

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



**Electric cables – Calculation of the current rating –
Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –
General**

**Câbles électriques – Calcul du courant admissible –
Partie 1-1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge
100 %) et calcul des pertes – Généralités**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 14 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 55 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 14 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 55 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



**Electric cables – Calculation of the current rating –
Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –
General**

**Câbles électriques – Calcul du courant admissible –
Partie 1-1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge
100 %) et calcul des pertes – Généralités**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.060.20

ISBN 978-2-8322-1926-3

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor. Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.
--

REDLINE VERSION

VERSION REDLINE



**Electric cables – Calculation of the current rating –
Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –
General**

**Câbles électriques – Calcul du courant admissible –
Partie 1-1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge
100 %) et calcul des pertes – Généralités**

CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 General	6
1.1 Scope.....	6
1.2 Normative references	6
1.3 Symbols	7
1.4 Permissible current rating of cables.....	10
2 Calculation of losses	13
2.1 AC resistance of conductor.....	13
2.2 Dielectric losses (applicable to a.c. cables only).....	16
2.3 Loss factor for sheath and screen (applicable to power frequency a.c. cables only).....	16
2.4 Loss factor for armour, reinforcement and steel pipes (applicable to power frequency a.c. cables only).....	25
Table 1 – Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used	30
Table 2 – Skin and proximity effects – Experimental values for the coefficients k_S and k_P	31
Table 3 – Values of relative permittivity and loss factors for the insulation of high-voltage and medium-voltage cables at power frequency	33
Table 4 – Absorption coefficient of solar radiation for cable surfaces	34

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING –

Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This Consolidated version of IEC 60287-1-1 bears the edition number 2.1. It consists of the second edition (2006-12) [documents 20/851/FDIS and 20/867/RVD] and its amendment 1 (2014-11) [documents 20/1499/FDIS and 20/1547/RVD]. The technical content is identical to the base edition and its amendment.

In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendment 1. Additions and deletions are displayed in red, with deletions being struck through. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.

This publication has been prepared for user convenience.

International Standard IEC 60287-1-1 has been prepared by IEC technical committee 20: Electric cables.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts of the IEC 60287 series, published under the general title: *Electric cables – Calculation of the current rating*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The “colour inside” logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this publication using a colour printer.

INTRODUCTION

This Part 1-1 contains formulae for the quantities R , W_d , λ_1 and λ_2 .

It contains methods for calculating the permissible current rating of cables from details of the permissible temperature rise, conductor resistance, losses and thermal resistivities.

Formulae for the calculation of losses are also given.

The formulae in this standard contain quantities which vary with cable design and materials used. The values given in the tables are either internationally agreed, for example, electrical resistivities and resistance temperature coefficients, or are those which are generally accepted in practice, for example, thermal resistivities and permittivities of materials. In this latter category, some of the values given are not characteristic of the quality of new cables but are considered to apply to cables after a long period of use. In order that uniform and comparable results may be obtained, the current ratings should be calculated with the values given in this standard. However, where it is known with certainty that other values are more appropriate to the materials and design, then these may be used, and the corresponding current rating declared in addition, provided that the different values are quoted.

Quantities related to the operating conditions of cables are liable to vary considerably from one country to another. For instance, with respect to the ambient temperature and soil thermal resistivity, the values are governed in various countries by different considerations. Superficial comparisons between the values used in the various countries may lead to erroneous conclusions if they are not based on common criteria: for example, there may be different expectations for the life of the cables, and in some countries design is based on maximum values of soil thermal resistivity, whereas in others average values are used. Particularly, in the case of soil thermal resistivity, it is well known that this quantity is very sensitive to soil moisture content and may vary significantly with time, depending on the soil type, the topographical and meteorological conditions, and the cable loading.

The following procedure for choosing the values for the various parameters should, therefore, be adopted.

Numerical values should preferably be based on results of suitable measurements. Often such results are already included in national specifications as recommended values, so that the calculation may be based on these values generally used in the country in question; a survey of such values is given in Part 3-1.

A suggested list of the information required to select the appropriate type of cable is given in Part 3-1.

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING –

Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General

1 General

1.1 Scope

This part of IEC 60287 is applicable to the conditions of steady-state operation of cables at all alternating voltages, and direct voltages up to 5 kV, buried directly in the ground, in ducts, troughs or in steel pipes, both with and without partial drying-out of the soil, as well as cables in air. The term "steady state" is intended to mean a continuous constant current (100 % load factor) just sufficient to produce asymptotically the maximum conductor temperature, the surrounding ambient conditions being assumed constant.

This part provides formulae for current ratings and losses.

The formulae given are essentially literal and designedly leave open the selection of certain important parameters. These may be divided into three groups:

- parameters related to construction of a cable (for example, thermal resistivity of insulating material) for which representative values have been selected based on published work;
- parameters related to the surrounding conditions, which may vary widely, the selection of which depends on the country in which the cables are used or are to be used;
- parameters which result from an agreement between manufacturer and user and which involve a margin for security of service (for example, maximum conductor temperature).

1.2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60027-3, *Letter symbols to be used in electrical technology – Part 3: Logarithmic and related quantities, and their units*

IEC 60028:1925, *International standard of resistance for copper*

IEC 60141 (all parts), *Tests on oil-filled and gas-pressure cables and their accessories*

IEC 60228, *Conductors of insulated cables*

IEC 60502-1, *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) and 3 kV ($U_m = 3,6$ kV)*

IEC 60502-2, *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*

IEC 60889, *Hard-drawn aluminium wire for overhead line conductors*

1.3 Symbols

The symbols used in this standard and the quantities which they represent are given in the following list:

A	cross-sectional area of the armour	mm^2
B_1 B_2	} coefficients (see 2.4.2)	
C	capacitance per core	F/m
D_e^*	external diameter of cable	m
D_i	diameter over insulation	mm
D_s	external diameter of metal sheath	mm
D_{oc}	the diameter of the imaginary coaxial cylinder which just touches the crests of a corrugated sheath	mm
D_{it}	the diameter of the imaginary cylinder which just touches the inside surface of the troughs of a corrugated sheath	mm
F	coefficient defined in 2.3.5	
H	intensity of solar radiation	W/m^2
H	magnetizing force (see 2.4.2)	ampere turns/m
H_s	inductance of sheath	H/m
H_1 H_2 H_3	} components of inductance due to the steel wires (see 2.4.2)	H/m
I	current in one conductor (r.m.s. value)	A
M N	} coefficients defined in 2.3.5	
P Q	} coefficients defined in 2.3.3	Ω/m
R	alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature	Ω/m
R_A	a.c. resistance of armour at its maximum operating temperature	Ω/m
R_{A0}	a.c. resistance of armour at 20 °C	Ω/m
R_e	equivalent a.c. resistance of sheath and armour in parallel	Ω/m
R_s	a.c. resistance of cable sheath or screen at their maximum operating temperature	Ω/m
R_{s0}	a.c. resistance of cable sheath or screen at 20 °C	Ω/m
R'	d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature	Ω/m
R_0	d.c. resistance of conductor at 20 °C	Ω/m
T_1	thermal resistance per core between conductor and sheath	K.m/W
T_2	thermal resistance between sheath and armour	K.m/W
T_3	thermal resistance of external serving	K.m/W
T_4	thermal resistance of surrounding medium (ratio of cable surface temperature rise above ambient to the losses per unit length)	K.m/W

T_4^*	external thermal resistance in free air, adjusted for solar radiation	K.m/W
U_0	voltage between conductor and screen or sheath	V
W_A	losses in armour per unit length	W/m
W_c	losses in conductor per unit length	W/m
W_d	dielectric losses per unit length per phase	W/m
W_s	losses dissipated in sheath per unit length	W/m
$W_{(s+A)}$	total losses in sheath and armour per unit length	W/m
X	reactance of sheath (two-core cables and three-core cables in trefoil)	Ω/m
X_1	reactance of sheath (cables in flat formation)	Ω/m
X_m	mutual reactance between the sheath of one cable and the conductors of the other two when cables are in flat information	Ω/m
a	shortest minor length in a cross-bonded electrical section having unequal minor lengths	
c	distance between the axes of conductors and the axis of the cable for three-core cables ($= 0,55 r_1 + 0,29 t$ for sector-shaped conductors)	mm
d	mean diameter of sheath or screen	mm
d'	mean diameter of sheath and reinforcement	mm
d_2	mean diameter of reinforcement	mm
d_A	mean diameter of armour	mm
d_c	external diameter of conductor	mm
d'_c	external diameter of equivalent round solid conductor having the same central duct as a hollow conductor	mm
d_d	internal diameter of pipe	mm
d_f	diameter of a steel wire	mm
d_i	internal diameter of hollow conductor	mm
d_M	major diameter of screen or sheath of an oval conductor	mm
d_m	minor diameter of screen or sheath of an oval conductor	mm
d_x	diameter of an equivalent circular conductor having the same cross-sectional area and degree of compactness as the shaped one	mm
f	system frequency	Hz
g_s	coefficient used in 2.3.6.1	
k	factor used in the calculation of hysteresis losses in armour or reinforcement (see 2.4.2.4)	
k_p	factor used in calculating x_p (proximity effect)	
k_s	factor used in calculating x_s (skin effect)	
l	length of a cable section (general symbol, see 2.3 and 2.3.4)	m
$\ln$	natural logarithm (logarithm to base e, see IEC 60027-3)	
m	$\frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$	
n	number of conductors in a cable	
n_1	number of steel wires in a cable (see 2.4.2)	
p	length of lay of a steel wire along a cable (see 2.4.2)	
$\left. \begin{matrix} p \\ q \end{matrix} \right\}$	coefficients used in 2.3.6.2	
r_1	circumscribing radius of two- or three-sector shaped conductors	mm

s	axial separation of conductors	mm
s_1	axial separation of two adjacent cables in a horizontal group of three, not touching	mm
s_2	axial separation of cables (see 2.4.2)	mm
t	insulation thickness between conductors	mm
t_3	thickness of the serving	mm
t_s	thickness of the sheath	mm
ν	ratio of the thermal resistivities of dry and moist soils ($\nu = \rho_d/\rho_w$)	
x_p	argument of a Bessel function used to calculate proximity effect	
x_s	argument of a Bessel function used to calculate skin effect	
y_p	proximity effect factor	} (see 2.1)
y_s	skin effect factor	
α_{20}	temperature coefficient of electrical resistivity at 20 °C, per kelvin	I/K
β	angle between axis of armour wires and axis of cable (see 2.4.2)	
β_1	coefficient used in 2.3.6.1	
γ	angular time delay (see 2.4.2)	
Δ_1	} coefficients used in 2.3.6.1	
Δ_2		
δ	equivalent thickness of armour or reinforcement	mm
$\tan \delta$	loss factor of insulation	
ε	relative permittivity of insulation	
θ	maximum operating temperature of conductor	°C
θ_a	ambient temperature	°C
θ_{ar}	maximum operating temperature of armour	°C
θ_{sc}	maximum operating temperature of cable screen or sheath	°C
θ_x	critical temperature of soil; this is the temperature of the boundary between dry and moist zones	°C
$\Delta\theta$	permissible temperature rise of conductor above ambient temperature	K
$\Delta\theta_x$	critical temperature rise of soil; this is the temperature rise of the boundary between dry and moist zones above the ambient temperature of the soil	K
λ_0	coefficient used in 2.3.6.1	
λ_1, λ_2	ratio of the total losses in metallic sheaths and armour respectively to the total conductor losses (or losses in one sheath or armour to the losses in one conductor)	
λ'_1	ratio of the losses in one sheath caused by circulating currents in the sheath to the losses in one conductor	
λ''_1	ratio of the losses in one sheath caused by eddy currents to the losses in one conductor	
λ'_{1m}	loss factor for the middle cable	} Three cables in flat formation without transposition, with sheaths bonded at both ends
λ'_{11}	loss factor for the outer cable with the greater losses	
λ'_{12}	loss factor for the outer cable with the least losses	

μ	relative magnetic permeability of armour material	
μ_e	longitudinal relative permeability	
μ_t	transverse relative permeability	
ρ	conductor resistivity at 20 °C	$\Omega \cdot m$
ρ_d	thermal resistivity of dry soil	K.m/W
ρ_w	thermal resistivity of moist soil	K.m/W
ρ_s	sheath resistivity at 20 °C	$\Omega \cdot m$
σ	absorption coefficient of solar radiation for the cable surface	
ω	angular frequency of system ($2\pi f$)	

1.4 Permissible current rating of cables

When the permissible current rating is being calculated under conditions of partial drying out of the soil, it is also necessary to calculate a rating for conditions where drying out of the soil does not occur. The lower of the two ratings shall be used.

1.4.1 Buried cables where drying out of the soil does not occur or cables in air

1.4.1.1 AC cables

The permissible current rating of an a.c. cable can be derived from the expression for the temperature rise above ambient temperature:

$$\Delta\theta = (I^2R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2R (1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4)$$

where

I is the current flowing in one conductor (A);

$\Delta\theta$ is the conductor temperature rise above the ambient temperature (K);

NOTE The ambient temperature is the temperature of the surrounding medium under normal conditions, at a situation in which cables are installed, or are to be installed, including the effect of any local source of heat, but not the increase of temperature in the immediate neighbourhood of the cables due to heat arising therefrom.

R is the alternating current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (Ω/m);

W_d is the dielectric loss per unit length for the insulation surrounding the conductor (W/m);

T_1 is the thermal resistance per unit length between one conductor and the sheath (K.m/W);

T_2 is the thermal resistance per unit length of the bedding between sheath and armour (K.m/W);

T_3 is the thermal resistance per unit length of the external serving of the cable (K.m/W);

T_4 is the thermal resistance per unit length between the cable surface and the surrounding medium, as derived from 2.2 of Part 2 (K.m/W);

n is the number of load-carrying conductors in the cable (conductors of equal size and carrying the same load);

λ_1 is the ratio of losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable;

λ_2 is the ratio of losses in the armouring to total losses in all conductors in that cable.

The permissible current rating is obtained from the above formula as follows:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

Where the cable is exposed to direct solar radiation, the formulae given in 2.2.1.2 of Part 2 shall be used.

The current rating for a four-core low-voltage cable may be taken to be equal to the current rating of a three-core cable for the same voltage and conductor size having the same construction, provided that the cable is to be used in a three-phase system where the fourth conductor is either a neutral conductor or a protective conductor. When it is a neutral conductor, the current rating applies to a balanced load.

1.4.1.2 DC cables up to 5 kV

The permissible current rating of a d.c. cable is obtained from the following simplification of the a.c. formula:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

where

R' is the direct current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (Ω/m).

Where the cable is exposed to direct solar radiation, the formulae given in 2.2.1.2 of Part 2 shall be used.

1.4.2 Buried cables where partial drying-out of the soil occurs

1.4.2.1 AC cables

The following method shall be applied to a single isolated cable or circuit only, laid at conventional depths. The method is based on a simple two-zone approximate physical model of the soil where the zone adjacent to the cable is dried out whilst the other zone retains the site's thermal resistivity, the zone boundary being on isotherm ¹⁾. This method is considered to be appropriate for those applications in which soil behaviour is considered in simple terms only.

NOTE Installations of more than one circuit as well as the necessary spacing between circuits are under consideration.

Changes in external thermal resistance, consequent to the formation of a dry zone around a single isolated cable or circuit, shall be obtained from the following formula (compared with the formula of 1.4.1.1):

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + \nu T_4)] + (\nu - 1) \Delta\theta_x}{R [T_1 + n (1 + \lambda_1) T_2 + n (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + \nu T_4)]} \right]^{0,5}$$

where

ν is the ratio of the thermal resistivities of the dry and moist soil zones ($\nu = \rho_d/\rho_w$);

R is the a.c. resistance of the conductor at its maximum operating temperature (Ω/m);

¹⁾ "Current ratings of cables buried in partially dried-out soil, Part 1": *Electra* No. 104, p. 11, January 1966 (in particular section 3 and Appendix 1).

- ρ_d is the thermal resistivity of the dry soil (K.m/W);
- ρ_w is the thermal resistivity of the moist soil (K.m/W);
- θ_x is the critical temperature of the soil and temperature of the boundary between dry and moist zones (°C);
- θ_a is the ambient temperature (°C);
- $\Delta\theta_x$ is the critical temperature rise of the soil. This is the temperature rise of the boundary between the dry and moist zones above the ambient temperature of the soil ($\theta_x - \theta_a$) (K);

NOTE T_4 is calculated using the thermal resistivity of the moist soil (ρ_w) using 2.2.3.2 of Part 2. Mutual heating by modification of the temperature rise as in 2.2.3.1 of Part 2 cannot be applied.

θ_x and ρ_d shall be determined from a knowledge of the soil conditions.

NOTE The choice of suitable soil parameters is under consideration. In the meantime, values may be agreed between manufacturer and purchaser.

1.4.2.2 DC cables up to 5 kV

The permissible current rating of a d.c. cable is obtained from the following simplification of the a.c. formula:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta + (v - 1) \Delta\theta_x}{R' [T_1 + nT_2 + n(T_3 + vT_4)]} \right]^{0,5}$$

where

R' is the direct current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (Ω/m).

1.4.3 Buried cables where drying-out of the soil is to be avoided

1.4.3.1 AC cables

Where it is desired that moisture migration be avoided by limiting the temperature rise of the cable surface to not more than $\Delta\theta_x$, the corresponding rating shall be obtained from:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x + n W_d T_4}{nRT_4 (1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0,5}$$

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x - nW_dT_4}{nRT_4(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0,5}$$

However, depending on the value of $\Delta\theta_x$ this may result in a conductor temperature which exceeds the maximum permissible value. The current rating used shall be the lower of the two values obtained, either from the above equation or from 1.4.1.1.

The conductor resistance R shall be calculated for the appropriate conductor temperature, which may be less than the maximum permitted value. An estimate of the operating temperature shall be made and, if necessary, subsequently amended.

NOTE For four-core low-voltage cables, see the final paragraph in 1.4.1.1.

1.4.3.2 DC cables up to 5 kV

The permissible current rating of a d.c. cable shall be obtained from the following simplification of the a.c. formula:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x}{nR' T_4} \right]^{0,5}$$

The conductor resistance R' shall be modified as in 1.4.2.2.

1.4.4 Cables directly exposed to solar radiation

Permissible current ratings

Taking into account the effect of solar radiation on a cable, the permissible current rating is given by the formulae:

1.4.4.1 AC cables

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \left[0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4^*) \right] - \sigma D_e^* H T_4^*}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5}$$

1.4.4.2 DC cables up to 5 kV

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \sigma D_e^* H T_4^*}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5}$$

where

- σ is the absorption coefficient of solar radiation for the cable surface (see Table 4);
- H is the intensity of solar radiation which should be taken as 10^3 W/m² for most latitudes; it is recommended that the local value should be obtained where possible;
- T_4^* is the external thermal resistance of the cable in free air, adjusted to take account of solar radiation (see part 2) (K.m/W);
- D_e^* is the external diameter of cable (m) for corrugated sheaths $D_e^* = (d_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3}$ (m);
- t_3 is the thickness of the serving (mm).

2 Calculation of losses

2.1 AC resistance of conductor

The a.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum operating temperature is given by the following formula, except in the case of pipe-type cables (see 2.1.5):

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

where

- R is the current resistance of conductor at maximum operating temperature (Ω/m);
- R' is the d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature (Ω/m);
- y_s is the skin effect factor;
- y_p is the proximity effect factor.

2.1.1 DC resistance of conductor

The d.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum operating temperature θ is given by:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

where

R_0 is the d.c. resistance of the conductor at 20 °C (Ω/m);

The value of R_0 shall be derived directly from IEC 60228. Where the conductor size is outside the range covered by IEC 60228, the value of R_0 may be chosen by agreement between manufacturer and purchaser. The conductor resistance should then be calculated using the values of resistivity given in Table 1.

α_{20} is the constant mass temperature coefficient at 20 °C per kelvin (see Table 1 for standard values);

θ is the maximum operating temperature in degrees Celsius (this will be determined by the type of insulation to be used); see appropriate IEC specification or national standard.

2.1.2 Skin effect factor y_s

The skin effect factor y_s is given by the following equations:

For $0 < x_s \leq 2,8$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4}$$

For $2,8 < x_s \leq 3,8$

$$y_s = -0,136 - 0,017 7x_s + 0,056 3x_s^2$$

For $x_s > 3,8$

$$y_s = 0,354x_s - 0,733$$

where

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

f is the supply frequency in hertz.

Values for k_s are given in Table 2.

~~The above formula is accurate providing x_s does not exceed 2,8, and therefore applies to the majority of practical cases.~~

In the absence of alternative formulae, it is recommended that the above formula should be used for sector and oval-shaped conductors.

2.1.3 Proximity effect factor y_p for two-core cables and for two single-core cables

The proximity effect factor is given by:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times 2,9$$

where

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c is the diameter of conductor (mm);

s is the distance between conductor axes (mm).

Values for k_p are given in Table 2.

The above formula is accurate providing x_p does not exceed 2,8, and therefore applies to the majority of practical cases.

2.1.4 Proximity effect factor y_p for three-core cables and for three single-core cables

2.1.4.1 Circular conductor cables

The proximity effect factor is given by:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} + 0,27} \right]$$

where

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c is the diameter of conductor (mm);

s is the distance between conductor axes (mm).

NOTE For cables in flat formation, s is the spacing between adjacent phases. Where the spacing between adjacent phases is not equal, the distance will be taken as $s = \sqrt{s_1 \times s_2}$.

Values for k_p are given in Table 2.

The above formula is accurate provided x_p does not exceed 2,8, and therefore applies to the majority of practical cases.

2.1.4.2 Shaped conductor cables

In the case of multicore cables with shaped conductors, the value of y_p shall be two-thirds of the value calculated according to 2.1.4.1,

with:

$d_c = d_x$ = diameter of an equivalent circular conductor of the same cross-sectional area, and degree of compaction (mm);

$s = (d_x + t)$ (mm),

where

t is the thickness of insulation between conductors (mm).

Values for k_p are given in Table 2.

The above formula is accurate provided x_p does not exceed 2,8, and therefore applies to the majority of practical cases.

2.1.5 Skin and proximity effects in pipe-type cables

For pipe-type cables, the skin and proximity effects calculated according to 2.1.2, 2.1.3 and 2.1.4 shall be increased by a factor of 1,5. For these cables,

$$R = R' [1 + 1,5(y_s + y_p)] \quad (\Omega/m)$$

2.2 Dielectric losses (applicable to a.c. cables only)

The dielectric loss is voltage dependent and thus only becomes important at voltage levels related to the insulation material being used. Table 3 gives, for the insulation materials in common use, the value of U_0 at which the dielectric loss should be taken into account where three-core screened or single-core cables are used. It is not necessary to calculate the dielectric loss for unscreened multicore or d.c. cables.

The dielectric loss per unit length in each phase is given by:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (\text{W/m})$$

where

$\omega = 2\pi f$;

C is the capacitance per unit length (F/m);

U_0 is the voltage to earth (V).

Values of $\tan \delta$, the loss factor of the insulation at power frequency and operating temperature, are given in Table 3.

The *capacitance* for circular conductors is given by:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} 10^{-9} \quad (\text{F/m})$$

where

ε is the relative permittivity of the insulation;

D_i is the external diameter of the insulation (excluding screen) (mm);

d_c is the diameter of conductor, including screen, if any (mm).

The same formula can be used for oval conductors if the geometric mean of the appropriate major and minor diameters is substituted for D_i and d_c .

Values of ε are given in Table 3.

2.3 Loss factor for sheath and screen (applicable to power frequency a.c. cables only)

The power loss in the sheath or screen (λ_1) consists of losses caused by circulating currents (λ'_1) and eddy currents (λ''_1),

thus:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

The formulae given in this section express the loss in terms of the total power loss in the conductor(s) and for each particular case it is indicated which type of loss has to be considered. The formulae for single-core cables apply to single circuits only and the effects of earth return paths are neglected. Methods are given for both smooth-sided and corrugated sheaths.

For single-core cables with sheaths bonded at both ends of an electrical section, only the loss due to circulating currents in the sheaths need be considered (see 2.3.1, 2.3.2 and 2.3.3). An electrical section is defined as a portion of the route between points at which the sheaths or screens of all cables are solidly bonded.

An allowance has usually also to be made for increased spacing at certain points on the route (see 2.3.4).

For cables with ~~large segmental~~ Milliken conductors, the loss factor should be increased to take account of the loss due to eddy currents in the sheaths (see 2.3.5).

For a cross-bonded installation, it is considered unrealistic to assume that minor sections are electrically identical and that the loss due to circulating currents in the sheaths is negligible. Recommendations are made in 2.3.6 for augmenting the losses in the sheaths to take account of this electrical unbalance.

The electrical resistivities and temperature coefficients of lead and aluminium, for use in calculating the resistance of the sheath R_s are given in Table 1.

The formulae given in this subclause use the resistance of the sheath or screen at its maximum operating temperature. The maximum operating temperature of the sheath or screen is given by:

$$\theta_{sc} = \theta_c - \frac{(I^2 R + 0,5 W_d)}{T_1} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\theta_{sc} = \theta - \frac{(I^2 R + 0,5 W_d)}{T_1} \quad (^\circ\text{C})$$

where

θ_{sc} is the maximum operating temperature of the cable screen or sheath ($^\circ\text{C}$).

Because the temperature of the sheath or screen is a function of the current, I , an iterative method is used for the calculation.

The resistance of the sheath or screen at its maximum operating temperature is given by:

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)] \quad (\Omega/\text{m})$$

where

R_{s0} is the resistance of the cable sheath or screen at 20 $^\circ\text{C}$ (Ω/m).

2.3.1 Two single-core cables, and three single-core cables (in trefoil formation), sheaths bonded at both ends of an electrical section

For two single-core cables, and three single-core cables (in trefoil formation) with sheaths bonded at both ends, the loss factor is given by:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

where

R_s is the resistance of sheath or screen per unit length of cable at its maximum operating temperature (Ω/m);

X is the reactance per unit length of sheath or screen per unit length of cable (Ω/m)

$$= 2 \omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

$\omega = 2 \pi \times \text{frequency (1/s)}$;

s is the distance between conductor axes in the electrical section being considered (mm);

d is the mean diameter of the sheath (mm);

– for oval-shaped cores, d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$;

where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively of the sheath

– for corrugated sheaths, d is given by $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$;

$\lambda_1'' = 0$, i.e. eddy-current loss is ignored, except for cables having ~~large Milliken~~ ~~conductors of segmental construction~~ when λ_1'' is calculated by the method given in 2.3.5.

2.3.2 Three single-core cables in flat formation, with regular transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section

For three single-core cables in flat formation, with the middle cable equidistant from the outer cables, regular transposition of the cables and the sheaths bonded at every third transposition, the loss factor is given by:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1} \right)^2}$$

where

X_1 is the reactance per unit length of sheath (Ω/m)

$$= X_1 = 2\omega 10^{-7} \ln \left\{ 2\sqrt[3]{2} \left(\frac{s}{d} \right) \right\}$$

$\lambda_1'' = 0$, i.e. eddy-current loss is ignored, except for cables having ~~large Milliken~~ ~~conductors of segmental construction~~ when λ_1'' is calculated by the method given in 2.3.5.

2.3.3 Three single-core cables in flat formation, without transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section

For three single-core cables in flat formation, with the middle cable equidistant from the outer cables, without transposition and with the sheaths bonded at both ends of an electrical section, the loss factor for the cable which has the greatest loss (i.e. the outer cable carrying the lagging phase) is given by:

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75 P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25 Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3 (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)}} \right]$$

For the other outer cable, the loss factor is given by:

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75 P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25 Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3 (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)}} \right]$$

For the middle cable, the loss factor is given by:

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

In these formulae:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

where

X is the reactance of sheath or screen per unit length of cable for two adjacent single-core cables (Ω/m)

$$= 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

X_m is the mutual reactance per unit length of cable between the sheath of an outer cable and the conductors of the other two, when the cables are in flat formation (Ω/m)

$$= 2 \times 10^{-7} \ln (2) (\Omega/\text{m});$$

$\lambda''_1 = 0$, i.e. eddy-current loss is ignored, except for cables having ~~large Milliken~~ **of segmental construction** when λ''_1 is calculated by the method given in 2.3.5.

Ratings for cables in air should be based on the first formula given above, i.e. the loss for the outer cable carrying the lagging phase.

2.3.4 Variation of spacing of single-core cables between sheath bonding points

For single-core cable circuits with sheaths solidly bonded at both ends and possibly at intermediate points, the circulating currents and the consequent loss increase as the spacing increases, and it is advisable to use as close a spacing as possible. The optimum spacing is achieved by considering both losses and mutual heating between cables.

It is not always possible to install cables with one value of spacing all along a route. The following recommendations relate to the calculation of sheath circulating current losses when it is not possible to install cables with a constant value of spacing over the length of one electrical section. A section is defined as a portion of the route between points at which sheaths of all cables are solidly bonded. The recommendations below give values for loss factors which apply to the whole of a section, but it should be noted that the appropriate values of conductor resistance and external thermal resistance must be calculated on the basis of the closest cable spacing at any place along the section.

a) Where spacing along a section is not constant but the various values are known, the value for X in 2.3.1, 2.3.2 and 2.3.3 shall be derived from:

$$X = \frac{l_a X_a + l_b X_b + \dots + l_n X_n}{l_a + l_b + \dots + l_n}$$

where

$l_a, l_b, \dots, l_n$ are lengths with different spacings along an electrical section;

$X_a, X_b \dots X_n$ are the reactances per unit length of cable, the relevant formulae being given in 2.3.1, 2.3.2 or 2.3.3 where appropriate values of spacings $s_a, s_b \dots s_n$ are used.

- b) Where in any section the spacing between cables and its variation along the route are not known and cannot be anticipated, the losses in that section, calculated from the design spacing, shall be arbitrarily increased by 25 %, this value having been found to be appropriate for lead-sheathed H.V. cables. A different increase may be used by agreement if it is considered that 25 % is not appropriate to a particular installation.
- c) Where the section includes a spread-out end, the allowance in b) may not be sufficient and it is recommended that an estimate of the probable spacing be made and the loss calculated by the procedure given in a) above.

NOTE This increase does not apply to installations with single-point bonding or cross-bonding (see 2.3.6).

2.3.5 Effect of ~~large segmental type~~ Milliken conductors

Where the conductors are subject to a reduced proximity effect, as with ~~large~~ Milliken conductors ~~of insulated segmental construction~~, the sheath loss factor λ_1'' of 2.3.1, 2.3.2 and 2.3.3 cannot be ignored, but shall be obtained by multiplying the value of λ_1'' , obtained from 2.3.6 for the same cable configuration, by the factor F given by the formula:

$$F = \frac{4 M^2 N^2 + (M + N)^2}{4 (M^2 + 1) (N^2 + 1)}$$

where

$$M = N = \frac{R_s}{X} \text{ for cables in trefoil formation}$$

and

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{R_s}{X + X_m} \\ N &= \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}} \end{aligned} \right\} \text{ for cables in flat formation with equidistant spacing.}$$

Where the spacing along a section is not constant the value of X shall be calculated as in 2.3.4 a).

2.3.6 Single-core cables, with sheaths bonded at a single point or cross-bonded

2.3.6.1 Eddy-current losses

For single-core cables with sheaths bonded at a single point or cross-bonded the eddy-current loss factor is given by:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

where

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \pi \omega}{10^7 \rho_s}}$$

ρ_s is the electrical resistivity of sheath material at operating temperature (see Table 1) ($\Omega \cdot m$);

D_s is the external diameter of cable sheath (mm);

NOTE For corrugated sheaths, the mean outside diameter $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$ shall be used.

t_s is the thickness of sheath (mm);

$\omega = 2\pi f$;

NOTE 1 For lead-sheathed cables, g_s can be taken as unity and $\frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}}$ can be neglected.

NOTE 2 For aluminium sheathed cables, both terms may need to be evaluated when sheath diameter is greater than about 70 mm or the sheath is thicker than usual.

NOTE 3 For cables with a wire screen and an equalising tape, or foil screen over the wires, the eddy-current losses are considered negligible.

Formulae for λ_0 , Δ_1 and Δ_2 are given below:

(in which: $m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$, for $m \leq 0,1$, Δ_1 and Δ_2 can be neglected)

1) Three single-core cables in trefoil formation:

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = (1,14 m^{2,45} + 0,33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,92 m + 1,66)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

2) Three single-core cables, flat formation:

a) centre cable:

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 0,86 m^{3,08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,4 m + 0,7)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

b) outer cable leading phase:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 4,7 m^{0,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,16 m + 2)}$$

$$\Delta_2 = 21 m^{3,3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,47 m + 5,06)}$$

c) outer cable lagging phase:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = - \frac{0,74 (m+2) m^{0,5}}{2 + (m-0,3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+1)}$$

$$\Delta_2 = 0,92 m^{3,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+2)}$$

2.3.6.2 Circulating current losses

The circulating current loss is zero for installations where the sheaths are single-point bonded, and for installations where the sheaths are cross-bonded and each major section is divided into three electrically identical minor sections.

Where a cross-bonded installation contains sections whose unbalance is not negligible, a residual voltage is produced which results in a circulating current loss in that section which must be taken into account.

For installations where the actual lengths of the minor sections are known, the loss factor λ'_1 can be calculated by multiplying the circulating current loss factor for the cable configuration concerned, calculated as if it were bonded and earthed at both ends of each major section without cross-bonding by:

$$\frac{p^2 + q^2 + 1 - p - pq - q}{(p + q + 1)^2}$$

Where in any major section, the two longer minor sections are p and q times the length of the shortest minor section (i.e. the minor section lengths are a , pa and qa , where the shortest section is a).

This formula deals only with differences in the length of minor sections.

Any variations in spacing must also be taken into account.

Where lengths of the minor sections are not known, p should be set to 1 and q to 1,2, this gives a value of 0,004.

2.3.7 Two-core unarmoured cables with common sheath

For a two-core unarmoured cable where the cores are contained in a common metallic sheath, λ'_1 is negligible and the loss factor is given by one of the following formulae:

– for round or oval conductors:

$$\lambda''_1 = \frac{16 \omega^2 10^{-14}}{R R_s} \left(\frac{c}{d} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right]$$

– for sector-shaped conductors:

$$\lambda''_1 = \frac{10,8 \omega^2 10^{-16}}{R R_s} \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \left[12,2 + \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \right]$$

where

$$\omega = 2\pi f;$$

f is the frequency (Hz);

c is the distance between the axis of one conductor and the axis of the cable (mm);

r_1 is the radius of the circle circumscribing the two sector-shaped conductors (mm);

d is the mean diameter of the sheath (mm);

- for oval-shaped cores, d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively;
- for corrugated sheaths, d is given by $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

2.3.8 Three-core unarmoured cables with common sheath

For a three-core unarmoured cable where the cores are contained in a common metallic sheath, λ_1' is negligible and the loss factor is, therefore, given by one of the following formulae:

- for round or oval conductors, and where the sheath resistance R_s is less than or equal to $100 \mu\Omega/\text{m}$:

$$\lambda_1'' = \frac{3 R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} \right]$$

- for round or oval conductors, and where the sheath resistance R_s is greater than $100 \mu\Omega/\text{m}$:

$$\lambda_1'' = \frac{3,2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-14}$$

- for sector-shaped conductors, and R_s any value:

$$\lambda_1'' = 0,94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2}$$

where

r_1 is the radius of the circle circumscribing the three shaped conductors (mm);

t is the thickness of insulation between conductors (mm);

d is the mean diameter of the sheath (mm);

- for oval-shaped cores, d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively of the sheath or screen;
- for corrugated sheaths, d is given by $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

2.3.9 Two-core and three-core cables with steel tape armour

The addition of steel tape armour increases the eddy-current loss in the sheath. The values for λ_1'' given in 2.3.7 and 2.3.8 should be multiplied by the following factor if the cable has steel-tape armour:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}} \right]^2$$

where

d_A is the mean diameter of armour (mm);

μ is the relative permeability of the steel tape (usually taken as 300);

δ is the equivalent thickness of armour = $\frac{A}{\pi d_A}$ (mm);

where A is the cross-sectional area of the armour (mm²).

This correction is only known to be applicable to tapes 0,3 mm to 1,0 mm thick.

2.3.10 Cables with each core in a separate lead sheath (SL type) and armoured

For a three-core cable of which each core has a separate lead sheath λ_1'' is zero and the loss factor for the sheaths is given by:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

where

$$X = 2 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

s is the distance between conductor axes (mm).

The loss factor for unarmoured cables with each core in a separate lead sheath is obtained from 2.3.1.

2.3.11 Losses in screen and sheaths of pipe-type cables

If each conductor of a pipe-type cable has a screen only over the insulation, for example a lead sheath or copper tape, the ratio of the screen loss to the conductor loss may be calculated by the formula given in 2.3.1 for the sheath of a single-core cable, provided that the formula is corrected for the additional loss caused by the presence of the steel pipe.

This modifies the formula to:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

If each core has a diaphragm sheath and non-magnetic reinforcement, the same formula is used, but the resistance R_s is replaced by the parallel combination of the resistance of the sheath and reinforcement. The diameter d is replaced by the value d' :

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}}$$

where

d' is the mean diameter of sheath and reinforcement (mm);

d is the mean diameter of screen or sheath (mm);

d_2 is the mean diameter of reinforcement (mm).

In the case of oval-shaped cores d and d_2 is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively of the sheath or screen.

NOTE See also 2.4.2.

2.4 Loss factor for armour, reinforcement and steel pipes (applicable to power frequency a.c. cables only)

The formulae given in this subclause express the power loss occurring in metallic armour, reinforcement or steel pipes of a cable in terms of an increment λ_2 of the power loss in all conductors.

Appropriate values of electrical resistivity and resistance temperature coefficients for the materials used for armour and reinforcement are given in Table 1.

The formulae given in this subclause use the resistance of the armour at its maximum operating temperature. The maximum operating temperature of the armour is given by:

$$\theta_{ar} = \theta_c - \left\{ \left(I^2 R + 0,5 W_d \right) T_1 + \left[I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] n T_2 \right\} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\theta_{ar} = \theta - \left\{ \left(I^2 R + 0,5 W_d \right) T_1 + \left[I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] n T_2 \right\} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

where

θ_{ar} is the maximum operating temperature of armour ($^\circ\text{C}$).

Because the temperature of the armour is a function of the current, I , an iterative method is used for the calculation.

The resistance of the armour at its maximum operating temperature is given by:

$$R_A = R_{A0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{ar} - 20)] \text{ (}\Omega/\text{m)}$$

where

R_{A0} is the resistance of the armour at 20°C (Ω/m).

Where the equivalent resistance of sheath and armour in parallel is used, it is sufficiently accurate to assume that both components are at the operating temperature of the armour and to use an average value for the temperature coefficient of the materials.

2.4.1 Non-magnetic armour or reinforcement

The general procedure is to combine the calculation of the loss in the reinforcement with that of the sheath. The formulae are given in 2.3 and the parallel combination of sheath and reinforcement resistance is used in place of the single sheath resistance R_s . The root mean square value of the sheath and reinforcement diameter replaces the mean sheath diameter d (see 2.3.11). This procedure applies to both single, twin and multicore cables.

The value of the reinforcement resistance is dependent on the lay of the tapes as follows:

- If the tapes have a very long lay (longitudinal tapes), the resistance is based on a cylinder having the same mass of material per unit length of cable and also the same internal diameter as the tapes.
- If the tapes are wound at approximately 54° to the cable axis, the resistance is twice the value calculated according to item a) above.

- c) If the tapes are wound with a very short lay (circumferential tapes), the resistance is regarded as infinite, i.e. the loss can be neglected.
- d) If there are two or more layers of tapes in contact with each other, having a very short lay, the resistance is twice the value calculated according to item a) above.

These considerations apply also to the cores of pipe-type cables dealt with in 2.3.11.

2.4.2 Magnetic armour or reinforcement

2.4.2.1 Single-core lead-sheathed cables – steel wire armour, bonded to sheath at both ends

The following method does not take into account the possible influence of the surrounding media, which may be appreciable in particular for cables laid under water. The method is intended for installations where spacing between cables is large (i.e. 10 m or more). It gives values for the sheath and armour losses that are usually higher than the actual ones, so that ratings are on the safe side. It should be noted that the hottest part of the cable route may be the on-shore section where both the losses and mutual heating may be high.

Where the influence of the surrounding media can be ignored, e.g. in air, the method may be used for any spacing between cables.

Calculation of the power loss in the lead sheath and armour of single-core cables with steel-wire armour with the sheath and armour bonded together at both ends is as follows:

- a) The equivalent resistance of sheath and armour in parallel is given by:

$$R_e = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} \quad (\Omega/m)$$

where

R_s is the resistance of sheath per unit length of cable at its maximum operating temperature (Ω/m);

R_A is the resistance a.c. resistance of armour per unit length at its maximum operating temperature (Ω/m).

The a.c. resistance of armour wire varies from about 1,2 times the d.c. resistance of 2 mm diameter wires up to 1,4 times the d.c. resistance for 5 mm wires. The resistance does not critically affect the final result.

- b) The inductance of the elements of the circuit is calculated per phase, as follows:

$$H_s = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2 s_2}{d} \right) \quad (\Omega/m)$$

where H_s is the inductance due to the sheath (H/m)

$$H_1 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \cos \gamma$$

$$H_2 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \sin \gamma$$

$$H_3 = 0,4 \left(\mu_t \cos^2 \beta - 1 \right) \left(\frac{d_f}{d_A} \right) 10^{-6}$$

NOTE H_3 is taken as zero for spaced wires.

where

H_1 , H_2 and H_3 are the components of the inductance due to the steel wires (H/m);

s_2 is the axial spacing between adjacent cables in trefoil formation; for cables in flat formation s_2 is the geometric mean of the three spacings (mm);

d_A is the mean diameter of armour (mm);

d_f is the diameter of a steel wire (mm);

p is the length of lay of a steel wire along the cable (mm);

n_1 is the number of steel wires;

β is the angle between axis of armour wire and axis of cable;

γ is the angular time delay of the longitudinal magnetic flux in the steel wires behind the magnetizing force;

μ_e is the longitudinal relative permeability of steel wires;

μ_t is the transverse relative permeability of steel wires;

For values of γ , μ_e and μ_t , see item d).

Let $B_1 = \omega (H_s + H_1 + H_3)$ (Ω/m)

$B_2 = \omega H_2$ (Ω/m).

c) The total loss in sheath and armour $W_{(s+A)}$ is given by:

$$W_{(s+A)} = I^2 R_e \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \right) \text{ (W/m)}$$

The loss in sheath and armour may be assumed to be approximately equal, so that:

$$\lambda'_1 = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2 W_c}$$

where

$W_c = I^2 R$ loss in conductor (W/m).

d) Choice of magnetic properties γ , μ_e and μ_t .

These quantities vary with the particular sample of steel and unless reference can be made to measurements on the steel wire to be used, some average values must be assumed.

No appreciable error is involved if, for wires of diameters from 4 mm to 6 mm and tensile breaking strengths around 400 N/mm², the following values are assumed:

$\mu_e = 400$

$\mu_t = 10$, when wires are in contact

$\mu_t = 1$, where wires are separated

$\gamma = 45^\circ$

If a more precise calculation is required and the wire properties are known, then it is initially necessary to know an approximate value for the magnetizing force H in order to find the appropriate magnetic properties.

$$H = \frac{1\,000 \left| \bar{I} + \bar{I}_s \right|}{\pi d_A} \text{ (ampere turns/m)}$$

where $\bar{I}$ and $\bar{I}_s$ are the vectorial values of conductor current and sheath current. For the initial choice of magnetic properties it is usually satisfactory to assume that $|\bar{I} + \bar{I}_s| = 0,6 I$, and to repeat the calculations if it is subsequently established that the calculated value is significantly different.

2.4.2.2 Two-core cables – steel wire armour

$$\lambda_2 = \frac{0,62 \omega^2 10^{-14}}{R \cdot R_A} + \frac{3,82 A \omega 10^{-5}}{R} \left[\frac{1,48 r_1 + t}{d_A^2 + 95,7 A} \right]^2$$

where

R_A is the a.c. resistance of armour at maximum armour temperature (Ω/m);

d_A is the mean diameter of armour (mm);

A is the cross-sectional area of armour (mm^2);

r_1 is the circumscribing radius over conductors (mm);

t is the insulation thickness between conductors (mm).

No correction has been made for non-uniform current distribution in the conductors because it is considered negligible for conductor sizes up to 400 mm^2 .

2.4.2.3 Three-core cables – steel wire armour

2.4.2.3.1 Round conductor cable

$$\lambda_2 = 1,23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

where

R_A is the a.c. resistance of armour at maximum armour temperature (Ω/m);

d_A is the mean diameter of armour (mm);

c is the distance between the axis of a conductor and the cable centre (mm).

No correction has been made for non-uniform current distribution in the conductors because it is considered negligible for conductor sizes up to 400 mm^2 . **This equation is under consideration because it may overestimate the armour loss factor for some cable designs.**

2.4.2.3.2 Sector conductor cables

$$\lambda_2 = 0,358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

where

r_1 is the radius of the circle circumscribing the three shaped conductors (mm);

$\omega = 2\pi f$;

f is the frequency of supply (Hz).

2.4.2.4 Three-core cables – steel tape armour or reinforcement

The following formulae apply to tapes 0,3 mm to 1 mm thick.

The hysteresis loss is given for a frequency of 50 Hz by:

$$\lambda'_2 = \frac{s^2 k^2 10^{-7}}{R d_A \delta}$$

where

s is the distance between conductor axes (mm);

δ is the equivalent thickness of armour (mm)

i.e. $\frac{A}{\pi d_A}$

and

A is the armour cross-sectional area (mm²);

d_A is the mean diameter of armour (mm).

The factor k is given by:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}}$$

where

μ is the relative permeability of the steel tape, usually taken as 300.

For frequencies f other than 50 Hz, multiply the value of k given by the above formula by the factor $\frac{f}{50}$.

The eddy-current loss is given for a frequency of 50 Hz by:

$$\lambda''_2 = \frac{2,25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

and for any other frequency the value calculated from this formula must be multiplied by the factor $\left(\frac{f}{50}\right)^2$.

The total armour loss factor is given by the sum of both hysteresis and eddy-current losses, thus:

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2$$

NOTE Magnetic armour or reinforcement, if any, increase eddy-current losses in the sheaths. Reference should be made to 2.3.9.

2.4.2.5 SL type cables

Where the armour is over a SL type cable, the screening effect of the sheath currents reduces the armour loss. The formula for λ_2 given in 2.4.2.3.1 or 2.4.2.3.2 shall be multiplied by the factor

$$\left(1 - \frac{R}{R_s} \lambda'_1\right)$$

where λ'_1 is obtained from 2.3.1.

2.4.3 Losses in steel pipes

The loss in steel pipes is given by two empirical formulae, one for cables where the cores are bound in close trefoil formation and the other for cables where the cores are placed in a more open configuration (cradled) on the bottom of the pipe. Actual cores in service probably approximate to a configuration somewhere between the two. It is considered that the losses should be calculated for each configuration and a mean value used:

NOTE These formulae have been empirically obtained in the United States of America and at present apply only to pipe sizes and steel types used in that country.

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,011\,5\,s - 0,001\,485\,d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ for closely bound triangular configuration}$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,004\,38\,s + 0,002\,26\,d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ for the open or cradled formation}$$

where

s is the axial spacing of adjacent conductors (mm);

d_d is the internal diameter of pipe (mm);

R is the a.c. resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (Ω/m).

The formulae given apply to a frequency of 60 Hz. For 50 Hz, each formula should be multiplied by 0,76.

For pipe-type cables, where flat-wire armour is applied over all three cores after they are laid up, the losses are independent of the presence of the pipe. For such cables, the losses in the armour are to be calculated as for SL type cables (see ~~2.4.2.3.2~~ 2.4.2.5 and the losses in the pipe are to be ignored).

Table 1 – Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used

Material	Resistivity (ρ) ohm · m at 20 °C	Temperature coefficient (α_{20}) per K at 20 °C
a) <i>Conductors</i>		
Copper	1,724 1 10^{-8}	3,93 10^{-3}
Aluminium	2,826 4 10^{-8}	4,03 10^{-3}
b) <i>Sheaths and armour</i>		
Lead or lead alloy	21,4 10^{-8}	4,0 10^{-3}
Steel	13,8 10^{-8}	4,5 10^{-3}
Bronze	3,5 10^{-8}	3,0 10^{-3}
Stainless steel	70 10^{-8}	Negligible
Aluminium	2,84 10^{-8}	4,03 10^{-3}
NOTE Values for copper conductors are taken from IEC 60028. Value for aluminium conductors are taken from IEC 60889.		

**Table 2 – Skin and proximity effects –
Experimental values for the coefficients k_s and k_p**

Type of conductor	Whether dried and impregnated or not	k_s	k_p
<i>Copper</i>			
Round, stranded	Yes	1	0,8
Round, stranded	No	1	1
Round, segmental ^a		0,435	0,37
Hollow, helical stranded	Yes	b	0,8
Sector-shaped	Yes	1	0,8
Sector-shaped	No	1	1
<i>Aluminium</i>			d
Round, stranded	Either	1	
Round, 4 segment	Either	0,28	
Round, 5 segment	Either	0,19	
Round, 6 segment	Either	0,12	
Segmental with peripheral strands	Either	c	
^a The values given apply to conductors having four segments (with or without central duct) and sectional areas less than 1 600 mm². These values apply to conductors in which all the layers of wire have the same direction of lay. The values are provisional and the subject is under consideration. ^b The following formula should be used for k_s: $k_s = \left(\frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \right) \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$ — where — d_i is the inside diameter of the conductor (central duct) (mm); — d'_c is the outside diameter of the equivalent solid conductor having the same central duct (mm). — ^c The following formula should be used to calculate k_s for cables having a conductor which consists of a central segmental portion surrounded by one or more layers of strands. $k_s = \left\{ 12c \left[(\alpha c - 0,5)^2 + (\alpha c - 0,5)(\psi - \alpha)c + 0,33(\psi - \alpha)^2 c^2 \right] + b(3 - 6b + 4b^2) \right\}^{0,5}$ — where — b is the ratio of the total cross-sectional area of the peripheral strands to the total cross-sectional area of the complete conductor; — c is the ratio of the total cross-sectional area of the segmental conductor to the total cross-sectional area of the complete conductor, $c = (1 - b)$. $\alpha = \frac{1}{(1 + \sin \pi / n)^2}$ $\psi = \frac{2\pi / n + 2/3}{2(1 + \pi / n)}$ — where — n is the number of segments. — This formula is applicable to aluminium conductors up to 1 600 mm². — If the total cross-sectional area of the peripheral strands exceeds 30 % of the total cross-sectional area of the conductor, then k_s may be regarded as unity. — ^d Although there are no accepted experimental results dealing specifically with the coefficient k_p for aluminium conductors, it is recommended that, for stranded aluminium conductors, the values given for similar copper conductors are used.			

Type of conductor	Conductor insulation system	k_s	k_p
Copper			
Round, solid	All	1	1
Round, stranded	Fluid ^d /paper ^e /PPL ^f	1	0,8
Round, stranded	Extruded ^g /Mineral ^h	1	1
Round, Milliken ^c	Fluid/paper/PPL	0,435	0,37
Round, Milliken, insulated wires ^b	Extruded	0,35	0,20
Round, Milliken, bare uni-directional wires ^b ,	Extruded	0,62	0,37
Round, Milliken, bare bi-directional wires ^b ,	Extruded	0,80	0,37
Hollow, helical stranded	All	a	0,8
Sector-shaped	Fluid/paper/PPL	1	0,8
Sector-shaped	Extruded/Mineral	1	1
Aluminium			
Round, solid	All	1	1
Round, stranded	All	1	0,8
Round Milliken	All	0,25	0,15
Hollow, helical stranded	All	a	0,8
a The following formula should be used for k_s :			
$k_s = \left(\frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \right) \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$			
where			
d_i is the inside diameter of the conductor (central duct) (mm);			
d'_c is the outside diameter of the equivalent solid conductor having the same central duct (mm).			
b The coefficients for these designs can be influenced by the detail of the conductor design. Subject to agreement between the manufacturer and user measured values of ac resistance may be used. A common measurement method is under consideration. Cigre (TB272) discusses three measurement methods.			
c Milliken conductor:	stranded conductor comprising an assembly of shaped stranded conductors, with each segment lightly insulated from each other. The individual strands may be either insulated (e.g. enamelled or oxidised) or bare.		
d Fluid insulation:	insulation system consisting of lapped paper and an insulating fluid which is designed to maintain free movement of the fluid within the cable.		
e Paper insulation:	lapped insulation consisting of paper impregnated with an insulating material.		
f PPL insulation:	fluid filled cable where a polypropylene/paper laminate is used in place of lapped paper.		
g Extruded insulation:	insulation consisting generally of one layer of a polymeric material and applied by an extrusion process.		
h Mineral insulation:	insulation consisting of compressed mineral powder. Generally only used on specific types of LV cable.		
NOTE 1 The tabulated values of k_s and k_p for large stranded conductors have generally been derived from those given in Cigre Technical brochure Ref. N° 272, <i>Large cross-sections and composite screens design</i> .			
NOTE 2 The value of k_s given for round, Milliken, insulated wires is a limiting value intended to cover all methods of insulating the wires including enamelling, oxidized wires or other methods.			
NOTE 3 The value of k_s given for hollow helical stranded conductors is applicable to keystone conductors.			

Table 3 – Values of relative permittivity and loss factors for the insulation of high-voltage and medium-voltage cables at power frequency

1	2	3
Type of cable	ϵ	$\tan \delta^*$
<i>Cables insulated with impregnated paper</i>		
Solid type, fully-impregnated, pre-impregnated or mass-impregnated non-draining	4	0,01
Oil-filled, self-contained ^a up to $U_o = 36$ kV	3,6	0,003 5
up to $U_o = 87$ kV	3,6	0,003 3
up to $U_o = 160$ kV	3,5	0,003 0
up to $U_o = 220$ kV	3,5	0,002 8
Oil-pressure, pipe-type ^b	3,7	0,004 5
External gas-pressure ^c	3,6	0,004 0
Internal gas-pressure ^d	3,4	0,004 5
<i>Cable with other kinds of insulation</i>		
Butyl rubber	4	0,050
EPR ^e		
up to and including 18/30 (36) kV cables	3	0,020
greater than 18/30 (36) kV cables	3	0,005
PVC ^e	8	0,1
PE (HD and LD) ^e	2,3	0,001
XLPE ^e		
up to and including 18/30 (36) kV cables (unfilled)	2,5	0,004
greater than 18/30 (36) kV cables (unfilled)	2,5	0,001
greater than 18/30 (36) kV cables (filled)	3,0	0,005
PPL		
equal to, or greater than 63/110 kV cables	2,8	0,001 4

* Safe values at maximum permissible temperature, applicable to the highest voltages normally specified for each type of cable.

^a See IEC 60141-1.

^b See IEC 60141-4.

^c See IEC 60141-3.

^d See IEC 60141-2.

^e See IEC 60502-1 and IEC 60502-2.

NOTE The dielectric loss should be taken into account for values of U_o equal to or greater than the following:

Type of cable	U_o kV
<i>Cables insulated with impregnated paper</i>	
Solid-type	38
Oil-filled and gas-pressure	63,5
<i>Cables with other types of insulation</i>	
Butyl rubber	18
EPR	63,5
PVC	6
PE (HD and LD)	127
XLPE (unfilled)	127
XLPE (filled)	63,5

**Table 4 – Absorption coefficient of solar radiation
for cable surfaces**

Material	σ
Bitumen/jute serving	0,8
Polychloroprene	0,8
PVC	0,6
PE	0,4
Lead	0,6

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	37
INTRODUCTION	39
1 Généralités	40
1.1 Domaine d'application	40
1.2 Références normatives	40
1.3 Symboles	41
1.4 Evaluation de l'intensité admissible du courant dans les câbles	44
2 Calcul des pertes	47
2.1 Résistance de l'âme en courant alternatif	47
2.2 Pertes diélectriques (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif)	50
2.3 Facteur de pertes dans les gaines ou les écrans (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)	50
2.4 Facteur de pertes dans les armures, les frettages et les tuyaux d'acier (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)	59
Tableau 1 – Résistivités électriques et coefficients de variation de la résistivité avec la température des métaux utilisés	64
Tableau 2 – Effets de peau et de proximité – Valeurs expérimentales pour les coefficients k_s et k_p	65
Tableau 3 – Valeurs numériques de la permittivité relative et du facteur de pertes pour les isolants utilisés dans les câbles à haute tension et moyenne tension à fréquence industrielle	68
Tableau 4 – Coefficient d'absorption des rayons solaires pour les surfaces de câbles suivantes	69

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 1-1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Généralités

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

Cette version consolidée de l'IEC 60287-1-1 porte le numéro d'édition 2.1. Elle comprend la deuxième édition (2006-12) [documents 20/851/FDIS et 20/867/RVD] et son amendement 1 (2014-11) [documents 20/1499/FDIS et 20/1547/RVD]. Le contenu technique est identique à celui de l'édition de base et à son amendement.

Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par l'amendement 1. Les ajouts et les suppressions apparaissent en rouge, les suppressions étant barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.

Cette publication a été préparée par commodité pour l'utilisateur.

La Norme internationale IEC 60287-1-1 a été établie par le comité d'études 20 de l'IEC: Câbles électriques.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de l'IEC 60287, sous le titre général: *Câbles électriques – calcul du courant admissible*, est disponible sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

La présente Partie 1-1 contient des formules relatives aux quantités R , W_d , λ_1 et λ_2 .

Elle contient des méthodes pour le calcul du courant admissible à partir des détails de l'accroissement admissible de la température de la résistance des conducteurs, des pertes et de la résistivité thermique.

Des formules pour le calcul des pertes s'y trouvent aussi.

Les formules de cette norme contiennent des paramètres variant avec la spécification du câble et les matériaux utilisés. Les valeurs données dans les tableaux sont soit approuvées internationalement, comme les résistivités électriques et la constante diélectrique des matériaux, ou bien généralement acceptées dans la pratique, comme les résistivités thermiques et les permittivités des matériaux. Certaines des valeurs de la dernière catégorie ne sont pas caractéristiques de la qualité des câbles neufs mais de celle des câbles ayant déjà subi une longue période d'utilisation. Dans le but d'obtenir des résultats comparables et reproductibles, les régimes permanents doivent être calculés avec les valeurs indiquées dans la présente norme. Toutefois, lorsqu'on sait avec certitude que d'autres valeurs sont plus appropriées aux matériaux et à leur mise en œuvre, ces dernières peuvent alors être utilisées en déclarant le régime permanent correspondant, pourvu que les différentes valeurs soient indiquées.

Les données relatives aux conditions de service sont susceptibles de varier considérablement d'un pays à l'autre. Par exemple, pour ce qui est de la température ambiante et de la résistance thermique du sol, les valeurs sont régies dans les différents pays par diverses considérations. Une comparaison hâtive entre les valeurs utilisées dans les différents pays peut amener des conclusions erronées, si elle n'est pas faite sur des bases communes; par exemple, on peut compter sur des espérances de vie du câble différentes; de même, dans certains pays, la spécification est établie sur la valeur maximale de la résistance thermique du sol, tandis que dans d'autres c'est la valeur moyenne qui est utilisée. En particulier, dans le cas de la résistivité thermique du sol, il est bien connu que celle-ci est très sensible au taux d'humidité et peut varier sensiblement dans le temps suivant le type de sol, les conditions topographiques et météorologiques et la charge du câble.

Le choix des valeurs des différents paramètres sera dès lors effectué de la façon suivante.

Les valeurs numériques devront, de préférence, être basées sur des résultats de mesures valables. De tels résultats sont déjà souvent inclus dans les spécifications nationales sous forme de valeurs recommandées, de telle sorte que le calcul peut être exécuté sur la base de ces valeurs, généralement utilisées dans le pays en question; un examen de ces valeurs est fait dans la Partie 3-1.

On trouvera un choix d'informations nécessaires pour sélectionner le type de câble approprié dans la Partie 3-1.

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 1-1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Généralités

1 Généralités

1.1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60287 concerne uniquement le fonctionnement en régime permanent des câbles de toutes tensions alternatives et de tensions continues jusqu'à 5 kV, enterrés directement dans le sol, placés dans des fourreaux, caniveaux ou tubes d'acier, avec ou sans assèchement partiel du sol, ainsi que les câbles posés à l'air libre. On entend par «régime permanent» la circulation continue d'un courant constant (facteur de charge 100 %) juste suffisant pour atteindre asymptotiquement la température maximale de l'âme en supposant que les conditions du milieu ambiant restent inchangées.

Cette partie fournit des formules pour l'intensité du courant et les pertes.

Les formules proposées sont essentiellement littérales et laissent en principe libre le choix de certains paramètres importants. Ceux-ci peuvent être divisés en trois groupes:

- les paramètres liés à la constitution du câble (par exemple résistance thermique de l'isolant) pour lesquels des valeurs représentatives ont été recueillies, à partir des travaux publiés;
- les paramètres liés aux conditions du milieu, qui peuvent varier considérablement; le choix de ceux-ci dépend du pays où les câbles sont ou doivent être utilisés;
- les paramètres résultant d'un accord entre fabricant et utilisateur et qui supposent une marge de sécurité en service (par exemple température maximale du conducteur).

1.2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60027-3, *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique – Partie 3 : Grandeurs logarithmiques et connexes, et leurs unités*

IEC 60028:1925, *Spécification internationale d'un cuivre-type recuit*

IEC 60141 (toutes les parties), *Essais de câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires*

IEC 60228, *Ames des câbles isolés*

IEC 60502-1, *Câbles d'énergie à isolant extrudé et leurs accessoires pour des tensions assignées de 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) à 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Partie 1: Câbles de tensions assignées de 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) et 3 kV ($U_m = 3,6$ kV)*

IEC 60502-2, *Câbles d'énergie à isolant extrudé et leurs accessoires pour des tensions assignées de 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) à 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Partie 2: Câbles de tensions assignées de 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) à 30 kV ($U_m = 36$ kV)*

IEC 60889, *Fils d'aluminium écroui dur pour conducteurs de lignes aériennes*

1.3 Symboles

Les symboles utilisés dans la présente norme et les grandeurs qu'ils représentent sont donnés dans la liste suivante:

A	section droite de l'armure	mm^2
B_1 B_2	} coefficients (voir 2.4.2)	
C		
C	capacité par phase	F/m
D_e^*	diamètre extérieur du câble	m
D_i	diamètre sur isolant	mm
D_s	diamètre extérieur de la gaine métallique	mm
D_{oc}	diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface extérieure des crêtes	mm
D_{it}	diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface intérieure des creux	mm
F	coefficient défini en 2.3.5	
H	intensité des radiations solaires	W/m^2
H	force magnétisante (voir 2.4.2)	ampère-tours/m
H_s	inductance de la gaine	H/m
H_1 H_2 H_3	} composants de l'inductance due aux fils d'acier (voir 2.4.2)	H/m
I		
I		
M N	} coefficients définis en 2.3.5	
P Q		
P Q	} coefficients définis en 2.3.3	
R		
R	résistance électrique de l'âme en courant alternatif à sa température maximale de service	Ω/m
R_A	résistance de l'armure en courant alternatif à sa température maximale de fonctionnement	Ω/m
R_{A0}	résistance de l'armure en courant alternatif à 20 °C	Ω/m
R_e	résistance équivalente en courant alternatif de la gaine et de l'armure en parallèle	Ω/m
R_s	résistance de la gaine ou de l'écran du câble en courant alternatif à sa température maximale de fonctionnement	Ω/m
R_{s0}	résistance de la gaine ou de l'écran du câble en courant alternatif à 20 °C	Ω/m
R'	résistance électrique de l'âme en courant continu à la température maximale de service	Ω/m
R_0	résistance électrique de l'âme en courant continu à 20 °C	Ω/m
T_1	résistance thermique par phase entre âme et gaine métallique ou écran	K.m/W
T_2	résistance thermique entre gaine métallique ou écran et armure	K.m/W
T_3	résistance thermique du revêtement	K.m/W
T_4	résistance thermique du milieu extérieur (rapport de l'échauffement de la surface du câble au-dessus de l'ambiante aux pertes totales par unité de longueur)	K.m/W

T_4^*	résistance thermique du milieu extérieur à l'air libre tenant compte du rayonnement solaire	K.m/W
U_0	tension entre âme et écran ou gaine	V
W_A	pertes dissipées dans l'armure par unité de longueur	W/m
W_c	pertes dissipées dans l'âme par unité de longueur	W/m
W_d	pertes diélectriques par unité de longueur et par phase	W/m
W_s	pertes dissipées dans la gaine par unité de longueur	W/m
$W_{(s+A)}$	pertes totales dissipées dans la gaine et l'armure par unité de longueur	W/m
X	réactance de la gaine quand les câbles sont bipolaires ou tripolaires (en trèfle)	Ω/m
X_1	réactance de la gaine quand les câbles sont disposés en nappe	Ω/m
X_m	réactance mutuelle entre la gaine d'un câble et les âmes des deux autres lorsque les câbles sont posés en nappe	Ω/m
a	plus petite longueur d'une section électrique à permutation d'écran ayant des longueurs différentes	
c	distance entre les axes des âmes et l'axe du câble quand les câbles sont tripolaires (= $0,55 r_1 + 0,29 t$ pour les âmes sectoriales)	mm
d	diamètre moyen de la gaine ou de l'écran	mm
d'	diamètre moyen de la gaine et du frettage	mm
d_2	diamètre moyen du frettage	mm
d_A	diamètre moyen de l'armure	mm
d_c	diamètre extérieur de l'âme	mm
d'_c	diamètre extérieur de l'âme massive ronde, ayant le même canal central qu'une âme creuse	mm
d_d	diamètre intérieur du tuyau	mm
d_f	diamètre d'un fil d'acier	mm
d_i	diamètre intérieur d'une âme creuse	mm
d_M	plus grand diamètre d'écran ou de gaine d'une âme ovale	mm
d_m	plus petit diamètre d'écran ou de gaine d'une âme ovale	mm
d_x	diamètre d'une âme circulaire équivalente ayant la même section et le même degré de rétreint que l'âme sectoriale	mm
f	fréquence du réseau	Hz
g_s	coefficient utilisé en 2.3.6.1	
k	facteur utilisé pour le calcul des pertes par hystérésis dans les armures ou frettages (voir 2.4.2.4)	
k_p	facteur utilisé dans le calcul de x_p (effet de proximité)	
k_s	facteur utilisé dans le calcul de x_s (effet de peau)	
l	longueur d'une section de câble (symbole général, voir 2.3 et 2.3.4)	m
$\ln$	logarithme naturel (logarithme en base e, voir IEC 60027-3)	
m	$\frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$	
n	nombre d'âmes dans un câble	
n_1	nombre de fils d'acier dans un câble (voir 2.4.2)	
p	pas d'assemblage d'un fil d'acier sur un câble (voir 2.4.2)	
$\left. \begin{matrix} p \\ q \end{matrix} \right\}$	coefficients utilisés en 2.3.6.2	
r_1	rayon du cercle circonscrit aux deux ou trois âmes sectoriales dans un câble bipolaire ou tripolaire	mm

s	distance entre axes et âmes	mm
s_1	distance entre axes de deux câbles adjacents dans une nappe horizontale de trois câbles non jointifs	mm
s_2	séparation axiale des câbles (voir 2.4.2)	mm
t	épaisseur d'isolant entre âmes	mm
t_3	épaisseur du revêtement externe	mm
t_s	épaisseur de la gaine	mm
ν	rapport des résistivités thermiques des zones de sol sec et humide ($\nu = \rho_d/\rho_w$)	
x_p	argument de la fonction de Bessel, utilisé dans le calcul de l'effet de proximité	
x_s	argument de la fonction de Bessel, utilisé dans le calcul de l'effet de peau	
y_p	facteur d'effet de proximité } (voir 2.1)	
y_s		
α_{20}	coefficient de variation de la résistance électrique avec la température à 20 °C, par kelvin	I/K
β	angle formé par l'axe d'un fil d'armure et l'axe du câble (voir 2.4.2)	
β_1	coefficient utilisé en 2.3.6.1	
γ	déphasage (voir 2.4.2)	
Δ_1 } Δ_2 }	coefficients utilisés en 2.3.6.1	
δ		
$\tan \delta$	épaisseur équivalente de l'armure ou du frettage	mm
ε	facteur de pertes de l'isolant	
θ	permittivité relative de l'isolant	
θ_a	température maximale de service de l'âme	°C
θ_{ar}	température ambiante	°C
θ_{sc}	température maximale de fonctionnement de l'armure	°C
θ_x	température maximale de fonctionnement de la gaine ou de l'écran du câble	°C
$\Delta\theta$	température critique du sol et température de la frontière entre zone sèche ou zone humide	°C
$\Delta\theta_x$	échauffement admissible à l'âme par rapport à la température ambiante	K
λ_0	échauffement critique du sol et échauffement de la frontière entre les zones sèche et humide au-dessus de la température ambiante du sol	K
λ_1, λ_2	coefficient utilisé en 2.3.6.1	
λ'_1	rapport utilisé des pertes totales dans les gaines métalliques et armures respectivement aux pertes totales des âmes (ou pertes dans une gaine ou armure aux pertes dans une âme)	
λ''_1	rapport des pertes dans une gaine produites par les courants de circulation dans la gaine aux pertes dans une âme	
λ'_{1m}	rapport des pertes dans une gaine produites par les courants de Foucault aux pertes dans une âme	
λ'_{11}	facteur de perte du câble médian	Trois câbles posés en nappe non transposés avec gaines court-circuitées aux deux extrémités
λ'_{12}	facteur de perte du câble extérieur ayant les pertes les plus importantes	
λ'_{12}	facteur de perte du câble extérieur ayant les pertes les plus faibles	

μ	perméabilité magnétique relative du matériau constituant l'armure	
μ_e	perméabilité relative longitudinale	
μ_t	perméabilité relative transversale	
ρ	résistivité de l'âme à 20 °C	$\Omega \cdot m$
ρ_d	résistivité thermique du sol sec	K.m/W
ρ_w	résistivité thermique du sol humide	K.m/W
ρ_s	résistivité de la gaine à 20 °C	$\Omega \cdot m$
σ	coefficient d'absorption des rayons solaires par la surface du câble	
ω	pulsation (fréquence angulaire $2\pi f$)	

1.4 Evaluation de l'intensité admissible du courant dans les câbles

Lorsque l'intensité du courant admissible est calculée pour des conditions d'assèchement partiel du sol, il est également nécessaire de calculer une capacité de transport pour des conditions où l'assèchement du sol ne se produit pas. La plus faible des deux valeurs doit être utilisée.

1.4.1 Câbles enterrés dans le cas où il n'y a pas d'assèchement du sol ou câbles posés à l'air libre

1.4.1.1 Câbles à courant alternatif

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant alternatif peut être déduite de l'expression donnant l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante:

$$\Delta\theta = (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4)$$

où

I est l'intensité du courant circulant dans une âme (A);

$\Delta\theta$ est l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante (K);

NOTE La température ambiante est la température du milieu environnant en régime normal à l'endroit où les câbles sont posés ou doivent être posés. Elle comprend les effets de n'importe quelle source de chaleur mais non pas l'élévation de température dans le voisinage immédiat des câbles provenant de la chaleur s'en dégageant.

R est la résistance de l'âme en courant alternatif, par unité de longueur, à sa température maximale de service (Ω/m);

W_d sont les pertes diélectriques, par unité de longueur, de l'isolant entourant l'âme (W/m);

T_1 est la résistance thermique, par unité de longueur, entre l'âme et la gaine (K.m/W);

T_2 est la résistance thermique, par unité de longueur, entre la gaine et l'armure (K.m/W);

T_3 est la résistance thermique, par unité de longueur, du revêtement extérieur du câble (K.m/W);

T_4 est la résistance thermique, par unité de longueur, entre la surface du câble et le milieu environnant, telle que déduite de 2.2 de la partie 2 (K.m/W);

n est le nombre d'âmes chargées dans le câble (âmes de même section et transportant la même charge);

λ_1 est le rapport des pertes dans la gaine métallique aux pertes totales dans toutes les âmes de ce câble;

λ_2 est le rapport des pertes dans l'armure aux pertes totales dans toutes les âmes de ce câble.

L'intensité du courant admissible est obtenue de la formule ci-dessus par la formule suivante:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

Lorsque le câble est exposé au rayonnement solaire direct, les formules données en 2.2.1.2 de la partie 2 doivent être utilisées.

L'intensité du courant pour un câble à quatre conducteurs basse tension peut être considérée comme étant égale à l'intensité d'un câble tripolaire pour les mêmes tension et dimension et construction des âmes, à condition que ce câble soit utilisé dans un système triphasé où le quatrième conducteur est soit un conducteur neutre, soit un conducteur de protection. Lorsqu'il s'agit d'un conducteur neutre, l'intensité du courant s'applique à une charge équilibrée.

1.4.1.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant continu s'obtient par la simplification suivante de la formule en courant alternatif:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

où

R' est la résistance de l'âme en courant continu, par unité de longueur, à sa température maximale de service (Ω/m).

Lorsque le câble est directement exposé au rayonnement solaire, les formules données en 2.2.1.2 de la partie 2 doivent être utilisées.

1.4.2 Câbles enterrés dans le cas où se produit un assèchement partiel du sol

1.4.2.1 Câbles à courant alternatif

La méthode suivante doit être appliquée uniquement à un seul câble ou à un seul circuit, posé à une profondeur normale. La méthode se fonde sur un modèle physique approximatif simple de sol à deux zones dans lequel la zone adjacente au câble est asséchée alors que l'autre zone présente la résistivité thermique du site, la limite entre ces deux zones étant isothermique ¹⁾. Cette méthode est estimée appropriée dans les applications où l'on simplifie l'influence du sol.

NOTE Les cas d'installations comportant plus d'un circuit et l'espacement nécessaire entre circuits sont à l'étude.

Les modifications de la résistance thermique externe, dues à la formation d'une zone sèche autour d'un seul câble ou d'un seul circuit, sont obtenues à partir de la formule suivante (à comparer à la formule de 1.4.1.1):

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + vT_4)] + (v - 1) \Delta\theta_x}{R [T_1 + n (1 + \lambda_1) T_2 + n (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + vT_4)]} \right]^{0,5}$$

où

v est le rapport des résistivités thermiques des zones de sol sec et humide ($v = \rho_d/\rho_w$);

R est la résistance de l'âme en courant alternatif à sa température maximale de service (Ω/m);

¹⁾ «Tenue en courant des câbles enterrés dans un sol partiellement asséché, Première partie»: *Electra* n° 104, p. 11, Janvier 1966 (voir en particulier la section 3 et l'annexe 1).

- ρ_d est la résistivité thermique du sol sec (K.m/W);
- ρ_w est la résistivité thermique du sol humide (K.m/W);
- θ_x est la température critique du sol et la température de la frontière entre zone sèche et zone humide (°C);
- θ_a est la température ambiante (°C);
- $\Delta\theta_x$ est l'échauffement critique du sol. C'est l'échauffement de la frontière entre les zones sèche et humide au-dessus de la température ambiante du sol ($\theta_x - \theta_a$) (K);
- NOTE T_4 est calculé en utilisant 2.2.3.2 de la partie 2 et la résistivité thermique du sol humide (ρ_w). La méthode utilisée en 2.2.3.1 de la partie 2 pour le calcul de l'échauffement mutuel des câbles par modification de l'élévation de la température ne peut pas être utilisée.

θ_x et ρ_d doivent être déterminés à partir d'une connaissance des conditions du sol.

NOTE Le choix de paramètres du sol appropriés est en cours d'étude. En attendant, des valeurs peuvent être retenues par accord entre fabricant et client.

1.4.2.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant continu s'obtient par la simplification suivante de la formule en courant alternatif:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta + (v - 1) \Delta\theta_x}{R' [T_1 + nT_2 + n(T_3 + vT_4)]} \right]^{0,5}$$

où

R' est la résistance de l'âme en courant continu, par unité de longueur, à sa température maximale de service (Ω/m).

1.4.3 Câbles enterrés dans le cas où un assèchement du sol est à éviter

1.4.3.1 Câbles à courant alternatif

Lorsqu'on souhaite éviter toute migration d'humidité en limitant l'échauffement de la surface externe du câble à une valeur inférieure ou égale à $\Delta\theta_x$, l'intensité de courant correspondante est obtenue à partir de:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x + n W_d T_4}{nRT_4 (1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0,5}$$

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x - nW_dT_4}{nRT_4(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0,5}$$

Cependant, pour certaines valeurs de $\Delta\theta_x$, la température de l'âme peut dépasser la température maximale admissible. Aussi, l'intensité de courant retenue doit être la plus faible des deux valeurs obtenues, soit par l'équation ci-dessus, soit par celle de 1.4.1.1.

La résistance de l'âme R doit être calculée à la température appropriée, qui peut être plus faible que la valeur maximale admissible. Une estimation de la température de service doit être effectuée et, si nécessaire, celle-ci peut être modifiée ultérieurement.

NOTE Pour ce qui concerne les câbles basse tension à quatre conducteurs, voir le dernier alinéa de 1.4.1.1.

1.4.3.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant continu s'obtient par la simplification suivante de la formule en courant alternatif:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x}{nR' T_4} \right]^{0,5}$$

La résistance de l'âme R' doit être modifiée comme en 1.4.2.2.

1.4.4 Câbles directement exposés au rayonnement solaire

Intensité admissible des courants

En tenant compte de l'effet que le rayonnement solaire produit sur un câble, le courant admissible est donné par les formules:

1.4.4.1 Câbles à courant alternatif

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \left[0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4^*) \right] - \sigma D_e^* H T_4^*}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5}$$

1.4.4.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \sigma D_e^* H T_4^*}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5}$$

où

- σ est le coefficient d'absorption des rayons solaires par la surface du câble (voir Tableau 4);
- H est l'intensité des radiations solaires que l'on prendra comme 10^3 W/m² dans la majorité des latitudes; autant que possible il est recommandé de se procurer les valeurs locales;
- T_4^* est la résistance thermique extérieure du câble à l'air libre, adaptée pour tenir compte de la radiation solaire (voir partie 2) (K.m/W);
- D_e^* est le diamètre extérieur du câble (m) (pour les gaines ondulées) $D_e^* = (d_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3}$ (m);
- t_3 est l'épaisseur du revêtement (mm).

2 Calcul des pertes

2.1 Résistance de l'âme en courant alternatif

La résistance linéique de l'âme en courant alternatif et à la température maximale de service est donnée par la formule suivante, sauf dans le cas des câbles en tuyau d'acier (voir 2.1.5):

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

où

- R est la résistance de l'âme en courant alternatif à la température maximale de service (Ω /m);
- R' est la résistance de l'âme en courant continu à la température maximale de service (Ω /m);
- y_s est le facteur d'effet de peau;
- y_p est le facteur d'effet de proximité.

2.1.1 Résistance de l'âme en courant continu

La résistance linéique de l'âme, en courant continu et à la température maximale de service θ , est donnée par:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

où

R_0 est la résistance de l'âme en courant continu à 20 °C (Ω/m);

La valeur de R_0 doit être tirée directement de l'IEC 60228. Lorsque la dimension de l'âme n'est pas comprise dans la liste donnée dans l'IEC 60228, la valeur de R_0 peut être choisie par accord entre le constructeur et l'acheteur. Il convient de calculer la résistance de l'âme en utilisant les valeurs des résistivités données au Tableau 1.

α_{20} est le coefficient de variation à 20 °C de la résistivité en fonction de la température, par kelvin (voir le Tableau 1 pour les valeurs de référence);

θ est la température maximale de service en degrés Celsius (celle-ci est déterminée d'après le type d'isolant utilisé), voir la spécification de l'IEC appropriée ou les normes nationales.

2.1.2 Facteur d'effet de peau y_s

Le facteur d'effet de peau y_s est donné par les équations suivantes:

Pour $0 < x_s \leq 2,8$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4}$$

Pour $2,8 < x_s \leq 3,8$

$$y_s = -0,136 - 0,0177x_s + 0,0563x_s^2$$

Pour $x_s > 3,8$

$$y_s = 0,354x_s - 0,733$$

où

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

f est la fréquence du courant d'alimentation en hertz.

Les valeurs k_s sont données dans le Tableau 2.

~~La formule ci-dessus est valable tant que x_s n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.~~

En l'absence d'autres formules, il est recommandé d'utiliser les formules ci-dessus pour des âmes sectoriales ou ovales.

2.1.3 Facteur d'effet de proximité y_p dans le cas de câbles bipolaires ou de deux câbles unipolaires

Le facteur d'effet de proximité est donné par:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times 2,9$$

où

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c est le diamètre de l'âme (mm);

s est la distance entre axes des âmes (mm).

Les valeurs de k_p sont données dans le Tableau 2.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

2.1.4 Facteur d'effet de proximité y_p dans le cas de câbles tripolaires ou de trois câbles unipolaires

2.1.4.1 Câbles à âme circulaire

Le facteur d'effet de proximité est donné par:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} + 0,27} \right]$$

où

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c est le diamètre de l'âme (mm);

s est la distance entre axes des âmes (mm).

NOTE Pour des câbles disposés en nappe, s est l'intervalle entre des phases adjacentes. Lorsque l'intervalle entre des phases adjacentes n'est pas égal, la distance utilisée sera $s = \sqrt{s_1 \times s_2}$.

Les valeurs de k_p sont données dans le Tableau 2.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

2.1.4.2 Câbles à âmes sectoriales

Dans le cas de câbles à plusieurs conducteurs à âmes sectoriales, la valeur de y_p doit être les deux tiers de la valeur calculée en 2.1.4.1,

avec:

$d_c = d_x$ = diamètre d'une âme circulaire équivalente de même section, et degré de rétreint (mm) ;

$s = (d_x + t)$ (mm),

où

t est l'épaisseur de l'isolant entre âmes (mm).

Les valeurs de k_p sont données dans le Tableau 2.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

2.1.5 Effets de peau et de proximité dans le cas des câbles en tuyau d'acier

Pour les câbles en tuyau, les effets de peau et de proximité calculés en 2.1.2, 2.1.3 et 2.1.4 doivent être multipliés par un facteur égal à 1,5. Pour ces câbles,

$$R = R' [1 + 1,5(y_s + y_p)] \quad (\Omega/m)$$

2.2 Pertes diélectriques (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif)

Les pertes diélectriques dépendent de la tension et ne deviennent donc importantes qu'à des niveaux de tension correspondant au matériel isolant utilisé. Le Tableau 3 donne, pour les matériaux isolants communément utilisés, la valeur U_0 à partir de laquelle il convient que les pertes diélectriques soient prises en considération, que les câbles soient tripolaires métallisés ou unipolaires. Il n'est pas nécessaire de calculer les pertes diélectriques pour les câbles à plusieurs conducteurs sans écran ou les câbles à courant continu.

Les pertes diélectriques par unité de longueur de chaque phase sont données par:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (\text{W/m})$$

où

$$\omega = 2\pi f;$$

C est la capacité par unité de longueur (F/m);

U_0 est la tension par rapport à la terre (V).

Les valeurs de $\tan \delta$, facteur de perte de l'isolant à la fréquence et à la température de service, sont données dans le Tableau 3.

La *capacité* pour des âmes circulaires est donnée par:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9} \quad (\text{F/m})$$

où

ε est la permittivité relative de l'isolant;

D_i est le diamètre extérieur de l'isolant, à l'exclusion de l'écran (mm);

d_c est le diamètre de l'âme y compris l'écran, s'il existe (mm).

La même formule peut être utilisée pour des âmes ovales en remplaçant D_i et d_c par la moyenne géométrique des grand et petit diamètres sur isolant et sur âme.

Les valeurs numériques de ε sont données dans le Tableau 3.

2.3 Facteur de pertes dans les gaines ou les écrans (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)

Les pertes dans les gaines ou les écrans (λ_1) sont dues au passage de courants de circulation (λ'_1) et aux courants de Foucault (λ''_1),

soit:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Les formules indiquées donnent l'expression de ces pertes rapportées aux pertes totales dans l'âme, de plus, on indique pour chaque cas particulier le type de pertes à considérer. Les formules pour les câbles unipolaires s'appliquent à un seul circuit et les effets de retour par la terre sont négligés. Des méthodes pour gaines lisses et ondulées sont données.

Pour les câbles unipolaires avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique, seules les pertes dues aux courants de circulation sont à prendre en considération (voir 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3). Une section électrique est définie comme la partie située entre les points où les gaines de tous les câbles sont court-circuitées et mises à la terre.

Il y a également lieu de prendre une certaine marge de sécurité pour tenir compte d'une augmentation d'écartement en certains points de parcours (voir 2.3.4).

Pour les câbles à ~~grosses~~ âmes segmentées, il convient de majorer le facteur de pertes pour tenir compte également des pertes dues aux courants de Foucault dans les gaines (voir 2.3.5).

Pour une installation à permutation des écrans, il n'est pas réaliste d'admettre que les longueurs élémentaires sont électriquement identiques et que les pertes dues aux courants de circulation dans les gaines sont négligeables. Des recommandations sont faites en 2.3.6 pour tenir compte de ce déséquilibre électrique.

Le Tableau 1 donne les résistivités et coefficients de température du plomb et de l'aluminium, pour le calcul de la résistance de la gaine R_s .

Les formules données dans ce paragraphe utilisent la résistance de la gaine ou de l'écran à sa température maximale de fonctionnement. La température maximale de fonctionnement de la gaine ou de l'écran est donnée par:

$$\theta_{sc} = \theta_c - \frac{(I^2 R + 0,5 W_d)}{T_1} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\theta_{sc} = \theta - \frac{(I^2 R + 0,5 W_d)}{T_1} \quad (^\circ\text{C})$$

où

θ_{sc} est la température de fonctionnement maximale de la gaine ou de l'écran du câble ($^\circ\text{C}$).

Comme la température de la gaine ou de l'écran est fonction du courant, I , une méthode de calcul itérative est utilisée.

La résistance de la gaine ou de l'écran à sa température de fonctionnement maximale est donnée par:

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)] \quad (\Omega/\text{m})$$

où

R_{s0} est la résistance de la gaine ou de l'écran à 20 $^\circ\text{C}$ (Ω/m).

2.3.1 Deux câbles unipolaires et trois câbles unipolaires (disposés en trèfle), avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour deux câbles unipolaires et trois câbles unipolaires (disposés en trèfle), avec gaines court-circuitées aux deux extrémités, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

où

R_s est la résistance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble à sa température de service maximale (Ω/m);

X est la réactance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble (Ω/m)

$$= 2 \omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

$\omega = 2 \pi \times \text{fréquence (1/s)}$;

s est la distance entre axes des âmes de la section électrique considérée (mm);

d est le diamètre moyen de la gaine (mm);

– pour des conducteurs ovales, d est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$;

où d_M et d_m représentent respectivement les grand et petit diamètres de la gaine

– pour les gaines ondulées, d est donné par $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$;

$\lambda_1'' = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf dans les câbles ~~ayant de grosses~~ à âmes segmentées pour lesquels λ_1'' est calculé par la méthode donnée en 2.3.5.

2.3.2 Trois câbles unipolaires disposés en nappe, régulièrement transposés, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour les câbles unipolaires disposés en nappe et régulièrement transposés, le câble médian étant équidistant des deux autres et les gaines étant transposées et court-circuitées aux extrémités de chaque section de transposition ternaire, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1} \right)^2}$$

où

X_1 est la réactance linéique de la gaine (Ω/m)

$$= X_1 = 2\omega 10^{-7} \ln \left\{ 2\sqrt[3]{2} \left(\frac{s}{d} \right) \right\};$$

$\lambda_1'' = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf dans les câbles ~~ayant de grosses~~ à âmes segmentées pour lesquels λ_1'' est calculé par la méthode donnée en 2.3.5.

2.3.3 Trois câbles unipolaires disposés en nappe, non transposés, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour trois câbles unipolaires disposés en nappe et non transposés dont le câble médian est équidistant des deux autres et les gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique, le facteur de pertes pour le câble qui a les plus fortes pertes (c'est-à-dire le câble extérieur dont le courant est déphasé en arrière) est donné par:

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75 P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25 Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

Pour l'autre câble extérieur, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

Pour le câble médian, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

Dans ces formules:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

où

X est la réactance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble pour deux câbles unipolaires adjacents (Ω/m)

$$= 2 \omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/m);$$

X_m est la réactance mutuelle par unité de longueur de câble entre la gaine d'un des câbles extérieurs et l'âme des deux autres, quand les câbles sont disposés en nappe (Ω/m)

$$= 2 \omega 10^{-7} \ln (2) (\Omega/m);$$

$\lambda''_1 = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf dans les câbles ~~ayant de grosses~~ à âmes segmentées pour lesquels λ''_1 est calculé par la méthode donnée en 2.3.5.

Les intensités du courant pour les câbles dans l'air doivent être basées sur la première formule donnée ci-dessus, c'est-à-dire, les pertes pour le câble extérieur dont le courant est déphasé en arrière.

2.3.4 Variation de l'écartement des câbles unipolaires entre les points où les gaines sont court-circuitées

Pour les circuits de câbles unipolaires à gaines court-circuitées à chaque extrémité et éventuellement en des points intermédiaires, les courants de circulation, et par conséquent les pertes, augmentent avec l'écartement, d'où l'intérêt de réduire celui-ci. En fait, il existe un écartement optimal obtenu par la double considération des pertes et de l'échauffement mutuel entre câbles.

Il n'est pas toujours possible d'installer les câbles avec le même écartement tout le long d'un parcours. Les recommandations suivantes concernent le calcul des pertes dues au courant de circulation des gaines lorsqu'il est impossible d'installer les câbles avec le même écartement sur toute la longueur d'une section électrique. Une section est définie comme la partie située entre les points où les gaines de tous les câbles sont court-circuitées et mises à la terre. Les recommandations ci-dessous donnent des valeurs pour des facteurs de perte qui sont valables pour une section entière mais il convient de remarquer que les valeurs appropriées de la résistance de l'âme et de la résistance thermique externe doivent être calculées sur la base du plus petit espacement entre câbles sur tout le long de la section.

a) Lorsque l'écartement le long de la section n'est pas constant mais que les diverses valeurs sont connues, la valeur de X en 2.3.1, 2.3.2 ou 2.3.3 sera déduite de:

$$X = \frac{l_a X_a + l_b X_b + \dots + l_n X_n}{l_a + l_b + \dots + l_n}$$

où

$l_a, l_b \dots l_n$ sont les longueurs correspondant à des écartements différents le long d'une section électrique;

$X_a, X_b \dots X_n$ sont les réactances par unité de longueur du câble, les formules correspondantes étant données en 2.3.1, 2.3.2 ou 2.3.3 où les valeurs appropriées des écartements $s_a, s_b \dots s_n$ sont utilisées.

- b) Lorsque dans une section l'écartement entre les câbles et sa variation le long du parcours ne sont pas connus et ne peuvent être prévus, les pertes de cette section calculées à partir de l'écartement type doivent être arbitrairement augmentées de 25 %, cette valeur étant estimée convenir aux câbles haute tension sous gaine de plomb. Si l'on pense qu'un accroissement de 25 % ne convient pas, on peut se mettre d'accord sur un autre pourcentage.
- c) Lorsque les phases de la section s'épanouissent à une extrémité, la marge de b) peut ne pas être suffisante et il est recommandé de faire une estimation de l'écartement prévu et de calculer les pertes en utilisant la procédure donnée en a) ci-dessus.

NOTE Cette augmentation n'est pas applicable aux installations dont les gaines ne sont réunies qu'en un seul point ou transposées (voir 2.3.6).

2.3.5 ~~Influence des grosses~~ Effet des âmes segmentées

Lorsque des dispositions ont été prises pour réduire l'effet de proximité, par exemple par l'utilisation ~~de grosses âmes à segments isolés~~ des âmes segmentées, le facteur de perte dans les gaines λ_1'' de 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3 ne peut plus être négligé; ce facteur ~~sera~~ doit être obtenu en multipliant la valeur λ_1'' du 2.3.6 pour la même configuration de câble, par le facteur F donné par la formule:

$$F = \frac{4 M^2 N^2 + (M + N)^2}{4 (M^2 + 1) (N^2 + 1)}$$

où

$$M = N = \frac{R_s}{X} \text{ pour les câbles posés en trèfle}$$

et

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{R_s}{X + X_m} \\ N &= \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}} \end{aligned} \right\} \text{ Pour les câbles posés en nappe, le câble central étant équidistant des câbles latéraux.}$$

Lorsque l'espacement le long d'une section électrique n'est pas constant, la valeur de X doit être calculée comme en 2.3.4 a).

2.3.6 Câbles unipolaires avec gaines court-circuitées en un seul point ou permutées

2.3.6.1 Pertes par courants de Foucault

Pour des câbles unipolaires, à gaines court-circuitées en un seul point ou permutées, le facteur de pertes par courants de Foucault est donné par:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

où

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1,74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1,6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \pi \omega}{10^7 \rho_s}}$$

ρ_s est la résistivité électrique du matériau constituant la gaine à la température de service (voir Tableau 1) ($\Omega \cdot m$);

D_s est le diamètre extérieur de la gaine du câble (mm);

NOTE Pour les gaines ondulées, le diamètre extérieur moyen $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$ doit être utilisé.

t_s est l'épaisseur de la gaine (mm);

$\omega = 2\pi f$;

NOTE 1 Pour les câbles à gaine de plomb, g_s peut être pris égal à 1 et $\frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}}$ peut être négligé.

NOTE 2 Pour les câbles à gaine d'aluminium, il peut être nécessaire d'évaluer les deux termes lorsque le diamètre de la gaine est supérieur à environ 70 mm ou lorsque la gaine est plus épaisse que d'ordinaire.

NOTE 3 Pour les câbles dont l'écran est constitué d'une nappe de fils avec un ruban d'égalisation ou une feuille métallique disposée au-dessus, les pertes par courants de Foucault sont considérées comme négligeables.

Les formules pour λ_0 , Δ_1 et Δ_2 sont données ci-dessous:

(dans lesquelles: $m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$, pour $m \leq 0,1$, Δ_1 et Δ_2 peuvent être négligés)

1) Trois câbles unipolaires en trèfle:

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = (1,14 m^{2,45} + 0,33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,92 m + 1,66)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

2) Trois câbles unipolaires en nappe:

a) câble central:

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 0,86 m^{3,08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,4 m + 0,7)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

b) câble extérieur, déphasé avant:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 4,7 m^{0,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,16 m + 2)}$$

$$\Delta_2 = 21 m^{3,3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,47 m + 5,06)}$$

c) câble extérieur, déphasé arrière:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = - \frac{0,74 (m + 2) m^{0,5}}{2 + (m - 0,3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m + 1)}$$

$$\Delta_2 = 0,92 m^{3,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m + 2)}$$

2.3.6.2 Pertes par courants de circulation

Les pertes par courants de circulation sont nulles pour les installations dont les gaines sont court-circuitées en un seul point et pour celles dont les gaines sont permutées et où chaque section ternaire est divisée en trois sections élémentaires électriquement identiques.

Lorsqu'une installation permutée comprend des sections dont le déséquilibre n'est pas négligeable, il apparaît dans ces sections une tension résiduelle, donc une circulation de courant et des pertes dont il importe de tenir compte.

Dans les installations où les longueurs effectives des sections simples sont connues, le facteur de pertes λ'_1 peut être obtenu à partir du facteur de pertes dû au courant de circulation dans un système de même configuration, non permuté et dont les gaines seront court-circuitées aux deux extrémités, en multipliant ce dernier facteur par:

$$\frac{p^2 + q^2 + 1 - p - pq - q}{(p + q + 1)^2}$$

Dans cette expression, p et q désignent pour la section ternaire considérée le rapport de longueurs des deux plus grandes sections à la plus petite (longueur de la plus petite: a , longueurs des deux autres: pa et qa).

Cette formule n'intervient que lorsque les sections simples ont des longueurs différentes.

Les variations d'écartement doivent également être prises en considération.

Lorsqu'on ne connaît pas les longueurs des sections simples, il convient de prendre pour p une valeur de 1 et pour q de 1,2, ce qui donne une valeur de 0,004.

2.3.7 Câbles bipolaires non armés sous gaine commune

Pour les câbles bipolaires non armés dont les conducteurs sont sous une gaine métallique commune, λ'_1 est négligeable et le facteur de pertes est donné par une des formules suivantes:

– pour les âmes rondes ou ovales:

$$\lambda''_1 = \frac{16 \omega^2 10^{-14}}{R R_s} \left(\frac{c}{d} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right]$$

– pour les âmes sectoriales:

$$\lambda''_1 = \frac{10,8 \omega^2 10^{-16}}{R R_s} \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \left[12,2 + \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \right]$$

où

$$\omega = 2\pi f;$$

f est la fréquence (Hz);

c est la distance entre l'axe d'une âme et l'axe du câble (mm);

r_1 est le rayon du cercle circonscrit aux deux âmes en secteur (mm);

d est le diamètre moyen de la gaine (mm);

- pour les conducteurs ovales, d est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres;
- pour des gaines ondulées, d est donné par $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

2.3.8 Câbles tripolaires non armés sous gaine commune

Pour un câble tripolaire non armé dont les conducteurs sont sous une gaine métallique commune, λ'_1 est négligeable et le facteur de pertes est donné par une des formules suivantes:

- pour les câbles à âmes circulaires ou ovales dont la résistance de gaine R_s est inférieure ou égale à $100 \mu\Omega/m$:

$$\lambda''_1 = \frac{3 R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} \right]$$

- pour les mêmes câbles dont la résistance R_s est supérieure à $100 \mu\Omega/m$:

$$\lambda''_1 = \frac{3,2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-14}$$

- pour les câbles à âmes sectoriales, quelle que soit la valeur de R_s :

$$\lambda''_1 = 0,94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2}$$

où

r_1 est le rayon du cercle circonscrit aux trois âmes sectoriales (mm);

t est l'épaisseur de l'isolant entre âmes (mm);

d est le diamètre moyen de la gaine (mm);

- pour les conducteurs ovales, d est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres de la gaine ou de l'écran;
- pour des gaines ondulées, d est donné par $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

2.3.9 Câbles bipolaires et tripolaires armés de feuillards d'acier

L'adjonction d'une armure de feuillards d'acier augmente les pertes par courants de Foucault dans la gaine. Dans ce cas, il convient de multiplier les valeurs correspondantes λ''_1 de 2.3.7 et 2.3.8 par le facteur suivant:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}} \right]^2$$

où

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm);

μ est la perméabilité relative du ruban d'acier (prise habituellement égale à 300);

δ est l'épaisseur équivalente de l'armure = $\frac{A}{\pi d_A}$ (mm);

où A est la section transversale de l'armure (mm²).

Cette correction n'est applicable qu'aux rubans d'épaisseur comprise entre 0,3 mm à 1,0 mm.

2.3.10 Câbles triplombs armés

Pour un câble tripolaire dont chaque phase possède sa propre gaine de plomb, λ_1'' est nul et le facteur de pertes pour les gaines est donné par:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

où

$X = 2 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right)$ (Ω/m);

s est la distance entre axes d'âmes (mm).

Le facteur de pertes pour les câbles non armés dont chaque phase possède sa propre gaine métallique est donné en 2.3.1.

2.3.11 Pertes dans les écrans et les gaines de câbles en tuyau d'acier

Lorsque, dans un câble en tuyau, chaque âme n'a qu'un écran sur l'isolant, par exemple une gaine de plomb ou un ruban de cuivre, le rapport des pertes dans les écrans aux pertes dans les âmes peut être calculé par la formule donnée en 2.3.1 pour la gaine d'un câble unipolaire, mais en corrigeant celle-ci pour tenir compte des pertes supplémentaires dues à la présence du tuyau d'acier.

La formule modifiée s'écrit:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

Si chaque phase comporte un écran métallique et un frettage non magnétique, la même formule peut être utilisée, mais la résistance R_s est remplacée par la résistance équivalente à la mise en parallèle de l'écran et du frettage. Le diamètre d est remplacé par la valeur d' :

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}}$$

où

d' est le diamètre moyen de gaine et frettage (mm);

d est le diamètre moyen de l'écran ou gaine (mm);

d_2 est le diamètre moyen du frettage (mm).

Dans le cas des conducteurs de forme ovales, d et d_2 sont donnés par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres de la gaine ou de l'écran.

NOTE Voir aussi 2.4.2.

2.4 Facteur de pertes dans les armures, les frettages et les tuyaux d'acier (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)

Les formules données dans ce paragraphe expriment la puissance dissipée dans l'armure métallique ou le frettage ou le tuyau d'acier des câbles sous la forme d'une fraction λ_2 de la puissance perdue dans toutes les âmes.

Les valeurs à utiliser pour la résistivité et les coefficients de variation de la résistivité avec la température sont données dans le Tableau 1.

Les formules données dans ce paragraphe utilisent la résistance de l'armure à sa température maximale de fonctionnement. La température maximale de fonctionnement de l'armure est donnée par:

$$\theta_{ar} = \theta_c - \left\{ \left(I^2 R + 0,5 W_d \right) T_1 + \left[I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] n T_2 \right\} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\theta_{ar} = \theta - \left\{ \left(I^2 R + 0,5 W_d \right) T_1 + \left[I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] n T_2 \right\} \quad (^\circ\text{C})$$

où

θ_{ar} est la température maximale de fonctionnement de l'armure ($^\circ\text{C}$).

Comme la température de l'armure est fonction du courant, I , une méthode de calcul itérative est utilisée.

La résistance de l'armure à sa température maximale de fonctionnement est donnée par:

$$R_A = R_{A0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{ar} - 20)] \quad (\Omega/\text{m})$$

où

R_{A0} est la résistance de l'armure à 20°C (Ω/m).

Lorsqu'on utilise la résistance équivalente pour la combinaison de la gaine et de l'armure en parallèle, il est suffisamment précis de supposer que les deux composants sont à la température de fonctionnement de l'armure et de prendre une valeur moyenne des coefficients de température des matériaux.

2.4.1 Armure ou frettage non magnétique

Le procédé général est de combiner le calcul des pertes dans le frettage avec celui des pertes dans la gaine. Les formules sont données en 2.3 et la combinaison en parallèle des résistances de la gaine et du frettage est utilisée à la place de la résistance R_s de la gaine. La moyenne quadratique des diamètres de la gaine et du frettage remplace le diamètre moyen d de la gaine (voir 2.3.11). Cette méthode est applicable aux câbles unipolaires, bipolaires et multipolaires.

La valeur de la résistance du frettage dépend du pas des rubans:

- Si le ruban a un très long pas (rubans longitudinaux), la résistance est calculée comme celle d'un cylindre ayant la même masse de matériau par unité de longueur de câble et le même diamètre intérieur que les rubans.

- b) Si les rubans font avec l'axe du câble un angle d'environ 54°, la résistance est le double de celle calculée ci-dessus en a) ci-dessus.
- c) Si les rubans ont un pas très court (rubans circonférentiels), la résistance est considérée comme infinie, c'est-à-dire que les pertes peuvent être négligées.
- d) Dans le cas où il y a deux couches ou plus de rubans à pas court au contact l'une de l'autre, la résistance est le double de celle considérée en a) ci-dessus.

Ces considérations s'appliquent aussi aux câbles en tuyaux, comme indiqué en 2.3.11.

2.4.2 Armure ou frettage magnétique

2.4.2.1 Câbles unipolaires sous gaine de plomb et armure de fils d'acier, court-circuitée à la gaine à chaque extrémité

La méthode suivante ne tient pas compte de l'influence possible des milieux environnants, qui peut être appréciable en particulier dans le cas des câbles sous-marins. La méthode est relative à des installations où l'écartement des câbles est grand (c'est-à-dire 10 m et plus). Elle donne des valeurs des pertes dans les gaines et les armures qui sont habituellement plus fortes que les pertes réelles, conduisant à un dimensionnement du côté de la sécurité. Il convient de noter que la zone la plus chaude sur le tracé des câbles peut être la zone d'atterrissage où à la fois les pertes et les échauffements mutuels peuvent être élevés.

Lorsque l'influence des milieux environnants peut être négligée, par exemple dans l'air, la méthode peut être utilisée quel que soit l'écartement des câbles.

Le calcul des pertes dans les gaines de plomb et les armures des câbles unipolaires sous armure de fils d'acier dont la gaine et l'armure sont court-circuitées aux deux extrémités est le suivant:

- a) La résistance équivalente aux résistances de la gaine et l'armure en parallèle est donnée par:

$$R_e = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} \quad (\Omega/m)$$

où

R_s est la résistance de la gaine par unité de longueur à sa température de service maximale (Ω/m);

R_A est la résistance de l'armure en courant alternatif par unité de longueur à sa température de service maximale (Ω/m).

La résistance en courant alternatif des fils d'armure varie d'environ 1,2 fois la résistance en courant continu pour les fils de 2 mm de diamètre jusqu'à 1,4 fois la résistance en courant continu pour les fils de 5 mm. La valeur de la résistance n'a pas un effet très sensible sur le résultat final.

- b) L'inductance des éléments du circuit est calculée par phase, de la façon suivante:

$$H_s = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2 s_2}{d} \right) \quad (\Omega/m)$$

où H_s est l'inductance due à la gaine (H/m)

$$H_1 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \cos \gamma$$

$$H_2 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \sin \gamma$$

$$H_3 = 0,4 \left(\mu_t \cos^2 \beta - 1 \right) \left(\frac{d_f}{d_A} \right) 10^{-6}$$

NOTE H_3 est pris égal à zéro pour des fils espacés.

où

H_1 , H_2 et H_3 sont les composantes de l'inductance due aux fils d'acier (H/m);

s_2 est la distance entre axes des câbles adjacents disposés en trèfle; pour les câbles disposés en nappe, s_2 est la moyenne géométrique des trois distances (mm);

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm);

d_f est le diamètre du fil d'acier (mm);

p est le pas d'assemblage du fil d'acier (mm);

n_1 est le nombre de fils d'acier;

β est l'angle formé par l'axe d'un fil d'armure et l'axe du câble;

γ est le déphasage du flux magnétique longitudinal dans les fils d'acier sur la force magnétisante;

μ_e est la perméabilité relative longitudinale des fils d'acier;

μ_t est la perméabilité relative transversale des fils d'acier;

Pour les valeurs de γ , μ_e et μ_t , voir le point d).

Prendre $B_1 = \omega (H_s + H_1 + H_3)$ (Ω/m)

$B_2 = \omega H_2$ (Ω/m).

- c) Les pertes totales dans la gaine et l'armure $W_{(s+A)}$ sont données par:

$$W_{(s+A)} = I^2 R_e \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \right) \text{ (W/m)}$$

Les pertes dans la gaine et l'armure sont supposées être approximativement égales, donc:

$$\lambda'_1 = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2 W_c}$$

où

$W_c = I^2 R$ pertes dans l'âme (W/m).

- d) Choix des caractéristiques magnétiques γ , μ_e et μ_t .

Ces valeurs varient suivant les échantillons particuliers d'acier et, à moins de pouvoir se référer à des mesures faites sur les fils d'acier utilisés, des valeurs moyennes doivent être adoptées.

L'erreur résultante n'est pas sensible si, pour des fils de 4 mm à 6 mm de diamètre et de charges à la rupture voisines de 400 N/mm², les valeurs suivantes sont adoptées:

$\mu_e = 400$

$\mu_t = 10$, lorsque les fils sont en contact

$\mu_t = 1$, lorsque les fils sont séparés

$\gamma = 45^\circ$

Si un calcul plus précis est exigé et si les caractéristiques des fils sont connues, il est alors nécessaire de connaître d'abord la valeur approchée de la force magnétisante H afin de trouver les caractéristiques magnétiques qui conviennent.

$$H = \frac{1\,000 \left| \bar{I} + \bar{I}_s \right|}{\pi d_A} \text{ (ampères-tours/m)}$$

où $\bar{I}$ et $\bar{I}_s$ sont les valeurs vectorielles du courant dans l'âme et du courant dans la gaine. Pour le choix initial des caractéristiques magnétiques, il suffit généralement de supposer que $|\bar{I} + \bar{I}_s| = 0,6 I$, et de reprendre les calculs s'il s'avère ensuite que la valeur calculée accuse une différence importante.

2.4.2.2 Câbles bipolaires sous armure de fil d'acier

$$\lambda_2 = \frac{0,62 \omega^2 10^{-14}}{R \cdot R_A} + \frac{3,82 A \omega 10^{-5}}{R} \left[\frac{1,48 r_1 + t}{d_A^2 + 95,7 A} \right]^2$$

où

R_A est la résistance (courant alternatif) de l'armure à sa température maximale (Ω/m);

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm);

A est la section de l'armure (mm^2);

r_1 est le rayon circonscrit aux âmes (mm);

t est l'épaisseur de l'isolant entre les âmes (mm).

Aucune correction tenant compte de la non-uniformité de la distribution du courant dans les âmes n'est proposée, car elle reste négligeable jusqu'à des sections de 400 mm².

2.4.2.3 Câbles tripolaires – armure en fils d'acier

2.4.2.3.1 Câbles à âmes circulaires

$$\lambda_2 = 1,23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

où

R_A est la résistance (courant alternatif) de l'armure à sa température maximale (Ω/m);

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm);

c est la distance entre l'axe d'une âme et le centre du câble (mm).

Aucune correction tenant compte de la non-uniformité de la distribution du courant dans les âmes n'est proposée, car elle reste négligeable jusqu'à des sections de 400 mm². Cette équation est à l'étude en raison du fait qu'elle peut surestimer le facteur de pertes dans les armures pour certaines constructions de câbles.

2.4.2.3.2 Câbles à âmes sectoriales

$$\lambda_2 = 0,358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

où

r_1 est le rayon du cercle circonscrit aux trois âmes sectoriales (mm);

$\omega = 2\pi f$;

f est la fréquence d'alimentation (Hz).

2.4.2.4 Câbles tripolaires sous feuillards d'acier

Les formules suivantes s'appliquent aux feuillards dont l'épaisseur est comprise entre 0,3 mm et 1 mm.

Les pertes par hystérésis sont, pour une fréquence de 50 Hz, données par:

$$\lambda'_2 = \frac{s^2 k^2 10^{-7}}{R d_A \delta}$$

où

s est la distance entre axes des âmes (mm);

δ est l'épaisseur équivalente de l'armure (mm)

soit $\frac{A}{\pi d_A}$

et

A est la section de l'armure (mm²);

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm).

Le facteur k est donné par:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}}$$

où

μ est la perméabilité relative du ruban d'acier, habituellement prise égale à 300.

Pour des fréquences f différentes de 50 Hz, la valeur de k doit être multipliée par $\frac{f}{50}$.

Le facteur de pertes par courants de Foucault, à 50 Hz, est:

$$\lambda''_2 = \frac{2,25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

et pour toute autre fréquence f , la valeur calculée par la formule ci-dessus doit être multipliée par $\left(\frac{f}{50}\right)^2$.

Le facteur de pertes total dans l'armure est donné par la somme des facteurs correspondant aux pertes par hystérésis et courants de Foucault, soit:

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2$$

NOTE La présence de frettages ou d'armures magnétiques augmente les pertes par courants de Foucault dans les gaines; il convient d'en tenir compte comme indiqué en 2.3.9.

2.4.2.5 Câbles triplombs

Quand il s'agit de câbles triplombs armés, l'effet d'écran résultant des courants dans les gaines réduit les pertes dans l'armure. La valeur de λ_2 calculée en 2.4.2.3.1 ou 2.4.2.3.2 doit être multipliée par le facteur

$$\left(1 - \frac{R}{R_s} \lambda'_1\right)$$

où λ'_1 a la valeur déterminée en 2.3.1.

2.4.3 Pertes dans les tuyaux d'acier

Les pertes dans les tuyaux d'acier sont données par deux formules empiriques, une pour les câbles où les phases sont posées en trèfle jointif, et une autre pour les câbles où les phases sont posées au fond du tuyau dans une configuration plus ouverte (dite en berceau). Les câbles en service ont probablement une configuration intermédiaire. Aussi, il convient que les pertes soient calculées pour les deux configurations et on prendra leur valeur moyenne:

NOTE Ces formules ont été obtenues empiriquement aux Etats-Unis d'Amérique et ne s'appliquent actuellement qu'aux dimensions des tuyaux et aux types d'acier utilisés dans ce pays.

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,0115 s - 0,001485 d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ pour la configuration en trèfle jointif}$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,00438 s + 0,00226 d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ pour la configuration en berceau}$$

où

s est l'espacement entre axes des âmes (mm);

d_d est le diamètre intérieur du tuyau (mm);

R est la résistance linéique de l'âme en courant alternatif à la température maximale de service (Ω/m).

Les formules indiquées s'appliquent à une fréquence de 60 Hz. Pour 50 Hz, il convient de multiplier chaque formule par 0,76.

Pour les câbles en tuyaux, dont l'armure en fils plats est appliquée sur les trois phases après qu'elles ont été mises en place, les pertes sont indépendantes de la présence du tuyau. Pour ces câbles, les pertes dans l'armure doivent être calculées comme pour les câbles triplombs (voir ~~2.4.2.3.2~~ 2.4.2.5 et les pertes dans le tuyau doivent être négligées).

Tableau 1 – Résistivités électriques et coefficients de variation de la résistivité avec la température des métaux utilisés

Matériaux	Résistivité (ρ) ohm · m à 20 °C	Température coefficient (α_{20}) par K à 20 °C
a) <i>Ames</i>		
Cuivre	1,724 1 10^{-8}	3,93 10^{-3}
Aluminium	2,826 4 10^{-8}	4,03 10^{-3}
b) <i>Matériaux de gaines et d'armure</i>		
Plomb et alliage de plomb	21,4 10^{-8}	4,0 10^{-3}
Acier	13,8 10^{-8}	4,5 10^{-3}
Bronze	3,5 10^{-8}	3,0 10^{-3}
Acier inoxydable	70 10^{-8}	Négligeable
Aluminium	2,84 10^{-8}	4,03 10^{-3}

NOTE Les valeurs se rapportant au cuivre constituant les âmes sont prises dans l'IEC 60028.
Les valeurs se rapportant à l'aluminium constituant les âmes sont prises dans l'IEC 60889.

**Tableau 2 – Effets de peau et de proximité –
Valeurs expérimentales pour les coefficients k_s et k_p**

Type d'âme	Séché et imprégné ou non	k_s	k_p
<i>Cuivre</i>			
Circulaire, câblé	Oui	1	0,8
Circulaire, câblé	Non	1	1
Circulaire, segmenté ^a		0,435	0,37
Croix, câblé hélicoïdal	Oui	b	0,8
Sectoral	Oui	1	0,8
Sectoral	Non	1	1
<i>Aluminium</i>			
Circulaire, câblé	Dans les deux cas	1	
Circulaire, 4 segments	Dans les deux cas	0,28	
Circulaire, 5 segments	Dans les deux cas	0,19	
Circulaire, 6 segments	Dans les deux cas	0,12	
Segmenté avec fils périphériques	Dans les deux cas	c	
^a Les valeurs données s'appliquent aux âmes ayant quatre segments (avec ou sans canal central) et aux sections inférieures à 1 600 mm². Ces valeurs s'appliquent aux âmes dans lesquelles toutes les couches de fils ont le même sens. Les valeurs sont provisoires et cette question est à l'étude. ^b Il convient que la formule suivante soit utilisée pour le calcul de k_s: $k_s = \frac{(d'_c - d_i) \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2}{\frac{d'_c + d_i}{d'_c + d_i}}$ —où d_i est le diamètre intérieur de l'âme (canal central) (mm); d'_c est le diamètre extérieur de l'âme massive équivalente ayant le même canal central (mm). ^c Il convient d'utiliser la formule suivante pour calculer k_s pour les câbles dont l'âme est constituée de segments entourés par une ou plusieurs couches périphériques de fils. $k_s = \left\{ 12c \left[(ac - 0,5)^2 + (ac - 0,5)(\psi - \alpha)c + 0,33(\psi - \alpha)^2 c^2 \right] + b(3 - 6b + 4b^2) \right\}^{0,5}$ —où b est le rapport de la section totale des fils périphériques à la section totale de l'âme complète; c est le rapport de la section totale des segments de l'âme à la section totale de l'âme complète, $c = (1 - b)$. $\alpha = \frac{1}{(1 + \sin \pi / n)^2}$ $\psi = \frac{2\pi / n + 2/3}{2(1 + \pi / n)}$ —où n est le nombre de segments. Cette formule est applicable aux âmes en aluminium jusqu'à 1 600 mm². Si la section totale des fils périphériques dépasse 30 % de la section totale de l'âme, alors on peut considérer que k_s est égal à l'unité. ^d Bien qu'aucun résultat expérimental s'appliquant spécifiquement au coefficient k_p pour les âmes câblées en aluminium n'ait été approuvé, il est recommandé d'utiliser pour les âmes câblées en aluminium les valeurs données pour des âmes en cuivre analogues.			

Type d'âme	Système d'isolation des âmes	k_s	k_p
<i>Cuivre</i>			
Circulaire, massive	Tous	1	1
Circulaire, câblée	Fluide ^d /papier ^e /PPL ^f	1	0,8
Circulaire, câblée	Extrudée ^g /minérale ^h	1	1
Circulaire, segmentée	Fluide/papier/PPL	0,435	0,37
Circulaire, segmentée, fils isolés ^b	Extrudée	0,35	0,20
Circulaire, segmentée, Fils nus ^b , unidirectionnel	Extrudée	0,62	0,37
Circulaire, segmentée, Fils nus ^b , bidirectionnel	Extrudée	0,80	0,37
Creuse, câblée hélicoïdale	Tous	^a	0,8
Sectorale	Fluide/papier/PPL	1	0,8
Sectorale	Extrudée/minérale	1	1
<i>Aluminium</i>			
Circulaire, massive	Tous	1	1
Circulaire, câblée	Tous	1	0,8
Circulaire, segmentée	Tous	0,25	0,15
Creuse, câblée hélicoïdale	Tous	^a	0,8
^a Il convient d'utiliser la formule suivante pour k_s : $k_s = \left(\frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \right) \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$ où d_i est le diamètre intérieur de l'âme (canal central) (mm); d'_c est le diamètre extérieur de l'âme massive équivalente ayant le même canal central (mm).			
^b Les coefficients relatifs à ces conceptions peuvent être influencés par le détail de la constitution de l'âme conductrice. Après accord entre le fabricant et l'utilisateur, les valeurs mesurées de la résistance en courant alternatif peuvent être utilisées. Une méthode de mesure commune est à l'étude. Le Cigre (TB272) examine trois méthodes de mesure.			
^c Âme segmentée:	Âme câblée comprenant un ensemble d'âmes câblées profilées dont chacun des segments est faiblement isolé les uns par rapport aux autres. Les fils individuels peuvent être soit isolés (par exemple émaillés ou à revêtement d'oxyde) soit nus.		
^d Isolant extrudé:	Isolant généralement constitué d'une couche de matériau polymère et appliqué à l'aide d'un procédé d'extrusion.		
^e Isolant minéral:	Isolant constitué d'une poudre minérale comprimée. Généralement utilisé sur des types spécifiques de câbles BT.		
^f Isolant papier:	Isolation rubanée constituée de papier imprégné de matériau isolant.		
^g Isolant fluide:	Système d'isolation constitué de rubanage en papier et d'un fluide isolant qui est conçu pour assurer le libre déplacement du fluide à l'intérieur du câble.		
^h Isolant PPL (polypropylene/papier laminé):	Câble rempli de fluide dans lequel un stratifié de papier/polypropylène est utilisé à la place du rubanage en papier.		

NOTE 1 Les valeurs k_s et k_p présentées dans le tableau ci-dessus pour des âmes câblées de grandes dimensions sont généralement dérivées des valeurs figurant dans la Cigre TB Ref. N° 272, *Large cross-sections and composite screens design*.

NOTE 2 La valeur de k_s donnée pour les fils isolés circulaires, à âmes segmentées, est une valeur limite destinée à couvrir toutes les méthodes d'isolation des fils y compris les fils émaillés, sous revêtement d'oxyde ou autres méthodes.

NOTE 3 La valeur de k_s donnée pour les fils creux, câblés hélicoïdaux est applicable aux âmes trapézoïdales.

Tableau 3 – Valeurs numériques de la permittivité relative et du facteur de pertes pour les isolants utilisés dans les câbles à haute tension et moyenne tension à fréquence industrielle

1	2	3																						
Type de câble	ε	$\tan \delta^*$																						
<i>Câbles isolés au papier imprégné</i>																								
Type «solid», à imprégnation totale, préimprégné ou imprégné de matière non migrante	4	0,01																						
A huile fluide, sous gaine métallique ^a																								
jusqu'à $U_o = 36$ kV	3,6	0,003 5																						
jusqu'à $U_o = 87$ kV	3,6	0,003 3																						
jusqu'à $U_o = 160$ kV	3,5	0,003 0																						
jusqu'à $U_o = 220$ kV	3,5	0,002 8																						
A pression d'huile, du type en tuyau ^b	3,7	0,004 5																						
A pression d'huile, du type en tuyau ^c	3,6	0,004 0																						
A pression d'huile, du type en tuyau ^d	3,4	0,004 5																						
<i>Câbles isolés avec d'autres matériaux</i>																								
Caoutchouc butyle	4	0,050																						
EPR ^e																								
câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV	3	0,020																						
câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV	3	0,005																						
PVC ^e	8	0,1																						
PE (HD et BD) ^e	2,3	0,001																						
XLPE ^e																								
câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV (non chargé)	2,5	0,004																						
câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV (non chargé)	2,5	0,001																						
câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV (chargé)	3,0	0,005																						
PPL																								
câble de tensions supérieures ou égales à 63/110 kV	2,8	0,001 4																						
* Valeurs prudentes relatives au maximum de température admissible et applicables à la plus haute tension normalement spécifiée pour chaque type de câble.																								
^a Voir l'IEC 60141-1.																								
^b Voir l'IEC 60141-4.																								
^c Voir l'IEC 60141-3.																								
^d Voir l'IEC 60141-2.																								
^e Voir l'IEC 60502-1 et l'IEC 60502-2.																								
NOTE Il convient de tenir compte des pertes diélectriques pour les valeurs de U_o supérieures ou égales aux valeurs suivantes:																								
<table><tr><th>Type de câble</th><th>U_o kV</th></tr><tr><td><i>Câbles isolés au papier imprégné</i></td><td></td></tr><tr><td>Type «solid»</td><td>38</td></tr><tr><td>A huile fluide et pression de gaz</td><td>63,5</td></tr><tr><td><i>Câbles isolés avec d'autres matériaux</i></td><td></td></tr><tr><td>Caoutchouc butyle</td><td>18</td></tr><tr><td>EPR</td><td>63,5</td></tr><tr><td>PVC</td><td>6</td></tr><tr><td>PE (HD et BD)</td><td>127</td></tr><tr><td>XLPE (non chargé)</td><td>127</td></tr><tr><td>XLPE (chargé)</td><td>63,5</td></tr></table>			Type de câble	U_o kV	<i>Câbles isolés au papier imprégné</i>		Type «solid»	38	A huile fluide et pression de gaz	63,5	<i>Câbles isolés avec d'autres matériaux</i>		Caoutchouc butyle	18	EPR	63,5	PVC	6	PE (HD et BD)	127	XLPE (non chargé)	127	XLPE (chargé)	63,5
Type de câble	U_o kV																							
<i>Câbles isolés au papier imprégné</i>																								
Type «solid»	38																							
A huile fluide et pression de gaz	63,5																							
<i>Câbles isolés avec d'autres matériaux</i>																								
Caoutchouc butyle	18																							
EPR	63,5																							
PVC	6																							
PE (HD et BD)	127																							
XLPE (non chargé)	127																							
XLPE (chargé)	63,5																							

**Tableau 4 – Coefficient d'absorption des rayons solaires
pour les surfaces de câbles suivantes**

Matériaux	σ
Bitume/jute	0,8
Polychloroprène	0,8
PVC	0,6
PE	0,4
Plomb	0,6

FINAL VERSION

VERSION FINALE

**Electric cables – Calculation of the current rating –
Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –
General**

**Câbles électriques – Calcul du courant admissible –
Partie 1-1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge
100 %) et calcul des pertes – Généralités**

CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 General	6
1.1 Scope.....	6
1.2 Normative references	6
1.3 Symbols	7
1.4 Permissible current rating of cables.....	10
2 Calculation of losses	13
2.1 AC resistance of conductor.....	13
2.2 Dielectric losses (applicable to a.c. cables only).....	16
2.3 Loss factor for sheath and screen (applicable to power frequency a.c. cables only).....	16
2.4 Loss factor for armour, reinforcement and steel pipes (applicable to power frequency a.c. cables only).....	25
Table 1 – Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used	30
Table 2 – Skin and proximity effects – Experimental values for the coefficients k_S and k_P	31
Table 3 – Values of relative permittivity and loss factors for the insulation of high-voltage and medium-voltage cables at power frequency	32
Table 4 – Absorption coefficient of solar radiation for cable surfaces	33

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING –

Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This Consolidated version of IEC 60287-1-1 bears the edition number 2.1. It consists of the second edition (2006-12) [documents 20/851/FDIS and 20/867/RVD] and its amendment 1 (2014-11) [documents 20/1499/FDIS and 20/1547/RVD]. The technical content is identical to the base edition and its amendment.

This Final version does not show where the technical content is modified by amendment 1. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.

This publication has been prepared for user convenience.

International Standard IEC 60287-1-1 has been prepared by IEC technical committee 20: Electric cables.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts of the IEC 60287 series, published under the general title: *Electric cables – Calculation of the current rating*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

This Part 1-1 contains formulae for the quantities R , W_d , λ_1 and λ_2 .

It contains methods for calculating the permissible current rating of cables from details of the permissible temperature rise, conductor resistance, losses and thermal resistivities.

Formulae for the calculation of losses are also given.

The formulae in this standard contain quantities which vary with cable design and materials used. The values given in the tables are either internationally agreed, for example, electrical resistivities and resistance temperature coefficients, or are those which are generally accepted in practice, for example, thermal resistivities and permittivities of materials. In this latter category, some of the values given are not characteristic of the quality of new cables but are considered to apply to cables after a long period of use. In order that uniform and comparable results may be obtained, the current ratings should be calculated with the values given in this standard. However, where it is known with certainty that other values are more appropriate to the materials and design, then these may be used, and the corresponding current rating declared in addition, provided that the different values are quoted.

Quantities related to the operating conditions of cables are liable to vary considerably from one country to another. For instance, with respect to the ambient temperature and soil thermal resistivity, the values are governed in various countries by different considerations. Superficial comparisons between the values used in the various countries may lead to erroneous conclusions if they are not based on common criteria: for example, there may be different expectations for the life of the cables, and in some countries design is based on maximum values of soil thermal resistivity, whereas in others average values are used. Particularly, in the case of soil thermal resistivity, it is well known that this quantity is very sensitive to soil moisture content and may vary significantly with time, depending on the soil type, the topographical and meteorological conditions, and the cable loading.

The following procedure for choosing the values for the various parameters should, therefore, be adopted.

Numerical values should preferably be based on results of suitable measurements. Often such results are already included in national specifications as recommended values, so that the calculation may be based on these values generally used in the country in question; a survey of such values is given in Part 3-1.

A suggested list of the information required to select the appropriate type of cable is given in Part 3-1.

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING –

Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General

1 General

1.1 Scope

This part of IEC 60287 is applicable to the conditions of steady-state operation of cables at all alternating voltages, and direct voltages up to 5 kV, buried directly in the ground, in ducts, troughs or in steel pipes, both with and without partial drying-out of the soil, as well as cables in air. The term "steady state" is intended to mean a continuous constant current (100 % load factor) just sufficient to produce asymptotically the maximum conductor temperature, the surrounding ambient conditions being assumed constant.

This part provides formulae for current ratings and losses.

The formulae given are essentially literal and designedly leave open the selection of certain important parameters. These may be divided into three groups:

- parameters related to construction of a cable (for example, thermal resistivity of insulating material) for which representative values have been selected based on published work;
- parameters related to the surrounding conditions, which may vary widely, the selection of which depends on the country in which the cables are used or are to be used;
- parameters which result from an agreement between manufacturer and user and which involve a margin for security of service (for example, maximum conductor temperature).

1.2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60027-3, *Letter symbols to be used in electrical technology – Part 3: Logarithmic and related quantities, and their units*

IEC 60028:1925, *International standard of resistance for copper*

IEC 60141 (all parts), *Tests on oil-filled and gas-pressure cables and their accessories*

IEC 60228, *Conductors of insulated cables*

IEC 60502-1, *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) and 3 kV ($U_m = 3,6$ kV)*

IEC 60502-2, *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*

IEC 60889, *Hard-drawn aluminium wire for overhead line conductors*

1.3 Symbols

The symbols used in this standard and the quantities which they represent are given in the following list:

A	cross-sectional area of the armour	mm^2
B_1 B_2	} coefficients (see 2.4.2)	
C	capacitance per core	F/m
D_e^*	external diameter of cable	m
D_i	diameter over insulation	mm
D_s	external diameter of metal sheath	mm
D_{oc}	the diameter of the imaginary coaxial cylinder which just touches the crests of a corrugated sheath	mm
D_{it}	the diameter of the imaginary cylinder which just touches the inside surface of the troughs of a corrugated sheath	mm
F	coefficient defined in 2.3.5	
H	intensity of solar radiation	W/m^2
H	magnetizing force (see 2.4.2)	ampere turns/m
H_s	inductance of sheath	H/m
H_1 H_2 H_3	} components of inductance due to the steel wires (see 2.4.2)	H/m
I	current in one conductor (r.m.s. value)	A
M N	} coefficients defined in 2.3.5	
P Q	} coefficients defined in 2.3.3	Ω/m
R	alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature	Ω/m
R_A	a.c. resistance of armour at its maximum operating temperature	Ω/m
R_{A0}	a.c. resistance of armour at 20 °C	Ω/m
R_e	equivalent a.c. resistance of sheath and armour in parallel	Ω/m
R_s	a.c. resistance of cable sheath or screen at their maximum operating temperature	Ω/m
R_{s0}	a.c. resistance of cable sheath or screen at 20 °C	Ω/m
R'	d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature	Ω/m
R_0	d.c. resistance of conductor at 20 °C	Ω/m
T_1	thermal resistance per core between conductor and sheath	K.m/W
T_2	thermal resistance between sheath and armour	K.m/W
T_3	thermal resistance of external serving	K.m/W
T_4	thermal resistance of surrounding medium (ratio of cable surface temperature rise above ambient to the losses per unit length)	K.m/W

T_4^*	external thermal resistance in free air, adjusted for solar radiation	K.m/W
U_0	voltage between conductor and screen or sheath	V
W_A	losses in armour per unit length	W/m
W_c	losses in conductor per unit length	W/m
W_d	dielectric losses per unit length per phase	W/m
W_s	losses dissipated in sheath per unit length	W/m
$W_{(s+A)}$	total losses in sheath and armour per unit length	W/m
X	reactance of sheath (two-core cables and three-core cables in trefoil)	Ω /m
X_1	reactance of sheath (cables in flat formation)	Ω /m
X_m	mutual reactance between the sheath of one cable and the conductors of the other two when cables are in flat information	Ω /m
a	shortest minor length in a cross-bonded electrical section having unequal minor lengths	
c	distance between the axes of conductors and the axis of the cable for three-core cables ($= 0,55 r_1 + 0,29 t$ for sector-shaped conductors)	mm
d	mean diameter of sheath or screen	mm
d'	mean diameter of sheath and reinforcement	mm
d_2	mean diameter of reinforcement	mm
d_A	mean diameter of armour	mm
d_c	external diameter of conductor	mm
d'_c	external diameter of equivalent round solid conductor having the same central duct as a hollow conductor	mm
d_d	internal diameter of pipe	mm
d_f	diameter of a steel wire	mm
d_i	internal diameter of hollow conductor	mm
d_M	major diameter of screen or sheath of an oval conductor	mm
d_m	minor diameter of screen or sheath of an oval conductor	mm
d_x	diameter of an equivalent circular conductor having the same cross-sectional area and degree of compactness as the shaped one	mm
f	system frequency	Hz
g_s	coefficient used in 2.3.6.1	
k	factor used in the calculation of hysteresis losses in armour or reinforcement (see 2.4.2.4)	
k_p	factor used in calculating x_p (proximity effect)	
k_s	factor used in calculating x_s (skin effect)	
l	length of a cable section (general symbol, see 2.3 and 2.3.4)	m
$\ln$	natural logarithm (logarithm to base e, see IEC 60027-3)	
m	$\frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$	
n	number of conductors in a cable	
n_1	number of steel wires in a cable (see 2.4.2)	
p	length of lay of a steel wire along a cable (see 2.4.2)	
$\left. \begin{matrix} p \\ q \end{matrix} \right\}$	coefficients used in 2.3.6.2	
r_1	circumscribing radius of two- or three-sector shaped conductors	mm

s	axial separation of conductors	mm
s_1	axial separation of two adjacent cables in a horizontal group of three, not touching	mm
s_2	axial separation of cables (see 2.4.2)	mm
t	insulation thickness between conductors	mm
t_3	thickness of the serving	mm
t_s	thickness of the sheath	mm
ν	ratio of the thermal resistivities of dry and moist soils ($\nu = \rho_d/\rho_w$)	
x_p	argument of a Bessel function used to calculate proximity effect	
x_s	argument of a Bessel function used to calculate skin effect	
y_p	proximity effect factor	} (see 2.1)
y_s	skin effect factor	
α_{20}	temperature coefficient of electrical resistivity at 20 °C, per kelvin	I/K
β	angle between axis of armour wires and axis of cable (see 2.4.2)	
β_1	coefficient used in 2.3.6.1	
γ	angular time delay (see 2.4.2)	
Δ_1	} coefficients used in 2.3.6.1	
Δ_2		
δ	equivalent thickness of armour or reinforcement	mm
$\tan \delta$	loss factor of insulation	
ε	relative permittivity of insulation	
θ	maximum operating temperature of conductor	°C
θ_a	ambient temperature	°C
θ_{ar}	maximum operating temperature of armour	°C
θ_{sc}	maximum operating temperature of cable screen or sheath	°C
θ_x	critical temperature of soil; this is the temperature of the boundary between dry and moist zones	°C
$\Delta\theta$	permissible temperature rise of conductor above ambient temperature	K
$\Delta\theta_x$	critical temperature rise of soil; this is the temperature rise of the boundary between dry and moist zones above the ambient temperature of the soil	K
λ_0	coefficient used in 2.3.6.1	
λ_1, λ_2	ratio of the total losses in metallic sheaths and armour respectively to the total conductor losses (or losses in one sheath or armour to the losses in one conductor)	
λ'_1	ratio of the losses in one sheath caused by circulating currents in the sheath to the losses in one conductor	
λ''_1	ratio of the losses in one sheath caused by eddy currents to the losses in one conductor	
λ'_{1m}	loss factor for the middle cable	} Three cables in flat formation without transposition, with sheaths bonded at both ends
λ'_{11}	loss factor for the outer cable with the greater losses	
λ'_{12}	loss factor for the outer cable with the least losses	

μ	relative magnetic permeability of armour material	
μ_e	longitudinal relative permeability	
μ_t	transverse relative permeability	
ρ	conductor resistivity at 20 °C	$\Omega \cdot m$
ρ_d	thermal resistivity of dry soil	K.m/W
ρ_w	thermal resistivity of moist soil	K.m/W
ρ_s	sheath resistivity at 20 °C	$\Omega \cdot m$
σ	absorption coefficient of solar radiation for the cable surface	
ω	angular frequency of system ($2\pi f$)	

1.4 Permissible current rating of cables

When the permissible current rating is being calculated under conditions of partial drying out of the soil, it is also necessary to calculate a rating for conditions where drying out of the soil does not occur. The lower of the two ratings shall be used.

1.4.1 Buried cables where drying out of the soil does not occur or cables in air

1.4.1.1 AC cables

The permissible current rating of an a.c. cable can be derived from the expression for the temperature rise above ambient temperature:

$$\Delta\theta = (I^2R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2R (1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4)$$

where

I is the current flowing in one conductor (A);

$\Delta\theta$ is the conductor temperature rise above the ambient temperature (K);

NOTE The ambient temperature is the temperature of the surrounding medium under normal conditions, at a situation in which cables are installed, or are to be installed, including the effect of any local source of heat, but not the increase of temperature in the immediate neighbourhood of the cables due to heat arising therefrom.

R is the alternating current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (Ω/m);

W_d is the dielectric loss per unit length for the insulation surrounding the conductor (W/m);

T_1 is the thermal resistance per unit length between one conductor and the sheath (K.m/W);

T_2 is the thermal resistance per unit length of the bedding between sheath and armour (K.m/W);

T_3 is the thermal resistance per unit length of the external serving of the cable (K.m/W);

T_4 is the thermal resistance per unit length between the cable surface and the surrounding medium, as derived from 2.2 of Part 2 (K.m/W);

n is the number of load-carrying conductors in the cable (conductors of equal size and carrying the same load);

λ_1 is the ratio of losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable;

λ_2 is the ratio of losses in the armouring to total losses in all conductors in that cable.

The permissible current rating is obtained from the above formula as follows:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

Where the cable is exposed to direct solar radiation, the formulae given in 2.2.1.2 of Part 2 shall be used.

The current rating for a four-core low-voltage cable may be taken to be equal to the current rating of a three-core cable for the same voltage and conductor size having the same construction, provided that the cable is to be used in a three-phase system where the fourth conductor is either a neutral conductor or a protective conductor. When it is a neutral conductor, the current rating applies to a balanced load.

1.4.1.2 DC cables up to 5 kV

The permissible current rating of a d.c. cable is obtained from the following simplification of the a.c. formula:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

where

R' is the direct current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (Ω/m).

Where the cable is exposed to direct solar radiation, the formulae given in 2.2.1.2 of Part 2 shall be used.

1.4.2 Buried cables where partial drying-out of the soil occurs

1.4.2.1 AC cables

The following method shall be applied to a single isolated cable or circuit only, laid at conventional depths. The method is based on a simple two-zone approximate physical model of the soil where the zone adjacent to the cable is dried out whilst the other zone retains the site's thermal resistivity, the zone boundary being on isotherm ¹⁾. This method is considered to be appropriate for those applications in which soil behaviour is considered in simple terms only.

NOTE Installations of more than one circuit as well as the necessary spacing between circuits are under consideration.

Changes in external thermal resistance, consequent to the formation of a dry zone around a single isolated cable or circuit, shall be obtained from the following formula (compared with the formula of 1.4.1.1):

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + \nu T_4)] + (\nu - 1) \Delta\theta_x}{R [T_1 + n (1 + \lambda_1) T_2 + n (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + \nu T_4)]} \right]^{0,5}$$

where

ν is the ratio of the thermal resistivities of the dry and moist soil zones ($\nu = \rho_d/\rho_w$);

R is the a.c. resistance of the conductor at its maximum operating temperature (Ω/m);

¹⁾ "Current ratings of cables buried in partially dried-out soil, Part 1": *Electra* No. 104, p. 11, January 1966 (in particular section 3 and Appendix 1).

- ρ_d is the thermal resistivity of the dry soil (K.m/W);
- ρ_w is the thermal resistivity of the moist soil (K.m/W);
- θ_x is the critical temperature of the soil and temperature of the boundary between dry and moist zones (°C);
- θ_a is the ambient temperature (°C);
- $\Delta\theta_x$ is the critical temperature rise of the soil. This is the temperature rise of the boundary between the dry and moist zones above the ambient temperature of the soil ($\theta_x - \theta_a$) (K);

NOTE T_4 is calculated using the thermal resistivity of the moist soil (ρ_w) using 2.2.3.2 of Part 2. Mutual heating by modification of the temperature rise as in 2.2.3.1 of Part 2 cannot be applied.

θ_x and ρ_d shall be determined from a knowledge of the soil conditions.

NOTE The choice of suitable soil parameters is under consideration. In the meantime, values may be agreed between manufacturer and purchaser.

1.4.2.2 DC cables up to 5 kV

The permissible current rating of a d.c. cable is obtained from the following simplification of the a.c. formula:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta + (v - 1) \Delta\theta_x}{R' [T_1 + nT_2 + n(T_3 + vT_4)]} \right]^{0.5}$$

where

R' is the direct current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (Ω/m).

1.4.3 Buried cables where drying-out of the soil is to be avoided

1.4.3.1 AC cables

Where it is desired that moisture migration be avoided by limiting the temperature rise of the cable surface to not more than $\Delta\theta_x$, the corresponding rating shall be obtained from:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x - nW_dT_4}{nRT_4(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0.5}$$

However, depending on the value of $\Delta\theta_x$ this may result in a conductor temperature which exceeds the maximum permissible value. The current rating used shall be the lower of the two values obtained, either from the above equation or from 1.4.1.1.

The conductor resistance R shall be calculated for the appropriate conductor temperature, which may be less than the maximum permitted value. An estimate of the operating temperature shall be made and, if necessary, subsequently amended.

NOTE For four-core low-voltage cables, see the final paragraph in 1.4.1.1.

1.4.3.2 DC cables up to 5 kV

The permissible current rating of a d.c. cable shall be obtained from the following simplification of the a.c. formula:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x}{nR' T_4} \right]^{0,5}$$

The conductor resistance R' shall be modified as in 1.4.2.2.

1.4.4 Cables directly exposed to solar radiation

Permissible current ratings

Taking into account the effect of solar radiation on a cable, the permissible current rating is given by the formulae:

1.4.4.1 AC cables

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \left[0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4^*) \right] - \sigma D_e^* H T_4^*}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5}$$

1.4.4.2 DC cables up to 5 kV

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \sigma D_e^* H T_4^*}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5}$$

where

- σ is the absorption coefficient of solar radiation for the cable surface (see Table 4);
- H is the intensity of solar radiation which should be taken as 10^3 W/m^2 for most latitudes; it is recommended that the local value should be obtained where possible;
- T_4^* is the external thermal resistance of the cable in free air, adjusted to take account of solar radiation (see part 2) (K.m/W);
- D_e^* is the external diameter of cable (m) for corrugated sheaths $D_e^* = (d_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$;
- t_3 is the thickness of the serving (mm).

2 Calculation of losses

2.1 AC resistance of conductor

The a.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum operating temperature is given by the following formula, except in the case of pipe-type cables (see 2.1.5):

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

where

- R is the current resistance of conductor at maximum operating temperature (Ω/m);
- R' is the d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature (Ω/m);
- y_s is the skin effect factor;
- y_p is the proximity effect factor.

2.1.1 DC resistance of conductor

The d.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum operating temperature θ is given by:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

where

R_0 is the d.c. resistance of the conductor at 20 °C (Ω/m);

The value of R_0 shall be derived directly from IEC 60228. Where the conductor size is outside the range covered by IEC 60228, the value of R_0 may be chosen by agreement between manufacturer and purchaser. The conductor resistance should then be calculated using the values of resistivity given in Table 1.

α_{20} is the constant mass temperature coefficient at 20 °C per kelvin (see Table 1 for standard values);

θ is the maximum operating temperature in degrees Celsius (this will be determined by the type of insulation to be used); see appropriate IEC specification or national standard.

2.1.2 Skin effect factor y_s

The skin effect factor y_s is given by the following equations:

$$\text{For } 0 < x_s \leq 2,8 \quad y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4}$$

$$\text{For } 2,8 < x_s \leq 3,8 \quad y_s = -0,136 - 0,017 7x_s + 0,056 3x_s^2$$

$$\text{For } x_s > 3,8 \quad y_s = 0,354x_s - 0,733$$

where

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

f is the supply frequency in hertz.

Values for k_s are given in Table 2.

In the absence of alternative formulae, it is recommended that the above formula should be used for sector and oval-shaped conductors.

2.1.3 Proximity effect factor y_p for two-core cables and for two single-core cables

The proximity effect factor is given by:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times 2,9$$

where

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c is the diameter of conductor (mm);

s is the distance between conductor axes (mm).

Values for k_p are given in Table 2.

Values for k_p are given in Table 2.

The above formula is accurate providing x_p does not exceed 2,8, and therefore applies to the majority of practical cases.

2.1.4 Proximity effect factor y_p for three-core cables and for three single-core cables

2.1.4.1 Circular conductor cables

The proximity effect factor is given by:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} + 0,27} \right]$$

where

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c is the diameter of conductor (mm);

s is the distance between conductor axes (mm).

NOTE For cables in flat formation, s is the spacing between adjacent phases. Where the spacing between adjacent phases is not equal, the distance will be taken as $s = \sqrt{s_1 \times s_2}$.

Values for k_p are given in Table 2.

The above formula is accurate provided x_p does not exceed 2,8, and therefore applies to the majority of practical cases.

2.1.4.2 Shaped conductor cables

In the case of multicore cables with shaped conductors, the value of y_p shall be two-thirds of the value calculated according to 2.1.4.1,

with:

$d_c = d_x$ = diameter of an equivalent circular conductor of the same cross-sectional area, and degree of compaction (mm);

$s = (d_x + t)$ (mm),

where

t is the thickness of insulation between conductors (mm).

Values for k_p are given in Table 2.

The above formula is accurate provided x_p does not exceed 2,8, and therefore applies to the majority of practical cases.

2.1.5 Skin and proximity effects in pipe-type cables

For pipe-type cables, the skin and proximity effects calculated according to 2.1.2, 2.1.3 and 2.1.4 shall be increased by a factor of 1,5. For these cables,

$$R = R' [1 + 1,5(y_s + y_p)] \quad (\Omega/m)$$

2.2 Dielectric losses (applicable to a.c. cables only)

The dielectric loss is voltage dependent and thus only becomes important at voltage levels related to the insulation material being used. Table 3 gives, for the insulation materials in common use, the value of U_0 at which the dielectric loss should be taken into account where three-core screened or single-core cables are used. It is not necessary to calculate the dielectric loss for unscreened multicore or d.c. cables.

The dielectric loss per unit length in each phase is given by:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (\text{W/m})$$

where

$\omega = 2\pi f$;

C is the capacitance per unit length (F/m);

U_0 is the voltage to earth (V).

Values of $\tan \delta$, the loss factor of the insulation at power frequency and operating temperature, are given in Table 3.

The *capacitance* for circular conductors is given by:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} 10^{-9} \quad (\text{F/m})$$

where

ε is the relative permittivity of the insulation;

D_i is the external diameter of the insulation (excluding screen) (mm);

d_c is the diameter of conductor, including screen, if any (mm).

The same formula can be used for oval conductors if the geometric mean of the appropriate major and minor diameters is substituted for D_i and d_c .

Values of ε are given in Table 3.

2.3 Loss factor for sheath and screen (applicable to power frequency a.c. cables only)

The power loss in the sheath or screen (λ_1) consists of losses caused by circulating currents (λ'_1) and eddy currents (λ''_1),

thus:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

The formulae given in this section express the loss in terms of the total power loss in the conductor(s) and for each particular case it is indicated which type of loss has to be considered. The formulae for single-core cables apply to single circuits only and the effects of earth return paths are neglected. Methods are given for both smooth-sided and corrugated sheaths.

For single-core cables with sheaths bonded at both ends of an electrical section, only the loss due to circulating currents in the sheaths need be considered (see 2.3.1, 2.3.2 and 2.3.3). An electrical section is defined as a portion of the route between points at which the sheaths or screens of all cables are solidly bonded.

An allowance has usually also to be made for increased spacing at certain points on the route (see 2.3.4).

For cables with Milliken conductors, the loss factor should be increased to take account of the loss due to eddy currents in the sheaths (see 2.3.5).

For a cross-bonded installation, it is considered unrealistic to assume that minor sections are electrically identical and that the loss due to circulating currents in the sheaths is negligible. Recommendations are made in 2.3.6 for augmenting the losses in the sheaths to take account of this electrical unbalance.

The electrical resistivities and temperature coefficients of lead and aluminium, for use in calculating the resistance of the sheath R_s are given in Table 1.

The formulae given in this subclause use the resistance of the sheath or screen at its maximum operating temperature. The maximum operating temperature of the sheath or screen is given by:

$$\theta_{sc} = \theta - (I^2 R + 0,5 W_d) T_1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

where

θ_{sc} is the maximum operating temperature of the cable screen or sheath ($^\circ\text{C}$).

Because the temperature of the sheath or screen is a function of the current, I , an iterative method is used for the calculation.

The resistance of the sheath or screen at its maximum operating temperature is given by:

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)] \text{ (}\Omega/\text{m)}$$

where

R_{s0} is the resistance of the cable sheath or screen at 20 $^\circ\text{C}$ (Ω/m).

2.3.1 Two single-core cables, and three single-core cables (in trefoil formation), sheaths bonded at both ends of an electrical section

For two single-core cables, and three single-core cables (in trefoil formation) with sheaths bonded at both ends, the loss factor is given by:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

where

R_s is the resistance of sheath or screen per unit length of cable at its maximum operating temperature (Ω/m);

X is the reactance per unit length of sheath or screen per unit length of cable (Ω/m)

$$= 2 \omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

$\omega = 2 \pi \times \text{frequency (1/s)}$;

s is the distance between conductor axes in the electrical section being considered (mm);

d is the mean diameter of the sheath (mm);

– for oval-shaped cores, d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$;

where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively of the sheath

– for corrugated sheaths, d is given by $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$;

$\lambda_1'' = 0$, i.e. eddy-current loss is ignored, except for cables having Milliken conductors when

λ_1'' is calculated by the method given in 2.3.5.

2.3.2 Three single-core cables in flat formation, with regular transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section

For three single-core cables in flat formation, with the middle cable equidistant from the outer cables, regular transposition of the cables and the sheaths bonded at every third transposition, the loss factor is given by:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1} \right)^2}$$

where

X_1 is the reactance per unit length of sheath (Ω/m)

$$= X_1 = 2\omega 10^{-7} \ln \left\{ 2\sqrt[3]{2} \left(\frac{s}{d} \right) \right\}$$

$\lambda_1'' = 0$, i.e. eddy-current loss is ignored, except for cables having Milliken conductors when λ_1'' is calculated by the method given in 2.3.5.

2.3.3 Three single-core cables in flat formation, without transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section

For three single-core cables in flat formation, with the middle cable equidistant from the outer cables, without transposition and with the sheaths bonded at both ends of an electrical section, the loss factor for the cable which has the greatest loss (i.e. the outer cable carrying the lagging phase) is given by:

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75 P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25 Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

For the other outer cable, the loss factor is given by:

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75 P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25 Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

For the middle cable, the loss factor is given by:

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

In these formulae:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

where

X is the reactance of sheath or screen per unit length of cable for two adjacent single-core cables (Ω/m)

$$= 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

X_m is the mutual reactance per unit length of cable between the sheath of an outer cable and the conductors of the other two, when the cables are in flat formation (Ω/m)

$$= 2 \times 10^{-7} \ln (2) (\Omega/\text{m});$$

$\lambda''_1 = 0$, i.e. eddy-current loss is ignored, except for cables having Milliken conductors when λ''_1 is calculated by the method given in 2.3.5.

Ratings for cables in air should be based on the first formula given above, i.e. the loss for the outer cable carrying the lagging phase.

2.3.4 Variation of spacing of single-core cables between sheath bonding points

For single-core cable circuits with sheaths solidly bonded at both ends and possibly at intermediate points, the circulating currents and the consequent loss increase as the spacing increases, and it is advisable to use as close a spacing as possible. The optimum spacing is achieved by considering both losses and mutual heating between cables.

It is not always possible to install cables with one value of spacing all along a route. The following recommendations relate to the calculation of sheath circulating current losses when it is not possible to install cables with a constant value of spacing over the length of one electrical section. A section is defined as a portion of the route between points at which sheaths of all cables are solidly bonded. The recommendations below give values for loss factors which apply to the whole of a section, but it should be noted that the appropriate values of conductor resistance and external thermal resistance must be calculated on the basis of the closest cable spacing at any place along the section.

- a) Where spacing along a section is not constant but the various values are known, the value for X in 2.3.1, 2.3.2 and 2.3.3 shall be derived from:

$$X = \frac{l_a X_a + l_b X_b + \dots + l_n X_n}{l_a + l_b + \dots + l_n}$$

where

$l_a, l_b, \dots, l_n$ are lengths with different spacings along an electrical section;

$X_a, X_b \dots X_n$ are the reactances per unit length of cable, the relevant formulae being given in 2.3.1, 2.3.2 or 2.3.3 where appropriate values of spacings $s_a, s_b \dots s_n$ are used.

- b) Where in any section the spacing between cables and its variation along the route are not known and cannot be anticipated, the losses in that section, calculated from the design spacing, shall be arbitrarily increased by 25 %, this value having been found to be appropriate for lead-sheathed H.V. cables. A different increase may be used by agreement if it is considered that 25 % is not appropriate to a particular installation.
- c) Where the section includes a spread-out end, the allowance in b) may not be sufficient and it is recommended that an estimate of the probable spacing be made and the loss calculated by the procedure given in a) above.

NOTE This increase does not apply to installations with single-point bonding or cross-bonding (see 2.3.6).

2.3.5 Effect of Milliken conductors

Where the conductors are subject to a reduced proximity effect, as with Milliken conductors, the sheath loss factor λ_1'' of 2.3.1, 2.3.2 and 2.3.3 cannot be ignored, but shall be obtained by multiplying the value of λ_1'' , obtained from 2.3.6 for the same cable configuration, by the factor F given by the formula:

$$F = \frac{4 M^2 N^2 + (M + N)^2}{4 (M^2 + 1) (N^2 + 1)}$$

where

$M = N = \frac{R_s}{X}$ for cables in trefoil formation

and

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{R_s}{X + X_m} \\ N &= \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}} \end{aligned} \right\} \text{ for cables in flat formation with equidistant spacing.}$$

Where the spacing along a section is not constant the value of X shall be calculated as in 2.3.4 a).

2.3.6 Single-core cables, with sheaths bonded at a single point or cross-bonded

2.3.6.1 Eddy-current losses

For single-core cables with sheaths bonded at a single point or cross-bonded the eddy-current loss factor is given by:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

where

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \pi \omega}{10^7 \rho_s}}$$

ρ_s is the electrical resistivity of sheath material at operating temperature (see Table 1) ($\Omega \cdot m$);

D_s is the external diameter of cable sheath (mm);

NOTE For corrugated sheaths, the mean outside diameter $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$ shall be used.

t_s is the thickness of sheath (mm);

$\omega = 2\pi f$;

NOTE 1 For lead-sheathed cables, g_s can be taken as unity and $\frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}}$ can be neglected.

NOTE 2 For aluminium sheathed cables, both terms may need to be evaluated when sheath diameter is greater than about 70 mm or the sheath is thicker than usual.

NOTE 3 For cables with a wire screen and an equalising tape, or foil screen over the wires, the eddy-current losses are considered negligible.

Formulae for λ_0 , Δ_1 and Δ_2 are given below:

(in which: $m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$, for $m \leq 0,1$, Δ_1 and Δ_2 can be neglected)

1) Three single-core cables in trefoil formation:

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = (1,14 m^{2,45} + 0,33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,92 m + 1,66)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

2) Three single-core cables, flat formation:

a) centre cable:

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 0,86 m^{3,08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,4 m + 0,7)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

b) outer cable leading phase:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 4,7 m^{0,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,16 m + 2)}$$

$$\Delta_2 = 21 m^{3,3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,47 m + 5,06)}$$

c) outer cable lagging phase:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = - \frac{0,74 (m+2) m^{0,5}}{2 + (m-0,3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+1)}$$

$$\Delta_2 = 0,92 m^{3,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+2)}$$

2.3.6.2 Circulating current losses

The circulating current loss is zero for installations where the sheaths are single-point bonded, and for installations where the sheaths are cross-bonded and each major section is divided into three electrically identical minor sections.

Where a cross-bonded installation contains sections whose unbalance is not negligible, a residual voltage is produced which results in a circulating current loss in that section which must be taken into account.

For installations where the actual lengths of the minor sections are known, the loss factor λ'_1 can be calculated by multiplying the circulating current loss factor for the cable configuration concerned, calculated as if it were bonded and earthed at both ends of each major section without cross-bonding by:

$$\frac{p^2 + q^2 + 1 - p - pq - q}{(p + q + 1)^2}$$

Where in any major section, the two longer minor sections are p and q times the length of the shortest minor section (i.e. the minor section lengths are a , pa and qa , where the shortest section is a).

This formula deals only with differences in the length of minor sections.

Any variations in spacing must also be taken into account.

Where lengths of the minor sections are not known, p should be set to 1 and q to 1,2, this gives a value of 0,004.

2.3.7 Two-core unarmoured cables with common sheath

For a two-core unarmoured cable where the cores are contained in a common metallic sheath, λ'_1 is negligible and the loss factor is given by one of the following formulae:

– for round or oval conductors:

$$\lambda''_1 = \frac{16 \omega^2 10^{-14}}{R R_s} \left(\frac{c}{d} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right]$$

– for sector-shaped conductors:

$$\lambda''_1 = \frac{10,8 \omega^2 10^{-16}}{R R_s} \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \left[12,2 + \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \right]$$

where

$$\omega = 2\pi f;$$

f is the frequency (Hz);

c is the distance between the axis of one conductor and the axis of the cable (mm);

r_1 is the radius of the circle circumscribing the two sector-shaped conductors (mm);

d is the mean diameter of the sheath (mm);

- for oval-shaped cores, d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively;
- for corrugated sheaths, d is given by $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

2.3.8 Three-core unarmoured cables with common sheath

For a three-core unarmoured cable where the cores are contained in a common metallic sheath, λ_1' is negligible and the loss factor is, therefore, given by one of the following formulae:

- for round or oval conductors, and where the sheath resistance R_s is less than or equal to $100 \mu\Omega/\text{m}$:

$$\lambda_1'' = \frac{3 R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} \right]$$

- for round or oval conductors, and where the sheath resistance R_s is greater than $100 \mu\Omega/\text{m}$:

$$\lambda_1'' = \frac{3,2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-14}$$

- for sector-shaped conductors, and R_s any value:

$$\lambda_1'' = 0,94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2}$$

where

r_1 is the radius of the circle circumscribing the three shaped conductors (mm);

t is the thickness of insulation between conductors (mm);

d is the mean diameter of the sheath (mm);

- for oval-shaped cores, d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively of the sheath or screen;
- for corrugated sheaths, d is given by $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

2.3.9 Two-core and three-core cables with steel tape armour

The addition of steel tape armour increases the eddy-current loss in the sheath. The values for λ_1'' given in 2.3.7 and 2.3.8 should be multiplied by the following factor if the cable has steel-tape armour:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}} \right]^2$$

where

d_A is the mean diameter of armour (mm);

μ is the relative permeability of the steel tape (usually taken as 300);

δ is the equivalent thickness of armour = $\frac{A}{\pi d_A}$ (mm);

where A is the cross-sectional area of the armour (mm²).

This correction is only known to be applicable to tapes 0,3 mm to 1,0 mm thick.

2.3.10 Cables with each core in a separate lead sheath (SL type) and armoured

For a three-core cable of which each core has a separate lead sheath λ_1'' is zero and the loss factor for the sheaths is given by:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

where

$$X = 2 \omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

s is the distance between conductor axes (mm).

The loss factor for unarmoured cables with each core in a separate lead sheath is obtained from 2.3.1.

2.3.11 Losses in screen and sheaths of pipe-type cables

If each conductor of a pipe-type cable has a screen only over the insulation, for example a lead sheath or copper tape, the ratio of the screen loss to the conductor loss may be calculated by the formula given in 2.3.1 for the sheath of a single-core cable, provided that the formula is corrected for the additional loss caused by the presence of the steel pipe.

This modifies the formula to:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

If each core has a diaphragm sheath and non-magnetic reinforcement, the same formula is used, but the resistance R_s is replaced by the parallel combination of the resistance of the sheath and reinforcement. The diameter d is replaced by the value d' :

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}}$$

where

d' is the mean diameter of sheath and reinforcement (mm);

d is the mean diameter of screen or sheath (mm);

d_2 is the mean diameter of reinforcement (mm).

In the case of oval-shaped cores d and d_2 is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively of the sheath or screen.

NOTE See also 2.4.2.

2.4 Loss factor for armour, reinforcement and steel pipes (applicable to power frequency a.c. cables only)

The formulae given in this subclause express the power loss occurring in metallic armour, reinforcement or steel pipes of a cable in terms of an increment λ_2 of the power loss in all conductors.

Appropriate values of electrical resistivity and resistance temperature coefficients for the materials used for armour and reinforcement are given in Table 1.

The formulae given in this subclause use the resistance of the armour at its maximum operating temperature. The maximum operating temperature of the armour is given by:

$$\theta_{ar} = \theta - \left\{ \left(I^2 R + 0,5 W_d \right) T_1 + \left[I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] n T_2 \right\} \quad (^\circ\text{C})$$

where

θ_{ar} is the maximum operating temperature of armour ($^\circ\text{C}$).

Because the temperature of the armour is a function of the current, I , an iterative method is used for the calculation.

The resistance of the armour at its maximum operating temperature is given by:

$$R_A = R_{A0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{ar} - 20)] \quad (\Omega/\text{m})$$

where

R_{A0} is the resistance of the armour at 20°C (Ω/m).

Where the equivalent resistance of sheath and armour in parallel is used, it is sufficiently accurate to assume that both components are at the operating temperature of the armour and to use an average value for the temperature coefficient of the materials.

2.4.1 Non-magnetic armour or reinforcement

The general procedure is to combine the calculation of the loss in the reinforcement with that of the sheath. The formulae are given in 2.3 and the parallel combination of sheath and reinforcement resistance is used in place of the single sheath resistance R_s . The root mean square value of the sheath and reinforcement diameter replaces the mean sheath diameter d (see 2.3.11). This procedure applies to both single, twin and multicore cables.

The value of the reinforcement resistance is dependent on the lay of the tapes as follows:

- If the tapes have a very long lay (longitudinal tapes), the resistance is based on a cylinder having the same mass of material per unit length of cable and also the same internal diameter as the tapes.
- If the tapes are wound at approximately 54° to the cable axis, the resistance is twice the value calculated according to item a) above.

- c) If the tapes are wound with a very short lay (circumferential tapes), the resistance is regarded as infinite, i.e. the loss can be neglected.
- d) If there are two or more layers of tapes in contact with each other, having a very short lay, the resistance is twice the value calculated according to item a) above.

These considerations apply also to the cores of pipe-type cables dealt with in 2.3.11.

2.4.2 Magnetic armour or reinforcement

2.4.2.1 Single-core lead-sheathed cables – steel wire armour, bonded to sheath at both ends

The following method does not take into account the possible influence of the surrounding media, which may be appreciable in particular for cables laid under water. The method is intended for installations where spacing between cables is large (i.e. 10 m or more). It gives values for the sheath and armour losses that are usually higher than the actual ones, so that ratings are on the safe side. It should be noted that the hottest part of the cable route may be the on-shore section where both the losses and mutual heating may be high.

Where the influence of the surrounding media can be ignored, e.g. in air, the method may be used for any spacing between cables.

Calculation of the power loss in the lead sheath and armour of single-core cables with steel-wire armour with the sheath and armour bonded together at both ends is as follows:

- a) The equivalent resistance of sheath and armour in parallel is given by:

$$R_e = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} \quad (\Omega/\text{m})$$

where

R_s is the resistance of sheath per unit length of cable at its maximum operating temperature (Ω/m);

R_A is the resistance a.c. resistance of armour per unit length at its maximum operating temperature (Ω/m).

The a.c. resistance of armour wire varies from about 1,2 times the d.c. resistance of 2 mm diameter wires up to 1,4 times the d.c. resistance for 5 mm wires. The resistance does not critically affect the final result.

- b) The inductance of the elements of the circuit is calculated per phase, as follows:

$$H_s = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2s_2}{d} \right)$$

where H_s is the inductance due to the sheath (H/m)

$$H_1 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \cos \gamma$$

$$H_2 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \sin \gamma$$

$$H_3 = 0,4 \left(\mu_t \cos^2 \beta - 1 \right) \left(\frac{d_f}{d_A} \right) 10^{-6}$$

NOTE H_3 is taken as zero for spaced wires.

where

H_1 , H_2 and H_3 are the components of the inductance due to the steel wires (H/m);

s_2 is the axial spacing between adjacent cables in trefoil formation; for cables in flat formation s_2 is the geometric mean of the three spacings (mm);

d_A is the mean diameter of armour (mm);

d_f is the diameter of a steel wire (mm);

p is the length of lay of a steel wire along the cable (mm);

n_1 is the number of steel wires;

β is the angle between axis of armour wire and axis of cable;

γ is the angular time delay of the longitudinal magnetic flux in the steel wires behind the magnetizing force;

μ_e is the longitudinal relative permeability of steel wires;

μ_t is the transverse relative permeability of steel wires;

For values of γ , μ_e and μ_t , see item d).

Let $B_1 = \omega (H_s + H_1 + H_3)$ (Ω/m)

$B_2 = \omega H_2$ (Ω/m).

c) The total loss in sheath and armour $W_{(s+A)}$ is given by:

$$W_{(s+A)} = I^2 R_e \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \right) \text{ (W/m)}$$

The loss in sheath and armour may be assumed to be approximately equal, so that:

$$\lambda'_1 = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2 W_c}$$

where

$W_c = I^2 R$ loss in conductor (W/m).

d) Choice of magnetic properties γ , μ_e and μ_t .

These quantities vary with the particular sample of steel and unless reference can be made to measurements on the steel wire to be used, some average values must be assumed.

No appreciable error is involved if, for wires of diameters from 4 mm to 6 mm and tensile breaking strengths around 400 N/mm², the following values are assumed:

$\mu_e = 400$

$\mu_t = 10$, when wires are in contact

$\mu_t = 1$, where wires are separated

$\gamma = 45^\circ$

If a more precise calculation is required and the wire properties are known, then it is initially necessary to know an approximate value for the magnetizing force H in order to find the appropriate magnetic properties.

$$H = \frac{1\,000 \left| \bar{I} + \bar{I}_s \right|}{\pi d_A} \text{ (ampere turns/m)}$$

where $\bar{I}$ and $\bar{I}_s$ are the vectorial values of conductor current and sheath current. For the initial choice of magnetic properties it is usually satisfactory to assume that $|\bar{I} + \bar{I}_s| = 0,6 I$, and to repeat the calculations if it is subsequently established that the calculated value is significantly different.

2.4.2.2 Two-core cables – steel wire armour

$$\lambda_2 = \frac{0,62 \omega^2 10^{-14}}{R \cdot R_A} + \frac{3,82 A \omega 10^{-5}}{R} \left[\frac{1,48 r_1 + t}{d_A^2 + 95,7 A} \right]^2$$

where

R_A is the a.c. resistance of armour at maximum armour temperature (Ω/m);

d_A is the mean diameter of armour (mm);

A is the cross-sectional area of armour (mm^2);

r_1 is the circumscribing radius over conductors (mm);

t is the insulation thickness between conductors (mm).

No correction has been made for non-uniform current distribution in the conductors because it is considered negligible for conductor sizes up to 400 mm^2 .

2.4.2.3 Three-core cables – steel wire armour

2.4.2.3.1 Round conductor cable

$$\lambda_2 = 1,23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

where

R_A is the a.c. resistance of armour at maximum armour temperature (Ω/m);

d_A is the mean diameter of armour (mm);

c is the distance between the axis of a conductor and the cable centre (mm).

No correction has been made for non-uniform current distribution in the conductors because it is considered negligible for conductor sizes up to 400 mm^2 . This equation is under consideration because it may overestimate the armour loss factor for some cable designs.

2.4.2.3.2 Sector conductor cables

$$\lambda_2 = 0,358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

where

r_1 is the radius of the circle circumscribing the three shaped conductors (mm);

$\omega = 2\pi f$;

f is the frequency of supply (Hz).

2.4.2.4 Three-core cables – steel tape armour or reinforcement

The following formulae apply to tapes 0,3 mm to 1 mm thick.

The hysteresis loss is given for a frequency of 50 Hz by:

$$\lambda'_2 = \frac{s^2 k^2 10^{-7}}{R d_A \delta}$$

where

s is the distance between conductor axes (mm);

δ is the equivalent thickness of armour (mm)

i.e. $\frac{A}{\pi d_A}$

and

A is the armour cross-sectional area (mm²);

d_A is the mean diameter of armour (mm).

The factor k is given by:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}}$$

where

μ is the relative permeability of the steel tape, usually taken as 300.

For frequencies f other than 50 Hz, multiply the value of k given by the above formula by the factor $\frac{f}{50}$.

The eddy-current loss is given for a frequency of 50 Hz by:

$$\lambda''_2 = \frac{2,25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

and for any other frequency the value calculated from this formula must be multiplied by the factor $\left(\frac{f}{50}\right)^2$.

The total armour loss factor is given by the sum of both hysteresis and eddy-current losses, thus:

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2$$

NOTE Magnetic armour or reinforcement, if any, increase eddy-current losses in the sheaths. Reference should be made to 2.3.9.

2.4.2.5 SL type cables

Where the armour is over a SL type cable, the screening effect of the sheath currents reduces the armour loss. The formula for λ_2 given in 2.4.2.3.1 or 2.4.2.3.2 shall be multiplied by the factor

$$\left(1 - \frac{R}{R_s} \lambda'_1\right)$$

where λ'_1 is obtained from 2.3.1.

2.4.3 Losses in steel pipes

The loss in steel pipes is given by two empirical formulae, one for cables where the cores are bound in close trefoil formation and the other for cables where the cores are placed in a more open configuration (cradled) on the bottom of the pipe. Actual cores in service probably approximate to a configuration somewhere between the two. It is considered that the losses should be calculated for each configuration and a mean value used:

NOTE These formulae have been empirically obtained in the United States of America and at present apply only to pipe sizes and steel types used in that country.

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,011\,5\,s - 0,001\,485\,d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ for closely bound triangular configuration}$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,004\,38\,s + 0,002\,26\,d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ for the open or cradled formation}$$

where

s is the axial spacing of adjacent conductors (mm);

d_d is the internal diameter of pipe (mm);

R is the a.c. resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (Ω/m).

The formulae given apply to a frequency of 60 Hz. For 50 Hz, each formula should be multiplied by 0,76.

For pipe-type cables, where flat-wire armour is applied over all three cores after they are laid up, the losses are independent of the presence of the pipe. For such cables, the losses in the armour are to be calculated as for SL type cables (see 2.4.2.5 and the losses in the pipe are to be ignored).

Table 1 – Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used

Material	Resistivity (ρ) ohm · m at 20 °C	Temperature coefficient (α_{20}) per K at 20 °C
a) <i>Conductors</i>		
Copper	1,724 1 10^{-8}	3,93 10^{-3}
Aluminium	2,826 4 10^{-8}	4,03 10^{-3}
b) <i>Sheaths and armour</i>		
Lead or lead alloy	21,4 10^{-8}	4,0 10^{-3}
Steel	13,8 10^{-8}	4,5 10^{-3}
Bronze	3,5 10^{-8}	3,0 10^{-3}
Stainless steel	70 10^{-8}	Negligible
Aluminium	2,84 10^{-8}	4,03 10^{-3}
NOTE Values for copper conductors are taken from IEC 60028. Value for aluminium conductors are taken from IEC 60889.		

**Table 2 – Skin and proximity effects –
Experimental values for the coefficients k_s and k_p**

Type of conductor	Conductor insulation system	k_s	k_p
Copper			
Round, solid	All	1	1
Round, stranded	Fluid ^d /paper ^e /PPL ^f	1	0,8
Round, stranded	Extruded ^g /Mineral ^h	1	1
Round, Milliken ^c	Fluid/paper/PPL	0,435	0,37
Round, Milliken, insulated wires ^b	Extruded	0,35	0,20
Round, Milliken, bare uni-directional wires ^b ,	Extruded	0,62	0,37
Round, Milliken, bare bi-directional wires ^b ,	Extruded	0,80	0,37
Hollow, helical stranded	All	a	0,8
Sector-shaped	Fluid/paper/PPL	1	0,8
Sector-shaped	Extruded/Mineral	1	1
Aluminium			
Round, solid	All	1	1
Round, stranded	All	1	0,8
Round Milliken	All	0,25	0,15
Hollow, helical stranded	All	a	0,8
a The following formula should be used for k_s :			
$k_s = \left(\frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \right) \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$			
where			
d_i is the inside diameter of the conductor (central duct) (mm);			
d'_c is the outside diameter of the equivalent solid conductor having the same central duct (mm).			
b The coefficients for these designs can be influenced by the detail of the conductor design. Subject to agreement between the manufacturer and user measured values of ac resistance may be used. A common measurement method is under consideration. Cigre (TB272) discusses three measurement methods.			
c Milliken conductor:	stranded conductor comprising an assembly of shaped stranded conductors, with each segment lightly insulated from each other. The individual strands may be either insulated (e.g. enamelled or oxidised) or bare.		
d Fluid insulation:	insulation system consisting of lapped paper and an insulating fluid which is designed to maintain free movement of the fluid within the cable.		
e Paper insulation:	lapped insulation consisting of paper impregnated with an insulating material.		
f PPL insulation:	fluid filled cable where a polypropylene/paper laminate is used in place of lapped paper.		
g Extruded insulation:	insulation consisting generally of one layer of a polymeric material and applied by an extrusion process.		
h Mineral insulation:	insulation consisting of compressed mineral powder. Generally only used on specific types of LV cable.		
NOTE 1 The tabulated values of k_s and k_p for large stranded conductors have generally been derived from those given in Cigre Technical brochure Ref. N° 272, <i>Large cross-sections and composite screens design</i> .			
NOTE 2 The value of k_s given for round, Milliken, insulated wires is a limiting value intended to cover all methods of insulating the wires including enamelling, oxidized wires or other methods.			
NOTE 3 The value of k_s given for hollow helical stranded conductors is applicable to keystone conductors.			

Table 3 – Values of relative permittivity and loss factors for the insulation of high-voltage and medium-voltage cables at power frequency

1	2	3
Type of cable	ϵ	$\tan \delta^*$
<i>Cables insulated with impregnated paper</i>		
Solid type, fully-impregnated, pre-impregnated or mass-impregnated non-draining	4	0,01
Oil-filled, self-contained ^a up to $U_o = 36$ kV	3,6	0,003 5
up to $U_o = 87$ kV	3,6	0,003 3
up to $U_o = 160$ kV	3,5	0,003 0
up to $U_o = 220$ kV	3,5	0,002 8
Oil-pressure, pipe-type ^b	3,7	0,004 5
External gas-pressure ^c	3,6	0,004 0
Internal gas-pressure ^d	3,4	0,004 5
<i>Cable with other kinds of insulation</i>		
Butyl rubber	4	0,050
EPR ^e		
up to and including 18/30 (36) kV cables	3	0,020
greater than 18/30 (36) kV cables	3	0,005
PVC ^e	8	0,1
PE (HD and LD) ^e	2,3	0,001
XLPE ^e		
up to and including 18/30 (36) kV cables (unfilled)	2,5	0,004
greater than 18/30 (36) kV cables (unfilled)	2,5	0,001
greater than 18/30 (36) kV cables (filled)	3,0	0,005
PPL		
equal to, or greater than 63/110 kV cables	2,8	0,001 4

* Safe values at maximum permissible temperature, applicable to the highest voltages normally specified for each type of cable.

^a See IEC 60141-1.

^b See IEC 60141-4.

^c See IEC 60141-3.

^d See IEC 60141-2.

^e See IEC 60502-1 and IEC 60502-2.

NOTE The dielectric loss should be taken into account for values of U_o equal to or greater than the following:

Type of cable	U_o kV
<i>Cables insulated with impregnated paper</i>	
Solid-type	38
Oil-filled and gas-pressure	63,5
<i>Cables with other types of insulation</i>	
Butyl rubber	18
EPR	63,5
PVC	6
PE (HD and LD)	127
XLPE (unfilled)	127
XLPE (filled)	63,5

**Table 4 – Absorption coefficient of solar radiation
for cable surfaces**

Material	σ
Bitumen/jute serving	0,8
Polychloroprene	0,8
PVC	0,6
PE	0,4
Lead	0,6

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	35
INTRODUCTION	37
1 Généralités	38
1.1 Domaine d'application	38
1.2 Références normatives	38
1.3 Symboles	39
1.4 Evaluation de l'intensité admissible du courant dans les câbles	42
2 Calcul des pertes	45
2.1 Résistance de l'âme en courant alternatif	45
2.2 Pertes diélectriques (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif)	48
2.3 Facteur de pertes dans les gaines ou les écrans (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)	48
2.4 Facteur de pertes dans les armures, les frettages et les tuyaux d'acier (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)	57
Tableau 1 – Résistivités électriques et coefficients de variation de la résistivité avec la température des métaux utilisés	62
Tableau 2 – Effets de peau et de proximité – Valeurs expérimentales pour les coefficients k_s et k_p	63
Tableau 3 – Valeurs numériques de la permittivité relative et du facteur de pertes pour les isolants utilisés dans les câbles à haute tension et moyenne tension à fréquence industrielle	65
Tableau 4 – Coefficient d'absorption des rayons solaires pour les surfaces de câbles suivantes	66

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 1-1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Généralités

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

Cette version consolidée de l'IEC 60287-1-1 porte le numéro d'édition 2.1. Elle comprend la deuxième édition (2006-12) [documents 20/851/FDIS et 20/867/RVD] et son amendement 1 (2014-11) [documents 20/1499/FDIS et 20/1547/RVD]. Le contenu technique est identique à celui de l'édition de base et à son amendement.

Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par l'amendement 1. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.

Cette publication a été préparée par commodité pour l'utilisateur.

La Norme internationale IEC 60287-1-1 a été établie par le comité d'études 20 de l'IEC: Câbles électriques.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de l'IEC 60287, sous le titre général: *Câbles électriques – calcul du courant admissible*, est disponible sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTRODUCTION

La présente Partie 1-1 contient des formules relatives aux quantités R , W_d , λ_1 et λ_2 .

Elle contient des méthodes pour le calcul du courant admissible à partir des détails de l'accroissement admissible de la température de la résistance des conducteurs, des pertes et de la résistivité thermique.

Des formules pour le calcul des pertes s'y trouvent aussi.

Les formules de cette norme contiennent des paramètres variant avec la spécification du câble et les matériaux utilisés. Les valeurs données dans les tableaux sont soit approuvées internationalement, comme les résistivités électriques et la constante diélectrique des matériaux, ou bien généralement acceptées dans la pratique, comme les résistivités thermiques et les permittivités des matériaux. Certaines des valeurs de la dernière catégorie ne sont pas caractéristiques de la qualité des câbles neufs mais de celle des câbles ayant déjà subi une longue période d'utilisation. Dans le but d'obtenir des résultats comparables et reproductibles, les régimes permanents doivent être calculés avec les valeurs indiquées dans la présente norme. Toutefois, lorsqu'on sait avec certitude que d'autres valeurs sont plus appropriées aux matériaux et à leur mise en œuvre, ces dernières peuvent alors être utilisées en déclarant le régime permanent correspondant, pourvu que les différentes valeurs soient indiquées.

Les données relatives aux conditions de service sont susceptibles de varier considérablement d'un pays à l'autre. Par exemple, pour ce qui est de la température ambiante et de la résistance thermique du sol, les valeurs sont régies dans les différents pays par diverses considérations. Une comparaison hâtive entre les valeurs utilisées dans les différents pays peut amener des conclusions erronées, si elle n'est pas faite sur des bases communes; par exemple, on peut compter sur des espérances de vie du câble différentes; de même, dans certains pays, la spécification est établie sur la valeur maximale de la résistance thermique du sol, tandis que dans d'autres c'est la valeur moyenne qui est utilisée. En particulier, dans le cas de la résistivité thermique du sol, il est bien connu que celle-ci est très sensible au taux d'humidité et peut varier sensiblement dans le temps suivant le type de sol, les conditions topographiques et météorologiques et la charge du câble.

Le choix des valeurs des différents paramètres sera dès lors effectué de la façon suivante.

Les valeurs numériques devront, de préférence, être basées sur des résultats de mesures valables. De tels résultats sont déjà souvent inclus dans les spécifications nationales sous forme de valeurs recommandées, de telle sorte que le calcul peut être exécuté sur la base de ces valeurs, généralement utilisées dans le pays en question; un examen de ces valeurs est fait dans la Partie 3-1.

On trouvera un choix d'informations nécessaires pour sélectionner le type de câble approprié dans la Partie 3-1.

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 1-1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Généralités

1 Généralités

1.1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60287 concerne uniquement le fonctionnement en régime permanent des câbles de toutes tensions alternatives et de tensions continues jusqu'à 5 kV, enterrés directement dans le sol, placés dans des fourreaux, caniveaux ou tubes d'acier, avec ou sans assèchement partiel du sol, ainsi que les câbles posés à l'air libre. On entend par «régime permanent» la circulation continue d'un courant constant (facteur de charge 100 %) juste suffisant pour atteindre asymptotiquement la température maximale de l'âme en supposant que les conditions du milieu ambiant restent inchangées.

Cette partie fournit des formules pour l'intensité du courant et les pertes.

Les formules proposées sont essentiellement littérales et laissent en principe libre le choix de certains paramètres importants. Ceux-ci peuvent être divisés en trois groupes:

- les paramètres liés à la constitution du câble (par exemple résistance thermique de l'isolant) pour lesquels des valeurs représentatives ont été recueillies, à partir des travaux publiés;
- les paramètres liés aux conditions du milieu, qui peuvent varier considérablement; le choix de ceux-ci dépend du pays où les câbles sont ou doivent être utilisés;
- les paramètres résultant d'un accord entre fabricant et utilisateur et qui supposent une marge de sécurité en service (par exemple température maximale du conducteur).

1.2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60027-3, *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique – Partie 3 : Grandeurs logarithmiques et connexes, et leurs unités*

IEC 60028:1925, *Spécification internationale d'un cuivre-type recuit*

IEC 60141 (toutes les parties), *Essais de câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires*

IEC 60228, *Ames des câbles isolés*

IEC 60502-1, *Câbles d'énergie à isolant extrudé et leurs accessoires pour des tensions assignées de 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) à 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Partie 1: Câbles de tensions assignées de 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) et 3 kV ($U_m = 3,6$ kV)*

IEC 60502-2, *Câbles d'énergie à isolant extrudé et leurs accessoires pour des tensions assignées de 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) à 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Partie 2: Câbles de tensions assignées de 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) à 30 kV ($U_m = 36$ kV)*

IEC 60889, *Fils d'aluminium écroui dur pour conducteurs de lignes aériennes*

1.3 Symboles

Les symboles utilisés dans la présente norme et les grandeurs qu'ils représentent sont donnés dans la liste suivante:

A	section droite de l'armure	mm^2
B_1 B_2	} coefficients (voir 2.4.2)	
C		
C	capacité par phase	F/m
D_e^*	diamètre extérieur du câble	m
D_i	diamètre sur isolant	mm
D_s	diamètre extérieur de la gaine métallique	mm
D_{oc}	diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface extérieure des crêtes	mm
D_{it}	diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface intérieure des creux	mm
F	coefficient défini en 2.3.5	
H	intensité des radiations solaires	W/m^2
H	force magnétisante (voir 2.4.2)	ampère-tours/m
H_s	inductance de la gaine	H/m
H_1 H_2 H_3	} composants de l'inductance due aux fils d'acier (voir 2.4.2)	H/m
I		
I		
I	intensité du courant dans une âme (valeur efficace)	A
M N	} coefficients définis en 2.3.5	
P Q		
P Q	} coefficients définis en 2.3.3	
R		
R	résistance électrique de l'âme en courant alternatif à sa température maximale de service	Ω/m
R_A	résistance de l'armure en courant alternatif à sa température maximale de fonctionnement	Ω/m
R_{A0}	résistance de l'armure en courant alternatif à 20 °C	Ω/m
R_e	résistance équivalente en courant alternatif de la gaine et de l'armure en parallèle	Ω/m
R_s	résistance de la gaine ou de l'écran du câble en courant alternatif à sa température maximale de fonctionnement	Ω/m
R_{s0}	résistance de la gaine ou de l'écran du câble en courant alternatif à 20 °C	Ω/m
R'	résistance électrique de l'âme en courant continu à la température maximale de service	Ω/m
R_0	résistance électrique de l'âme en courant continu à 20 °C	Ω/m
T_1	résistance thermique par phase entre âme et gaine métallique ou écran	K.m/W
T_2	résistance thermique entre gaine métallique ou écran et armure	K.m/W
T_3	résistance thermique du revêtement	K.m/W
T_4	résistance thermique du milieu extérieur (rapport de l'échauffement de la surface du câble au-dessus de l'ambiante aux pertes totales par unité de longueur)	K.m/W

T_4^*	résistance thermique du milieu extérieur à l'air libre tenant compte du rayonnement solaire	K.m/W
U_0	tension entre âme et écran ou gaine	V
W_A	pertes dissipées dans l'armure par unité de longueur	W/m
W_c	pertes dissipées dans l'âme par unité de longueur	W/m
W_d	pertes diélectriques par unité de longueur et par phase	W/m
W_s	pertes dissipées dans la gaine par unité de longueur	W/m
$W_{(s+A)}$	pertes totales dissipées dans la gaine et l'armure par unité de longueur	W/m
X	réactance de la gaine quand les câbles sont bipolaires ou tripolaires (en trèfle)	Ω /m
X_1	réactance de la gaine quand les câbles sont disposés en nappe	Ω /m
X_m	réactance mutuelle entre la gaine d'un câble et les âmes des deux autres lorsque les câbles sont posés en nappe	Ω /m
a	plus petite longueur d'une section électrique à permutation d'écran ayant des longueurs différentes	
c	distance entre les axes des âmes et l'axe du câble quand les câbles sont tripolaires (= $0,55 r_1 + 0,29 t$ pour les âmes sectoriales)	mm
d	diamètre moyen de la gaine ou de l'écran	mm
d'	diamètre moyen de la gaine et du frettage	mm
d_2	diamètre moyen du frettage	mm
d_A	diamètre moyen de l'armure	mm
d_c	diamètre extérieur de l'âme	mm
d'_c	diamètre extérieur de l'âme massive ronde, ayant le même canal central qu'une âme creuse	mm
d_d	diamètre intérieur du tuyau	mm
d_f	diamètre d'un fil d'acier	mm
d_i	diamètre intérieur d'une âme creuse	mm
d_M	plus grand diamètre d'écran ou de gaine d'une âme ovale	mm
d_m	plus petit diamètre d'écran ou de gaine d'une âme ovale	mm
d_x	diamètre d'une âme circulaire équivalente ayant la même section et le même degré de rétreint que l'âme sectoriale	mm
f	fréquence du réseau	Hz
g_s	coefficient utilisé en 2.3.6.1	
k	facteur utilisé pour le calcul des pertes par hystérésis dans les armures ou frettages (voir 2.4.2.4)	
k_p	facteur utilisé dans le calcul de x_p (effet de proximité)	
k_s	facteur utilisé dans le calcul de x_s (effet de peau)	
l	longueur d'une section de câble (symbole général, voir 2.3 et 2.3.4)	m
$\ln$	logarithme naturel (logarithme en base e, voir IEC 60027-3)	
m	$\frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$	
n	nombre d'âmes dans un câble	
n_1	nombre de fils d'acier dans un câble (voir 2.4.2)	
p	pas d'assemblage d'un fil d'acier sur un câble (voir 2.4.2)	
$\left. \begin{matrix} p \\ q \end{matrix} \right\}$	coefficients utilisés en 2.3.6.2	
r_1	rayon du cercle circonscrit aux deux ou trois âmes sectoriales dans un câble bipolaire ou tripolaire	mm

s	distance entre axes et âmes	mm
s_1	distance entre axes de deux câbles adjacents dans une nappe horizontale de trois câbles non jointifs	mm
s_2	séparation axiale des câbles (voir 2.4.2)	mm
t	épaisseur d'isolant entre âmes	mm
t_3	épaisseur du revêtement externe	mm
t_s	épaisseur de la gaine	mm
ν	rapport des résistivités thermiques des zones de sol sec et humide ($\nu = \rho_d/\rho_w$)	
x_p	argument de la fonction de Bessel, utilisé dans le calcul de l'effet de proximité	
x_s	argument de la fonction de Bessel, utilisé dans le calcul de l'effet de peau	
y_p	facteur d'effet de proximité	} (voir 2.1)
y_s	facteur d'effet de peau	
α_{20}	coefficient de variation de la résistance électrique avec la température à 20 °C, par kelvin	I/K
β	angle formé par l'axe d'un fil d'armure et l'axe du câble (voir 2.4.2)	
β_1	coefficient utilisé en 2.3.6.1	
γ	déphasage (voir 2.4.2)	
Δ_1	} coefficients utilisés en 2.3.6.1	
Δ_2		
δ	épaisseur équivalente de l'armure ou du frettage	mm
$\tan \delta$	facteur de pertes de l'isolant	
ε	permittivité relative de l'isolant	
θ	température maximale de service de l'âme	°C
θ_a	température ambiante	°C
θ_{ar}	température maximale de fonctionnement de l'armure	°C
θ_{sc}	température maximale de fonctionnement de la gaine ou de l'écran du câble	°C
θ_x	température critique du sol et température de la frontière entre zone sèche ou zone humide	°C
$\Delta\theta$	échauffement admissible à l'âme par rapport à la température ambiante	K
$\Delta\theta_x$	échauffement critique du sol et échauffement de la frontière entre les zones sèche et humide au-dessus de la température ambiante du sol	K
λ_0	coefficient utilisé en 2.3.6.1	
λ_1, λ_2	rapport utilisé des pertes totales dans les gaines métalliques et armures respectivement aux pertes totales des âmes (ou pertes dans une gaine ou armure aux pertes dans une âme)	
λ'_1	rapport des pertes dans une gaine produites par les courants de circulation dans la gaine aux pertes dans une âme	
λ''_1	rapport des pertes dans une gaine produites par les courants de Foucault aux pertes dans une âme	
λ'_{1m}	facteur de perte du câble médian	} Trois câbles posés en nappe non transposés avec gaines court-circuitées aux deux extrémités
λ'_{11}	facteur de perte du câble extérieur ayant les pertes les plus importantes	
λ'_{12}	facteur de perte du câble extérieur ayant les pertes les plus faibles	

μ	perméabilité magnétique relative du matériau constituant l'armure	
μ_e	perméabilité relative longitudinale	
μ_t	perméabilité relative transversale	
ρ	résistivité de l'âme à 20 °C	$\Omega \cdot m$
ρ_d	résistivité thermique du sol sec	K.m/W
ρ_w	résistivité thermique du sol humide	K.m/W
ρ_s	résistivité de la gaine à 20 °C	$\Omega \cdot m$
σ	coefficient d'absorption des rayons solaires par la surface du câble	
ω	pulsation (fréquence angulaire $2\pi f$)	

1.4 Evaluation de l'intensité admissible du courant dans les câbles

Lorsque l'intensité du courant admissible est calculée pour des conditions d'assèchement partiel du sol, il est également nécessaire de calculer une capacité de transport pour des conditions où l'assèchement du sol ne se produit pas. La plus faible des deux valeurs doit être utilisée.

1.4.1 Câbles enterrés dans le cas où il n'y a pas d'assèchement du sol ou câbles posés à l'air libre

1.4.1.1 Câbles à courant alternatif

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant alternatif peut être déduite de l'expression donnant l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante:

$$\Delta\theta = (I^2R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2R (1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4)$$

où

I est l'intensité du courant circulant dans une âme (A);

$\Delta\theta$ est l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante (K);

NOTE La température ambiante est la température du milieu environnant en régime normal à l'endroit où les câbles sont posés ou doivent être posés. Elle comprend les effets de n'importe quelle source de chaleur mais non pas l'élévation de température dans le voisinage immédiat des câbles provenant de la chaleur s'en dégageant.

R est la résistance de l'âme en courant alternatif, par unité de longueur, à sa température maximale de service (Ω/m);

W_d sont les pertes diélectriques, par unité de longueur, de l'isolant entourant l'âme (W/m);

T_1 est la résistance thermique, par unité de longueur, entre l'âme et la gaine (K.m/W);

T_2 est la résistance thermique, par unité de longueur, entre la gaine et l'armure (K.m/W);

T_3 est la résistance thermique, par unité de longueur, du revêtement extérieur du câble (K.m/W);

T_4 est la résistance thermique, par unité de longueur, entre la surface du câble et le milieu environnant, telle que déduite de 2.2 de la partie 2 (K.m/W);

n est le nombre d'âmes chargées dans le câble (âmes de même section et transportant la même charge);

λ_1 est le rapport des pertes dans la gaine métallique aux pertes totales dans toutes les âmes de ce câble;

λ_2 est le rapport des pertes dans l'armure aux pertes totales dans toutes les âmes de ce câble.

L'intensité du courant admissible est obtenue de la formule ci-dessus par la formule suivante:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

Lorsque le câble est exposé au rayonnement solaire direct, les formules données en 2.2.1.2 de la partie 2 doivent être utilisées.

L'intensité du courant pour un câble à quatre conducteurs basse tension peut être considérée comme étant égale à l'intensité d'un câble tripolaire pour les mêmes tension et dimension et construction des âmes, à condition que ce câble soit utilisé dans un système triphasé où le quatrième conducteur est soit un conducteur neutre, soit un conducteur de protection. Lorsqu'il s'agit d'un conducteur neutre, l'intensité du courant s'applique à une charge équilibrée.

1.4.1.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant continu s'obtient par la simplification suivante de la formule en courant alternatif:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

où

R' est la résistance de l'âme en courant continu, par unité de longueur, à sa température maximale de service (Ω/m).

Lorsque le câble est directement exposé au rayonnement solaire, les formules données en 2.2.1.2 de la partie 2 doivent être utilisées.

1.4.2 Câbles enterrés dans le cas où se produit un assèchement partiel du sol

1.4.2.1 Câbles à courant alternatif

La méthode suivante doit être appliquée uniquement à un seul câble ou à un seul circuit, posé à une profondeur normale. La méthode se fonde sur un modèle physique approximatif simple de sol à deux zones dans lequel la zone adjacente au câble est asséchée alors que l'autre zone présente la résistivité thermique du site, la limite entre ces deux zones étant isothermique ¹⁾. Cette méthode est estimée appropriée dans les applications où l'on simplifie l'influence du sol.

NOTE Les cas d'installations comportant plus d'un circuit et l'espacement nécessaire entre circuits sont à l'étude.

Les modifications de la résistance thermique externe, dues à la formation d'une zone sèche autour d'un seul câble ou d'un seul circuit, sont obtenues à partir de la formule suivante (à comparer à la formule de 1.4.1.1):

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + vT_4)] + (v - 1) \Delta\theta_x}{R [T_1 + n (1 + \lambda_1) T_2 + n (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + vT_4)]} \right]^{0,5}$$

où

v est le rapport des résistivités thermiques des zones de sol sec et humide ($v = \rho_d/\rho_w$);

R est la résistance de l'âme en courant alternatif à sa température maximale de service (Ω/m);

¹⁾ «Tenue en courant des câbles enterrés dans un sol partiellement asséché, Première partie»: *Electra* n° 104, p. 11, Janvier 1966 (voir en particulier la section 3 et l'annexe 1).

- ρ_d est la résistivité thermique du sol sec (K.m/W);
- ρ_w est la résistivité thermique du sol humide (K.m/W);
- θ_x est la température critique du sol et la température de la frontière entre zone sèche et zone humide (°C);
- θ_a est la température ambiante (°C);
- $\Delta\theta_x$ est l'échauffement critique du sol. C'est l'échauffement de la frontière entre les zones sèche et humide au-dessus de la température ambiante du sol ($\theta_x - \theta_a$) (K);
- NOTE T_4 est calculé en utilisant 2.2.3.2 de la partie 2 et la résistivité thermique du sol humide (ρ_w). La méthode utilisée en 2.2.3.1 de la partie 2 pour le calcul de l'échauffement mutuel des câbles par modification de l'élévation de la température ne peut pas être utilisée.

θ_x et ρ_d doivent être déterminés à partir d'une connaissance des conditions du sol.

NOTE Le choix de paramètres du sol appropriés est en cours d'étude. En attendant, des valeurs peuvent être retenues par accord entre fabricant et client.

1.4.2.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant continu s'obtient par la simplification suivante de la formule en courant alternatif:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta + (v - 1) \Delta\theta_x}{R' [T_1 + nT_2 + n(T_3 + vT_4)]} \right]^{0,5}$$

où

R' est la résistance de l'âme en courant continu, par unité de longueur, à sa température maximale de service (Ω/m).

1.4.3 Câbles enterrés dans le cas où un assèchement du sol est à éviter

1.4.3.1 Câbles à courant alternatif

Lorsqu'on souhaite éviter toute migration d'humidité en limitant l'échauffement de la surface externe du câble à une valeur inférieure ou égale à $\Delta\theta_x$, l'intensité de courant correspondante est obtenue à partir de:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x - nW_dT_4}{nRT_4(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0,5}$$

Cependant, pour certaines valeurs de $\Delta\theta_x$, la température de l'âme peut dépasser la température maximale admissible. Aussi, l'intensité de courant retenue doit être la plus faible des deux valeurs obtenues, soit par l'équation ci-dessus, soit par celle de 1.4.1.1.

La résistance de l'âme R doit être calculée à la température appropriée, qui peut être plus faible que la valeur maximale admissible. Une estimation de la température de service doit être effectuée et, si nécessaire, celle-ci peut être modifiée ultérieurement.

NOTE Pour ce qui concerne les câbles basse tension à quatre conducteurs, voir le dernier alinéa de 1.4.1.1.

1.4.3.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant continu s'obtient par la simplification suivante de la formule en courant alternatif:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x}{nR' T_4} \right]^{0,5}$$

La résistance de l'âme R' doit être modifiée comme en 1.4.2.2.

1.4.4 Câbles directement exposés au rayonnement solaire

Intensité admissible des courants

En tenant compte de l'effet que le rayonnement solaire produit sur un câble, le courant admissible est donné par les formules:

1.4.4.1 Câbles à courant alternatif

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \left[0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4^*) \right] - \sigma D_e^* H T_4^*}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5}$$

1.4.4.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \sigma D_e^* H T_4^*}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5}$$

où

- σ est le coefficient d'absorption des rayons solaires par la surface du câble (voir Tableau 4);
- H est l'intensité des radiations solaires que l'on prendra comme 10^3 W/m² dans la majorité des latitudes; autant que possible il est recommandé de se procurer les valeurs locales;
- T_4^* est la résistance thermique extérieure du câble à l'air libre, adaptée pour tenir compte de la radiation solaire (voir partie 2) (K.m/W);
- D_e^* est le diamètre extérieur du câble (m) (pour les gaines ondulées) $D_e^* = (d_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3}$ (m);
- t_3 est l'épaisseur du revêtement (mm).

2 Calcul des pertes

2.1 Résistance de l'âme en courant alternatif

La résistance linéique de l'âme en courant alternatif et à la température maximale de service est donnée par la formule suivante, sauf dans le cas des câbles en tuyau d'acier (voir 2.1.5):

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

où

- R est la résistance de l'âme en courant alternatif à la température maximale de service (Ω /m);
- R' est la résistance de l'âme en courant continu à la température maximale de service (Ω /m);
- y_s est le facteur d'effet de peau;
- y_p est le facteur d'effet de proximité.

2.1.1 Résistance de l'âme en courant continu

La résistance linéique de l'âme, en courant continu et à la température maximale de service θ , est donnée par:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

où

R_0 est la résistance de l'âme en courant continu à 20 °C (Ω/m);

La valeur de R_0 doit être tirée directement de l'IEC 60228. Lorsque la dimension de l'âme n'est pas comprise dans la liste donnée dans l'IEC 60228, la valeur de R_0 peut être choisie par accord entre le constructeur et l'acheteur. Il convient de calculer la résistance de l'âme en utilisant les valeurs des résistivités données au Tableau 1.

α_{20} est le coefficient de variation à 20 °C de la résistivité en fonction de la température, par kelvin (voir le Tableau 1 pour les valeurs de référence);

θ est la température maximale de service en degrés Celsius (celle-ci est déterminée d'après le type d'isolant utilisé), voir la spécification de l'IEC appropriée ou les normes nationales.

2.1.2 Facteur d'effet de peau y_s

Le facteur d'effet de peau y_s est donné par les équations suivantes:

Pour $0 < x_s \leq 2,8$
$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4}$$

Pour $2,8 < x_s \leq 3,8$
$$y_s = -0,136 - 0,017 7x_s + 0,056 3x_s^2$$

Pour $x_s > 3,8$
$$y_s = 0,354x_s - 0,733$$

où

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

f est la fréquence du courant d'alimentation en hertz.

Les valeurs k_s sont données dans le Tableau 2.

En l'absence d'autres formules, il est recommandé d'utiliser les formules ci-dessus pour des âmes sectoriales ou ovales.

2.1.3 Facteur d'effet de proximité y_p dans le cas de câbles bipolaires ou de deux câbles unipolaires

Le facteur d'effet de proximité est donné par:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times 2,9$$

où

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c est le diamètre de l'âme (mm);

s est la distance entre axes des âmes (mm).

Les valeurs de k_p sont données dans le Tableau 2.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

2.1.4 Facteur d'effet de proximité y_p dans le cas de câbles tripolaires ou de trois câbles unipolaires

2.1.4.1 Câbles à âme circulaire

Le facteur d'effet de proximité est donné par:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} + 0,27} \right]$$

où

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c est le diamètre de l'âme (mm);

s est la distance entre axes des âmes (mm).

NOTE Pour des câbles disposés en nappe, s est l'intervalle entre des phases adjacentes. Lorsque l'intervalle entre des phases adjacentes n'est pas égal, la distance utilisée sera $s = \sqrt{s_1 \times s_2}$.

Les valeurs de k_p sont données dans le Tableau 2.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

2.1.4.2 Câbles à âmes sectoriales

Dans le cas de câbles à plusieurs conducteurs à âmes sectoriales, la valeur de y_p doit être les deux tiers de la valeur calculée en 2.1.4.1,

avec:

$d_c = d_x$ = diamètre d'une âme circulaire équivalente de même section, et degré de rétreint (mm) ;

$s = (d_x + t)$ (mm),

où

t est l'épaisseur de l'isolant entre âmes (mm).

Les valeurs de k_p sont données dans le Tableau 2.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

2.1.5 Effets de peau et de proximité dans le cas des câbles en tuyau d'acier

Pour les câbles en tuyau, les effets de peau et de proximité calculés en 2.1.2, 2.1.3 et 2.1.4 doivent être multipliés par un facteur égal à 1,5. Pour ces câbles,

$$R = R' [1 + 1,5(y_s + y_p)] \quad (\Omega/m)$$

2.2 Pertes diélectriques (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif)

Les pertes diélectriques dépendent de la tension et ne deviennent donc importantes qu'à des niveaux de tension correspondant au matériel isolant utilisé. Le Tableau 3 donne, pour les matériaux isolants communément utilisés, la valeur U_0 à partir de laquelle il convient que les pertes diélectriques soient prises en considération, que les câbles soient tripolaires métallisés ou unipolaires. Il n'est pas nécessaire de calculer les pertes diélectriques pour les câbles à plusieurs conducteurs sans écran ou les câbles à courant continu.

Les pertes diélectriques par unité de longueur de chaque phase sont données par:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (\text{W/m})$$

où

$$\omega = 2\pi f;$$

C est la capacité par unité de longueur (F/m);

U_0 est la tension par rapport à la terre (V).

Les valeurs de $\tan \delta$, facteur de perte de l'isolant à la fréquence et à la température de service, sont données dans le Tableau 3.

La *capacité* pour des âmes circulaires est donnée par:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9} \quad (\text{F/m})$$

où

ε est la permittivité relative de l'isolant;

D_i est le diamètre extérieur de l'isolant, à l'exclusion de l'écran (mm);

d_c est le diamètre de l'âme y compris l'écran, s'il existe (mm).

La même formule peut être utilisée pour des âmes ovales en remplaçant D_i et d_c par la moyenne géométrique des grand et petit diamètres sur isolant et sur âme.

Les valeurs numériques de ε sont données dans le Tableau 3.

2.3 Facteur de pertes dans les gaines ou les écrans (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)

Les pertes dans les gaines ou les écrans (λ_1) sont dues au passage de courants de circulation (λ'_1) et aux courants de Foucault (λ''_1),

soit:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Les formules indiquées donnent l'expression de ces pertes rapportées aux pertes totales dans l'âme, de plus, on indique pour chaque cas particulier le type de pertes à considérer. Les formules pour les câbles unipolaires s'appliquent à un seul circuit et les effets de retour par la terre sont négligés. Des méthodes pour gaines lisses et ondulées sont données.

Pour les câbles unipolaires avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique, seules les pertes dues aux courants de circulation sont à prendre en considération (voir 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3). Une section électrique est définie comme la partie située entre les points où les gaines de tous les câbles sont court-circuitées et mises à la terre.

Il y a également lieu de prendre une certaine marge de sécurité pour tenir compte d'une augmentation d'écartement en certains points de parcours (voir 2.3.4).

Pour les câbles à âmes segmentées, il convient de majorer le facteur de pertes pour tenir compte également des pertes dues aux courants de Foucault dans les gaines (voir 2.3.5).

Pour une installation à permutation des écrans, il n'est pas réaliste d'admettre que les longueurs élémentaires sont électriquement identiques et que les pertes dues aux courants de circulation dans les gaines sont négligeables. Des recommandations sont faites en 2.3.6 pour tenir compte de ce déséquilibre électrique.

Le Tableau 1 donne les résistivités et coefficients de température du plomb et de l'aluminium, pour le calcul de la résistance de la gaine R_S .

Les formules données dans ce paragraphe utilisent la résistance de la gaine ou de l'écran à sa température maximale de fonctionnement. La température maximale de fonctionnement de la gaine ou de l'écran est donnée par:

$$\theta_{sc} = \theta - (I^2 R + 0,5 W_d) T_1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

où

θ_{sc} est la température de fonctionnement maximale de la gaine ou de l'écran du câble ($^\circ\text{C}$).

Comme la température de la gaine ou de l'écran est fonction du courant, I , une méthode de calcul itérative est utilisée.

La résistance de la gaine ou de l'écran à sa température de fonctionnement maximale est donnée par:

$$R_S = R_{S0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)] \text{ (}\Omega/\text{m)}$$

où

R_{S0} est la résistance de la gaine ou de l'écran à 20 $^\circ\text{C}$ (Ω/m).

2.3.1 Deux câbles unipolaires et trois câbles unipolaires (disposés en trèfle), avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour deux câbles unipolaires et trois câbles unipolaires (disposés en trèfle), avec gaines court-circuitées aux deux extrémités, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_1 = \frac{R_S}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_S}{X} \right)^2}$$

où

R_S est la résistance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble à sa température de service maximale (Ω/m);

X est la réactance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble (Ω/m)

$$= 2 \omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

$\omega = 2 \pi \times$ fréquence (1/s);

s est la distance entre axes des âmes de la section électrique considérée (mm);

d est le diamètre moyen de la gaine (mm);

– pour des conducteurs ovales, d est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$;

où d_M et d_m représentent respectivement les grand et petit diamètres de la gaine

– pour les gaines ondulées, d est donné par $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$;

$\lambda_1'' = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf dans les câbles à âmes segmentées pour lesquels λ_1'' est calculé par la méthode donnée en 2.3.5.

2.3.2 Trois câbles unipolaires disposés en nappe, régulièrement transposés, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour les câbles unipolaires disposés en nappe et régulièrement transposés, le câble médian étant équidistant des deux autres et les gaines étant transposées et court-circuitées aux extrémités de chaque section de transposition ternaire, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1} \right)^2}$$

où

X_1 est la réactance linéique de la gaine (Ω/m)

$$= X_1 = 2\omega 10^{-7} \ln \left\{ 2\sqrt[3]{2} \left(\frac{s}{d} \right) \right\};$$

$\lambda_1'' = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf dans les câbles à âmes segmentées pour lesquels λ_1'' est calculé par la méthode donnée en 2.3.5.

2.3.3 Trois câbles unipolaires disposés en nappe, non transposés, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour trois câbles unipolaires disposés en nappe et non transposés dont le câble médian est équidistant des deux autres et les gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique, le facteur de pertes pour le câble qui a les plus fortes pertes (c'est-à-dire le câble extérieur dont le courant est déphasé en arrière) est donné par:

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75 P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25 Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

Pour l'autre câble extérieur, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75 P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25 Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

Pour le câble médian, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

Dans ces formules:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

où

X est la réactance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble pour deux câbles unipolaires adjacents (Ω/m)

$$= 2 \omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) (\Omega/\text{m});$$

X_m est la réactance mutuelle par unité de longueur de câble entre la gaine d'un des câbles extérieurs et l'âme des deux autres, quand les câbles sont disposés en nappe (Ω/m)

$$= 2 \omega 10^{-7} \ln (2) (\Omega/\text{m});$$

$\lambda''_1 = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf dans les câbles à âmes segmentées pour lesquels λ''_1 est calculé par la méthode donnée en 2.3.5.

Les intensités du courant pour les câbles dans l'air doivent être basées sur la première formule donnée ci-dessus, c'est-à-dire, les pertes pour le câble extérieur dont le courant est déphasé en arrière.

2.3.4 Variation de l'écartement des câbles unipolaires entre les points où les gaines sont court-circuitées

Pour les circuits de câbles unipolaires à gaines court-circuitées à chaque extrémité et éventuellement en des points intermédiaires, les courants de circulation, et par conséquent les pertes, augmentent avec l'écartement, d'où l'intérêt de réduire celui-ci. En fait, il existe un écartement optimal obtenu par la double considération des pertes et de l'échauffement mutuel entre câbles.

Il n'est pas toujours possible d'installer les câbles avec le même écartement tout le long d'un parcours. Les recommandations suivantes concernent le calcul des pertes dues au courant de circulation des gaines lorsqu'il est impossible d'installer les câbles avec le même écartement sur toute la longueur d'une section électrique. Une section est définie comme la partie située entre les points où les gaines de tous les câbles sont court-circuitées et mises à la terre. Les recommandations ci-dessous donnent des valeurs pour des facteurs de perte qui sont valables pour une section entière mais il convient de remarquer que les valeurs appropriées de la résistance de l'âme et de la résistance thermique externe doivent être calculées sur la base du plus petit espacement entre câbles sur tout le long de la section.

a) Lorsque l'écartement le long de la section n'est pas constant mais que les diverses valeurs sont connues, la valeur de X en 2.3.1, 2.3.2 ou 2.3.3 sera déduite de:

$$X = \frac{l_a X_a + l_b X_b + \dots + l_n X_n}{l_a + l_b + \dots + l_n}$$

où

$l_a, l_b \dots l_n$ sont les longueurs correspondant à des écartements différents le long d'une section électrique;

$X_a, X_b \dots X_n$ sont les réactances par unité de longueur du câble, les formules correspondantes étant données en 2.3.1, 2.3.2 ou 2.3.3 où les valeurs appropriées des écartements $s_a, s_b \dots s_n$ sont utilisées.

- b) Lorsque dans une section l'écartement entre les câbles et sa variation le long du parcours ne sont pas connus et ne peuvent être prévus, les pertes de cette section calculées à partir de l'écartement type doivent être arbitrairement augmentées de 25 %, cette valeur étant estimée convenir aux câbles haute tension sous gaine de plomb. Si l'on pense qu'un accroissement de 25 % ne convient pas, on peut se mettre d'accord sur un autre pourcentage.
- c) Lorsque les phases de la section s'épanouissent à une extrémité, la marge de b) peut ne pas être suffisante et il est recommandé de faire une estimation de l'écartement prévu et de calculer les pertes en utilisant la procédure donnée en a) ci-dessus.

NOTE Cette augmentation n'est pas applicable aux installations dont les gaines ne sont réunies qu'en un seul point ou transposées (voir 2.3.6).

2.3.5 Effet des âmes segmentées

Lorsque des dispositions ont été prises pour réduire l'effet de proximité, par exemple par l'utilisation des âmes segmentées, le facteur de perte dans les gaines λ_1'' de 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3 ne peut plus être négligé; ce facteur doit être obtenu en multipliant la valeur λ_1'' du 2.3.6 pour la même configuration de câble, par le facteur F donné par la formule:

$$F = \frac{4 M^2 N^2 + (M + N)^2}{4 (M^2 + 1) (N^2 + 1)}$$

où

$$M = N = \frac{R_s}{X} \text{ pour les câbles posés en trèfle}$$

et

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{R_s}{X + X_m} \\ N &= \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Pour les câbles posés en nappe, le câble central étant} \\ \text{équidistant des câbles latéraux.} \end{array}$$

Lorsque l'espacement le long d'une section électrique n'est pas constant, la valeur de X doit être calculée comme en 2.3.4 a).

2.3.6 Câbles unipolaires avec gaines court-circuitées en un seul point ou permutées

2.3.6.1 Pertes par courants de Foucault

Pour des câbles unipolaires, à gaines court-circuitées en un seul point ou permutées, le facteur de pertes par courants de Foucault est donné par:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

où

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1,74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1,6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \pi \omega}{10^7 \rho_s}}$$

ρ_s est la résistivité électrique du matériau constituant la gaine à la température de service (voir Tableau 1) ($\Omega.m$);

D_s est le diamètre extérieur de la gaine du câble (mm);

NOTE Pour les gaines ondulées, le diamètre extérieur moyen $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$ doit être utilisé.

t_s est l'épaisseur de la gaine (mm);

$$\omega = 2\pi f;$$

NOTE 1 Pour les câbles à gaine de plomb, g_s peut être pris égal à 1 et $\frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}}$ peut être négligé.

NOTE 2 Pour les câbles à gaine d'aluminium, il peut être nécessaire d'évaluer les deux termes lorsque le diamètre de la gaine est supérieur à environ 70 mm ou lorsque la gaine est plus épaisse que d'ordinaire.

NOTE 3 Pour les câbles dont l'écran est constitué d'une nappe de fils avec un ruban d'égalisation ou une feuille métallique disposée au-dessus, les pertes par courants de Foucault sont considérées comme négligeables.

Les formules pour λ_0 , Δ_1 et Δ_2 sont données ci-dessous:

(dans lesquelles: $m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$, pour $m \leq 0,1$, Δ_1 et Δ_2 peuvent être négligés)

1) Trois câbles unipolaires en trèfle:

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = (1,14 m^{2,45} + 0,33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,92 m + 1,66)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

2) Trois câbles unipolaires en nappe:

a) câble central:

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 0,86 m^{3,08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,4 m + 0,7)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

b) câble extérieur, déphasé avant:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 4,7 m^{0,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,16 m + 2)}$$

$$\Delta_2 = 21 m^{3,3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,47 m + 5,06)}$$

c) câble extérieur, déphasé arrière:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = - \frac{0,74 (m + 2) m^{0,5}}{2 + (m - 0,3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m + 1)}$$

$$\Delta_2 = 0,92 m^{3,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m + 2)}$$

2.3.6.2 Pertes par courants de circulation

Les pertes par courants de circulation sont nulles pour les installations dont les gaines sont court-circuitées en un seul point et pour celles dont les gaines sont permutées et où chaque section ternaire est divisée en trois sections élémentaires électriquement identiques.

Lorsqu'une installation permutée comprend des sections dont le déséquilibre n'est pas négligeable, il apparaît dans ces sections une tension résiduelle, donc une circulation de courant et des pertes dont il importe de tenir compte.

Dans les installations où les longueurs effectives des sections simples sont connues, le facteur de pertes λ'_1 peut être obtenu à partir du facteur de pertes dû au courant de circulation dans un système de même configuration, non permuté et dont les gaines seront court-circuitées aux deux extrémités, en multipliant ce dernier facteur par:

$$\frac{p^2 + q^2 + 1 - p - pq - q}{(p + q + 1)^2}$$

Dans cette expression, p et q désignent pour la section ternaire considérée le rapport de longueurs des deux plus grandes sections à la plus petite (longueur de la plus petite: a , longueurs des deux autres: pa et qa).

Cette formule n'intervient que lorsque les sections simples ont des longueurs différentes.

Les variations d'écartement doivent également être prises en considération.

Lorsqu'on ne connaît pas les longueurs des sections simples, il convient de prendre pour p une valeur de 1 et pour q de 1,2, ce qui donne une valeur de 0,004.

2.3.7 Câbles bipolaires non armés sous gaine commune

Pour les câbles bipolaires non armés dont les conducteurs sont sous une gaine métallique commune, λ'_1 est négligeable et le facteur de pertes est donné par une des formules suivantes:

- pour les âmes rondes ou ovales:

$$\lambda''_1 = \frac{16 \omega^2 10^{-14}}{R R_s} \left(\frac{c}{d} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right]$$

- pour les âmes sectoriales:

$$\lambda''_1 = \frac{10,8 \omega^2 10^{-16}}{R R_s} \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \left[12,2 + \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \right]$$

où

$$\omega = 2\pi f;$$

f est la fréquence (Hz);

c est la distance entre l'axe d'une âme et l'axe du câble (mm);

r_1 est le rayon du cercle circonscrit aux deux âmes en secteur (mm);

d est le diamètre moyen de la gaine (mm);

- pour les conducteurs ovales, d est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres;
- pour des gaines ondulées, d est donné par $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

2.3.8 Câbles tripolaires non armés sous gaine commune

Pour un câble tripolaire non armé dont les conducteurs sont sous une gaine métallique commune, λ'_1 est négligeable et le facteur de pertes est donné par une des formules suivantes:

- pour les câbles à âmes circulaires ou ovales dont la résistance de gaine R_s est inférieure ou égale à $100 \mu\Omega/m$:

$$\lambda''_1 = \frac{3 R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} \right]$$

- pour les mêmes câbles dont la résistance R_s est supérieure à $100 \mu\Omega/m$:

$$\lambda''_1 = \frac{3,2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-14}$$

- pour les câbles à âmes sectoriales, quelle que soit la valeur de R_s :

$$\lambda''_1 = 0,94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2}$$

où

r_1 est le rayon du cercle circonscrit aux trois âmes sectoriales (mm);

t est l'épaisseur de l'isolant entre âmes (mm);

d est le diamètre moyen de la gaine (mm);

- pour les conducteurs ovales, d est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres de la gaine ou de l'écran;
- pour des gaines ondulées, d est donné par $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

2.3.9 Câbles bipolaires et tripolaires armés de feuillets d'acier

L'adjonction d'une armure de feuillets d'acier augmente les pertes par courants de Foucault dans la gaine. Dans ce cas, il convient de multiplier les valeurs correspondantes λ''_1 de 2.3.7 et 2.3.8 par le facteur suivant:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}} \right]^2$$

où

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm);

μ est la perméabilité relative du ruban d'acier (prise habituellement égale à 300);

δ est l'épaisseur équivalente de l'armure = $\frac{A}{\pi d_A}$ (mm);

où A est la section transversale de l'armure (mm²).

Cette correction n'est applicable qu'aux rubans d'épaisseur comprise entre 0,3 mm à 1,0 mm.

2.3.10 Câbles triplombs armés

Pour un câble tripolaire dont chaque phase possède sa propre gaine de plomb, λ_1'' est nul et le facteur de pertes pour les gaines est donné par:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

où

$X = 2 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right)$ (Ω/m);

s est la distance entre axes d'âmes (mm).

Le facteur de pertes pour les câbles non armés dont chaque phase possède sa propre gaine métallique est donné en 2.3.1.

2.3.11 Pertes dans les écrans et les gaines de câbles en tuyau d'acier

Lorsque, dans un câble en tuyau, chaque âme n'a qu'un écran sur l'isolant, par exemple une gaine de plomb ou un ruban de cuivre, le rapport des pertes dans les écrans aux pertes dans les âmes peut être calculé par la formule donnée en 2.3.1 pour la gaine d'un câble unipolaire, mais en corrigeant celle-ci pour tenir compte des pertes supplémentaires dues à la présence du tuyau d'acier.

La formule modifiée s'écrit:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

Si chaque phase comporte un écran métallique et un frettage non magnétique, la même formule peut être utilisée, mais la résistance R_s est remplacée par la résistance équivalente à la mise en parallèle de l'écran et du frettage. Le diamètre d est remplacé par la valeur d' :

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}}$$

où

d' est le diamètre moyen de gaine et frettage (mm);

d est le diamètre moyen de l'écran ou gaine (mm);

d_2 est le diamètre moyen du frettage (mm).

Dans le cas des conducteurs de forme ovales, d et d_2 sont donnés par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres de la gaine ou de l'écran.

NOTE Voir aussi 2.4.2.

2.4 Facteur de pertes dans les armures, les frettages et les tuyaux d'acier (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)

Les formules données dans ce paragraphe expriment la puissance dissipée dans l'armure métallique ou le frettage ou le tuyau d'acier des câbles sous la forme d'une fraction λ_2 de la puissance perdue dans toutes les âmes.

Les valeurs à utiliser pour la résistivité et les coefficients de variation de la résistivité avec la température sont données dans le Tableau 1.

Les formules données dans ce paragraphe utilisent la résistance de l'armure à sa température maximale de fonctionnement. La température maximale de fonctionnement de l'armure est donnée par:

$$\theta_{ar} = \theta - \left\{ \left[I^2 R + 0,5 W_d \right] T_1 + \left[I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] n T_2 \right\} \quad (^\circ\text{C})$$

où

θ_{ar} est la température maximale de fonctionnement de l'armure ($^\circ\text{C}$).

Comme la température de l'armure est fonction du courant, I , une méthode de calcul itérative est utilisée.

La résistance de l'armure à sa température maximale de fonctionnement est donnée par:

$$R_A = R_{A0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{ar} - 20)] \quad (\Omega/\text{m})$$

où

R_{A0} est la résistance de l'armure à 20°C (Ω/m).

Lorsqu'on utilise la résistance équivalente pour la combinaison de la gaine et de l'armure en parallèle, il est suffisamment précis de supposer que les deux composants sont à la température de fonctionnement de l'armure et de prendre une valeur moyenne des coefficients de température des matériaux.

2.4.1 Armure ou frettage non magnétique

Le procédé général est de combiner le calcul des pertes dans le frettage avec celui des pertes dans la gaine. Les formules sont données en 2.3 et la combinaison en parallèle des résistances de la gaine et du frettage est utilisée à la place de la résistance R_s de la gaine. La moyenne quadratique des diamètres de la gaine et du frettage remplace le diamètre moyen d de la gaine (voir 2.3.11). Cette méthode est applicable aux câbles unipolaires, bipolaires et multipolaires.

La valeur de la résistance du frettage dépend du pas des rubans:

- Si le ruban a un très long pas (rubans longitudinaux), la résistance est calculée comme celle d'un cylindre ayant la même masse de matériau par unité de longueur de câble et le même diamètre intérieur que les rubans.
- Si les rubans font avec l'axe du câble un angle d'environ 54° , la résistance est le double de celle calculée ci-dessus en a) ci-dessus.

- c) Si les rubans ont un pas très court (rubans circonférentiels), la résistance est considérée comme infinie, c'est-à-dire que les pertes peuvent être négligées.
- d) Dans le cas où il y a deux couches ou plus de rubans à pas court au contact l'une de l'autre, la résistance est le double de celle considérée en a) ci-dessus.

Ces considérations s'appliquent aussi aux câbles en tuyaux, comme indiqué en 2.3.11.

2.4.2 Armure ou frettage magnétique

2.4.2.1 Câbles unipolaires sous gaine de plomb et armure de fils d'acier, court-circuitée à la gaine à chaque extrémité

La méthode suivante ne tient pas compte de l'influence possible des milieux environnants, qui peut être appréciable en particulier dans le cas des câbles sous-marins. La méthode est relative à des installations où l'écartement des câbles est grand (c'est-à-dire 10 m et plus). Elle donne des valeurs des pertes dans les gaines et les armures qui sont habituellement plus fortes que les pertes réelles, conduisant à un dimensionnement du côté de la sécurité. Il convient de noter que la zone la plus chaude sur le tracé des câbles peut être la zone d'atterrissage où à la fois les pertes et les échauffements mutuels peuvent être élevés.

Lorsque l'influence des milieux environnants peut être négligée, par exemple dans l'air, la méthode peut être utilisée quel que soit l'écartement des câbles.

Le calcul des pertes dans les gaines de plomb et les armures des câbles unipolaires sous armure de fils d'acier dont la gaine et l'armure sont court-circuitées aux deux extrémités est le suivant:

- a) La résistance équivalente aux résistances de la gaine et l'armure en parallèle est donnée par:

$$R_e = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} \quad (\Omega/m)$$

où

R_s est la résistance de la gaine par unité de longueur à sa température de service maximale (Ω/m);

R_A est la résistance de l'armure en courant alternatif par unité de longueur à sa température de service maximale (Ω/m).

La résistance en courant alternatif des fils d'armure varie d'environ 1,2 fois la résistance en courant continu pour les fils de 2 mm de diamètre jusqu'à 1,4 fois la résistance en courant continu pour les fils de 5 mm. La valeur de la résistance n'a pas un effet très sensible sur le résultat final.

- b) L'inductance des éléments du circuit est calculée par phase, de la façon suivante:

$$H_s = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2s_2}{d} \right)$$

où H_s est l'inductance due à la gaine (H/m)

$$H_1 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \cos \gamma$$

$$H_2 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \sin \gamma$$

$$H_3 = 0,4 \left(\mu_t \cos^2 \beta - 1 \right) \left(\frac{d_f}{d_A} \right) 10^{-6}$$

NOTE H_3 est pris égal à zéro pour des fils espacés.

où

H_1 , H_2 et H_3 sont les composantes de l'inductance due aux fils d'acier (H/m);

s_2 est la distance entre axes des câbles adjacents disposés en trèfle; pour les câbles disposés en nappe, s_2 est la moyenne géométrique des trois distances (mm);

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm);

d_f est le diamètre du fil d'acier (mm);

p est le pas d'assemblage du fil d'acier (mm);

n_1 est le nombre de fils d'acier;

β est l'angle formé par l'axe d'un fil d'armure et l'axe du câble;

γ est le déphasage du flux magnétique longitudinal dans les fils d'acier sur la force magnétisante;

μ_e est la perméabilité relative longitudinale des fils d'acier;

μ_t est la perméabilité relative transversale des fils d'acier;

Pour les valeurs de γ , μ_e et μ_t , voir le point d).

Prendre $B_1 = \omega (H_s + H_1 + H_3)$ (Ω/m)

$B_2 = \omega H_2$ (Ω/m).

- c) Les pertes totales dans la gaine et l'armure $W_{(s+A)}$ sont données par:

$$W_{(s+A)} = I^2 R_e \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \right) \text{ (W/m)}$$

Les pertes dans la gaine et l'armure sont supposées être approximativement égales, donc:

$$\lambda'_1 = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2 W_c}$$

où

$W_c = I^2 R$ pertes dans l'âme (W/m).

- d) Choix des caractéristiques magnétiques γ , μ_e et μ_t .

Ces valeurs varient suivant les échantillons particuliers d'acier et, à moins de pouvoir se référer à des mesures faites sur les fils d'acier utilisés, des valeurs moyennes doivent être adoptées.

L'erreur résultante n'est pas sensible si, pour des fils de 4 mm à 6 mm de diamètre et de charges à la rupture voisines de 400 N/mm², les valeurs suivantes sont adoptées:

$\mu_e = 400$

$\mu_t = 10$, lorsque les fils sont en contact

$\mu_t = 1$, lorsque les fils sont séparés

$\gamma = 45^\circ$

Si un calcul plus précis est exigé et si les caractéristiques des fils sont connues, il est alors nécessaire de connaître d'abord la valeur approchée de la force magnétisante H afin de trouver les caractéristiques magnétiques qui conviennent.

$$H = \frac{1\,000 \left| \bar{I} + \bar{I}_s \right|}{\pi d_A} \text{ (ampères-tours/m)}$$

où $\bar{I}$ et $\bar{I}_s$ sont les valeurs vectorielles du courant dans l'âme et du courant dans la gaine. Pour le choix initial des caractéristiques magnétiques, il suffit généralement de supposer que $|\bar{I} + \bar{I}_s| = 0,6 I$, et de reprendre les calculs s'il s'avère ensuite que la valeur calculée accuse une différence importante.

2.4.2.2 Câbles bipolaires sous armure de fil d'acier

$$\lambda_2 = \frac{0,62 \omega^2 10^{-14}}{R \cdot R_A} + \frac{3,82 A \omega 10^{-5}}{R} \left[\frac{1,48 r_1 + t}{d_A^2 + 95,7 A} \right]^2$$

où

R_A est la résistance (courant alternatif) de l'armure à sa température maximale (Ω/m);

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm);

A est la section de l'armure (mm^2);

r_1 est le rayon circonscrit aux âmes (mm);

t est l'épaisseur de l'isolant entre les âmes (mm).

Aucune correction tenant compte de la non-uniformité de la distribution du courant dans les âmes n'est proposée, car elle reste négligeable jusqu'à des sections de 400 mm^2 .

2.4.2.3 Câbles tripolaires – armure en fils d'acier

2.4.2.3.1 Câbles à âmes circulaires

$$\lambda_2 = 1,23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

où

R_A est la résistance (courant alternatif) de l'armure à sa température maximale (Ω/m);

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm);

c est la distance entre l'axe d'une âme et le centre du câble (mm).

Aucune correction tenant compte de la non-uniformité de la distribution du courant dans les âmes n'est proposée, car elle reste négligeable jusqu'à des sections de 400 mm^2 . Cette équation est à l'étude en raison du fait qu'elle peut surestimer le facteur de pertes dans les armures pour certaines constructions de câbles.

2.4.2.3.2 Câbles à âmes sectoriales

$$\lambda_2 = 0,358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

où

r_1 est le rayon du cercle circonscrit aux trois âmes sectoriales (mm);

$\omega = 2\pi f$;

f est la fréquence d'alimentation (Hz).

2.4.2.4 Câbles tripolaires sous feuillets d'acier

Les formules suivantes s'appliquent aux feuillets dont l'épaisseur est comprise entre 0,3 mm et 1 mm.

Les pertes par hystérésis sont, pour une fréquence de 50 Hz, données par:

$$\lambda'_2 = \frac{s^2 k^2 10^{-7}}{R d_A \delta}$$

où

s est la distance entre axes des âmes (mm);

δ est l'épaisseur équivalente de l'armure (mm)

soit $\frac{A}{\pi d_A}$

et

A est la section de l'armure (mm²);

d_A est le diamètre moyen de l'armure (mm).

Le facteur k est donné par:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}}$$

où

μ est la perméabilité relative du ruban d'acier, habituellement prise égale à 300.

Pour des fréquences f différentes de 50 Hz, la valeur de k doit être multipliée par $\frac{f}{50}$.

Le facteur de pertes par courants de Foucault, à 50 Hz, est:

$$\lambda''_2 = \frac{2,25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

et pour toute autre fréquence f , la valeur calculée par la formule ci-dessus doit être multipliée par $\left(\frac{f}{50}\right)^2$.

Le facteur de pertes total dans l'armure est donné par la somme des facteurs correspondant aux pertes par hystérésis et courants de Foucault, soit:

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2$$

NOTE La présence de frettages ou d'armures magnétiques augmente les pertes par courants de Foucault dans les gaines; il convient d'en tenir compte comme indiqué en 2.3.9.

2.4.2.5 Câbles triplombs

Quand il s'agit de câbles triplombs armés, l'effet d'écran résultant des courants dans les gaines réduit les pertes dans l'armure. La valeur de λ_2 calculée en 2.4.2.3.1 ou 2.4.2.3.2 doit être multipliée par le facteur

$$\left(1 - \frac{R}{R_s} \lambda'_1\right)$$

où λ'_1 a la valeur déterminée en 2.3.1.

2.4.3 Pertes dans les tuyaux d'acier

Les pertes dans les tuyaux d'acier sont données par deux formules empiriques, une pour les câbles où les phases sont posées en trèfle jointif, et une autre pour les câbles où les phases sont posées au fond du tuyau dans une configuration plus ouverte (dite en berceau). Les câbles en service ont probablement une configuration intermédiaire. Aussi, il convient que les pertes soient calculées pour les deux configurations et on prendra leur valeur moyenne:

NOTE Ces formules ont été obtenues empiriquement aux Etats-Unis d'Amérique et ne s'appliquent actuellement qu'aux dimensions des tuyaux et aux types d'acier utilisés dans ce pays.

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,0115 s - 0,001485 d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ pour la configuration en trèfle jointif}$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,00438 s + 0,00226 d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ pour la configuration en berceau}$$

où

s est l'espacement entre axes des âmes (mm);

d_d est le diamètre intérieur du tuyau (mm);

R est la résistance linéique de l'âme en courant alternatif à la température maximale de service (Ω/m).

Les formules indiquées s'appliquent à une fréquence de 60 Hz. Pour 50 Hz, il convient de multiplier chaque formule par 0,76.

Pour les câbles en tuyaux, dont l'armure en fils plats est appliquée sur les trois phases après qu'elles ont été mises en place, les pertes sont indépendantes de la présence du tuyau. Pour ces câbles, les pertes dans l'armure doivent être calculées comme pour les câbles triplombs (voir 2.4.2.5 et les pertes dans le tuyau doivent être négligées).

Tableau 1 – Résistivités électriques et coefficients de variation de la résistivité avec la température des métaux utilisés

Matériaux	Résistivité (ρ) ohm · m à 20 °C	Température coefficient (α_{20}) par K à 20 °C
a) <i>Ames</i>		
Cuivre	1,724 1 10^{-8}	3,93 10^{-3}
Aluminium	2,826 4 10^{-8}	4,03 10^{-3}
b) <i>Matériaux de gaines et d'armure</i>		
Plomb et alliage de plomb	21,4 10^{-8}	4,0 10^{-3}
Acier	13,8 10^{-8}	4,5 10^{-3}
Bronze	3,5 10^{-8}	3,0 10^{-3}
Acier inoxydable	70 10^{-8}	Négligeable
Aluminium	2,84 10^{-8}	4,03 10^{-3}
NOTE Les valeurs se rapportant au cuivre constituant les âmes sont prises dans l'IEC 60028. Les valeurs se rapportant à l'aluminium constituant les âmes sont prises dans l'IEC 60889.		

**Tableau 2 – Effets de peau et de proximité –
Valeurs expérimentales pour les coefficients k_s et k_p**

Type d'âme	Système d'isolation des âmes	k_s	k_p
<i>Cuivre</i>			
Circulaire, massive	Tous	1	1
Circulaire, câblée	Fluide ^d /papier ^e /PPL ^f	1	0,8
Circulaire, câblée	Extrudée ^g /minérale ^h	1	1
Circulaire, segmentée	Fluide/papier/PPL	0,435	0,37
Circulaire, segmentée, fils isolés ^b	Extrudée	0,35	0,20
Circulaire, segmentée, Fils nus ^b , unidirectionnel	Extrudée	0,62	0,37
Circulaire, segmentée, Fils nus ^b , bidirectionnel	Extrudée	0,80	0,37
Creuse, câblée hélicoïdale	Tous	^a	0,8
Sectorale	Fluide/papier/PPL	1	0,8
Sectorale	Extrudée/minérale	1	1
<i>Aluminium</i>			
Circulaire, massive	Tous	1	1
Circulaire, câblée	Tous	1	0,8
Circulaire, segmentée	Tous	0,25	0,15
Creuse, câblée hélicoïdale	Tous	^a	0,8
^a Il convient d'utiliser la formule suivante pour k_s : $k_s = \left(\frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \right) \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$ où d_i est le diamètre intérieur de l'âme (canal central) (mm); d'_c est le diamètre extérieur de l'âme massive équivalente ayant le même canal central (mm).			
^b Les coefficients relatifs à ces conceptions peuvent être influencés par le détail de la constitution de l'âme conductrice. Après accord entre le fabricant et l'utilisateur, les valeurs mesurées de la résistance en courant alternatif peuvent être utilisées. Une méthode de mesure commune est à l'étude. Le Cigre (TB272) examine trois méthodes de mesure.			
^c Âme segmentée:	Âme câblée comprenant un ensemble d'âmes câblées profilées dont chacun des segments est faiblement isolé les uns par rapport aux autres. Les fils individuels peuvent être soit isolés (par exemple émaillés ou à revêtement d'oxyde) soit nus.		
^d Isolant extrudé:	Isolant généralement constitué d'une couche de matériau polymère et appliqué à l'aide d'un procédé d'extrusion.		
^e Isolant minéral:	Isolant constitué d'une poudre minérale comprimée. Généralement utilisé sur des types spécifiques de câbles BT.		
^f Isolant papier:	Isolation rubanée constituée de papier imprégné de matériau isolant.		
^g Isolant fluide:	Système d'isolation constitué de rubanage en papier et d'un fluide isolant qui est conçu pour assurer le libre déplacement du fluide à l'intérieur du câble.		
^h Isolant PPL (polypropylène/papier laminé):	Câble rempli de fluide dans lequel un stratifié de papier/polypropylène est utilisé à la place du rubanage en papier.		

NOTE 1 Les valeurs k_s et k_p présentées dans le tableau ci-dessus pour des âmes câblées de grandes dimensions sont généralement dérivées des valeurs figurant dans la Cigre TB Ref. N° 272, *Large cross-sections and composite screens design*.

NOTE 2 La valeur de k_s donnée pour les fils isolés circulaires, à âmes segmentées, est une valeur limite destinée à couvrir toutes les méthodes d'isolation des fils y compris les fils émaillés, sous revêtement d'oxyde ou autres méthodes.

NOTE 3 La valeur de k_s donnée pour les fils creux, câblés hélicoïdaux est applicable aux âmes trapézoïdales.

Tableau 3 – Valeurs numériques de la permittivité relative et du facteur de pertes pour les isolants utilisés dans les câbles à haute tension et moyenne tension à fréquence industrielle

1	2	3
Type de câble	ε	$\tan \delta^*$
<i>Câbles isolés au papier imprégné</i>		
Type «solid», à imprégnation totale, préimprégné ou imprégné de matière non migrante	4	0,01
A huile fluide, sous gaine métallique ^a		
jusqu'à $U_o = 36$ kV	3,6	0,003 5
jusqu'à $U_o = 87$ kV	3,6	0,003 3
jusqu'à $U_o = 160$ kV	3,5	0,003 0
jusqu'à $U_o = 220$ kV	3,5	0,002 8
A pression d'huile, du type en tuyau ^b	3,7	0,004 5
A pression d'huile, du type en tuyau ^c	3,6	0,004 0
A pression d'huile, du type en tuyau ^d	3,4	0,004 5
<i>Câbles isolés avec d'autres matériaux</i>		
Caoutchouc butyle	4	0,050
EPR ^e		
câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV	3	0,020
câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV	3	0,005
PVC ^e	8	0,1
PE (HD et BD) ^e	2,3	0,001
XLPE ^e		
câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV (non chargé)	2,5	0,004
câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV (non chargé)	2,5	0,001
câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV (chargé)	3,0	0,005
PPL		
câble de tensions supérieures ou égales à 63/110 kV	2,8	0,001 4

* Valeurs prudentes relatives au maximum de température admissible et applicables à la plus haute tension normalement spécifiée pour chaque type de câble.

^a Voir l'IEC 60141-1.

^b Voir l'IEC 60141-4.

^c Voir l'IEC 60141-3.

^d Voir l'IEC 60141-2.

^e Voir l'IEC 60502-1 et l'IEC 60502-2.

NOTE Il convient de tenir compte des pertes diélectriques pour les valeurs de U_o supérieures ou égales aux valeurs suivantes:

Type de câble	U_o kV
<i>Câbles isolés au papier imprégné</i>	
Type «solid»	38
A huile fluide et pression de gaz	63,5
<i>Câbles isolés avec d'autres matériaux</i>	
Caoutchouc butyle	18
EPR	63,5
PVC	6
PE (HD et BD)	127
XLPE (non chargé)	127
XLPE (chargé)	63,5

**Tableau 4 – Coefficient d'absorption des rayons solaires
pour les surfaces de câbles suivantes**

Matériaux	σ
Bitume/jute	0,8
Polychloroprène	0,8
PVC	0,6
PE	0,4
Plomb	0,6

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch