

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Power transformers –
Part 12: Loading guide for dry-type power transformers**

**Transformateurs de puissance –
Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2008 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60076-12

Edition 1.0 2008-11

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Power transformers –
Part 12: Loading guide for dry-type power transformers**

**Transformateurs de puissance –
Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 29.180

ISBN 2-8318-1015-2

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Effect of loading beyond nameplate rating	8
4.1 General.....	8
4.2 General consequences.....	8
4.3 Effects and hazards of short-time emergency loading.....	8
4.4 Effects of long-time emergency loading	9
5 Ageing and transformer insulation lifetime	9
5.1 General.....	9
5.2 Lifetime	9
5.3 Relation between constant continuous load and temperature	10
5.4 Ageing rate.....	11
5.5 Lifetime consumption	11
5.6 Hot-spot temperature in steady state.....	11
5.7 Assumed hot-spot factor.....	12
5.8 Hot-spot temperature rises at varying ambient temperature and load conditions.....	12
5.9 Loading equations	12
5.9.1 Continuous loading.....	12
5.9.2 Transient loading.....	13
5.10 Determination of winding time constant	14
5.10.1 General	14
5.10.2 Time constant calculation method.....	14
5.10.3 Time constant test method.....	15
5.11 Determination of winding time constant according to empirical constant.....	15
5.12 Calculation of loading capability	15
6 Limitations.....	17
6.1 Current and temperature limitations.....	17
6.2 Other limitations	17
6.2.1 Magnetic leakage field in structural metallic parts.....	17
6.2.2 Accessories and other considerations.....	17
6.2.3 Transformers in an enclosure	18
6.2.4 Outdoor ambient conditions	18
Annex A (informative) Ageing rate	19
Annex B (informative) Examples of lifetime consumptions for 3 load regimes.....	24
Annex C (informative) List of symbols	33
Bibliography.....	35
Figure A.1 – Molecule structure of an epoxy	19
Figure A.2 – Thermal endurance graph	22
Figure B.1 – Step change loading curve.....	25
Figure B.2 – Hot-spot temperature rise and life consumption	27

Figure B.3 – Load current and winding hot-spot temperature rise.....	30
Figure B.4 – Ageing rate versus time	30
Table 1 – Constants for lifetime equation	10
Table 2 – Maximum hot-spot winding temperature	16
Table 3 – Current and temperature limits applicable to loading beyond nameplate rating	17
Table B.1 – Lifetime consumption calculations	26
Table B.2 – Life consumption calculations for varying load	29
Table B.3 – Life consumption calculation	31

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –

Part 12: Loading guide for dry-type power transformers

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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 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.

International Standard IEC 60076-12 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This standards cancels and replaces IEC 60905 (1987). This first edition constitutes a technical revision.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
14/584/FDIS	14/590/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

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

A list of all parts of IEC 60076 series, under the general title *Power transformers*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result 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 of IEC 60076 provides guidance for the specification and loading of dry type power transformers from the point of view of operating temperatures and thermal ageing. It provides the consequence of loading above the nameplate rating and guidance for the planner to choose appropriate rated quantities and loading conditions for new installations.

IEC 60076-11 is the basis for contractual agreements and it contains the requirements and tests relating to temperature-rise figures for dry type power transformers during continuous rated loading. It should be noted that IEC 60076-11 refers to the average winding temperature rise while this part of IEC 60076 refers mainly to the hot-spot temperature and the latter stated values are provided only for guidance.

This part of IEC 60076 gives mathematical models for judging the consequence of different loading, with different temperatures of the cooling medium, and with transient or cyclical variation with time. The models provide for the calculation of operating temperatures in the transformer, particularly the temperature of the hottest part of the winding. This hot-spot temperature is used for estimation of the number of hours of life time consumed during a particular time period.

This part of IEC 60076 further presents recommendations for limitations of permissible loading according to the results of temperature calculations or measurements. These recommendations refer to different types of loading duty – continuous loading, short-time and long time emergency loading. An explanation of ageing fundamentals is given in Annex A.

POWER TRANSFORMERS –

Part 12: Loading guide for dry-type power transformers

1 Scope

This part of IEC 60076 is applicable to dry-type transformers according to the scope of IEC 60076-11. It provides the means to estimate ageing rate and consumption of lifetime of the transformer insulation as a function of the operating temperature, time and the loading of the transformer.

NOTE For special applications such as wind turbine application transformers, furnace transformers, welding machine transformers, and others, the manufacturer should be consulted regarding the particular loading profile.

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 60076-11, *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers*

IEC 60216-1, *Electrical insulating materials – Properties of thermal endurance – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*

IEC 61378-1:1997, *Convertor transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

long-time emergency loading

loading resulting from the prolonged outage of some system elements that will not be reconnected before the transformer reaches a new and higher steady state temperature

3.2

short-time emergency loading

unusually heavy loading of a transient nature (less than one time constant of the coil) due to the occurrence of one or more unlikely events which seriously disturb normal system loading

3.3

hot-spot

if not specifically defined, “hot-spot” means the hottest-spot of the winding

3.4

relative thermal ageing rate

for a given hot-spot temperature, the rate at which transformer insulation ageing is reduced or accelerated compared with the ageing rate at a reference hot-spot temperature

3.5

transformer insulation life time

the total time between the initial state for which the normal transformer insulation life time is considered new and the final state when due to thermal ageing, dielectric stress, short-circuit stress, or mechanical movement, which could occur in normal service and result in a high risk of electrical failure

3.6

AN cooling

cooling by natural air ventilation

3.7

AF cooling

method of cooling to increase the rated power of the transformer with fan cooling

4 Effect of loading beyond nameplate rating

4.1 General

Normal life expectancy is a conventional reference basis for continuous duty under design ambient temperature and rated operating conditions. The application of a load in excess of nameplate rating and/or an ambient temperature higher than specified ambient temperatures involves a degree of risk and accelerated ageing. It is the purpose of this part of IEC 60076 to identify such risks and to indicate how, within limitations, transformers may be loaded in excess of the nameplate rating.

4.2 General consequences

The consequences of loading a transformer beyond its nameplate rating are as follows:

- the temperatures of windings, terminals, leads, tap changer and insulation increase, and can reach unacceptable levels;
- enclosure cooling is more sensitive to overload leading to a more rapid increase in insulation temperature to unacceptable levels;
- as a consequence, there will be a risk of premature failure associated with the increased currents and temperatures. This risk may be of an immediate short-term character or may come from the cumulative effect of thermal ageing of the insulation in the transformer over many years.

NOTE Another consequence of overload is an increased voltage drop in the transformer.

4.3 Effects and hazards of short-time emergency loading

The main risks, for short-time emergency loading over the specified limits, are

- critical mechanical stresses due to increased temperature, which can reach an unacceptable level causing cracks in the insulation of a cast resin transformer;
- mechanical damage in the winding due to short and repetitive current above rated current;
- mechanical damage in the winding due to short and repetitive current combined with ambient temperature higher than specified;
- deterioration of mechanical properties at higher temperature could reduce the short-circuit strength;
- reduction of dielectric strength due to elevated temperature.

As a result the maximum overcurrent is limited to 50 % over the rated nominal current.

The agreement of the manufacturer is necessary in case of overloading in excess of 50 % to assess the consequences of such overloading. In any case the duration of such overloading should be kept as short as possible.

4.4 Effects of long-time emergency loading

The effects of long-time emergency loading are the following:

- cumulative thermal deterioration of the mechanical and dielectric properties of the conductor insulation will accelerate at higher temperatures. If this deterioration proceeds far enough, it reduces the lifetime of the transformer, particularly if the apparatus is subjected to system short-circuits;
- other insulation materials, as well as structural parts and the conductors, suffer increased ageing rate at higher temperature;
- the calculation rules for ageing rate and consumption of lifetime are based on considerations of loading.

5 Ageing and transformer insulation lifetime

5.1 General

Experience indicates that the normal lifetime of a transformer is some tens of years. It cannot be stated more precisely, because it may vary even between identical units, owing in particular to operating factors, which may differ from one transformer to another. With few exceptions a transformer rarely operates at 100 % of rated current throughout its lifetime. Other heating factors such as insufficient cooling, harmonics, over fluxing and/or unusual conditions as described in 60076-11 could also affect the life of the transformer.

When heat, which is mainly due to the transformer losses, is transferred to the insulation system, a chemical process begins. This process changes the molecular structure of the materials which form the insulation system. The ageing rate increases with the amount of heat transferred to the system. This process is cumulative and irreversible, which means that the materials do not regain their original molecular structure when the heat supply stops and the temperature decreases. The thermal index of the insulation system is stated in the manufacturer's documentation and is also written on the rating plate. It is assumed that failing insulation due to ageing is one of the causes of end of lifetime of the transformer.

Further it is assumed that the ageing rate varies with temperature according to the Arrhenius' equation. See Annex A for additional background information. The two constants in Arrhenius' equation should ideally be determined by means of thermal endurance testing. In cases where data from such testing is missing, this guide provides estimated constants, which are calculated on the basis of the following assumptions:

- a temperature increase of 6 K doubles the ageing rate. 6 K is an estimated value for the whole winding linked with the value of specific materials used in the winding;
- another value for this doubling rate should be used when supported by thermal endurance tests on the complete electrical insulation system (EIS), according to IEC 60216-1;
- insulation failures are the cause of end of life of the transformer.

5.2 Lifetime

The expected lifetime L of a transformer at a constant hot-spot thermodynamic temperature T in Kelvin (K) can be calculated by means of the equation:

$$L = a \times e^{\frac{b}{T}} \quad (1)$$

This equation can be written more conveniently as:

$$L = a \times \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (2)$$

Although any time unit may be used in these formulas, the hour is used in this guide. The constant a , given in Table 1 for the different insulation system temperatures, is based on this time unit.

NOTE 1 The expected lifetime calculated according to this equation should not be perceived in a too literal sense. The ability of the transformer to withstand high over-currents due to short-circuits in the power system and over-voltages is, after this theoretically calculated lifetime, certainly weakened compared to a new transformer. In the absence of such disturbances the transformer may still operate satisfactorily for many years. Taking precaution to avoid short-circuit and installing adequate over-voltage protection may extend the transformer lifetime.

Table 1 – Constants for lifetime equation

Insulation system temperature (thermal class)	Arrhenius' equation constants		Rated hot spot winding temperature $\vartheta_{HS,r}$
	a	b	
°C	h	K	°C
105 (A)	3,10E-14	15 900	95
120 (E)	5,48E-15	17 212	110
130 (B)	1,72E-15	18 115	120
155 (F)	9,60E-17	20 475	145
180 (H)	5,35E-18	22 979	170
200	5,31E-19	25 086	190
220	5,26E-20	27 285	210

NOTE 2 The following formulas are used to determine the coefficients a and b for the rated hot-spot temperature in the winding:

$$\ln(180\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HS,r} + 273} + \ln(a)$$

$$\ln(90\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HS,r} + 6 + 273} + \ln(a)$$

$\vartheta_{HS,r}$ is the winding rated hot-spot temperature;

T_i is insulation system temperature (thermal index T_i).

The Table 1 is calculated by doubling the ageing for each 6 K.

NOTE 3 Most power transformers operate well below full load most of their actual lifetime. Since a hot-spot temperature of as little as 6 °C below rated values results in half the rated loss of life, the actual lifetime of a transformer typically exceeds 20 years. Accordingly, the constants in Table 1 were developed based on 180 000 h using a halving constant of 6 K.

5.3 Relation between constant continuous load and temperature

The constant hot-spot thermodynamic temperature T , in Kelvin (K), of the winding is given by:

$$T = 273 + \vartheta_a + \Delta\vartheta_{HSn} \quad (3)$$

where

ϑ_a is the ambient temperature in degrees Celsius (°C);

$\Delta\vartheta_{\text{HSn}}$ is the winding hot-spot temperature rise above the ambient temperature at the considered load.

Note that the ambient temperature may not be independent of the loading, but may be a function of the loading :

$$\vartheta_a = f(\text{current}) \quad (4)$$

This function may vary from one site to another. Knowledge of this correlation for the particular site is necessary to make relevant estimates of the ageing rate and consumption of lifetime. The correlation may be found by measurement at the specific site. If no such information is available, indications regarding ageing rate and lifetime consumption can be obtained by making alternative calculations at different ambient temperatures, for example within the range 10 °C to 40 °C.

The formulas given in this standard consider eddy losses as ohmic losses in the windings. Test data indicates that the formulas show higher loss of lifetime than expected. If harmonic currents are present, the increased eddy losses during overloading may need additional consideration in accordance with Annex A of IEC 61378-1.

5.4 Ageing rate

The normal lifetime of a transformer is in practice at least 180 000 h. In order to express the ageing rate k as consumption of lifetime-hours per hour of operation time at a temperature T in Kelvins (K), 180 000 h is used as a conservative reference in the following equation:

$$k = 180\,000 \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (5)$$

The relative ageing rate kr at constant hot-spot temperature T , in Kelvins (K), expressed as a percentage of the ageing rate that gives 180 000 h lifetime is calculated according to the equation:

$$kr = 100 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (6)$$

a and b are to be taken from Table 1.

5.5 Lifetime consumption

The lifetime consumption L_c , expressed in hours (h), at a constant hot-spot temperature T , in Kelvins (K), during a time t in hours (h) is calculated according to the equation:

$$L_c = 180\,000 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (7)$$

a and b are taken from Table 1.

5.6 Hot-spot temperature in steady state

For most transformers in service, the hot-spot temperature inside a winding is not precisely known. For most of these units, the hot-spot temperature can be assessed by calculation.

The calculation rules in this document are based on the following:

ϑ_{HS} is the hot-spot temperature, in degrees Celsius (°C), at rated conditions (rated current, rated ambient temperature, rated voltage, rated frequency...).

The parameter ϑ_{HS} can be found by calculation method or by test.

NOTE Although there is no standard test to determine the hot-spot temperature, if the manufacturer demonstrates other values by test, the manufacturer can use these values to carry out calculation of the life consumption of the transformer.

5.7 Assumed hot-spot factor

For the following consideration, the assumed hot-spot factor Z is 1,25:

$$\Delta\vartheta_{HS,r} = Z \times \Delta\vartheta_{Wr} \quad (8)$$

where

$\Delta\vartheta_{HS,r}$ is the hot-spot temperature rise, in Kelvin (K);

$\Delta\vartheta_{Wr}$ is average winding temperature rise at rated load, in Kelvin (K).

5.8 Hot-spot temperature rises at varying ambient temperature and load conditions

The basic value required for calculating the life consumption is the temperature at the hot-spot. For this purpose, it is necessary to know the temperature rise at this position for each load condition as well as the ambient temperature.

$$\Delta\vartheta_{HSn} = Z \times \Delta\vartheta_{Wr} \times I_n^q \quad (9)$$

where

$\Delta\vartheta_{HSn}$ is the hot-spot temperature rise at the considered load;

I_n is the loading factor per unit;

q is equal to 1,6 for air natural cooling (AN) ; or
is equal to 2 for AF cooled transformers (AF);

Z is assumed to be 1,25.

Whenever possible it is preferable to use test results for $\Delta\vartheta_{Wr}$, to limit the uncertainty regarding the validity of the factor Z and the value of q . Experience shows that q and Z assume different values depending on the type of transformer and the level of the load current at which it operates.

NOTE With some types of winding constructions, determination of $\Delta\vartheta_{Wr}$ may be possible only on prototype transformers.

5.9 Loading equations

5.9.1 Continuous loading

The hot-spot temperature ϑ_{HS} as a function of load for steady-state conditions should be calculated by the following equations:

$$\vartheta_{HS} = \vartheta_a + \Delta\vartheta_{HS} \quad (10)$$

For AN cooling the following equation applies:

$$\Delta\vartheta_{\text{HS}} = \Delta\vartheta_{\text{HS},r} [I]^{2m} \quad (11)$$

For AF cooling the following equation applies:

$$\Delta\vartheta_{\text{HS}} = \Delta\vartheta_{\text{HS},r} [I^2 C_T]^X \quad (12)$$

$$C_T = \frac{T_k + \vartheta_{\text{HS}}}{T_k + \vartheta_{\text{HS},r}} \quad (13)$$

where

- $\Delta\vartheta_{\text{HS}}$ is the hot-spot temperature rise at per unit load I , in Kelvins (K);
- $\vartheta_{\text{HS},r}$ is the rated or tested hot-spot temperature at 1,0 per unit load, in degrees Celsius (°C) [tested values for self-cooled operation for use in Equation (11) may be different than tested values for fan-cooled operation for use in Equation (12)];
- I is loading factor per unit (ratio between load current and rated current);
- C_T is the temperature correction for resistance change with temperature;
- m is an empirical constant, which is equal to 0,8 (suggested unless test data is available);
- ϑ_a is the ambient temperature, in degrees Celsius (°C);
- ϑ_{HS} is the hot-spot temperature at load I , in degrees Celsius (°C);
- T_k is the temperature constant for conductor, which is 225 for aluminium and 235 for copper;
- X is an empirical constant used in forced-air calculation, which is 1 (suggested unless test data available).

Test data indicates that the above equations should result in conservative predictions of the hot-spot temperature.

The m exponent of 0,8 for self-cooled operation and the X exponent of 1 for forced-air operation are derived from heat transfer correlation for natural and forced convection. Test data indicates that a temperature correction for resistance given by Equation (13) is required to predict hot-spot temperatures rise during forced-air loading due to the higher losses present at forced-cooled operation.

Equation (11) and Equation (12) ignore eddy losses in the windings, which vary inversely with temperature. The formula provides a conservative result since Eddy losses are usually low unless harmonic currents are present.

Equation (11) and Equation (12) require an iterative calculation procedure. Using the suggested exponents and considering the resistance change with temperature for fan-cooled operation should result in conservative calculations of the hot-spot temperature rise, even when eddy losses are ignored. If harmonic currents are present, the increased eddy losses during overloading may need consideration in accordance with Annex A of IEC 61378-1.

5.9.2 Transient loading

The hot-spot temperature rise due to transient overloading should be determined by the following equations:

$$\Delta \vartheta_t = (\Delta \vartheta_U - \Delta \vartheta_i) \left[1 - \exp \frac{-t}{\tau} \right] + \Delta \vartheta_i \quad (14)$$

$$\vartheta_{HS} = \Delta \vartheta_t + \vartheta_a \quad (15)$$

where

- $\Delta \vartheta_i$ is the initial hot-spot temperature rise at some prior load I_n , expressed in Kelvins (K);
- $\Delta \vartheta_t$ is the hot-spot temperature rise in Kelvins (K) at time t after changing the load;
- $\Delta \vartheta_U$ is the ultimate hot-spot temperature rise in Kelvins (K) if the per unit overload I_U continued until the hot-spot temperature rise stabilised;
- t is the time, in minutes (min);
- τ_R is the time constant in minutes (min) for the transformer at rated load;
- τ is the time constant in minutes (min) for the transformer at a given load;
- ϑ_{HS} is the hot-spot temperature in degrees Celsius (°C);
- ϑ_a is the ambient temperature in degrees Celsius (°C).

5.10 Determination of winding time constant

5.10.1 General

The concept of a transformer time constant is based on the assumption that a single heat source supplies heat to a single heat sink and that the temperature rise of the sink is an exponential function of the heat input. The time constant is defined as the time for the temperature rise over ambient to change 63,2 % after a step change in load. Typically the temperature stabilises after 5 time constants. Hot-spot temperature calculations for loading should be made on both the low-voltage and high-voltage windings since published test data indicates that the time constants may be different. Insulation system temperature classes for the two windings may also be different.

The time constant should be calculated or determined by test on the transformer after agreement between supplier and purchaser.

5.10.2 Time constant calculation method

The time constant of a winding at rated load, τ_R , is:

$$\tau_R = \frac{C(\Delta \vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_r} \quad (16)$$

where

- C is the effective thermal capacity of winding, in watt-minutes per K (Wmin/K),
- = $(15,0 \times \text{mass of aluminium conductor in kilograms (kg)}) + (24,5 \times \text{mass of epoxy and other winding insulation in kilograms (kg)})$, or
- = $(6,42 \times \text{mass of copper conductor in kilograms (kg)}) + (24,5 \times \text{mass of epoxy and other winding insulation in kilograms (kg)})$;

or

- C is the effective thermal capacity of winding, in watt-hours per K (Wh/K),
- = $(0,25 \times \text{mass of aluminium conductor in kilograms (kg)}) + (0,408 \times \text{mass of epoxy and other winding insulation in kilograms (kg)})$, or
- = $(0,107 \times \text{mass of copper conductor in kilograms (kg)}) + (0,408 \times \text{mass of epoxy and other winding insulation in kilograms (kg)})$;
- P_r is the winding total losses (resistive losses + eddy losses) at rated load and rated temperature rise, in watts (W);
- $\Delta\vartheta_{HS,r}$ is the winding hot-spot temperature rise at rated load, in Kelvin (K);
- ϑ_e is the core contribution to winding hot-spot temperature rise at no load. This value should be the value given below or the value measured by the manufacturer during the temperature rise test on the transformer.
- = 5 K for outer winding (usually HV)
- = 25 K for inner winding (usually LV less than 1 kV).

NOTE 1 The core contribution values above are based on manufacturers' experience.

NOTE 2 Other winding insulation material and kind of epoxy material can be used. For such transformers the correspondent specific heat values of 24,5 Wmin/K and /kg (or 0,408 Wh/K and per kg) can be replaced by the values based on the manufacturer's experience.

5.10.3 Time constant test method

Time constants may also be estimated from the hot resistance cooling curve obtained during thermal tests.

5.11 Determination of winding time constant according to empirical constant

When the temperature rise changes, the time constant varies according to the empirical constant m .

$$\tau_R = \frac{C(\Delta\vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_r} \quad (17)$$

If m is equal to 1, Equation (17) is correct for any load and any starting temperature. If m is not equal to 1, the time constant for any load and for any starting temperature for either a heating cycle or a cooling cycle is given by Equation (18).

$$\tau = \tau_R \frac{\left(\frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right) - \left(\frac{\Delta\vartheta_I}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)}{\left(\frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{\Delta\vartheta_I}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}}} \quad (18)$$

5.12 Calculation of loading capability

Equations (10) through (18) should be used to determine hot-spot temperatures during a load cycle. They should also be used to determine the short-time or continuous loading, which results in the maximum temperatures given in Table 1 or any other limiting temperatures.

The initial hot-spot temperature rise for the initial loading factor I_i should be obtained from Equation (11) and is determined as follows:

$$\Delta\vartheta_i = \Delta\vartheta_{HS,r} [I_i]^{2m} \quad (19)$$

where

I_i is the initial loading factor (ratio between load current and rated current).

From Table 2, select the limiting hot-spot temperature ϑ_{HS} . For the ambient temperature, determine the permissible hot-spot temperature rise at time t from Equation (10).

Table 2 – Maximum hot-spot winding temperature

Insulation system temperature (IEC 60076-11) °C	Maximum hot-spot winding temperature °C
105 (A)	130
120 (E)	145
130 (B)	155
155 (F)	180
180 (H)	205
200	225
220	245

Calculation of the lifetime is not practical for hot-spot temperature over the maximum hot-spot winding temperature indicated in the Table 2 because the winding material composition may change. Transformer loading that results in temperatures that exceed the limits in Table 2 risks transformer failures in an unpredictably short period of time.

$$\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_{HS} + \vartheta_a \quad (20)$$

where

ϑ_{HS} is the hot-spot temperature in degrees Celsius (°C);

$\Delta\vartheta_{HS}$ is the hot-spot temperature rise in Kelvin (K);

ϑ_a is the ambient temperature in degrees Celsius (°C).

$$\Delta\vartheta_t = \vartheta_{HS} - \vartheta_a \quad (21)$$

where

$\Delta\vartheta_t$ is the hot-spot temperature rise in Kelvin (K) at time t after changing the load.

Determine the ultimate hot-spot temperature rise from Equation (14).

$$\Delta\vartheta_U = \left[\frac{\Delta\vartheta_t - \Delta\vartheta_i}{1 - \exp(-t/\tau)} \right] + \Delta\vartheta_i \quad (22)$$

where

$\Delta\vartheta_U$ is the ultimate hot spot temperature rise in Kelvin (K).

The time constant τ should be obtained from 5.9. Select a time t for the duration of the load cycle to substitute in the above equation. From Equation (11) the overload corresponding to these conditions may be obtained as follows:

$$I_U = \left[\frac{\Delta \vartheta_U}{\Delta \vartheta_{HS,r}} \right]^{\frac{1}{2m}} \quad (23)$$

where

I_U is the ultimate loading factor.

The determination of the time constant should be done by an iteration process.

6 Limitations

6.1 Current and temperature limitations

With loading values beyond the nameplate rating, the hot-spot winding temperature shown in Table 3 shall not be exceeded and the specific limitations given in 4.3 and 5.12 shall be taken into account.

The current magnitude is limited to 1,5 I_r especially when the cycle is short and repeated to avoid mechanical damage in the winding. Values over 1,5 I_r shall be specified at the enquiry stage and shall be agreed upon between purchaser and manufacturer. For all other types of cycles the current is limited to 1,5 I_r .

Table 3 – Current and temperature limits applicable to loading beyond nameplate rating

Insulation system temperature (°C)	105 (A)	120 (E)	130 (B)	155 (F)	180 (H)	200	220
Maximum current (p.u.)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Highest temperature for hot-spot (°C)	130	145	155	180	205	225	245
NOTE 1 The temperature and current limits are not intended to be valid simultaneously. The current may be limited to a lower value than shown in order to meet the temperature limitation requirement. Conversely, the temperature may be limited to a lower value than shown in order to meet the current limitation requirement. NOTE 2 The calculation shows that at the highest hot-spot temperature shown in the table the lifetime of a new transformer is only few thousand hours.							

6.2 Other limitations

6.2.1 Magnetic leakage field in structural metallic parts

The magnetic leakage field increases with increasing current. This field may cause excessive temperatures in structural metallic parts that may restrict the overloading. The limits on load current, hot-spot temperature and temperature of structural metallic parts other than windings and leads stated in Table 2 should not be exceeded. It should be noted that when the hot-spot temperature exceeds the highest temperature in Table 2 according to the insulation classes of the transformer, the characteristics of the insulation system decrease to a level below the minimum value for the dielectric withstand of the transformer.

6.2.2 Accessories and other considerations

Aside from the windings, other parts of the transformer, such as bushings, cable-end connections, tap-changing devices, tap changer, temperature measurement devices, surge arresters and leads may restrict the operation at 1,5 times the rated current.

6.2.3 Transformers in an enclosure

Consumption of life time due to overload is higher when the transformer is in an enclosure.

When transformers are used indoors, a correction should be made to the rated hot-spot temperature rise to account for the enclosure.

6.2.4 Outdoor ambient conditions

In many parts of the world, direct sunshine may increase the transformer temperature drastically, which should be taken into account when loading beyond rated current is considered.

Wind may improve the cooling of the transformer, but its unpredictable nature makes it impractical to take into account.

Annex A (informative)

Ageing rate

A.1 Loading capability

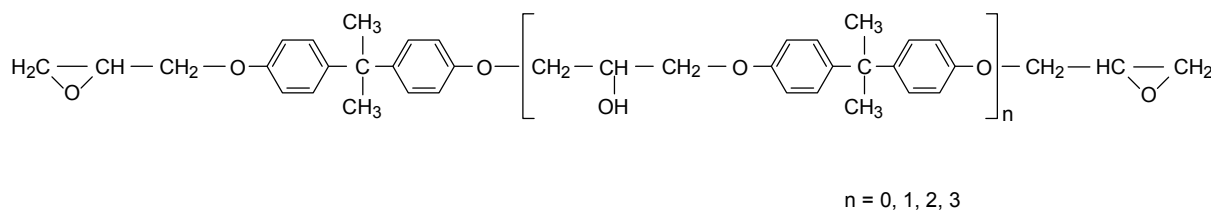
The loading capability of transformers is related to properties of the insulating materials and insulation systems. While the dominant solid insulating materials of oil-immersed transformers are cellulose products, a larger variety of different insulating materials are used in dry-type transformers.

A.2 Molecule structure

A.2.1 General

One common feature of the solid insulating materials is the molecule structure, which consists of long chains of smaller molecules linked together. The chains may contain branches, hexagonal rings and cross-links between chains.

Figure A.1 shows an example of such a molecule structure of an epoxy.



IEC 2001/08

Figure A.1 – Molecule structure of an epoxy

The molecules move. In a solid material, these movements have the character of oscillations. When heat due to the losses in the winding conductor (or other sources of heat) is transferred to the insulation material, the heat energy is converted to kinetic energy in the material. Due to the increased kinetic energy, the movements of the molecules become faster and with larger amplitudes, in other words, more violent. The probability that molecules break into smaller molecules when they collide with each other increases. This kind of chemical process where heat is supplied to the material is called an endothermic process.

A.2.2 Oxidation

Other mechanisms may occur, such as oxidation.

The rate of this chemical reaction is temperature dependent, which in turn depends on the amount of heat transferred to the insulation material.

Insulation materials are developed to achieve optimum properties for their application. The change in the material molecular structure during the endothermic process causes also changes in important properties of the material, like mechanical and dielectric strength, thermal shock resistance and sealing performance. Usually a decline in these properties takes place. The decline in different properties may not happen at the same rate. The word ageing is commonly used for this chemical process and the consequential decline in the various material properties.

A.2.3 Thermal endurance properties

A.2.3.1 General

Thermal index (TI) and the halving interval (HIC) are two terms used to characterise the thermal endurance properties of an insulating material or system. TI is the numerical value of the temperature in degrees Celsius derived from the thermal endurance relationship at a certain time. In relevant IEC standards this time is 20 000 h, but other times can in principle also be specified. HIC is the numerical value of the temperature interval in Kelvins, which expresses the halving of the chosen time to end-point taken at the temperature equal to TI. See Figure A.2.

TI and HIC are found experimentally in accelerated tests at elevated temperatures, and the method is based on the validity of Arrhenius' equation.

A.2.3.2 Arrhenius' law

The chemist and physicist Svante Arrhenius (winner of the Nobel price in chemistry 1903) launched the following general correlation between temperature and chemical reaction rate:

$$k = A \times e^{-\left(\frac{E_a}{R \times T}\right)} \quad (\text{A.1})$$

where

- k is the reaction rate coefficient;
- A is a constant;
- E_a is the activation energy related to the specific material;
- R is the universal gas constant;
- T is the temperature in Kelvins (K); and
- e is the base number of the natural logarithm system (2,718 28...).

Equation (A.1) is known as Arrhenius' equation or Arrhenius' law.

R has the value of $8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$. The activation energy E_a is the amount of energy needed for a reaction to happen to the specific material under consideration, and it is assumed that E_a does not vary with the temperature. E_a has the unit kJ mol^{-1} .

A and k have basically the unit $\text{second}^{-1} (\text{s}^{-1})$, but other time units can also be used when suitable, for example hour. k indicates how rapidly the chemical reaction in the material or in the combination of materials proceeds.

The inverse of (A.1) becomes:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A} \times e^{\frac{E_a}{R \times T}} \quad (\text{A.2})$$

The unit of $1/k$ is the second (s), and it indicates the time elapsed to the chemical reaction has proceeded to a certain stage.

Equation (A.2) can also be written:

$$h = a \times e^{\frac{b}{T}} \quad (\text{A.3})$$

where

$$h = 1/k;$$

$$a = 1/A; \text{ and}$$

$$b = E_a / R.$$

The natural logarithm is taken on both sides of the equal sign:

$$\ln h = \ln a + b \times \frac{1}{T} \quad (\text{A.4})$$

A.2.3.3 Thermal endurance graph

When corresponding values of $\ln h$ and $1/T$ are plotted in a Cartesian diagram, the points will be situated on a straight line. Such a graph is called a thermal endurance graph. An example is shown in Figure A.2.

The experiments are made at higher temperatures than the expected temperature of the temperature index (TI). In the example in Figure A.2 the experiments are made at four different temperatures, 170 °C, 160 °C, 150 °C and 140 °C.

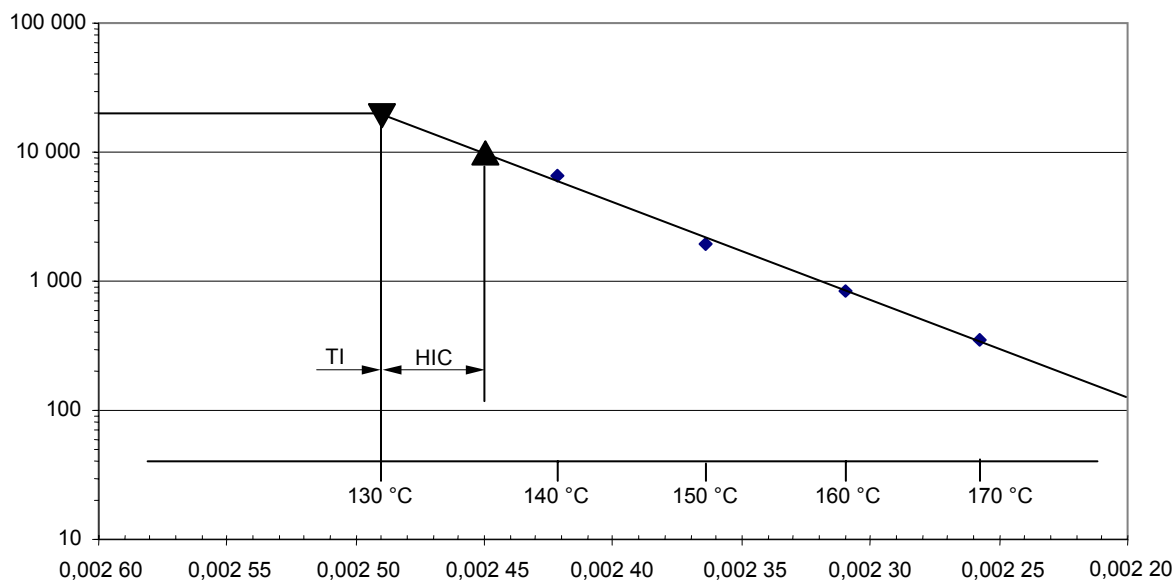
In the experiments an end-point of the material property under investigation (for example the a.c. breakdown voltage) must be defined. The end-point may be defined as a minimum absolute value (e.g. in kV/mm) or a percentual remaining value of the property before the experiment started. Such end-points are suggested in IEC standards for some materials and properties but not for all. IEC 60216-2 contains some suggestions for a number of material properties. In other cases the definition of end-points may be subject to agreement between supplier and purchaser of the material.

An end-point defined as for example 50 % remaining value could be perceived as 'end of life' for the insulation. However, this should not be taken too literally. Definition of end-points in IEC is mainly conventional and is not functional. The deterioration of the material happens gradually. The end-point represents no sharp limit between 'life' and 'death' of the transformer. Reaching the end-point means only that the particular material property has been reduced to a certain percentage of its original value, and that the safety margins and consequently the service reliability of the transformer have been reduced in relation to a new transformer. With respect to for example dielectric properties, the transformer may still perform well for many years if no serious over voltages occur.

Likewise, if no high over currents occur due to short-circuits in the power system, the transformer may operate well in spite of degraded mechanical properties.

In Figure A.2 the four dots indicate the time in hours needed to reach the defined end-point at the four different temperatures 170 °C, 160 °C, 150 °C and 140 °C according to the thermal endurance test. A regression line is drawn between the four points and extended to intersect the 20 000 h ordinate. The intersection takes place at a temperature of 130 °C.

Consequently the material TI for this particular property is 130. Further the regression line shows that the estimated temperature increase that would bring the material to the endpoint after 10 000 h is about 5 °C. The halving interval HIC is then 5.



IEC 2002/08

Key

Y-axis: time (logarithmic scale) in hours (h)

X-axis: reciprocal thermodynamic temperature (linear scale) in Kelvins (K^{-1})

additional temperature axis: Celsius temperature ($^{\circ}C$) (nonlinear scale)

▼ estimated temperature at 20 000 h

▲ estimated temperature at 10 000 h

TI thermal index

HIC halving interval

Figure A.2 – Thermal endurance graph

Because different material properties may decline at different rates, it may be necessary to assign several temperature indexes and halving intervals to one and the same material.

Detailed descriptions regarding the experimental procedures are given in IEC 60216-1 to IEC 60216-6. Figure A.2 shows a simplified and idealised picture that just demonstrates the principle. In reality there will be dispersion in the results from the material samples, partly due to real variations in the material, partly due to measurement uncertainty.

Detailed instructions for calculating thermal endurance characteristics from large bodies of experimental data are provided in IEC 60216-3, including statistical test to verify the validity of using Arrhenius' law. Materials containing substantial quantities of inorganic components may deviate considerably from Arrhenius' law.

This loading guide is based on Arrhenius' law.

The temperature within a transformer winding varies. Certain areas in a winding are exposed to higher temperatures than others. The material deterioration rate is highest in high temperature areas. These areas will reach the end-point first and determine the service reliability of the whole transformer.

The relation between the hot-spot temperature and the average temperature in the windings may vary from one design to another. The formulas for the hot-spot temperature are general and may imply an uncertainty that makes the prediction of lifetime consumption correspondingly uncertain. Manufacturers may be able to provide more precise information on hot-spot temperatures for their particular design.

When assessing the load capability of a transformer, the ambient temperature as a function of the load must be taken into consideration.

A.3 Reference documents

IEC 60216-1, *Electrical insulating materials – Properties of thermal endurance – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*

IEC 60216-2, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 2: Determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials – Choice of test criteria*

IEC 60216-3, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics*

IEC 60216-4-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-1: Ageing ovens – Single-chamber ovens*

IEC 60216-4-2, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-2: Ageing ovens – Precision ovens for use up to 300 °C*

IEC 60216-4-3, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-3: Ageing ovens – Multi-chamber ovens*

IEC 60216-5, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 5: Determination of relative thermal endurance index (RTE) of an insulating material*

IEC 60216-6, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 6: Determination of thermal endurance indices (TI and RTE) of an insulating material using the fixed time frame method*

Annex B (informative)

Examples of lifetime consumptions for 3 load regimes

B.1 Example 1: Loading at constant temperature

B.1.1 Assumptions

Hot-spot temperature rise above ambient:	125 K
Ambient temperature:	30 °C = constant
Insulation system temperature:	130 °C (B)
Loading time:	1 week = 168 h

B.1.2 Calculation

According to Equation (3)

Hot-spot thermodynamic temperature:

$$273 + 30 + 125 = 428 \text{ K}$$

From Table 1

Coefficients a and b are:

$$a = 1,72 \text{ E} - 15 \text{ h}, b = 18 \text{ 115}$$

The ageing rate is calculated according to Equation (5)

$$k = 180 \text{ 000} \times (1,72 \text{ E} - 15)^{-1} \times \exp(-18 \text{ 115} / 428) = 43,48$$

Which means 43,48 h lifetime consumption per hour.

With a loading time of 168 h, the consumption of lifetime in the course of one week at this temperature becomes:

$$43,48 \times 168 = 7 \text{ 305 lifetime hours}$$

The expected lifetime at the rated hot-spot temperature, 120 °C, is 180 000 h. One week at a hot-spot temperature 155 °C consumes then:

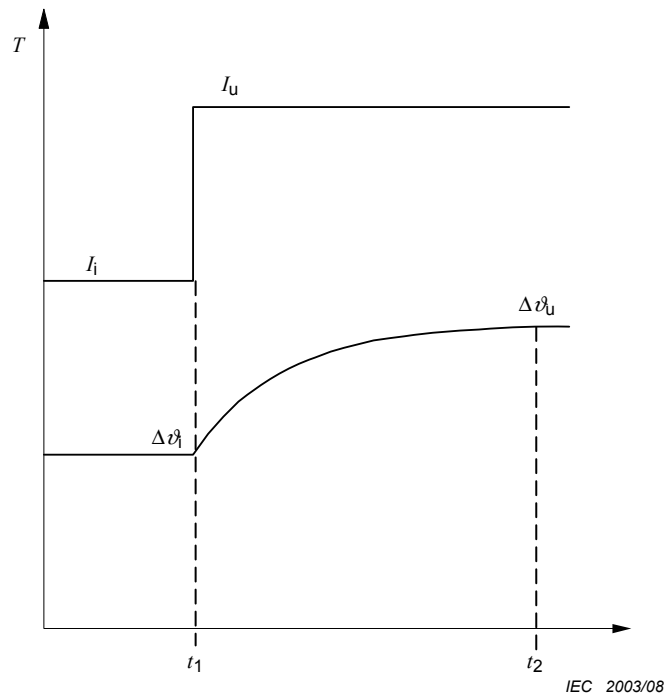
$$100 \times 7 \text{ 305} / 180 \text{ 000} = 4,06 \%$$

of the total expected lifetime of the transformer.

B.2 Example 2: Loading current I_1 for a time t_1 followed by loading current I_u for a time t_2

B.2.1 General

When the load current suddenly changes from one level I_1 to another I_2 the hot-spot winding temperature is assumed to change from an initial temperature rise $\Delta\vartheta_1$ to an $\Delta\vartheta_2$ according to the exponential function (Equation 14) as shown in figure below.

**Key**

X-axis time

Y-axis Upper curve: initial and ultimate loading

Lower curve: temperature rise above ambient temperature

Figure B.1 – Step change loading curve**B.2.2 Assumptions** $I_i = 0,8$ pu, time period $t_1 = 10$ h I_i initial load $I_u = 1,2$ pu, time period $t_2 = 10$ h I_u ultimate load ssRated time constant for the considered winding: $\tau_r = 0,5$ h.

Ambient temperature: 30 °C constant (independent of the load current).

Insulation system temperature: 155 °C.

The hot-spot spot winding temperature at time = 0 is $\Delta\theta_{HSi}$.The average winding temperature rise at rated current $\Delta\theta_{Wr} = 80$ K.

Self-cooled operation.

B.2.3 CalculationEquation (9) is used to calculate $\Delta\theta_{HSi}$ and $\Delta\theta_{HSu}$:

$$\Delta\theta_{HSi} = 1,25 \times 80 \times 0,8^{1,6} = 70 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_{HSu} = 1,25 \times 80 \times 1,2^{1,6} = 134 \text{ K}$$

$$\Delta\vartheta_{HS,r} = 1,25 \times 80 = 100 \text{ K}$$

Equation (18) is used to calculate the time constant for the change in the hot-spot winding temperature rise from 70 K to 134 K:

$$\tau = 0,5 \times \frac{\frac{134}{100} - \frac{70}{100}}{\left(\frac{134}{100}\right)^{1,25} - \left(\frac{70}{100}\right)^{1,25}} = 0,399$$

Equation (14) is used to calculate the momentary value of $\Delta\vartheta_{HS}$ at any time t in the time interval when $\Delta\vartheta_{HS}$ changes from $\Delta\vartheta_{HSi}$ to $\Delta\vartheta_{HSu}$:

$$\Delta\vartheta_{HSu} = 70 + (134 - 70) \times (1 - \exp(-t / 0,399))$$

The ageing rate increases continuously as $\Delta\vartheta_{HS}$ increases. See Figure B.2.

$$\Delta\vartheta_{HS} \approx \Delta\vartheta_{HSu} \text{ when } t \approx 5 \times \tau = 5 \times 0,399 = 1,995 \text{ h, say 2 h.}$$

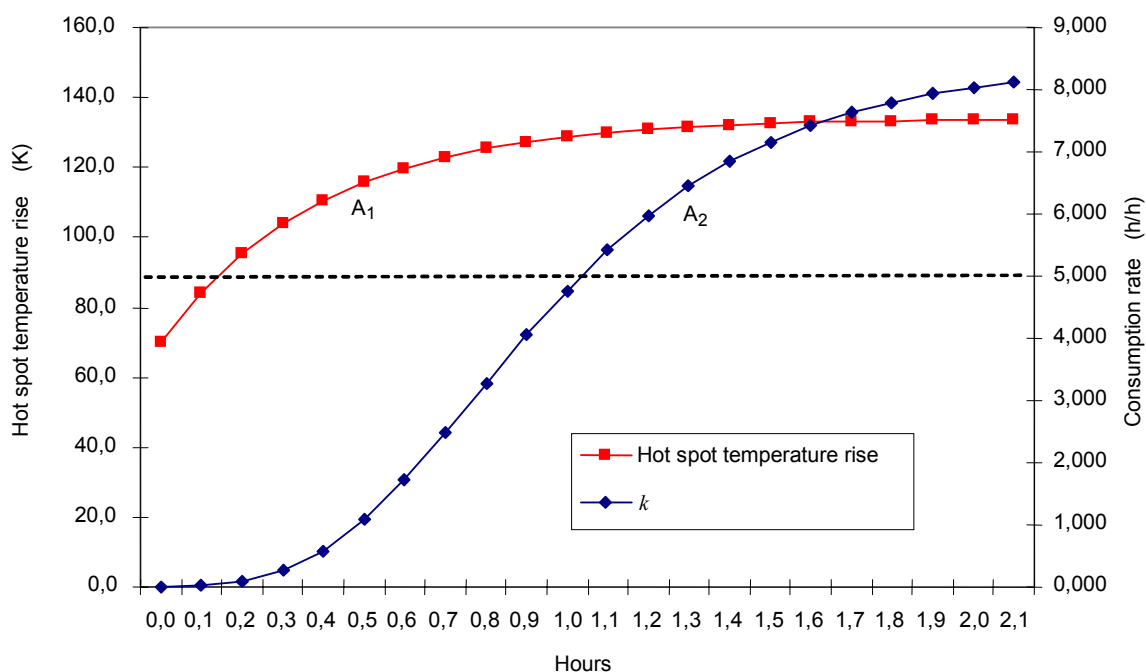
In order to calculate the lifetime consumption during the transition interval between $\Delta\vartheta_{HSi}$ and $\Delta\vartheta_{HSu}$ simultaneous values of time, hot-spot temperature rise $\Delta\vartheta_{HS}$, thermodynamic temperature T and ageing rate k are listed in Table B.1 for the time interval $t - t_1 = 0$ to 2 h.

Table B.1 – Lifetime consumption calculations

Time	Hot-spot temperature rise	Thermodynamic temperature	Ageing rate	Lifetime consumption
(h)	(K)	(K)	(h/h)	(h)
	Eq. 14	Eq. 3	Eq. 5	Eq. 7
0	70,0	373,0	0,003	0,000 0
0,1	84,2	387,2	0,020	0,002 0
0,2	95,2	398,2	0,088	0,008 8
0,3	103,8	406,8	0,260	0,026 0
0,4	110,5	413,5	0,586	0,058 6
0,5	115,7	418,7	1,086	0,108 6
0,6	119,8	422,8	1,735	0,173 5
0,7	122,9	425,9	2,484	0,248 4
0,8	125,4	428,4	3,272	0,327 2
0,9	127,3	430,3	4,046	0,404 6
1	128,8	431,8	4,768	0,476 8
1,1	129,9	432,9	5,413	0,541 3
1,2	130,8	433,8	5,972	0,597 2
1,3	131,5	434,5	6,445	0,644 5
1,4	132,1	435,1	6,838	0,683 8
1,5	132,5	435,5	7,160	0,716 0
1,6	132,8	435,8	7,420	0,742 0

Time	Hot-spot temperature rise	Thermodynamic temperature	Ageing rate	Lifetime consumption
(h)	(K)	(K)	(h/h)	(h)
	Eq. 14	Eq. 3	Eq. 5	Eq. 7
1,7	133,1	436,1	7,629	0,762 9
1,8	133,3	436,3	7,796	0,779 6
1,9	133,5	436,5	7,928	0,792 8
2	133,6	436,6	8,032	0,803 2
2,1	133,7	436,7	8,114	0,811 4
			L_C total	9,709 3

Values of $\Delta\vartheta_{HS}$ and k are plotted versus time in Figure B.2.



IEC 2004/08

Key

X-axis: time after t_1 in hours (h)

Y-axis: Left hot-spot temperature rise in Kelvin (K)

Right lifetime consumption rate k in hours per hour (h/h)

Upper red curve: hot-spot temperature rise in Kelvin (K)

Lower blue curve: lifetime consumption rate corresponding to the hot-spot temperature rise

Figure B.2 – Hot-spot temperature rise and life consumption

The lifetime consumption for the 2 h long period of transition from $\Delta\vartheta_{HSi}$ to $\Delta\vartheta_{HSu}$ is represented by the area below the lower solid curve. There are several ways to estimate this area. A simple way is to draw a horizontal straight line across the diagram. The line shall be situated at an ordinate that makes the size of the two areas A_1 and A_2 equal judged by the eye. The boundaries of the area A_1 are the left ordinate axis, the horizontal line and the solid curve. The boundaries of the area A_2 are the right ordinate axis, the horizontal line and the

solid curve. The ordinate on the right axis is read, and the area below the curve for k is equal to the product of this ordinate and the time at the right end of the X-axis. In this case:

$$5,0 \times 2 = 10 \text{ (h)}$$

This means that the lifetime consumption during the 2 h long time interval while the hot-spot temperature rise increases from 70 K to 134 K is 10 h.

In addition to these hours comes the lifetime consumption due to 10 h at 70 K hot-spot temperature rise and $10 - 2 = 8$ h at 134 K. The two latter contributions can be calculated by Equation (7).

$$L_{c1} = 180\,000 \times 10 \times (9,60 \text{ E} - 17)^{-1} \times \exp(-20\,475 / (273+100)) = 0,03 \text{ h}$$

$$L_{c2} = 180\,000 \times 8 \times (9,60 \text{ E} - 17)^{-1} \times \exp(-20\,475 / (273+164)) = 67,28 \text{ h}$$

They are 0,03 h and 67,28 h respectively.

The total lifetime consumption during the total 20 h considered is then:

$$0,03 + 9,71 + 67,28 = 77,02 \text{ h.}$$

Other ways to determine the area below the curve for k in the transition interval are the numerical integration methods, the rectangular, trapezoidal or Simpson's rule.

The k -curve has a shape that can be described by a polynomial, which is easy to integrate to obtain the size of the area below the curve. By this method, the lifetime is 8,54 h if the step of calculation is 0,01 h.

B.3 Example 3: Varying load current

B.3.1 Assumptions

Loading current varying between 0,7 p.u. and 1,2 p.u. during a 24 h period.

Rated time constant for the considered winding: $\tau_r = 0,5$ h.

Ambient temperature: 30 °C constant (independent of the loading current).

Insulation system temperature: 180 °C.

The average winding temperature rise at rated current $\Delta\vartheta_{Wr} = 100$ K.

Self-cooled operation.

B.3.2 Calculation

The load cycle is shown in the two left columns of Table B.2 and in Figure B.3. The load current is recorded once every hour.

In order to calculate the lifetime consumption during 24 h period simultaneous values of time, hot-spot temperature rise $\Delta\vartheta_{HS}$, thermodynamic temperature T and ageing rate k are listed in Table B.2.

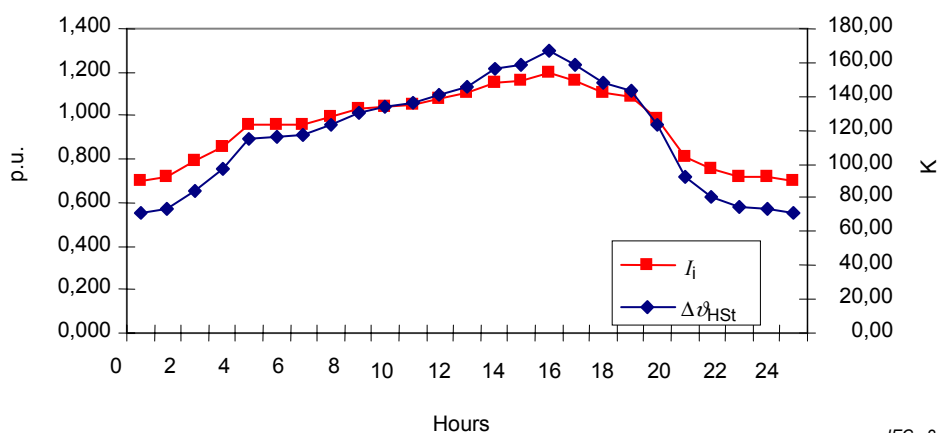
Table B.2 – Life consumption calculations for varying load

Time	p.u. Loading factor	Ultimate hot spot temperature rise	Time constant	Hot spot tempera- ture rise	Thermodynamic temperature	Ageing rate k	Time	Con- sump- tion of life k	Factor	$k \times$ factor
(h)		(K)	(h)	(°C)	(K)	(h/h)	(h)	(h/h)		(h)
		Eq. 9	Eq. 18	Eq. 14	Eq. 3	Eq. 5				
0	0,700	70,64		70,64	373,6	0,000	0	0,000	1	0,000
1	0,722	74,23	0,458	73,82	376,8	0,000	1	0,000	4	0,000
2	0,788	85,38	0,448	84,14	387,1	0,001	2	0,001	2	0,001
3	0,859	98,02	0,432	96,64	399,6	0,004	3	0,004	4	0,014
4	0,956	116,32	0,416	114,54	417,5	0,042	4	0,042	2	0,085
5	0,957	116,51	0,407	116,34	419,3	0,054	5	0,054	4	0,214
6	0,962	117,49	0,407	117,39	420,4	0,061	6	0,061	2	0,123
7	0,991	123,20	0,404	122,72	425,7	0,122	7	0,122	4	0,486
8	1,029	130,85	0,398	130,19	433,2	0,309	8	0,309	2	0,617
9	1,044	133,92	0,394	133,62	436,6	0,468	9	0,468	4	1,872
10	1,054	135,97	0,392	135,79	438,8	0,607	10	0,607	2	1,214
11	1,080	141,38	0,390	140,95	444,0	1,116	11	1,116	4	4,464
12	1,104	146,44	0,386	146,03	449,0	2,004	12	2,004	2	4,008
13	1,152	156,76	0,381	155,98	459,0	6,079	13	6,079	4	24,317
14	1,163	159,16	0,377	158,94	461,9	8,375	14	8,375	2	16,750
15	1,200	167,34	0,374	166,76	469,8	19,176	15	19,176	4	76,702
16	1,159	158,29	0,374	158,87	461,9	8,317	16	8,317	2	16,635
17	1,109	147,50	0,380	148,32	451,3	2,600	17	2,600	4	10,399
18	1,087	142,85	0,385	143,26	446,3	1,459	18	1,459	2	2,917
19	0,982	121,42	0,395	123,15	426,2	0,128	19	0,128	4	0,514
20	0,810	89,22	0,418	92,32	395,3	0,002	20	0,002	2	0,004
21	0,751	79,06	0,442	80,43	383,4	0,000	21	0,000	4	0,001
22	0,720	73,90	0,452	74,62	377,6	0,000	22	0,000	2	0,000
23	0,719	73,74	0,456	73,83	376,8	0,000	23	0,000	4	0,000
24	0,700	70,64	0,459	71,00	374,0	0,000	24	0,000	1	0,000

161,34

53,78

Notice that there is some variation in the time constant during the cycle.



IEC 2005/08

Key

X-axis time in hours (h)

Y-axis left: load current (p.u.)

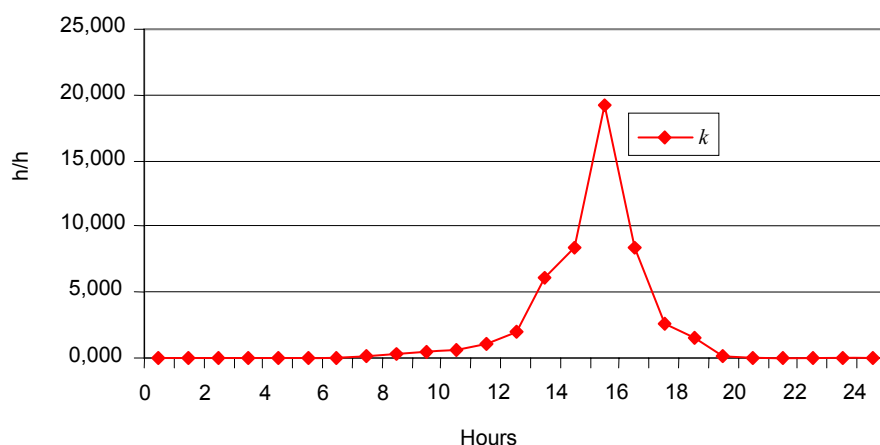
Y-axis right: winding hot-spot temperature rise in Kelvin (K)

Blue curve load current, corresponding to left Y-axis (p.u.) and corresponding to symbol I_i

Red curve winding hot-spot temperature rise, corresponding to right Y-axis (K)

Figure B.3 – Load current and winding hot-spot temperature rise

The curve in Figure B.4 shows how the ageing rate varies with the time during the 24 h cycle. The lifetime consumption in the course of the cycle is the area below this curve.



IEC 2006/08

Key

X-axis time in hours (h)

Y-axis ageing rate in hours per hour (h/h)

Figure B.4 – Ageing rate versus time

The area below the curve can be found by means of Simpson's rule of numerical integration, which says:

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{b-a}{6n} \times (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 4y_{2n-1} + y_{2n})$$

where $2n$ is the number of equal subdivision intervals in the total interval from a to b .

In the present example $2n = 24$ ($n = 12$), and the ordinates y_0, y_1, y_2 etc., are the values of k , $b = 24$ and $a = 0$.

The following table can be set up:

Table B.3 – Life consumption calculation

Time	Consumption of life	Factor	$k \times \text{factor}$
(h)	(h/h)	(h)	(h)
	Eq. 7		
0	0,000	1	0,000
1	0,000	4	0,000
2	0,001	2	0,001
3	0,004	4	0,014
4	0,042	2	0,085
5	0,054	4	0,214
6	0,061	2	0,123
7	0,122	4	0,486
8	0,309	2	0,617
9	0,468	4	1,872
10	0,607	2	1,214
11	1,116	4	4,464
12	2,004	2	4,008
13	6,079	4	24,317
14	8,375	2	16,750
15	19,176	4	76,702
16	8,317	2	16,635
17	2,600	4	10,399
18	1,459	2	2,917
19	0,128	4	0,514
20	0,002	2	0,004
21	0,000	4	0,001
22	0,000	2	0,000
23	0,000	4	0,000
24	0,000	1	0,000

161,34

53,78

The area of below the curve in Figure B.4 is then:

$$\frac{24}{6 \times 12} \times 161,34 = 53,78 \text{ (h)}$$

This means that during the given 24 h loading cycle 53,78 lifetime hours is consumed of a total lifetime of 180 000 h, which is 0,029 9 % of the total lifetime.

Annex C (informative)

List of symbols

Symbol	Meaning	Units	Subclause
a	Arrhenius' equation constants	h	5.2
b	Arrhenius' equation constants	K	5.2
C	effective thermal capacity of winding	W•min/ K or W•h/K	5.10.2
C_T	temperature correction for resistance change with temperature		5.9.1
I	loading factor per unit		5.9.1
I_i	initial loading factor		5.12
I_n	loading factor n per unit		5.8
I_U	ultimate loading factor		5.12
k	ageing rate as consumption of lifetime-hours per hour of operation time at a temperature	h/h	5.4
kr	relative ageing rate at constant hot-spot temperature T (in Kelvin) expressed as a percentage of the ageing rate that gives 180 000 hours lifetime	%	5.4
L	life time	h	5.2
L_c	lifetime consumption expressed in hours, at a constant hot-spot temperature T (in Kelvin) during a time t in hours	h	5.5
m	empirical constant, which is equal to 0,8		5.9.1
P_r	winding total losses (resistive losses+ eddy losses) at rated load and rated temperature rise	W	5.10.2
q	empirical constant for calculation of hot-spot temperature rise at a considered load		5.8
t	time	min	5.9.2
T	hot-spot thermodynamic temperature	K	5.2
T_i	insulation system temperature (thermal index T_i)	°C	5.2
T_k	temperature constant for conductor, which is 225 for aluminium and 235 for copper		5.9.1
X	empirical constant used in forced-air calculation, which is 1 (suggested unless test data available)		5.9.1
Z	assumed hot-spot factor to be 1,25		5.7/5.8
ϑ_a	ambient temperature	°C	5.3 /5.9.1 /5.9.2 /5.12
ϑ_e	core contribution to winding hot-spot temperature rise at no load	K	5.10.2
ϑ_{HS}	hot-spot temperature at given conditions (load I , ambient temperature...)	°C	5.6 5.9.1 5.9.2 /5.12
$\vartheta_{HS,r}$	winding rated hot-spot temperature calculated or tested hot-spot temperature at 1,0 per unit	°C	5.2 5.9.1

Symbol	Meaning	Units	Subclause
	load		
$\Delta\vartheta_{HS}$	hot-spot temperature rise at per unit load I	K	5.9.1 5.12
$\Delta\vartheta_{HS,r}$	hot-spot temperature rise at rated load	K	5.7
$\Delta\vartheta_{HSn}$	winding hot-spot temperature rise above the ambient temperature at the considered load hot-spot temperature rise at the considered load	K	5.2 5.8
$\Delta\vartheta_i$	initial hot-spot temperature rise at some prior load I_n	K	5.9.2
$\Delta\vartheta_t$	hot-spot temperature rise at time t after changing the load	K	5.9.2 / 5.12
$\Delta\vartheta_U$	ultimate hot-spot temperature rise if the per unit overload I_U continued until the hot-spot temperature rise stabilized ultimate hot-spot temperature rise	K	5.9.2 5.12
$\Delta\vartheta_{Wr}$	average winding temperature rise at rated load	K	5.7
τ	time constant for the transformer at a given load	min	5.9.2
τ_R	time constant for the transformer at rated load	min	5.9.2

Bibliography

IEC 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2, *Power transformers – Part 2: Temperature rise*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	38
INTRODUCTION.....	40
1 Domaine d'application	41
2 Références normatives.....	41
3 Termes et définitions	41
4 Effet d'un régime de charge au-delà de la puissance assignée de la plaque signalétique.....	42
4.1 Généralités.....	42
4.2 Conséquences générales	42
4.3 Effets et dangers d'un régime de charge de secours de courte durée	42
4.4 Effets d'un régime de charge de secours de longue durée.....	43
5 Vieillessement et durée de vie de l'isolation du transformateur	43
5.1 Généralités.....	43
5.2 Durée de vie.....	44
5.3 Relation entre la charge continue constante et la température.....	45
5.4 Vitesse de vieillissement	45
5.5 Consommation de la durée de vie	46
5.6 Température du point chaud en régime permanent.....	46
5.7 Facteur de point chaud supposé.....	46
5.8 Echauffements de point chaud pour des conditions variables de température ambiante et de régime de charge	46
5.9 Equations de charge	47
5.9.1 Charge continue	47
5.9.2 Charge transitoire.....	48
5.10 Détermination de la constante de temps de l'enroulement	49
5.10.1 Généralités.....	49
5.10.2 Méthode de calcul de la constante de temps	49
5.10.3 Méthode d'essai de la constante de temps	50
5.11 Détermination de la constante de temps de l'enroulement conformément à la constante empirique	50
5.12 Calcul de la capacité de charge.....	50
6 Limites	52
6.1 Limites de courant et de température	52
6.2 Autres limites	52
6.2.1 Champ magnétique de fuite dans les parties métalliques de construction.....	52
6.2.2 Accessoires et autres considérations.....	52
6.2.3 Transformateurs sous enveloppe	53
6.2.4 Conditions ambiantes extérieures.....	53
Annexe A (informative) Vitesse de vieillissement	54
Annexe B (informative) Exemples de consommation de durée de vie pour 3 régimes de charge	59
Annexe C (informative) Liste de symboles	68
Bibliographie.....	70
Figure A.1 – Structure moléculaire d'une résine époxy.....	54

Figure A.2 – Graphique d'endurance thermique	57
Figure B.1 – Courbe de charge variable par pas	60
Figure B.2 – Échauffement du point chaud et consommation de durée de vie	62
Figure B.3 – Courant de charge et échauffement du point chaud de l'enroulement.....	65
Figure B.4 – Taux de vieillissement en fonction du temps	65
Tableau 1 – Constantes pour équation de durée de vie.....	44
Tableau 2 – Température maximale du point chaud de l'enroulement	51
Tableau 3 – Limites de courant et de température applicables aux charges au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique	52
Tableau B.1 – Calculs de consommation de durée de vie	61
Tableau B.2 – Calculs de consommation de vie pour une charge variable.....	64
Tableau B.3 – Calcul de consommation de vie	66

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60076-12 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

La présente norme annule et remplace la CEI 60905 (1987). Cette première édition constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/584/FDIS	14/590/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60076, présentées sous le titre général *Transformateurs de puissance*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI 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 de la CEI 60076 donne des lignes directrices pour la spécification et la charge des transformateurs de puissance de type sec, du point de vue des températures de fonctionnement et du vieillissement thermique. Elle indique les conséquences d'un fonctionnement à des régimes de charge supérieurs à la valeur assignée et fournit un guide pour le planificateur afin de choisir les grandeurs assignées et les conditions de charge appropriées pour de nouvelles installations.

La CEI 60076-11 constitue la base pour des ententes contractuelles et elle contient les exigences et les essais concernant les valeurs d'échauffement des transformateurs de puissance de type sec au cours d'une charge assignée continue. Il convient de noter que la CEI 60076-11 fait référence à l'échauffement moyen des enroulements, tandis que la présente partie de la CEI 60076 se réfère principalement à la température de point chaud, et les dernières valeurs indiquées sont données seulement à titre indicatif.

La présente partie de la CEI 60076 donne des modèles mathématiques pour juger la conséquence de différents régimes de charge, transitoires ou cycliques, pour différentes températures du fluide de refroidissement, et pour des variations transitoires ou cycliques au cours du temps. Les modèles donnent le calcul des températures de fonctionnement dans le transformateur, en particulier la température de la partie la plus chaude de l'enroulement. Cette température de point chaud est utilisée pour l'estimation du nombre d'heures de la durée de vie consommée au cours d'une période de temps particulière.

La présente partie de la CEI 60076 présente des recommandations supplémentaires concernant les limites de charge admissible selon les résultats des calculs ou des mesures de la température. Ces recommandations se réfèrent à différents types de régimes de charge – régime de charge continu, régime de charge de secours de courte durée et de longue durée. Une explication des principes essentiels du vieillissement est donnée en Annexe A.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 s'applique aux transformateurs de type sec, conformément au domaine d'application de la CEI 60076-11. Elle fournit les moyens pour estimer la vitesse de vieillissement et la consommation de la durée de vie de l'isolation du transformateur en fonction de la température de fonctionnement, de la durée et de la charge du transformateur.

NOTE Pour les applications particulières telles que les transformateurs pour application dans les éoliennes, les transformateurs de fours, les transformateurs des machines à souder, et d'autres transformateurs, il convient de consulter le constructeur concernant le profil de charge particulier.

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).

CEI 60076-11, *Transformateurs de puissance – Partie 11: Transformateurs de type sec*

CEI 60216-1, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 1: Méthodes de vieillissement et évaluation des résultats d'essai*

CEI 61378-1:1997, *Transformateurs de conversion – Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

régime de charge de secours de longue durée

régime de charge résultant de la panne prolongée de certains éléments du système qui ne seront pas reconnectés avant que le transformateur atteigne, en régime permanent, une nouvelle température stabilisée plus élevée

3.2

régime de charge de secours de courte durée

régime de charge exceptionnellement élevé à caractère transitoire (inférieure à une fois la constante de temps de la bobine) dû à l'apparition d'un ou plusieurs événements de faible probabilité qui perturbent sérieusement le régime de charge normal du système

3.3

point chaud

en l'absence de définition spécifique, «point chaud» signifie le point le plus chaud de l'enroulement

3.4

vitesse relative de vieillissement thermique

pour une température de point chaud donnée, vitesse à laquelle le vieillissement de l'isolation du transformateur est réduit ou accéléré par rapport à la vitesse de vieillissement correspondant à une température de point chaud de référence

3.5

durée de vie de l'isolation du transformateur

durée totale entre l'état initial pour lequel la durée de vie de l'isolation d'un transformateur normal est considérée neuve et l'état final correspondant au moment où, en raison du vieillissement thermique, des contraintes diélectriques, des contraintes de court-circuit ou des mouvements mécaniques, qui pourraient se produire en service normal, conduisent à un risque élevé de défaillance électrique

3.6

refroidissement AN

refroidissement par ventilation naturelle de l'air

3.7

refroidissement AF

méthode de refroidissement pour augmenter la puissance assignée du transformateur avec un refroidissement par ventilateur

4 Effet d'un régime de charge au-delà de la puissance assignée de la plaque signalétique

4.1 Généralités

L'espérance de vie normale est une base de référence conventionnelle pour un service continu à la température ambiante de conception et aux conditions de fonctionnement assignées. L'application d'une charge supérieure à celle de la plaque signalétique et/ou d'une température ambiante plus élevée que les températures ambiantes spécifiées implique un degré de risque et un vieillissement accéléré. L'objet de la présente partie de la CEI 60076 consiste à identifier de tels risques et à indiquer comment, dans certaines limites, les transformateurs peuvent être chargés au-delà de la puissance assignée de la plaque signalétique.

4.2 Conséquences générales

Un régime de charge d'un transformateur au-delà de la puissance assignée de sa plaque signalétique entraîne les conséquences suivantes:

- les températures des enroulements, des bornes, des connexions, des changeurs de prises et de l'isolation augmentent, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables;
- le refroidissement de l'enveloppe est plus sensible à la surcharge, entraînant une augmentation plus rapide de la température de l'isolation à des niveaux inacceptables;
- par conséquent, il y aura un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures. Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou peut résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolation du transformateur sur de nombreuses d'années.

NOTE Une autre conséquence de la surcharge est une augmentation de la chute de tension du transformateur.

4.3 Effets et dangers d'un régime de charge de secours de courte durée

Les risques principaux, pour un régime de charge de secours de courte durée au-dessus des limites spécifiées, sont les suivantes:

- contraintes mécaniques critiques dues à l'augmentation de la température, qui peut atteindre un niveau inacceptable, provoquant des fissures dans l'isolation d'un transformateur en résine enrobés;
- dommages mécaniques dans l'enroulement dus à un courant court et répétitif supérieur au courant assigné;
- dommages mécaniques dans l'enroulement dus à un courant court et répétitif combiné à une température ambiante supérieure à la température spécifiée;
- une dégradation des propriétés mécaniques à une température plus élevée peut réduire la tenue au court-circuit;
- réduction de la tenue diélectrique à cause de la température élevée.

Par conséquent, la surintensité maximale est limitée à 50 % du courant nominal assigné.

L'accord du constructeur est nécessaire en cas de surcharge supérieure à 50 %, afin d'évaluer les conséquences d'une telle surcharge. Dans tous les cas, il convient que la durée d'une telle surcharge soit aussi courte que possible.

4.4 Effets d'un régime de charge de secours de longue durée

Les effets d'un régime de charge de secours de longue durée sont

- la détérioration thermique cumulée des propriétés mécaniques et diélectriques de l'isolation des conducteurs sera accélérée à des températures plus élevées. Si cette détérioration se poursuit suffisamment, elle réduit la durée de vie du transformateur, en particulier si l'appareil est soumis à des courts-circuits du réseau électrique;
- d'autres matériaux isolants, ainsi que les parties structurelles et les conducteurs, vieillissent davantage à des températures plus élevées;
- les règles de calcul pour la vitesse de vieillissement et la consommation de la durée de vie sont basées sur des considérations de charge.

5 Vieillessement et durée de vie de l'isolation du transformateur

5.1 Généralités

L'expérience montre que la durée de vie normale d'un transformateur est de plusieurs dizaines d'années. Elle ne peut pas être indiquée plus précisément, parce qu'elle peut varier, même entre des unités identiques, en particulier à cause des facteurs de fonctionnement, qui peuvent différer d'un transformateur à l'autre. A quelques exceptions près, un transformateur fonctionne rarement à 100 % du courant assigné tout au long de sa durée de vie. D'autres facteurs d'échauffement tels qu'un refroidissement insuffisant, des harmoniques, une saturation et/ou des conditions inhabituelles telles que décrites dans la CEI 60076-11, peuvent également affecter la durée de vie du transformateur.

Lorsque la chaleur, qui est principalement due aux pertes du transformateur, est transférée au système d'isolation, un processus chimique commence. Ce processus modifie la structure moléculaire des matériaux qui constituent le système d'isolation. La vitesse de vieillissement augmente avec la quantité de chaleur transférée au système. Ce processus est cumulatif et irréversible, ce qui signifie que les matériaux ne retrouvent pas leur structure moléculaire d'origine lorsqu'il n'y a plus d'apport de chaleur et que la température diminue. L'indice thermique du système d'isolation est indiqué dans la documentation du constructeur et est également écrit sur la plaque signalétique. On suppose qu'une isolation défaillante due au vieillissement est l'une des causes de la fin de la durée de vie du transformateur.

De plus, on suppose que la vitesse de vieillissement varie en fonction de la température, conformément à l'équation d'Arrhenius. Se reporter à l'Annexe A pour des informations de base supplémentaires. Il convient que les deux constantes dans l'équation d'Arrhenius soient idéalement déterminées au moyen d'essais d'endurance thermique. Dans les cas où il n'y a

pas de données provenant d'essais de ce type, ce guide fournit des constantes estimées, qui sont calculées sur la base des hypothèses suivantes:

- une augmentation de la température de 6 K double la vitesse de vieillissement. 6 K est une valeur estimée pour l'ensemble de l'enroulement, liée à la valeur de matériaux spécifiques utilisés dans l'enroulement;
- il convient d'utiliser une autre valeur pour ce doublement de vitesse lorsqu'il est validé par les essais d'endurance thermique sur l'ensemble du système d'isolation électrique, d'après la CEI 60216-1;
- les défaillances de l'isolation provoquent la fin de vie du transformateur.

5.2 Durée de vie

La durée de vie prévue L d'un transformateur à une température thermodynamique constante de point chaud T en kelvins (K) peut être calculée à l'aide de l'équation:

$$L = a \times e^{\frac{b}{T}} \quad (1)$$

Cette équation peut être écrite de façon plus appropriée ainsi:

$$L = a \times \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (2)$$

Bien que toute unité de temps puisse être utilisée dans ces formules, l'heure est utilisée dans le présent guide. La constante a , donnée dans le Tableau 1 pour les différentes températures du système d'isolation, est basée sur cette unité de temps.

NOTE 1 Il convient que la durée de vie prévue calculée conformément à cette équation ne soit pas perçue dans un sens trop littéral. La capacité du transformateur à résister à des surintensités élevées dues à des courts-circuits dans le système d'alimentation et à des surtensions est, après cette durée de vie calculée théoriquement, certainement affaiblie par rapport à celle d'un nouveau transformateur. En l'absence de telles perturbations, le transformateur peut continuer à fonctionner de manière satisfaisante pendant de nombreuses années. Des précautions pour éviter les courts-circuits et des installations de protection adéquate contre les surtensions peuvent prolonger la durée de vie du transformateur.

Tableau 1 – Constantes pour équation de durée de vie

Température du système d'isolation (classe thermique)	Constantes de l'équation d'Arrhenius		Température de point chaud nominale de l'enroulement $\vartheta_{HS,r}$
	a	b	
°C	h	K	°C
105 (A)	3,10E-14	15 900	95
120 (E)	5,48E-15	17 212	110
130 (B)	1,72E-15	18 115	120
155 (F)	9,60E-17	20 475	145
180 (H)	5,35E-18	22 979	170
200	5,31E-19	25 086	190
220	5,26E-20	27 285	210

NOTE 2 Les formules suivantes sont utilisées pour déterminer les coefficients a et b pour la température assignée du point chaud de l'enroulement:

$$\ln(180\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HS,r} + 273} + \ln(a)$$

$$\ln(90\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HS,r} + 6 + 273} + \ln(a)$$

$\vartheta_{HS,r}$ est la température nominale de point chaud de l'enroulement;

T_i est la température du système d'isolation (classe thermique T_i).

Le Tableau 1 est calculé en doublant le vieillissement pour chaque valeur de 6 K.

NOTE 3 La plupart des transformateurs de puissance fonctionnent bien en dessous de la pleine charge pour l'essentiel de leur durée de vie réelle. Puisque une température de point chaud d'une valeur aussi petite que 6 °C inférieure aux valeurs assignées a comme conséquence une réduction de moitié de la consommation de durée de vie assignée, la durée de vie réelle d'un transformateur excède typiquement 20 ans. En conséquence, les constantes du Tableau 1 ont été développées sur une base de 180 000 h en doublant le vieillissement 6 K.

5.3 Relation entre la charge continue constante et la température

La température thermodynamique constante de point chaud T , exprimée en kelvins (K) de l'enroulement est donnée par:

$$T = 273 + \vartheta_a + \Delta\vartheta_{HSn} \quad (3)$$

où

ϑ_a est la température ambiante en degrés Celsius (°C);

$\Delta\vartheta_{HSn}$ est l'échauffement du point chaud de l'enroulement au-dessus de la température ambiante à la charge considérée.

Notez que la température ambiante peut ne pas être indépendante de la charge, mais peut être fonction de la charge:

$$\vartheta_a = f(\text{courant}) \quad (4)$$

Cette fonction peut varier d'un site à l'autre. La connaissance de cette corrélation pour le site particulier est nécessaire pour faire des estimations pertinentes de la vitesse de vieillissement et de la consommation de la durée de vie. La corrélation peut être trouvée par des mesures sur le site spécifique. Si aucune information de ce type n'est disponible, des indications concernant la vitesse de vieillissement et la consommation de la durée de vie peuvent être obtenues en effectuant des calculs alternatifs à différentes températures ambiantes, par exemple dans la plage comprise entre 10 °C et 40 °C.

Les formules données dans la présente norme considèrent les pertes par courants de Foucault comme des pertes ohmiques dans les enroulements. Les données d'essai indiquent que les formules montrent une perte de durée de vie plus élevée que prévu. Si des courants harmoniques sont présents, l'augmentation des pertes par courants de Foucault au cours de la surcharge peut nécessiter une prise en compte supplémentaire, conformément à l'Annexe A de la CEI 61378-1.

5.4 Vitesse de vieillissement

La durée de vie normale d'un transformateur est en pratique d'au moins 180 000 h. Afin d'exprimer la vitesse de vieillissement k comme une consommation de la durée de vie-heures par heure de durée de fonctionnement à une température T , exprimée en kelvins (K), une durée de 180 000 h est utilisée comme référence prudente dans l'équation suivante:

$$k = 180\,000 \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (5)$$

La vitesse de vieillissement relative kr à la température constante de point chaud T , exprimée en kelvins (K), exprimée en pourcentage de la vitesse de vieillissement qui donne une durée de vie de 180 000 h est calculée conformément à l'équation:

$$kr = 100 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (6)$$

a et b doivent être extraits du Tableau 1.

5.5 Consommation de la durée de vie

La consommation de la durée de vie L_C , exprimée en heures (h), à une température constante de point chaud T , exprimée en kelvins (K), au cours d'un temps t en heures (h) est calculée conformément à l'équation:

$$L_C = 180\,000 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (7)$$

a et b sont extraits du Tableau 1.

5.6 Température du point chaud en régime permanent

Pour la plupart des transformateurs en service, la température de point chaud à l'intérieur d'un enroulement n'est pas connue avec précision. Pour la plupart de ces unités, la température de point chaud peut être évaluée par calcul.

Les règles de calcul dans ce document sont basées sur les éléments suivants:

ϑ_{HS} est la température de point chaud, exprimée en degrés Celsius (°C), aux conditions assignées (courant assigné, température ambiante assignée, tension assignée, fréquence assignée...).

Le paramètre ϑ_{HS} peut être trouvé par une méthode de calcul ou par des essais.

NOTE Bien qu'il n'y ait pas d'essai normalisé pour déterminer la température de point chaud, si le constructeur démontre d'autres valeurs par des essais, il peut utiliser ces valeurs pour effectuer des calculs de la consommation de la durée de vie du transformateur.

5.7 Facteur de point chaud supposé

Pour la considération suivante, le facteur de point chaud supposé Z est de 1,25:

$$\Delta\vartheta_{HS,r} = Z \times \Delta\vartheta_{Wr} \quad (8)$$

où

$\Delta\vartheta_{HS,r}$ est l'échauffement du point chaud, exprimé en kelvins (K);

$\Delta\vartheta_{Wr}$ est l'échauffement moyen de l'enroulement à la charge assignée, exprimé en kelvins (K).

5.8 Echauffements de point chaud pour des conditions variables de température ambiante et de régime de charge

La valeur de base requise pour le calcul de la consommation de la durée de vie est la température au point chaud. A cet effet, il est nécessaire de connaître l'échauffement à cet emplacement pour chaque régime de charge, ainsi que la température ambiante.

$$\Delta\vartheta_{HSn} = Z \times \Delta\vartheta_{Wr} \times I_n^q \quad (9)$$

où

$\Delta\vartheta_{HSn}$ est l'échauffement du point chaud à la charge considérée;

I_n est le facteur de charge par unité;

q est égal à 1,6 pour le refroidissement par ventilation naturelle (AN); ou
est égal à 2 pour les transformateurs à refroidissement (AF);

Z est supposé être égal à 1,25.

Chaque fois que cela est possible, il est préférable d'utiliser les résultats d'essais donnant $\Delta\vartheta_{Wr}$, afin de limiter l'incertitude concernant la validité du facteur Z et la valeur de q . L'expérience montre que q et Z prennent des valeurs différentes selon le type de transformateur et le niveau de courant de charge auquel il fonctionne.

NOTE Avec certains types de constructions d'enroulements, la détermination de $\Delta\vartheta_{Wr}$ peut être possible uniquement sur des transformateurs prototypes.

5.9 Equations de charge

5.9.1 Charge continue

Il convient que la température du point chaud ϑ_{HS} en fonction de la charge pour des conditions de régime permanent soit calculée par les équations suivantes:

$$\vartheta_{HS} = \vartheta_a + \Delta\vartheta_{HS} \quad (10)$$

Pour le refroidissement AN, l'équation suivante s'applique:

$$\Delta\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_{HS,r} [I]^{2m} \quad (11)$$

Pour le refroidissement AF, l'équation suivante s'applique:

$$\Delta\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_{HS,r} [I^2 C_T]^X \quad (12)$$

$$C_T = \frac{T_k + \vartheta_{HS}}{T_k + \vartheta_{HS,r}} \quad (13)$$

où

$\Delta\vartheta_{HS}$ est l'échauffement du point chaud par unité de charge I , exprimé en kelvins (K);

$\vartheta_{HS,r}$ est la température de point chaud assignée ou mesurée à 1,0 par unité de charge, exprimée en degrés Celsius (°C) [les valeurs mesurées pour un fonctionnement à refroidissement naturel utilisées dans l'Equation (11) peuvent être différentes des valeurs mesurées pour un fonctionnement à refroidissement par ventilateur utilisées dans l'Equation (12)];

I est le facteur de charge par unité (rapport entre le courant de charge et le courant assigné);

C_T est la correction de température pour la variation de la résistance en fonction de la température;

- m est une constante empirique, qui est égale à 0,8 (suggérée, à moins que des données d'essai ne soient disponibles);
- ϑ_a est la température ambiante, exprimée en degrés Celsius (°C);
- ϑ_{HS} est la température de point chaud à la charge I , exprimée en degrés Celsius (°C);
- T_k est la constante de température pour le conducteur, qui est de 225 pour l'aluminium et de 235 pour le cuivre;
- X est une constante empirique utilisée dans le calcul de la ventilation forcée, qui est égale à 1 (suggérée, à moins que des données d'essai ne soient disponibles).

Les données d'essai indiquent qu'il convient que les équations ci-dessus donnent lieu à des prévisions satisfaisantes de la température de point chaud.

L'exposant m de 0,8 pour le fonctionnement à refroidissement naturel et l'exposant X de 1 pour le fonctionnement à ventilation forcée sont déduits de la corrélation de transfert thermique pour la convection naturelle et forcée. Les données d'essai indiquent qu'une correction de température pour la résistance donnée par l'Equation (13) est nécessaire pour prévoir que les températures de point chaud augmentent au cours d'une charge à ventilation forcée en raison des pertes plus élevées présentes lors d'un fonctionnement à refroidissement forcé.

L'Equation (11) et l'Equation (12) ne prennent pas en compte les pertes par courants de Foucault dans les enroulements, qui varient inversement avec la température. La formule fournit un résultat satisfaisant, étant donné que les pertes par courants de Foucault sont généralement faibles, à moins que des courants harmoniques ne soient présents.

L'Equation (11) et l'Equation (12) exigent une méthode de calcul itérative. Il convient que l'utilisation des exposants suggérés et la prise en compte de la variation de la résistance en fonction de la température pour un fonctionnement à refroidissement par ventilateur entraînent des calculs satisfaisants de l'échauffement du point chaud, même lorsque les pertes par courants de Foucault ne sont pas prises en compte. Si des courants harmoniques sont présents, il peut être nécessaire de prendre en compte l'augmentation des pertes par courants de Foucault au cours de la surcharge, conformément à l'Annexe A de la CEI 61378-1.

5.9.2 Charge transitoire

Il convient de déterminer l'échauffement du point chaud dû à une surcharge transitoire par les équations suivantes:

$$\Delta\vartheta_t = (\Delta\vartheta_U - \Delta\vartheta_i) \left[1 - \exp \frac{-t}{\tau} \right] + \Delta\vartheta_i \quad (14)$$

$$\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_t + \vartheta_a \quad (15)$$

où

- $\Delta\vartheta_i$ est l'échauffement initial du point chaud à une certaine charge précédente I_n , exprimé en kelvins (K);
- $\Delta\vartheta_t$ est l'échauffement du point chaud, exprimé en kelvins (K) et au temps t , après la variation de la charge;
- $\Delta\vartheta_U$ est l'échauffement ultime du point chaud exprimé en kelvins (K) si la surcharge par unité I_U s'est poursuivie jusqu'à stabilisation de l'échauffement du point chaud;
- t est le temps, exprimé en minutes (min);

- τ_R est la constante de temps, exprimée en minutes (min), pour le transformateur à la charge assignée;
- τ est la constante de temps, exprimée en minutes (min), pour le transformateur à une charge donnée;
- ϑ_{HS} est la température de point chaud, exprimée en degrés Celsius (°C);
- ϑ_a est la température ambiante, exprimée en degrés Celsius (°C).

5.10 Détermination de la constante de temps de l'enroulement

5.10.1 Généralités

Le concept de constante de temps d'un transformateur est fondé sur l'hypothèse qu'une seule source de chaleur fournit de la chaleur à un seul dissipateur thermique et que l'échauffement du dissipateur est une fonction exponentielle de la chaleur fournie. La constante de temps est définie comme la durée nécessaire pour que l'échauffement au-dessus de la température ambiante varie de 63,2 % après une variation par paliers de la charge. La température se stabilise généralement après 5 constantes de temps. Il convient d'effectuer les calculs de la température de point chaud pour la charge à la fois sur les enroulements à basse tension et à haute tension, étant donné que les données d'essai publiées indiquent que les constantes de temps peuvent être différentes. Les classes de températures du système d'isolation pour les deux enroulements peuvent également être différentes.

Il convient de calculer ou de déterminer la constante de temps par des essais sur le transformateur après accord entre le fournisseur et l'acheteur.

5.10.2 Méthode de calcul de la constante de temps

La constante de temps d'un enroulement à la charge assignée, τ_R , est:

$$\tau_R = \frac{C(\Delta\vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_T} \quad (16)$$

où

- C est la capacité thermique effective de l'enroulement, en watt-minutes par K (Wmin/K),
- = $(15,0 \times \text{masse du conducteur en aluminium en kilogrammes (kg)}) + (24,5 \times \text{masse de la résine époxy et d'une autre isolation de l'enroulement en kilogrammes (kg)})$, ou
- = $(6,42 \times \text{masse du conducteur en cuivre en kilogrammes (kg)}) + (24,5 \times \text{masse de la résine époxy et d'une autre isolation de l'enroulement en kilogrammes (kg)})$;

ou

- C est la capacité thermique effective de l'enroulement, en watt-heures par K (Wh/K),
- = $(0,25 \times \text{masse du conducteur en aluminium en kilogrammes (kg)}) + (0,408 \times \text{masse de la résine époxy et d'une autre isolation de l'enroulement en kilogrammes (kg)})$, ou
- = $(0,107 \times \text{masse du conducteur en cuivre en kilogrammes (kg)}) + (0,408 \times \text{masse de la résine époxy et d'une autre isolation de l'enroulement en kilogrammes (kg)})$;

P_T représente les pertes totales de l'enroulement (pertes résistives + pertes par courants de Foucault) à la charge assignée et à l'échauffement assigné, en watts (W);

$\Delta\vartheta_{HS,r}$ est l'échauffement du point chaud de l'enroulement à la charge assignée, en kelvins (K);

ϑ_e est la contribution du noyau à l'échauffement du point chaud de l'enroulement à vide. Il convient que cette valeur soit la valeur donnée ci-dessous ou la valeur mesurée par le fabricant au cours de l'essai d'échauffement sur le transformateur.

= 5 K pour l'enroulement extérieur (généralement HT)

= 25 K pour l'enroulement intérieur (généralement BT inférieure à 1 kV).

NOTE 1 Les valeurs de contribution du noyau magnétique ci-dessus sont basées sur l'expérience du constructeur

NOTE 2 Un autre matériau d'isolation de l'enroulement et type de matériau époxy peuvent être utilisés. Pour de tels transformateurs, les valeurs correspondantes de chaleur spécifique de 24,5 Wmin/K et /kg (ou 0,408 Wh/K et /kg) peuvent être remplacées par des valeurs basées sur l'expérience du constructeur.

5.10.3 Méthode d'essai de la constante de temps

Les constantes de temps peuvent également être estimées à partir de la courbe de refroidissement de résistance à chaud obtenue au cours des essais thermiques.

5.11 Détermination de la constante de temps de l'enroulement conformément à la constante empirique

Lorsque l'échauffement varie, la constante de temps varie conformément à la constante empirique m .

$$\tau_R = \frac{C(\Delta\vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_r} \quad (17)$$

Si m est égal à 1, l'Equation (17) est correcte pour toute charge et toute température de démarrage. Si m n'est pas égale à 1, la constante de temps pour toute charge et pour toute température de démarrage pour un cycle d'échauffement ou un cycle de refroidissement est donnée par l'Equation (18).

$$\tau = \tau_R \frac{\left(\frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right) - \left(\frac{\Delta\vartheta_I}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)}{\left(\frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{\Delta\vartheta_I}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}}} \quad (18)$$

5.12 Calcul de la capacité de charge

Il convient d'utiliser les Equations (10) à (18) pour déterminer les températures de point chaud au cours d'un cycle de charge. Il convient aussi de les utiliser pour déterminer la charge de courte durée ou continue, qui entraîne les températures maximales données dans le Tableau 1 ou toutes les autres températures limites.

Il convient que l'échauffement initial du point chaud pour le facteur de charge initial I_i soit obtenu à partir de l'Equation (11) et il est déterminé de la façon suivante:

$$\Delta\vartheta_I = \Delta\vartheta_{HS,r} [I_i]^{2m} \quad (19)$$

où

I_i est le facteur de charge initial (rapport entre le courant de charge et le courant assigné).

A partir du Tableau 2, choisir la température limite de point chaud ϑ_{HS} . Pour la température ambiante, déterminer l'échauffement du point chaud admissible au temps t à partir de l'Equation (10).

Tableau 2 – Température maximale du point chaud de l'enroulement

Température du système d'isolation (CEI 60076-11)	Température maximale de point chaud de l'enroulement
°C	°C
105 (A)	130
120 (E)	145
130 (B)	155
155 (F)	180
180 (H)	205
200	225
220	245

Le calcul de la durée de vie n'est pas pratique pour une température de point chaud supérieure à la température maximale de point chaud de l'enroulement indiquée dans le Tableau 2, parce que la composition des matériaux de l'enroulement peut varier. La charge du transformateur qui entraîne des températures dépassant les limites du Tableau 2 risque de donner lieu à des défaillances du transformateur dans une période de temps courte et imprévisible.

$$\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_{HS} + \vartheta_a \quad (20)$$

où

ϑ_{HS} est la température de point chaud en degrés Celsius (°C);

$\Delta\vartheta_{HS}$ est l'échauffement du point chaud en kelvins (K);

ϑ_a est la température ambiante en degrés Celsius (°C).

$$\Delta\vartheta_t = \vartheta_{HS} - \vartheta_a \quad (21)$$

où

$\Delta\vartheta_t$ est l'échauffement du point chaud, en kelvins (K) et au temps t , après la variation de la charge.

Déterminer l'échauffement ultime du point chaud à partir de l'Equation (14).

$$\Delta\vartheta_U = \left[\frac{\Delta\vartheta_t - \Delta\vartheta}{1 - \exp(-t/\tau)} \right] + \Delta\vartheta \quad (22)$$

où

$\Delta\vartheta_U$ est l'échauffement ultime du point chaud en kelvins (K).

Il convient d'obtenir la constante de temps τ à partir de 5.9. Choisir un temps t pour la durée du cycle de charge pour remplacer dans l'équation ci-dessus. A partir de l'Equation (11), la surcharge correspondant à ces conditions peut être obtenue comme suit:

$$I_U = \left[\frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right]^{\frac{1}{2m}} \quad (23)$$

où

I_U est le facteur de charge ultime.

Il convient d'effectuer la détermination de la constante de temps par un processus d'itération.

6 Limites

6.1 Limites de courant et de température

Avec des valeurs de charge au-delà des valeurs de la plaque signalétique, la température de point chaud de l'enroulement présentée au Tableau 3 ne doit pas être dépassée et les limites spécifiques données en 4.3 et 5.12 doivent être prises en compte.

L'amplitude du courant est limitée à $1,5 I_r$, en particulier lorsque le cycle est court et répété, afin d'éviter des dommages mécaniques dans l'enroulement. Des valeurs supérieures à $1,5 I_r$ doivent être spécifiées au stade de l'enquête et doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant. Pour tous les autres types de cycles, le courant est limité à $1,5 I_r$.

Tableau 3 – Limites de courant et de température applicables aux charges au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique

Température du système d'isolation (°C)	105 (A)	120 (E)	130 (B)	155 (F)	180 (H)	200	220
Courant maximal (p.u.)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Température la plus élevée de point chaud (°C)	130	145	155	180	205	225	245
NOTE 1 Les limites de température et de courant ne sont pas destinées à être valables simultanément. Le courant peut être limité à une valeur inférieure à celle indiquée, afin de satisfaire à l'exigence de limite de température. Inversement, la température peut être limitée à une valeur inférieure à celle indiquée, afin de satisfaire à l'exigence de limite de courant. NOTE 2 Le calcul montre qu'à la température de point chaud la plus élevée présentée dans le tableau, la durée de vie, d'un nouveau transformateur n'est que de quelques milliers d'heures.							

6.2 Autres limites

6.2.1 Champ magnétique de fuite dans les parties métalliques de construction

Le champ de fuite magnétique augmente avec l'augmentation du courant. Ce champ peut provoquer des températures excessives dans les parties métalliques structurales, pouvant restreindre la surcharge. Il convient de ne pas dépasser les limites indiquées dans le Tableau 2 concernant le courant de charge, la température de point chaud et la température des parties métalliques structurales autres que les enroulements et les connexions. Il convient de noter que, lorsque la température de point chaud dépasse la température la plus élevée du Tableau 2, conformément aux classes d'isolation du transformateur, les caractéristiques du système d'isolation diminuent à un niveau inférieur à la valeur minimale pour la tenue diélectrique du transformateur.

6.2.2 Accessoires et autres considérations

En dehors des enroulements, d'autres parties du transformateur, telles que les traversées, les connexions d'extrémité de câble, les accessoires de changement de prises, les changeurs de prises, les dispositifs de mesure de la température, les parafoudres et les connexions peuvent limiter le fonctionnement à 1,5 fois le courant assigné.

6.2.3 Transformateurs sous enveloppe

La consommation de la durée de vie due à la surcharge est supérieure lorsque le transformateur se trouve dans une enveloppe.

Lorsque des transformateurs sont utilisés à l'intérieur, il convient de corriger l'échauffement assigné du point chaud, pour tenir compte de l'enveloppe.

6.2.4 Conditions ambiantes extérieures

Dans de nombreuses régions du monde, l'ensoleillement direct peut augmenter la température du transformateur de façon considérable, ce qu'il convient de prendre en compte lorsqu'une charge au-delà du courant assigné est considérée.

Le vent peut améliorer le refroidissement du transformateur mais, de par sa nature imprévisible, il n'est pas pratique de prendre en compte ce facteur.

Annexe A (informative)

Vitesse de vieillissement

A.1 Capacité de charge

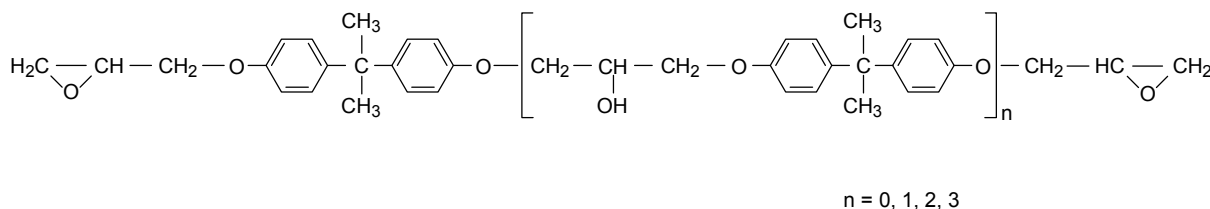
La capacité de charge des transformateurs est liée aux propriétés des matériaux isolants et des systèmes d'isolation. Tandis que les matériaux isolants solides dominants des transformateurs immergés dans l'huile sont les produits à base de cellulose, une variété plus grande de matériaux isolants différents est utilisée dans les transformateurs de type sec.

A.2 Structure moléculaire

A.2.1 Généralités

Une caractéristique commune des matériaux isolants solides est la structure moléculaire, qui se compose de longues chaînes de molécules plus petites reliées entre elles. Les chaînes peuvent contenir des branches, des anneaux hexagonaux et des liaisons réticulées entre chaînes.

La Figure A.1 montre un exemple d'une structure moléculaire de ce type d'une résine époxy.



IEC 2001/08

Figure A.1 – Structure moléculaire d'une résine époxy

Les molécules se déplacent. Dans un matériau solide, ces mouvements ressemblent à des oscillations. Lorsque la chaleur due aux pertes dans le conducteur de l'enroulement (ou d'autres sources de chaleur) est transférée au matériau isolant, l'énergie thermique est convertie en énergie cinétique dans le matériau. En raison de l'augmentation de l'énergie cinétique, les mouvements des molécules deviennent plus rapides et avec de plus grandes amplitudes, en d'autres termes, plus violents. La probabilité selon laquelle les molécules se dissocient en molécules plus petites lorsqu'elles entrent en collision augmente. Ce type de procédé chimique dans lequel la chaleur est fournie au matériau est appelé processus endothermique.

A.2.2 Oxydation

D'autres mécanismes peuvent se produire, tels que l'oxydation.

La vitesse de cette réaction chimique dépend de la température, qui dépend elle-même de la quantité de chaleur transférée au matériau isolant.

Les matériaux isolants sont élaborés afin d'obtenir des propriétés optimales pour leur application. La modification de la structure moléculaire du matériau au cours du processus endothermique provoque également des modifications des propriétés importantes du

matériau, telles que la résistance mécanique et la tenue diélectrique, la résistance aux chocs thermiques et la performance d'étanchéité. Une diminution de ces propriétés se produit généralement. La diminution des différentes propriétés peut ne pas se produire à la même vitesse. Le terme vieillissement est communément utilisé pour ce procédé chimique et la diminution consécutive pour les diverses propriétés des matériaux.

A.2.3 Propriétés d'endurance thermiques

A.2.3.1 Généralités

L'indice thermique (TI) et l'intervalle de division par deux (HIC, *halving interval*) sont deux termes utilisés pour caractériser les propriétés d'endurance thermique d'un matériau isolant ou d'un système d'isolation. L'indice thermique est la valeur numérique de la température en degrés Celsius, déduite de la relation d'endurance thermique à un certain temps. Dans les normes CEI applicables, cette durée est de 20 000 h, mais d'autres durées peuvent aussi être spécifiées en principe. L'intervalle de division par deux est la valeur numérique de l'intervalle de température en Kelvins (K), qui exprime la réduction de moitié de la durée choisie par rapport au point limite pris à une température égale à l'indice thermique. Voir Figure A.2.

L'indice thermique et l'intervalle de division par deux sont trouvés expérimentalement au cours des essais accélérés à des températures élevées, et la méthode est fondée sur la validité de l'équation d'Arrhenius.

A.2.3.2 Loi d'Arrhenius

Svante Arrhenius, chimiste et physicien (lauréat du prix Nobel de chimie en 1903), est à l'origine de la corrélation générale suivante entre la température et la vitesse de réaction chimique:

$$k = A \times e^{-\left(\frac{E_a}{R \times T}\right)} \quad (\text{A.1})$$

où

k est le coefficient de la vitesse de réaction;

A est une constante;

E_a est l'énergie d'activation liée au matériau spécifique;

R est la constante de gaz universelle;

T est la température en kelvins (K); et

e est le nombre de base du système logarithmique naturel (2,718 28...).

L'Equation (A.1) est connue sous le nom d'équation d'Arrhenius ou de loi d'Arrhenius.

R a la valeur de $8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$. L'énergie d'activation E_a est la quantité d'énergie nécessaire pour qu'une réaction se produise dans le matériau spécifique considéré, et on suppose que E_a ne varie pas avec la température. E_a s'exprime en kJ mol^{-1} .

A et k s'expriment essentiellement en secondes⁻¹ (s^{-1}), mais d'autres unités de temps peuvent également être utilisées lorsqu'elles sont adaptées, par exemple l'heure. k indique la rapidité avec laquelle la réaction chimique se déroule dans le matériau ou dans la combinaison de matériaux.

L'inverse de (A.1) devient

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A} \times e^{\frac{E_a}{R \times T}} \quad (\text{A.2})$$

L'unité de $1/k$ est la seconde (s), et elle indique le temps écoulé pour que la réaction chimique arrive à un certain stade.

On peut également écrire l'Equation (A.2) de la façon suivante:

$$h = a \times e^{\frac{b}{T}} \quad (\text{A.3})$$

où

$$h = 1/k;$$

$$a = 1/A; \text{ et}$$

$$b = E_a / R.$$

Le logarithme naturel est pris de chaque côté du signe égal:

$$\ln h = \ln a + b \times 1/T \quad (\text{A.4})$$

A.2.3.3 Graphique d'endurance thermique

Lorsque les valeurs correspondantes de $\ln h$ et $1/T$ sont tracées sur un diagramme cartésien, les points seront situés sur une ligne droite. Un graphique de ce type est appelé graphique d'endurance thermique. Un exemple est donné sur la Figure A.2.

Les expériences sont effectuées à des températures supérieures à la température prévue de l'indice de température (TI). Dans l'exemple de la Figure A.2, les expériences sont réalisées à quatre températures différentes, 170 °C, 160 °C, 150 °C et 140 °C.

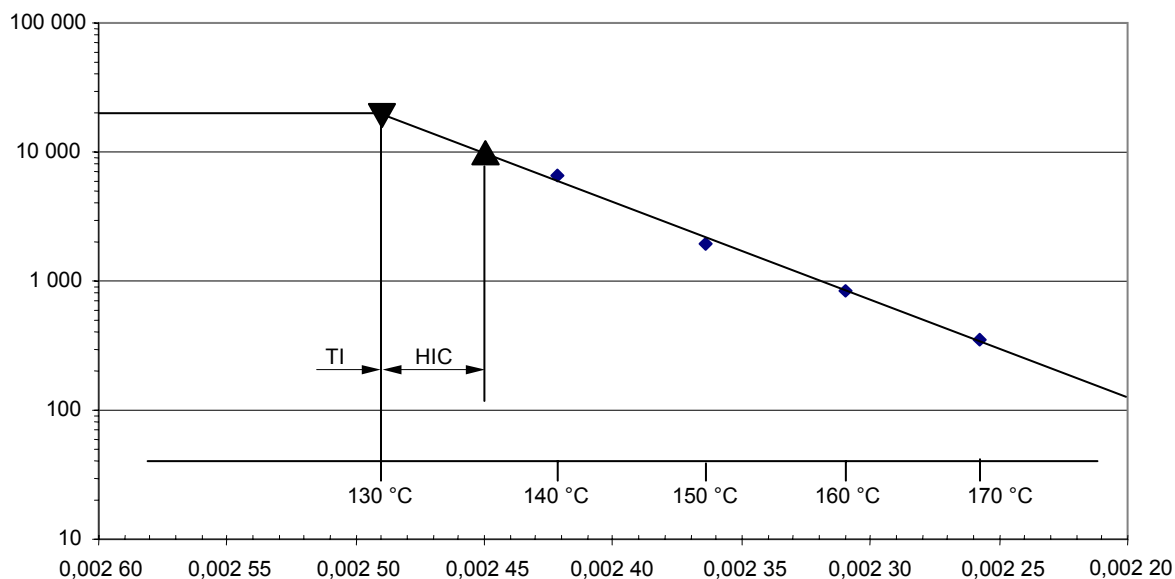
Dans les expériences, un point limite de la propriété du matériau étudiée (par exemple la tension alternative de claquage) doit être défini. Le point limite peut être défini comme une valeur absolue minimale (par exemple en kV/mm) ou une valeur restante procentuelle de la propriété avant le début de l'expérience. Des points limites de ce type sont suggérés dans les normes CEI pour certains matériaux et certaines propriétés, mais pas pour tous. La CEI 60216-2 comporte certaines suggestions pour un certain nombre de propriétés de matériaux. Dans d'autres cas, la définition des points limites peut être soumise à un accord entre le fournisseur et l'acheteur du matériau.

Un point limite défini comme par exemple à 50 % de la valeur restante peut être perçu comme « fin de vie » pour l'isolation. Toutefois, il convient de ne pas prendre ceci au sens trop littéral du terme. La définition des points limites dans la CEI est principalement conventionnelle et n'est pas fonctionnelle. La détérioration du matériau se produit progressivement. Le point limite ne représente pas de limite distincte entre la « vie » et la « mort » du transformateur. Le fait d'atteindre le point limite signifie uniquement que la propriété particulière du matériau a été réduite à un certain pourcentage de sa valeur d'origine, et que les marges de sécurité et par conséquent la fiabilité de fonctionnement du transformateur ont été réduites par rapport à un nouveau transformateur. En ce qui concerne par exemple les propriétés diélectriques, le transformateur peut continuer à bien fonctionner pendant de nombreuses années si aucune surtension importante ne se produit.

De même, si aucune surintensité élevée ne se produit à cause de courts-circuits dans le système d'alimentation, le transformateur peut bien fonctionner en dépit d'une dégradation de ses propriétés mécaniques.

Sur la Figure A.2, les quatre points indiquent la durée en heures nécessaire pour atteindre le point limite défini aux quatre températures différentes de 170 °C, 160 °C, 150 °C et 140 °C, conformément à l'essai d'endurance thermique. Une droite de régression est tracée entre les quatre points et prolongée pour couper l'axe des ordonnées au niveau de la valeur égale à 20 000 h. L'intersection se produit à une température de 130 °C.

Par conséquent, l'indice thermique du matériau pour cette propriété particulière est de 130. De plus, la droite de régression montre que l'augmentation de température estimée qui entraînerait le matériau au point limite après 10 000 h est d'environ 5 °C. L'intervalle de division par deux HIC est alors de 5.



IEC 2002/08

Légende

axe Y: temps (échelle logarithmique) en heures (h)

axe X: température thermodynamique réciproque (échelle linéaire) en kelvins (K⁻¹)

axe de températures supplémentaire: température en degrés Celsius (°C) (échelle non linéaire)

▼ température estimée à 20 000 h

▲ température estimée à 10 000 h

TI indice thermique

HIC intervalle de division par deux

Figure A.2 – Graphique d'endurance thermique

Dans la mesure où différentes propriétés de matériaux peuvent diminuer à différentes vitesses, il peut être nécessaire d'attribuer plusieurs indices de températures et plusieurs intervalles de division par deux à un seul et même matériau.

Des descriptions détaillées concernant les procédures expérimentales sont données dans les CEI 60216-1 à 60216-6. La Figure A.2 montre une image simplifiée et idéalisée qui démontre simplement le principe. En réalité, il y aura une dispersion des résultats à partir des échantillons de matériaux, en partie à cause des variations réelles dans le matériau, et en partie à cause de l'incertitude de mesure.

Des instructions détaillées pour le calcul des caractéristiques d'endurance thermique à partir de grands ensembles de données expérimentales sont données dans la CEI 60216-3, y

compris un essai statistique pour vérifier la validité de l'utilisation de la loi d'Arrhenius. Les matériaux contenant des quantités importantes de composants inorganiques peuvent s'écarter considérablement de la loi d'Arrhenius.

Ce guide de charge est fondé sur la loi d'Arrhenius.

La température à l'intérieur de l'enroulement d'un transformateur varie. Certaines zones d'un enroulement sont exposées à des températures plus élevées que d'autres. La vitesse de détérioration des matériaux est plus élevée dans les zones de température élevée. Ces zones atteindront le point limite en premier et déterminent la fiabilité de fonctionnement de l'ensemble du transformateur.

La relation entre la température de point chaud et la température moyenne dans les enroulements peut varier d'une conception à une autre. Les formules pour la température de point chaud sont générales et peuvent impliquer une incertitude qui rend la prévision de la consommation de durée de vie proportionnellement incertaine. Les fabricants peuvent être capables de fournir des informations plus précises sur les températures de point chaud pour leur conception particulière.

Lors de l'évaluation de la capacité de charge d'un transformateur, la température ambiante en fonction de la charge doit être prise en considération.

A.3 Documents de référence

CEI 60216-1, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 1: Méthodes de vieillissement et évaluation des résultats d'essai*

CEI 60216-2, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 2: Détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques – Choix de critères d'essai*

CEI 60216-3, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics (disponible en anglais seulement)*

CEI 60216-4-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-1: Ageing ovens – Single-chamber ovens (disponible en anglais seulement)*

CEI 60216-4-2, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 4-2: Etuves de vieillissement – Etuves de précision pour des utilisations pouvant atteindre 300 °C*

CEI 60216-4-3, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 4-3: Etuves de vieillissement – Etuves à chambres multiples*

CEI 60216-5, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 5: Détermination de l'indice d'endurance thermique relatif (RTE) d'un matériau isolant*

CEI 60216-6, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 6: Détermination des indices d'endurance thermique (TI et RTE) d'un matériau isolant en utilisant la méthode de «trame de durées fixes (fixed time frame)»*

Annexe B (informative)

Exemples de consommation de durée de vie pour 3 régimes de charge

B.1 Exemple 1: Charge à température constante

B.1.1 Hypothèses

Echauffement du point chaud au-dessus de la température ambiante:	125 K
Température ambiante:	30 °C = constante
Température du système d'isolation:	130 °C (B)
Temps de charge:	1 semaine = 168 h

B.1.2 Calcul

Conformément à l'Equation (3)

Température thermodynamique de point chaud:

$$273 + 30 + 125 = 428 \text{ K}$$

D'après le Tableau 1

Les coefficients a et b sont:

$$a = 1,72 \text{ E} - 15 \text{ h}, b = 18 \text{ 115}$$

La vitesse de vieillissement est calculée conformément à l'Equation (5)

$$k = 180 \text{ 000} \times (1,72 \text{ E} - 15)^{-1} \times \exp(-18 \text{ 115} / 428) = 43,48$$

Ce qui signifie une consommation de la durée de vie de 43,48 heures par heure.

Avec un temps de charge de 168 h, la consommation de la durée de vie au cours d'une semaine à cette température devient:

$$43,48 \times 168 = 7 \text{ 305 h de durée de vie}$$

La durée de vie prévue à la température assignée de point chaud, 120 °C, est de 180 000 h. Une semaine à une température de point chaud de 155 °C donne alors une consommation de:

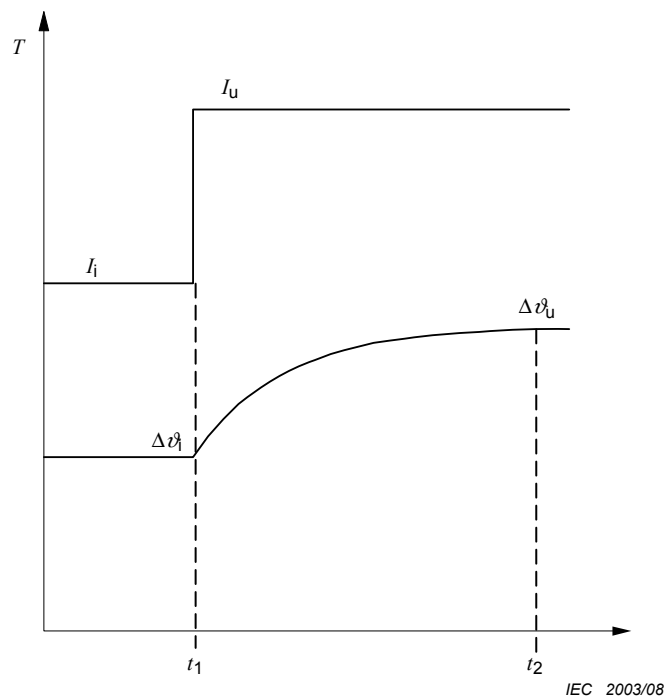
$$100 \times 7 \text{ 305} / 180 \text{ 000} = 4,06 \%$$

de la durée de vie prévue totale du transformateur.

B.2 Exemple 2: Courant de charge I_i pendant une durée t_1 suivi d'un courant de charge I_u pendant une durée t_2

B.2.1 Généralités

Si le courant de charge change subitement d'un niveau I_1 à un autre I_2 la température du point chaud est supposée changer d'un échauffement initial $\Delta\vartheta_1$ à $\Delta\vartheta_2$ selon la fonction exponentielle (Equation 14) comme illustré dans la figure ci-dessous.



Axe X temps

Axe Y Courbe supérieure: charge initiale et ultime

Courbe Inférieure: échauffement au-dessus de la température ambiante

Figure B.1 – Courbe de charge variable par pas

B.2.2 Hypothèses

$I_i = 0,8$ p.u., période de temps $t_1 = 10$ h

I_i charge initiale

$I_u = 1,2$ p.u., période de temps $t_2 = 10$ h

I_u charge finale

Constante de temps nominale de l'enroulement considéré: $\tau_r = 0,5$ h.

Température ambiante: 30°C constante (indépendante du courant de charge).

Température du système d'Isolation: 155°C .

La température du point chaud de l'enroulement au temps = 0 est $\Delta\vartheta_{\text{HSi}}$.

L'échauffement moyen de l'enroulement pour le courant nominal: $\Delta\vartheta_{\text{Wr}} = 80$ K.

Fonctionnement AN: Air Naturel.

B.2.3 Calcul

L'Equation (9) est utilisée pour calculer $\Delta\vartheta_{\text{HSi}}$ et $\Delta\vartheta_{\text{HSu}}$:

$$\Delta\vartheta_{\text{HSi}} = 1,25 \times 80 \times 0,8^{1,6} = 70 \text{ K}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{HSu}} = 1,25 \times 80 \times 1,2^{1,6} = 134 \text{ K}$$

$$\Delta\vartheta_{HS,r} = 1,25 \times 80 = 100 \text{ K}$$

L'Equation (18) est utilisée pour calculer la constante de temps pour le changement de l'échauffement du point chaud de 70 K à 134 K:

$$\tau = 0,5 \times \frac{\frac{134}{100} - \frac{70}{100}}{\left(\frac{134}{100}\right)^{1,25} - \left(\frac{70}{100}\right)^{1,25}} = 0,399$$

L'Equation (14) est utilisée pour calculer la valeur momentanée de $\Delta\vartheta_{HS}$ à tout instant t dans l'intervalle de temps quand $\Delta\vartheta_{HS}$ varie de $\Delta\vartheta_{HSi}$ à $\Delta\vartheta_{HSu}$:

$$\Delta\vartheta_{HSu} = 70 + (134 - 70) \times (1 - \exp(-t / 0,399))$$

Le taux de vieillissement augmente de façon continue si $\Delta\vartheta_{HS}$ augmente. Voir Figure B.2.

$$\Delta\vartheta_{HS} \approx \Delta\vartheta_{HSu} \text{ si } t \approx 5 \times \tau = 5 \times 0,399 = 1,995 \text{ h, soit 2 h.}$$

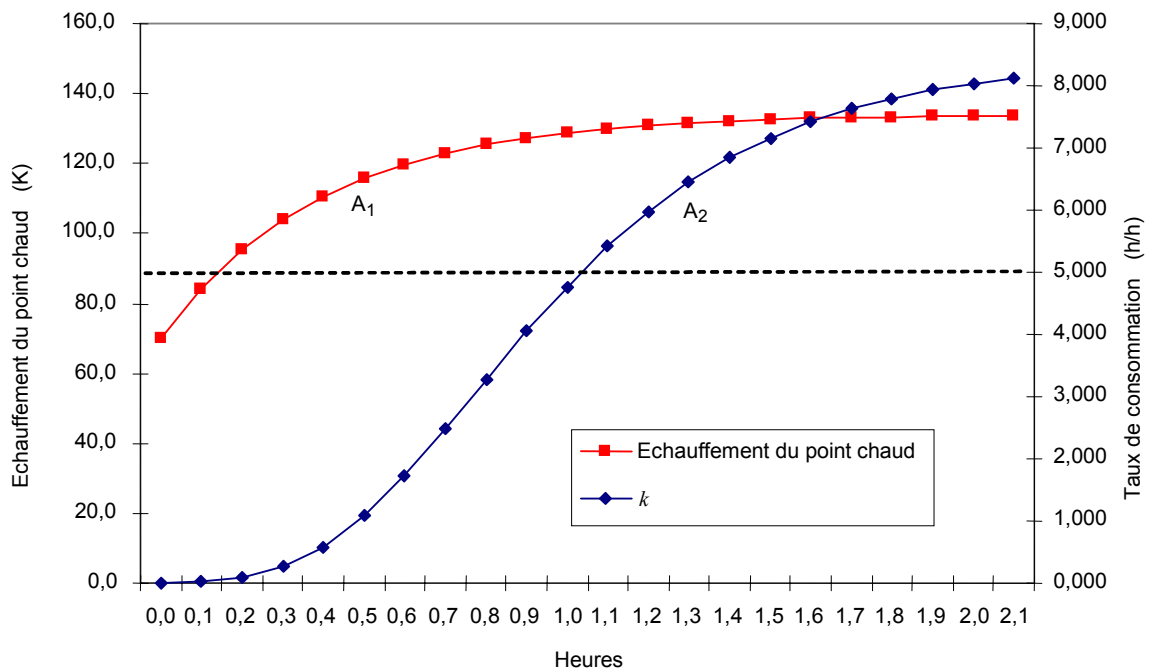
Pour calculer la consommation de durée de vie durant l'intervalle de transition entre $\Delta\vartheta_{HSi}$ et $\Delta\vartheta_{HSu}$, les valeurs simultanées de temps, échauffement du point chaud $\Delta\vartheta_{HS}$, température thermodynamique T et taux de vieillissement k sont indiquées dans le Tableau B.1 pour l'intervalle de temps $t - t_1 = 0$ à 2 h.

Tableau B.1 – Calculs de consommation de durée de vie

Temps	Echauffement du point chaud	Température thermodynamique	Taux de vieillissement	Consommation de durée de vie
(h)	(K)	(K)	(h/h)	(h)
	Eq. 14	Eq. 3	Eq. 5	Eq. 7
0	70,0	373,0	0,003	0,000 0
0,1	84,2	387,2	0,020	0,002 0
0,2	95,2	398,2	0,088	0,008 8
0,3	103,8	406,8	0,260	0,026 0
0,4	110,5	413,5	0,586	0,058 6
0,5	115,7	418,7	1,086	0,108 6
0,6	119,8	422,8	1,735	0,173 5
0,7	122,9	425,9	2,484	0,248 4
0,8	125,4	428,4	3,272	0,327 2
0,9	127,3	430,3	4,046	0,404 6
1	128,8	431,8	4,768	0,476 8
1,1	129,9	432,9	5,413	0,541 3
1,2	130,8	433,8	5,972	0,597 2
1,3	131,5	434,5	6,445	0,644 5
1,4	132,1	435,1	6,838	0,683 8
1,5	132,5	435,5	7,160	0,716 0

Temps	Echauffement du point chaud	Température thermodynamique	Taux de vieillessement	Consommation de durée de vie
(h)	(K)	(K)	(h/h)	(h)
	Eq. 14	Eq. 3	Eq. 5	Eq. 7
1,6	132,8	435,8	7,420	0,742 0
1,7	133,1	436,1	7,629	0,762 9
1,8	133,3	436,3	7,796	0,779 6
1,9	133,5	436,5	7,928	0,792 8
2	133,6	436,6	8,032	0,803 2
2,1	133,7	436,7	8,114	0,811 4
			L_C total	9,709 3

Les valeurs de $\Delta\vartheta_{HS}$ et k sont indiquées en fonction du temps dans la Figure B.2.



IEC 2004/08

Légende

Axe X: temps après t_1 en heures (h)

Axe Y: Gauche échauffement du point chaud en Kelvin (K)

Droite taux de consommation de durée de vie k en heures par heure (h/h)

Courbe supérieure rouge: échauffement du point chaud en Kelvin (K)

Courbe inférieure bleue: taux de consommation de durée de vie correspondant à l'échauffement du point chaud

Figure B.2 – Echauffement du point chaud et consommation de durée de vie

La consommation de durée de vie pour la période de transition longue de 2 h de $\Delta\vartheta_{HSi}$ à $\Delta\vartheta_{HSu}$ est représentée par l'aire en dessous de la courbe continue inférieure continue. Il y a

de nombreuses méthodes pour estimer cette aire. Une méthode simple consiste à tracer une ligne droite horizontale à travers le diagramme. La ligne doit être située à une ordonnée qui égale visuellement la taille des deux aires A_1 et A_2 . Les frontières de l'aire A_1 sont l'axe gauche des ordonnées, la ligne horizontale et la courbe continue. Les frontières de l'aire A_2 sont l'axe droit des ordonnées, la ligne horizontale et la courbe continue. L'ordonnée sur l'axe de droite est lue, et l'aire en dessous de la courbe pour k est égale au produit de cette ordonnée par le temps à la fin droite de l'axe X. Dans ce cas:

$$5,0 \times 2 = 10 \text{ (h)}$$

Ceci signifie que la consommation de durée de vie durant l'intervalle de temps de 2 h pendant que l'échauffement du point chaud augmente de 70 K à 134 K est de 10 h.

En plus de ces heures s'ajoute la consommation de durée de vie de 10 h à un échauffement du point chaud de 70 K et de $10 - 2 = 8$ h à 134 K. Les deux dernières contributions peuvent être calculées par l'Equation (7).

$$L_{c1} = 180\,000 \times 10 \times (9,60 \text{ E} - 17)^{-1} \times \text{EXP}(-20\,475 / (273+100)) = 0,03 \text{ h}$$

$$L_{c2} = 180\,000 \times 8 \times (9,60 \text{ E} - 17)^{-1} \times \text{EXP}(-20\,475 / (273+164)) = 67,28 \text{ h}$$

Il y a 0,03 h et 67,28 h respectivement.

La consommation totale de durée de vie pendant la totalité des 20 h considérés est alors:

$$0,03 + 9,71 + 67,28 = 77,02 \text{ h.}$$

D'autres façons de déterminer l'aire en-dessous de la courbe pour k dans l'intervalle de transition sont les méthodes numériques d'intégration, rectangulaire, trapézoïdale ou la loi de Simpson.

La courbe k a une forme qui peut être décrite par un polynôme, qui est facile à intégrer pour obtenir la grandeur de l'aire en-dessous de la courbe. Par cette méthode, la durée de vie est de 8,54 h si le pas de calcul est de 0,01 h.

B.3 Exemple 3: courant de charge variable

B.3.1 Hypothèses

Courant de charge variant de 0,7 p.u. à 1,2 p.u. durant une période de 24 h.

Constante de temps nominale de l'enroulement considéré: $\tau_r = 0,5 \text{ h}$.

Température ambiante: 30 °C constante (indépendante du courant de charge).

Température du système d'Isolation: 180 °C.

L'échauffement moyen de l'enroulement pour le courant nominal: $\Delta\vartheta_{Wr} = 100 \text{ K}$.

Fonctionnement AN: Air Naturel.

B.3.2 Calcul

Le cycle de charge est montré dans les deux colonnes de gauche du Tableau B.2 et dans la Figure B.3. Le courant de charge est enregistré une fois chaque heure.

Pour calculer la consommation de durée de vie durant une période de 24 h, les valeurs simultanées de temps, échauffement du point chaud $\Delta\vartheta_{HS}$, température thermodynamique T et le taux de vieillissement k sont indiqués dans le Tableau B.2.

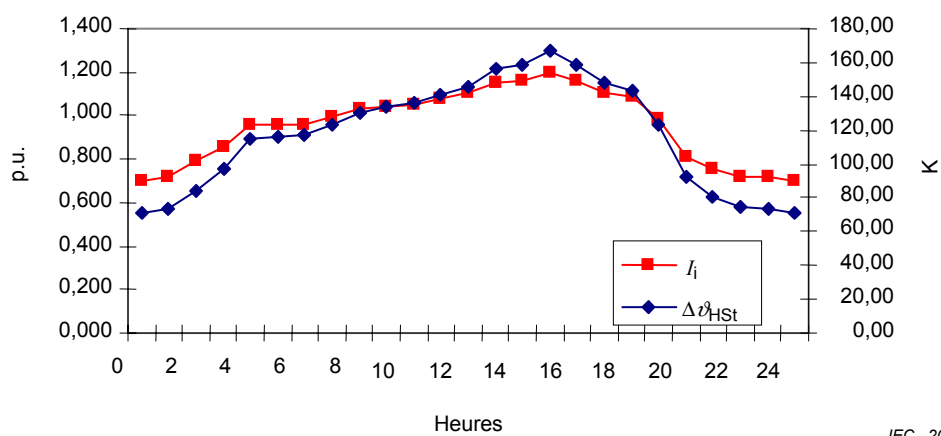
Tableau B.2 – Calculs de consommation de vie pour une charge variable

Temps	p.u. facteur de charge	Echauffement ultime du point chaud	Constante de temps	Echauffement du point chaud	Température thermodyna- mique	Taux de vieillis- sement k	Temps	Consom- -mation de vie k	Facteur	$k \times$ facteur
(h)		(K)	(h)	(°C)	(K)	(h/h)	(h)	(h/h)		(h)
		Eq. 9	Eq. 18	Eq. 14	Eq. 3	Eq. 5				
0	0,700	70,64		70,64	373,6	0,000	0	0,000	1	0,000
1	0,722	74,23	0,458	73,82	376,8	0,000	1	0,000	4	0,000
2	0,788	85,38	0,448	84,14	387,1	0,001	2	0,001	2	0,001
3	0,859	98,02	0,432	96,64	399,6	0,004	3	0,004	4	0,014
4	0,956	116,32	0,416	114,54	417,5	0,042	4	0,042	2	0,085
5	0,957	116,51	0,407	116,34	419,3	0,054	5	0,054	4	0,214
6	0,962	117,49	0,407	117,39	420,4	0,061	6	0,061	2	0,123
7	0,991	123,20	0,404	122,72	425,7	0,122	7	0,122	4	0,486
8	1,029	130,85	0,398	130,19	433,2	0,309	8	0,309	2	0,617
9	1,044	133,92	0,394	133,62	436,6	0,468	9	0,468	4	1,872
10	1,054	135,97	0,392	135,79	438,8	0,607	10	0,607	2	1,214
11	1,080	141,38	0,390	140,95	444,0	1,116	11	1,116	4	4,464
12	1,104	146,44	0,386	146,03	449,0	2,004	12	2,004	2	4,008
13	1,152	156,76	0,381	155,98	459,0	6,079	13	6,079	4	24,317
14	1,163	159,16	0,377	158,94	461,9	8,375	14	8,375	2	16,750
15	1,200	167,34	0,374	166,76	469,8	19,176	15	19,176	4	76,702
16	1,159	158,29	0,374	158,87	461,9	8,317	16	8,317	2	16,635
17	1,109	147,50	0,380	148,32	451,3	2,600	17	2,600	4	10,399
18	1,087	142,85	0,385	143,26	446,3	1,459	18	1,459	2	2,917
19	0,982	121,42	0,395	123,15	426,2	0,128	19	0,128	4	0,514
20	0,810	89,22	0,418	92,32	395,3	0,002	20	0,002	2	0,004
21	0,751	79,06	0,442	80,43	383,4	0,000	21	0,000	4	0,001
22	0,720	73,90	0,452	74,62	377,6	0,000	22	0,000	2	0,000
23	0,719	73,74	0,456	73,83	376,8	0,000	23	0,000	4	0,000
24	0,700	70,64	0,459	71,00	374,0	0,000	24	0,000	1	0,000

161,34

53,78

Notez qu'il y a des variations dans la constante de temps au cours du cycle.



IEC 2005/08

Légende

Axe X temps en heures (h)

Axe Y gauche: courant de charge (p.u.)

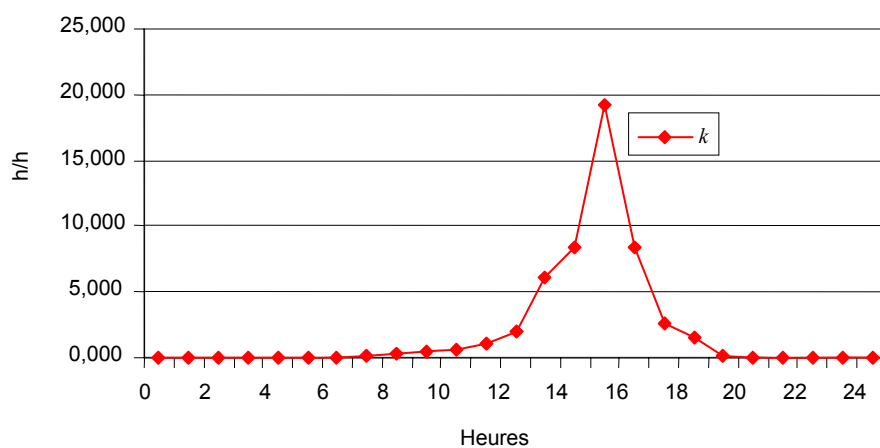
Axe Y droit: échauffement du point chaud de l'enroulement en Kelvin (K)

Courbe bleue courant de charge, correspondant à l'axe Y droit (p.u.) et correspondant au symbole I_i

Courbe rouge échauffement du point chaud de l'enroulement, correspondant à l'axe Y gauche (K)

Figure B.3 – Courant de charge et échauffement du point chaud de l'enroulement

La courbe de la Figure B.4 montre comment le taux de vieillissement varie avec le temps durant le cycle de 24 h. La consommation de durée de vie au cours du cycle est l'aire en-dessous de cette courbe.



IEC 2006/08

Légende

Axe X temps en heures (h)

Axe Y taux de vieillissement en heures par heure (h/h)

Figure B.4 – Taux de vieillissement en fonction du temps

L'aire en-dessous de la courbe peut être déterminée au moyen de la loi d'intégration numérique de Simpson, qui dit:

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{b-a}{6n} \times (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 4y_{2n-1} + y_{2n})$$

avec $2n$ le nombre d'intervalles subdivisés égaux de l'intervalle total de a à b .

Dans l'exemple présent $2n = 24$ ($n = 12$), et les ordonnées y_0, y_1, y_2 etc., sont les valeurs de k , $a = 0$ et $b = 24$.

Le tableau suivant peut être établi:

Tableau B.3 – Calcul de consommation de vie

Temps	Consommation de vie	Facteur	$k \times$ facteur
(h)	(h/h)	(h)	(h)
	Eq. 7		
0	0,000	1	0,000
1	0,000	4	0,000
2	0,001	2	0,001
3	0,004	4	0,014
4	0,042	2	0,085
5	0,054	4	0,214
6	0,061	2	0,123
7	0,122	4	0,486
8	0,309	2	0,617
9	0,468	4	1,872
10	0,607	2	1,214
11	1,116	4	4,464
12	2,004	2	4,008
13	6,079	4	24,317
14	8,375	2	16,750
15	19,176	4	76,702
16	8,317	2	16,635
17	2,600	4	10,399
18	1,459	2	2,917
19	0,128	4	0,514
20	0,002	2	0,004
21	0,000	4	0,001
22	0,000	2	0,000
23	0,000	4	0,000
24	0,000	1	0,000

161,34

53,78

L'aire en-dessous de la courbe de la Figure B.4 est alors:

$$\frac{24}{6 \times 12} \times 161,34 = 53,78 \text{ (h)}$$

Ceci signifie que durant le cycle de charge donné de 24 h, 53,78 heures de durée de vie sont consommées sur un total de 180 000 h, ce qui représente 0,029 9 % de la durée de vie totale.

Annexe C (informative)

Liste de symboles

Symbole	Signification	Unités	Paragraphe
a	constante de l'équation d'Arrhenius	h	5.2
b	constante de l'équation d'Arrhenius	K	5.2
C	capacité thermique effective de l'enroulement	W•min/ K ou W•h/K	5.10.2
C_T	coefficient de température pour la variation de résistance avec la température		5.9.1
I	facteur de charge par unité		5.9.1
I_i	facteur de charge initial		5.12
I_n	facteur de charge n par unité		5.8
I_U	facteur de charge ultime		5.12
k	taux de vieillissement en consommation d'heures de durée de vie par heure de fonctionnement à une température donnée	h/h	5.4
kr	taux de vieillissement relatif à température T constante du point chaud (en Kelvin) exprimé comme un pourcentage du taux de vieillissement qui donne 180 000 heures de durée de vie	%	5.4
L	durée de vie	h	5.2
L_C	consommation de durée de vie exprimée en heures, à une température constante T du point chaud (en Kelvin) pendant un temps t en heures	h	5.5
m	constante empirique, qui est égale à 0,8		5.9.1
P_r	pertes totales de l'enroulement (pertes résistives + pertes de Foucault) à la charge nominale et à échauffement nominal	W	5.10.2
q	constante empirique pour le calcul de l'échauffement du point chaud pour une charge considérée		5.8
t	temps	min	5.9.2
T	température de point chaud thermodynamique	K	5.2
T_i	température du système d'isolation (classe thermique T_i)	°C	5.2
T_k	température constante pour conducteur, qui est 225 pour l'aluminium et 235 pour le cuivre		5.9.1
X	constante empirique utilisée pour le calcul en air forcé, qui est 1 (suggérée à moins que les données d'essai ne soient disponibles)		5.9.1
Z	facteur de point chaud supposé être 1,25		5.7/5.8
ϑ_a	température ambiante	°C	5.3 /5.9.1 /5.9.2 /5.12
ϑ_e	contribution du noyau magnétique à l'échauffement à vide du point chaud de l'enroulement	K	5.10.2
ϑ_{HS}	température du point chaud pour des conditions données	°C	5.6

Symbole	Signification	Unités	Paragraphe
	(charge I , température ambiante)		5.9.1 5.9.2 / 5.12
$\vartheta_{HS,r}$	température nominale du point chaud de l'enroulement calculée ou mesurée pour une charge de 1,0 par unité	°C	5.2 5.9.1
$\Delta\vartheta_{HS}$	échauffement du point chaud pour une charge I exprimée par unité	K	5.9.1 5.12
$\Delta\vartheta_{HS,r}$	échauffement du point chaud pour la charge nominale	K	5.7
$\Delta\vartheta_{HSn}$	échauffement du point chaud de l'enroulement au dessus de la température ambiante pour la charge considérée	K	5.2 5.8
$\Delta\vartheta_i$	échauffement du point chaud initial pour une charge antérieure I_n	K	5.9.2
$\Delta\vartheta_t$	échauffement du point chaud au temps t après changement de la charge	K	5.9.2 / 5.12
$\Delta\vartheta_U$	échauffement ultime du point chaud dans le cas d'une surcharge par unité I_U continue jusqu'à stabilisation de l'échauffement du point chaud	K	5.9.2 5.12
$\Delta\vartheta_{Wr}$	échauffement moyen de l'enroulement pour la charge nominale	K	5.7
τ	constante de temps du transformateur pour une charge donnée	min	5.9.2
τ_R	constante de temps du transformateur pour la charge nominale	min	5.9.2

Bibliographie

CEI 60076-1, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

CEI 60076-2, *Transformateurs de puissance – Partie 2: Echauffement*

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