

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



**Measuring relays and protection equipment –  
Part 149: Functional requirements for thermal electrical relays**

**Relais de mesure et dispositifs de protection –  
Partie 149: Exigences fonctionnelles pour relais électriques thermiques**



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 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

Tel.: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://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.

#### Useful links:

IEC publications search - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

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

Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

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

Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

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

---

### 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.

#### Liens utiles:

Recherche de publications CEI - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

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

Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

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

Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

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



IEC 60255-149

Edition 1.0 2013-07

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



**Measuring relays and protection equipment –  
Part 149: Functional requirements for thermal electrical relays**

**Relais de mesure et dispositifs de protection –  
Partie 149: Exigences fonctionnelles pour relais électriques thermiques**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

PRICE CODE  
CODE PRIX



ICS 29.120.70

ISBN 978-2-8322-1005-5

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

## CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references .....	6
3 Terms and definitions .....	7
4 Specification of the function.....	8
4.1 General .....	8
4.2 Input energizing quantities/energizing quantities .....	9
4.3 Binary input signals .....	9
4.4 Functional logic .....	10
4.4.1 Equivalent heating current .....	10
4.4.2 Basic (setting) and operating current values for thermal protection .....	10
4.4.3 Thermal level calculation .....	11
4.4.4 Time-current limit characteristic equations and curves.....	12
4.4.5 Thermal level alarm threshold.....	14
4.5 Binary output signals .....	15
4.5.1 General .....	15
4.5.2 Operate (trip) output signal.....	15
4.5.3 Alarm signal .....	15
4.5.4 Other binary output signals.....	15
4.6 Additional influencing factors on thermal protection .....	16
4.6.1 General .....	16
4.6.2 Influence of ambient temperature on thermal protection.....	16
4.6.3 Thermal reset facilities .....	16
4.7 Behaviour of thermal protective device during auxiliary power supply failure .....	17
5 Performance specification .....	17
5.1 Accuracy related to the characteristic quantity.....	17
5.2 Accuracy related to the operate time .....	17
5.3 Performance during frequency variations.....	18
6 Functional test methodology .....	18
6.1 General.....	18
6.2 Determination of steady-state errors related to the operating current value .....	19
6.3 Determination of steady-state errors related to the characteristic quantity and the operate time .....	19
6.3.1 Accuracy determination of the cold curve.....	19
6.3.2 Accuracy determination of the hot curves .....	20
6.4 Performance with specific cooling thermal time constant .....	21
6.5 Performance with harmonics .....	22
6.6 Performance during frequency variations.....	22
6.7 Performance during different ambient temperatures .....	23
7 Documentation requirements .....	24
7.1 Type test report.....	24
7.2 Other user documentation .....	24
Annex A (informative) Simple first-order thermal model of electrical equipment.....	26
Annex B (informative) Thermal electrical relays which use temperature as setting parameters .....	41
Bibliography.....	46

Figure 1 – Simplified thermal protection function block diagram .....	9
Figure 2 – Typical examples of characteristic curves for cold state of a first-order thermal system with no previous load before overload occurs .....	13
Figure 3 – Typical examples of characteristic curves for hot states of a first-order thermal system for different values of previous load before overload occurs .....	14
Figure A.1 – An electrical equipment to be thermally protected represented as a simple first-order thermal system .....	26
Figure A.2 – Equivalence between a first-order thermal system and an electric parallel RC circuit.....	30
Figure A.3 – Analogue thermal circuit representation of a simple first-order thermal system .....	31
Figure A.4 – Analogue thermal circuit representation of a simple first-order thermal system – motor starting condition.....	31
Figure A.5 – Analogue thermal circuit representation of a simple first-order thermal system – motor stopped condition .....	31
Figure A.6 – Dynamic step response of a simple first-order thermal system algorithm to a current below pickup .....	33
Figure A.7 – Dynamic step response of a first-order thermal system (cold initial state) .....	34
Figure A.8 – Dynamic step response of a first-order thermal system (hot initial state) .....	34
Figure A.9 – Dynamic step response of a first-order thermal system to a load current followed by an overload current (initial state: cold).....	35
Figure A.10 – Dynamic step response of a first-order thermal system to a load current followed by an overload current (initial state: hot) .....	35
Table 1 – Limiting error as multiples of assigned error .....	18
Table 2 – Test points of the cold curve .....	20
Table 3 – Test points of the hot curve .....	21
Table 4 – Test points of the cold curve with harmonics .....	22
Table 5 – Test points of the cold curve during frequency variations .....	22
Table A.1 – Thermal and electrical models.....	30
Table A.2 – Thermal insulation classes and maximum temperatures, according to IEC 60085.....	40
Table A.3 – Example of correction factor values ( $F_a$ ) for class F equipment according to the ambient temperature ( $T_a$ ).....	40

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASURING RELAYS AND PROTECTION EQUIPMENT –**

**Part 149: Functional requirements for thermal electrical relays**

FOREWORD

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

International Standard IEC 60255-149 has been prepared by IEC technical committee 95: Measuring relays and protection equipment.

This first edition cancels and replaces IEC 60255-8, published in 1990.

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

FDIS	Report on voting
95/313/FDIS	95/317/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 60255 series, under the general title *Measuring relays and protection equipment*, can be found on the IEC website.

Future standards in this series will carry the new general title as cited above. Titles of existing standards in this series will be updated at the time of the next edition.

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

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

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

## MEASURING RELAYS AND PROTECTION EQUIPMENT –

### Part 149: Functional requirements for thermal electrical relays

#### 1 Scope

This part of the IEC 60255 series specifies minimum requirements for thermal protection relays. This standard includes specification of the protection function, measurement characteristics and test methodologies.

The object of this standard is to establish a common and reproducible reference for evaluating dependent time relays which protect equipment from thermal damage by measuring a.c. current flowing through the equipment. Complementary input energizing quantities such as ambient, coolant, top oil and winding temperature may be applicable for the thermal protection specification set forth in this standard. This standard covers protection relays based on a thermal model with memory function.

The test methodologies for verifying performance characteristics of the thermal protection function and accuracy are also included in this Standard.

This standard does not intend to cover the thermal overload protection trip classes indicated in IEC 60947-4-1 and IEC 60947-4-2, related to electromechanical and electronic protection devices for low voltage motor-starters.

The thermal protection functions covered by this standard are as follows:

Protection function	IEC 61850-7-4	IEEE C37.2
Thermal overload protection	<b>PTTR</b>	49
Rotor thermal overload protection	<b>PROL</b>	49R
Stator thermal overload protection	<b>PSOL</b>	49S

General requirements for measuring relays and protection equipment are specified in IEC 60255-1.

#### 2 Normative references

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

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org>)

IEC 60085, *Electrical insulation – Thermal evaluation and designation*

IEC 60255-1, *Measuring relays and protection equipment – Part 1: Common requirements*

IEC 61850-7-4, *Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-4: Basic communication structure – Compatible logical node classes and data classes*

### 3 Terms and definitions

For the purpose of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-447, as well as the following apply.

#### 3.1

##### **hot curve**

for a thermal electrical relay with a total memory function, characteristic curve representing the relationship between specified operating time and current, taking into account thermal effect of a specified steady-state load current before the overload occurs

Note 1 to entry: Hot curve is a plot of a particular time-current solution for a first-order thermal system differential equation, assuming a specific constant overload current and a specific preload current.

#### 3.2

##### **cold curve**

for a thermal electrical relay, characteristic curve representing the relationship between specified operating time and current, with the relay at reference and steady-state conditions with no-load current flowing before the overload occurs

Note 1 to entry: Cold curve is a plot of a particular time-current solution for a first-order thermal system differential equation, assuming a specific constant overload current when there is no preload.

#### 3.3

##### **basic current**

$I_B$

specified limiting (nominal) value of the current for which the relay is required not to operate at steady-state conditions of the equipment to be thermally protected

Note 1 to entry: The basic current serves as a reference for the definition of the operational characteristics of thermal electrical relays. The basic settings of a thermal electrical protection function are made in terms of this basic current ( $I_B$ ) and the thermal time constant ( $\tau$ ) of the protected equipment.

#### 3.4

##### **equivalent heating current**

$I_{eq}$

current which takes into account the additional heating sources such as imbalance currents and/or harmonics

#### 3.5

##### **factor $k$**

factor by which the basic current ( $I_B$ ) is multiplied to obtain the maximum permissible continuous operating current value of the equipment to be thermally protected, which is used in the thermal characteristic function

Note 1 to entry: The factor  $k$  indicates the maximum permissible constant between phase current (full load) and the basic (nominal) current of the protected equipment.

#### 3.6

##### **previous load ratio**

ratio of the load current preceding the overload to basic current under specified conditions

#### 3.7

##### **reference limiting error**

limiting error determined under reference conditions

[SOURCE: IEC 60050:2010, 447-08-07]

### 3.8 temperature rise

difference between the temperature of the part under consideration and a reference temperature

Note 1 to entry: The reference temperature may be for example the ambient air temperature or the temperature of a cooling fluid.

[SOURCE: IEC 60050:2001, 151-16-26]

### 3.9 thermal equilibrium

thermal state reached when the temperature rise of the several parts of the machine do not vary by more than a gradient of 2 K per hour

[SOURCE: IEC 60050:1996, 411-51-08]

### 3.10 thermal time constant

$T_{th}$   
time required for the temperature rise of the protected equipment relative to its initial temperature, to reach 63,2 % of its final, asymptotic value following a step increase in current

Note 1 to entry: The initial temperature for example can be ambient temperature.

### 3.11 thermal level

$H$   
ratio expressed in percentage between the estimated actual temperature of the equipment and the temperature of the equipment when the equipment is operating at its maximum current ( $k \times I_B$ ) for a long period, enough to allow equipment to reach its thermal equilibrium

## 4 Specification of the function

### 4.1 General

An example of a thermal protection function with its input energizing quantities, binary input signals, operate (trip), alarm and other binary outputs, and functional logic which includes measuring element, thermal level calculation, settings, and thresholds are shown in Figure 1. The manufacturer shall provide the functional block diagram of the specific thermal protection implementation.

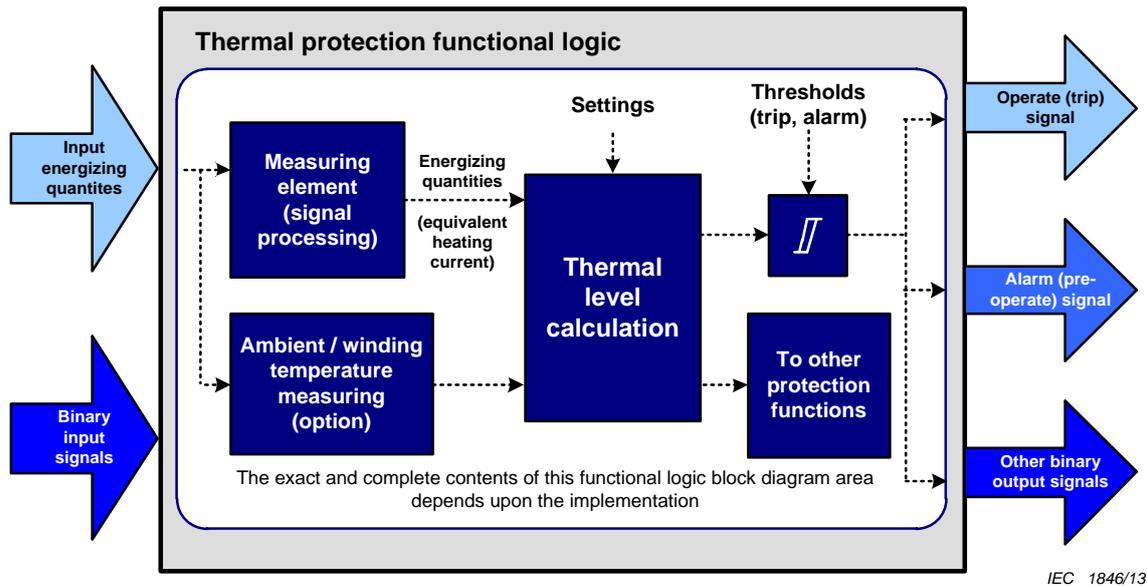


Figure 1 – Simplified thermal protection function block diagram

#### 4.2 Input energizing quantities/energizing quantities

The input energizing quantities are the measuring signals, such as phase (or line) currents, and ambient/environmental or winding temperatures (if required or applicable). Their ratings and relevant requirements are specified in IEC 60255-1.

Input energizing quantities can be presented to the thermal protection functional logic either hardwired from current transformers and any additional input quantities such as ambient or winding temperature, or as a data packet over a communication ports using an appropriate data communication protocol, such as IEC 61850-9-2.

The input energizing quantities used by the thermal protection function need not be the current directly taken from the secondary side of the current transformers. Therefore the protection relay documentation shall state the type of energizing quantities used by the thermal protection function.

Examples of input energizing quantities are:

- single-phase current measurement;
- three-phase current measurement;
- positive and negative sequence current measurement;
- winding or ambient temperature sensor.

NOTE The ambient temperature, coolant temperature, top oil temperature or winding temperature of the equipment to be thermally protected can be measured by temperature sensors, such as resistance temperature detector (RTD), the values of which can be used for biasing the calculation of the thermal level replica specified in this standard. Output signals or values of these temperature sensors can be taken into account for the first-order thermal model algorithm, which can influence and compensate the calculated thermal level (based on the equivalent heating current and heating thermal time constant values).

#### 4.3 Binary input signals

If any binary input signals (externally or internally driven) are used, their influence on the thermal protection function shall be clearly described on the functional logic diagram or in the protective device manufacturer documentation. Additional textual description may also be provided if this can further clarify the functionality of the input signals and their intended application or implementation.

Binary input signals to this function may emanate from a number of different sources. Examples include:

- traditionally wired to physical inputs;
- via a communications port from external devices;
- via internal logical connections from other functional elements within the relay.

The method of receiving the signal is largely irrelevant except to conform to operational requirements.

Definitions, ratings and standards for physical binary input signals are specified in IEC 60255-1.

The following are examples of binary input signal application in thermal protection.

- 1) When the thermal protection function is implemented with two operating modes of the protected equipment, such as power transformers with natural or forced ventilation, two-speed motors or a star/delta starting motor, a binary input can be implemented to discriminate the different operating modes and to select the required group of settings to be used for proper thermal protection application.
- 2) Another example of a binary input is to implement a reset function of the thermal memory during testing/commissioning procedures, using a binary input either directly hardwired or through data communications.

#### 4.4 Functional logic

##### 4.4.1 Equivalent heating current

The equivalent heating current  $I_{eq}$  takes into account the additional heating source such as imbalance currents and/or harmonics. The type of measurement of the equivalent heating current shall be stated in the protection relay documentation.

For the rms measurement, the manufacturer shall specify the bandwidth of the rms current measurement and define which harmonics are included in the equivalent heating current calculation.

Annex A gives an explanation of the definition of the equivalent heating current and different cases of implementation of thermal protection applications of electrical equipment.

##### 4.4.2 Basic (setting) and operating current values for thermal protection

For the thermal electrical relay, the basic (setting) current value  $I_B$  is the specified limiting value of the current for which the relay is required not to operate. For motor or transformer applications, the basic current is usually set to the nominal current of the protected equipment.

To take into account the maximum continuous load current of the protected equipment, a factor  $k$  is applied to the basic (setting) current value, to determine the operating current for the thermal protection.

Therefore the value  $k \times I_B$  defines the operating current of the thermal protection relays,

where

- $k$  may be a constant value or a user setting, as declared by the thermal relay manufacturer;
- $I_B$  is the basic (setting) current value expressed as the permissible current of the equipment to be thermally protected.

With the factor  $k$ , no operation of the thermal relay is guaranteed for phase currents equal to the setting value  $I_B$ . If the factor  $k$  is a user setting, it should include a range of at least 1,0 to 1,5. For motor or transformer applications, the factor  $k$  is usually set by the user, where  $k \times I_B$  is equal to or less than maximum operating (full load) current of the equipment to be thermally protected. For relays which do not have a  $k$  factor setting (assumed to be fixed at 1,0) the setting for  $I_B$  should be adjusted to account for the  $k$  factor.

In some cases a fixed value of  $k$  may be defined by the manufacturer, equal to the accuracy of current measurement of the thermal electrical relay. This ensures that the thermal relay shall not operate for an operating current of  $I_B$ . In this case the ratio between the overload and the nominal current for the equipment being protected can be accommodated in the setting of the base current  $I_B$ .

#### 4.4.3 Thermal level calculation

The thermal level calculation of the protected equipment is based on the equivalent heating phase current measurement and the recursive computation of a discrete-time equation of a differential first-order thermal model.

The thermal level  $H(t)$  of the protected equipment is calculated by the following equation:

$$H(t) = \left( \frac{I_{\text{eq}}(t)}{k \cdot I_B} \right)^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad (1)$$

where

$H(t)$  is the thermal level at time  $t$ ;

$H(t - \Delta t)$  is the thermal level at time  $t - \Delta t$ ;

$\Delta t$  is the sample period which is the time interval between two consecutive samples of input currents;

$I_{\text{eq}}(t)$  is the equivalent heating phase current at time  $t$  (see 4.4.1 and Annex A);

$k \cdot I_B$  is the value of the maximum continuous current, including  $k$  factor;

$\tau$  is the heating/cooling thermal time constant of the equipment to be thermally protected,  $\tau$  is assumed to be  $\gg \Delta t$ .

Derivation of differential and time-current equations and dynamics for a simple first-order thermal system are given in detail in Annex A.

For a particular steady-state case with a constant  $I_{\text{eq}}$ , the thermal level  $H$  can be calculated by the following particular and simplified equation:

$$H = \left( \frac{I_{\text{eq}}}{k \cdot I_B} \right)^2 \quad (2)$$

The thermal electrical relay operates if the thermal level reaches 100 % of maximum thermal level threshold.

According to the mechanical design of the electrical equipment to be thermally protected, the heating thermal time constant and cooling thermal time constant can have different values. For example, for electric motor protection application, the heating thermal time constant is lower than the cooling thermal time constant due to the rotor rotation and self-ventilation operation when the motor is running. In these cases, the thermal level is calculated according to the phase current level, with two different thermal time constants, according to the following equations.

If  $I_{eq}(t) \geq 0$  (or if  $I_{eq}(t)$  is greater than a fixed input current threshold, stated by the thermal relay manufacturer), the thermal level can be computed by the following equation:

$$H(t) = \left( \frac{I_{eq}(t)}{k.I_B} \right)^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau_1 + \Delta t} + \frac{\tau_1}{\tau_1 + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad (3)$$

If  $I_{eq}(t) \approx 0$  (or if  $I_{eq}(t)$  is lower than a fixed input current threshold, stated by the thermal relay manufacturer), the thermal level can be computed by the following equation:

$$H(t) = \frac{\tau_2}{\tau_2 + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad (4)$$

where

$\tau_1$  is the heating thermal time constant of the equipment to be thermally protected;

$\tau_2$  is the cooling thermal time constant of the equipment to be thermally protected.

NOTE 1 Generally  $\tau_1$  is used when the protected equipment is energized and  $\tau_2$  is used when the protected equipment is deenergized.

NOTE 2 The heating thermal time constant  $\tau_1$  is also used when the equipment is energized and the phase current is reduced to a lower level, which causes a lowering of the equipment thermal level, causing a decrease in the equipment temperature.

NOTE 3 Manufacturers can implement multiple heating and multiple cooling time constants to cover the variety of heating and cooling conditions. For example, during direct on-line motor starting the time constant used in the thermal model can be changed (decreased) to allow for reduced cooling capability of the rotor at standstill/low speed and then revert to a longer time constant when normal running speed is achieved.

For most thermal protection applications, such as self-ventilated motor and generator, two-speed motors, star/delta starting motor, the thermal time constants  $\tau_1$  and  $\tau_2$  are different. For some other applications, such as motors with separated, independent forced ventilation or cooling systems, power transformers with or without forced ventilation cooling systems, cables, and capacitors, the thermal time constants  $\tau_1$  and  $\tau_2$  may have the same value. Some specific applications, such as two-speed motors or where star/delta starting is used, additional heating time constants may be used.

#### 4.4.4 Time-current limit characteristic equations and curves

##### 4.4.4.1 General

The time-current characteristics shall be published by the relay manufacturer either in the form of equations or by graphical methods. The time-current equations for a simple thermal model are given here for cold state and hot state.

##### 4.4.4.2 Cold curve

The cold curve for thermal protection relays is a particular solution of the first-order differential Equation (1) for the following conditions.

- Starting from a thermal level with no load current before the overload occurs. Therefore, the equipment temperature is considered as the ambient temperature and its thermal level is considered equal to zero.
- A constant phase current during the overload.

The cold time-current limit characteristic is given by the following time-current equation:

$$t(I_{\text{eq}}) = \tau \cdot \ln \left( \frac{I_{\text{eq}}^2}{I_{\text{eq}}^2 - (k \cdot I_{\text{B}})^2} \right) \quad (5)$$

where

$t(I_{\text{eq}})$  is the theoretical operate time with a constant phase current  $I_{\text{eq}}$ , with no load current before (prior) the overload occurs;

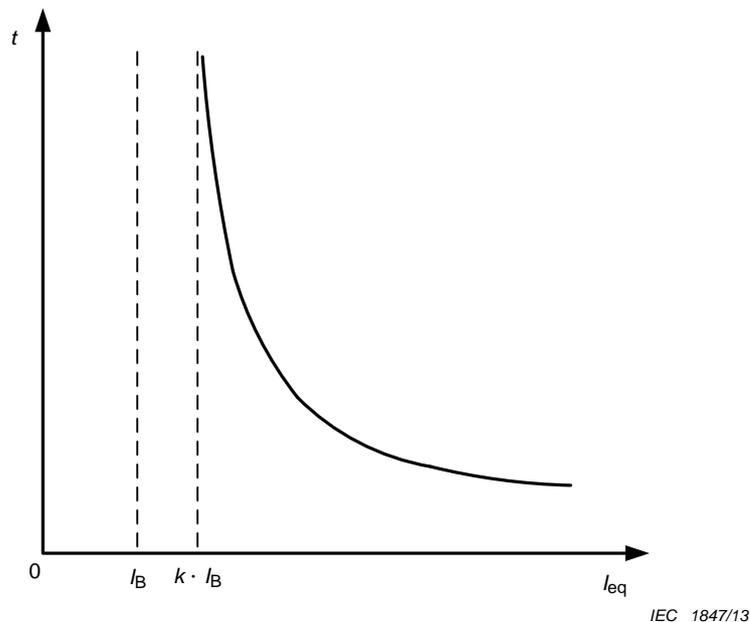
$I_{\text{eq}}$  is the equivalent heating current;

$\tau$  is the heating thermal time constant of the protected equipment;

$k$  is a constant (fixed) value or a setting, declared by the thermal relay manufacturer;

$I_{\text{B}}$  is the basic current value expressed as permissible current of the equipment to be thermally protected.

A typical example of time-current characteristic curve for cold state of a first-order thermal system with no previous load before overload occurs is shown in Figure 2.



**Figure 2 – Typical examples of characteristic curves for cold state of a first-order thermal system with no previous load before overload occurs**

A detailed differential equation derivation, algorithm, dynamics, and cold time-current characteristic solution for the first-order thermal system are developed and given in Annex A.

#### 4.4.4.3 Hot curve

The hot curve for thermal protection relays is a particular solution of the first-order differential Equation (1) and it is given by the following time-current equation:

$$t(I_{\text{eq}}) = \tau \cdot \ln \left( \frac{I_{\text{eq}}^2 - I_{\text{p}}^2}{I_{\text{eq}}^2 - (k \cdot I_{\text{B}})^2} \right) \quad (6)$$

where

$t(I_{eq})$  is the theoretical operate time with a constant phase current  $I_{eq}$  with a constant current of  $I_p$  prior to the overload;

$I_{eq}$  is the equivalent heating current;

$I_p$  is the steady-state load current prior to the overload for a duration which would result in constant thermal level (duration is greater than several heating thermal time constants  $\tau$ );  $I_p = 0$  results in the cold curve;

$\tau$  is the heating thermal time constant of the equipment to be thermally protected;

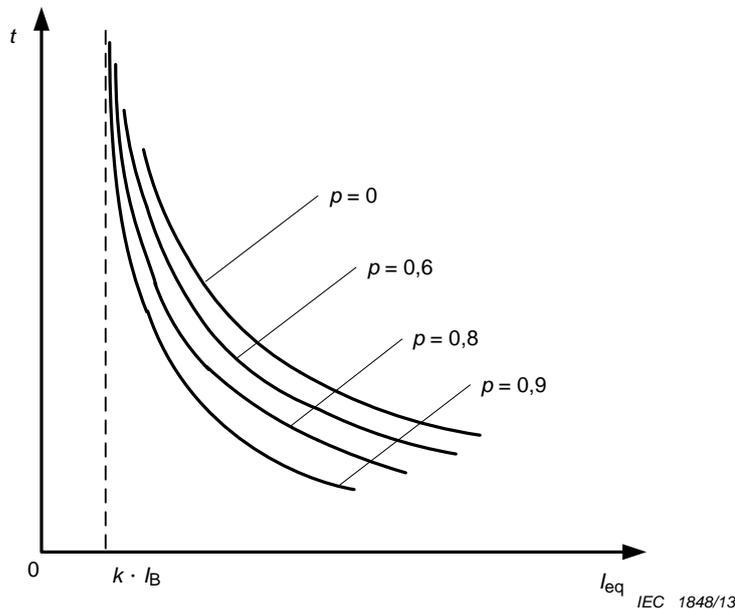
$k$  is a constant value (fixed) value or a setting, declared by the thermal relay manufacturer;

$I_B$  is the basic current value expressed as permissible current of the equipment to be thermally protected.

The relay manufacturer can publish thermal tripping curves as in the example given below with the previous load ratio  $p$  as a parameter, described by the following equation:

$$p = \frac{I_p}{I_B} \tag{7}$$

Typical examples of current-time characteristic curves for hot states of a first-order thermal system for different values of previous load before overload occurs are shown in Figure 3.



**Figure 3 – Typical examples of characteristic curves for hot states of a first-order thermal system for different values of previous load before overload occurs**

A detailed differential equation derivation, algorithm, dynamics, and hot time-current characteristic solution for the first-order thermal system are developed and given in Annex A.

#### 4.4.5 Thermal level alarm threshold

If the thermal protection relay contains an alarm threshold level it can produce an alarm output signal when the thermal level exceeds a predetermined setting alarm threshold. This threshold can be defined as a percentage of the nominal (rated) thermal limit of the equipment to be thermally protected.

Nominal (rated) thermal limit ( $H_{\text{nominal}} = 100\%$ ) is considered as the maximum thermal level to which the equipment to be thermally protected can continuously withstand to avoid over temperature. An over temperature above the permitted limit could damage the chemical/physical properties of the materials component of the insulation system, reducing its expected life time.

This predictive overload alarm threshold level, if provided, shall include at least a range of 50 % to 100 % of the nominal (rated) thermal limit.

NOTE 1 The thermal level  $H$  can be compensated for the ambient temperature level of the equipment this is detailed in Equations (8) and (9).

NOTE 2 For motor thermal protection applications, the actual thermal level, measured by the thermal protection device using the equations shown in this standard, can be used as a restart blocking signal, as an input reference for the restarting blocking protection function (function 66), for a motor in a stopped condition (at rest), at a hot state, after operation. For this application, the remaining time for the next allowed motor start attempt can be indicated in the thermal protection device display, taking into account the cooling thermal time constant for the stopped motor, the actual thermal level of the motor at rest and the estimated or calculated thermal level required for motor starting (calculated based on the motor heating thermal time constant, starting current and starting time).

## 4.5 Binary output signals

### 4.5.1 General

Binary output signals from this function may be available in a number of different forms. Examples include:

- traditionally wired from physical relay output contacts,
- via a communications port to external devices,
- via internal logical connections to other functional elements within the relay.

The method of providing the signal is largely irrelevant except to conform to functional requirements.

Definitions, ratings and standards for physical binary output signals are specified in IEC 60255-1.

### 4.5.2 Operate (trip) output signal

The operate (trip) signal is the output of measuring and threshold elements, when the calculated thermal level  $H(t)$ , defined in Equation (1), exceeds 100 % (1,0 pu) of the nominal (rated) thermal level of the equipment to be thermally protected.

NOTE The trip signal could operate when the calculated thermal level of any of the three phases exceeds the nominal thermal level.

### 4.5.3 Alarm signal

The alarm signal is the output of measuring and threshold elements, when the calculated thermal level  $H(t)$ , defined in Equation (1), exceeds a predetermined overload alarm threshold setting.

### 4.5.4 Other binary output signals

If any other binary output signals are available for use, their method of operation shall be clearly shown on the functional logic diagram or in the protective device manufacturer documentation. Additional textual description may also be provided if this can further clarify the functionality of the output signal and its intended usage.

## 4.6 Additional influencing factors on thermal protection

### 4.6.1 General

The manufacturer shall declare if any specific algorithms are implemented in the relay. These algorithms shall be described by the manufacturer in the thermal protective device documentation.

For example, if the thermal protection relay is equipped with temperature measurement facilities the thermal protection can take into account the ambient or coolant temperature. One possible implementation of ambient temperature compensation is described in the following subclauses, but other methods could be used.

### 4.6.2 Influence of ambient temperature on thermal protection

Electrical machines, such as motors and power transformers, are designed to operate within a specific ambient temperature range. If the machine operates at a higher ambient temperature than specified, the windings may overheat and suffer insulation degradation even if it is operating within the permitted rated load and equivalent heating currents. In this case, it is beneficial to compensate or bias the calculated thermal level of the machine to maintain adequate thermal protection by directly measuring the ambient temperature.

Typically, the design limits (or maximum ambient temperature) of the protected machine is in the region of 40 °C. When the measurement of ambient temperature is other than this design limit, the thermal level  $H(t)$  can be compensated by a factor  $F_a$ , defined by the following equation:

$$F_a = \frac{T_{\max} - T_{\text{limit}}}{T_{\max} - T_a} \quad (8)$$

where

- $T_{\max}$  is the equipment maximum temperature (according to equipment thermal insulation class, as indicated in IEC 60085);
- $T_a$  is the actual ambient (environment) temperature of the equipment, measured by the thermal protection relay;
- $T_{\text{limit}}$  is the ambient temperature design limits for operation at rated load without causing thermal degradation of insulation, typically 40 °C.

In the case of a thermal protection relay which is equipped with ambient temperature sensor and ambient temperature correction factor, the thermal level  $H(t)$  of the equipment is calculated by the following equation:

$$H(t) = \left( \frac{I_{\text{eq}}(t)}{k \cdot I_B} \right)^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} \cdot F_a + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad (9)$$

The derivation of the ambient temperature factor  $F_a$  is given in detail in Annex A.

### 4.6.3 Thermal reset facilities

During testing of the thermal element, it is preferable to be able to force the thermal element to a fully reset (zero) state, or other known value. If such a facility is available on the device, its method of operation, capability and any relevant settings should be clearly shown on the functional diagram and within the relay documentation.

#### 4.7 Behaviour of thermal protective device during auxiliary power supply failure

The thermal protection function continuously calculates and stores the thermal level in its thermal memory using the recursive equation.

When energizing the thermal protective device, the state of the thermal memory shall be clearly defined and stated by the relay manufacturer in the protective device documentation.

In some cases, it is a parameter setting which defines the starting level of the thermal memory. Depending on the setting of the thermal protective device, the stored value of the thermal level of the protected equipment should be either reset to zero (in the event of an auxiliary power supply failure) or stored in a non-volatile type memory, so that the previous thermal level is maintained if the power supply fails.

The manufacturer shall declare in the thermal protective device documentation the behaviour of the thermal level in the event of a power system supply failure along with user settings and the factory (default) settings.

### 5 Performance specification

#### 5.1 Accuracy related to the characteristic quantity

The accuracy related to the characteristic quantity shall be declared by the manufacturer at operate value  $k \times I_B$ , in the setting value range over which it is applicable.

The range of  $k$  shall be specified which is supported by the thermal electrical relay (e.g.  $1,0 \leq k \leq 1,5$ ). The manufacturer shall prove that no operation occurs due to measurement inaccuracies of current and temperature as well as thermal calculation at  $I_B$ .

For functions with an ambient temperature measurement, the manufacturer shall declare the influence of the ambient temperature measurement on the characteristic accuracy. In order to avoid the combination of a varying characteristic quantity and a varying ambient temperature, it is sufficient to specify the accuracy with an ambient temperature measurement  $T_a$  lower than 40 °C and one value higher than 40 °C (e.g.  $T_a = 0 \text{ °C}$  and  $T_a = 0,5 T_{max}$ ).

#### 5.2 Accuracy related to the operate time

The effective range of the time-current characteristics shall be specified by the manufacturer ( $I_{min} \leq I_{eq} \leq I_{max}$ ).  $I_{min}$  and  $I_{max}$  shall be stated by the manufacturer and  $I_{min}$  shall lie between  $k \times I_B$  and  $1,2 \times k \times I_B$ . This results in a maximum operating time for a value of  $I_{eq} = I_{min}$  and a minimum operating time of  $I_{eq} = I_{max}$ . The accuracy of the characteristic is specified within this effective range. In addition the manufacturer shall declare the behaviour of the function above the effective range, under high fault current conditions (e.g. if the function is blocked or  $I_{eq}$  is limited to  $I_{max}$ ).

The reference limiting error is identified by an assigned error declared by the manufacturer, which may be multiplied by factors corresponding to different values of the characteristic quantity. The value of the assigned error shall be declared at the maximum limit of the effective range ( $I_{max}$ ). The reference limiting error may be declared either as:

- 1) a theoretical curve of time plotted against multiples of the setting value of the characteristic quantity bounded by two curves representing the maximum and minimum limits of the limiting error over the effective range, or
- 2) an assigned error claimed at the maximum limit of the effective range of the time-current characteristic multiplied by stated factors corresponding to different values of the characteristic quantity within its effective range of the characteristic, as specified in Table 1.

**Table 1 – Limiting error as multiples of assigned error**

Value of characteristic quantity as multiple of setting value ( $k \times I_B$ )	1,2 to 1,5	1,5 to 2	2 to $I_{max}$
Limiting error as multiples of assigned error	2,5	1,5	1

NOTE The characteristic quantity can be different depending on the nature of the thermal protection being provided. As an example it can be phase current combined or not with negative sequence current in the case of motor thermal protection.

The manufacturer shall declare if compensation of the internal measurement time of the characteristic quantity and the output contact operation is included in the operate time and its stated accuracy.

Nominal accuracy will be stated based on a sinusoidal input at nominal frequency; however the manufacturer shall state the effect of harmonics on the characteristic quantity and the operating frequency range where the nominal accuracy is met. In addition, the manufacturer shall state if harmonics are included in the calculation of the characteristic quantity.

### 5.3 Performance during frequency variations

The purpose of these tests is to verify the relay performance when the frequency of the energizing quantities deviates from the nominal value. The influence of frequency deviation from  $f_{min}$  to  $f_{max}$  is determined by means of testing accuracy when the frequency of the characteristic quantity is varied between  $f_{min}$  and  $f_{max}$ .

## 6 Functional test methodology

### 6.1 General

Tests described in this clause are for type tests. These tests shall be designed in such a way to exercise all aspects of hardware and firmware (if applicable) of the thermal protection relay. This means that injection of current shall be at the interface to the relay, either directly into the conventional current transformer input terminals, or an equivalent signal at the appropriate interface.

The manufacturer shall clearly indicate the test methodology, procedure, structure and architecture used in this protective device performance test.

Whenever applicable, other influencing input quantities like inputs for ambient temperature measurement, reset inputs, or power supply failure functions shall be considered in the type tests. Similarly, operation shall be taken from output contacts wherever possible or equivalent signals at an appropriate interface.

The accuracy of the relay shall be determined in steady-state conditions. The injected characteristic quantity shall be a sinusoid of rated frequency and its magnitude shall be varied according to the test requirements.

When determining the influence of harmonics the injected characteristic quantity shall be superimposed sinusoidal signals with the fundamental signal of rated frequency and its magnitude shall be varied according to the test requirements.

When determining the influence of abnormal frequencies the injected characteristic quantity shall be a sinusoidal signal at required test frequencies and its magnitude shall be varied according to the test requirements.

In accordance with IEC 60255-1 each test point related to accuracy shall be repeated 5 times to ensure repeatability of results, with the maximum and average error values of all the tests

being used for the accuracy claim. Sufficient test points should be used to assess the performance over the entire setting range of the element, but as a minimum three settings shall be used. Preferred values are: minimum setting (or 0 % of the range); 50 %; maximum setting (or 100 % of the range).

In the following subclauses, the test settings to be used are expressed in a percentage of the available range with 0 % representing the minimum available setting and 100 % representing the maximum available setting. Similarly 50 % would represent the mid-point of the available setting range. The actual setting to be used can be calculated using the following equation:

$$S_{AV} = (S_{MAX} - S_{MIN}) X + S_{MIN} \quad (10)$$

where

$S_{AV}$  is the actual setting value to be used in test;

$S_{MAX}$  is the maximum available setting value;

$S_{MIN}$  is the minimum available setting value;

$X$  is the test point percentage value expressed in test methodology.

## 6.2 Determination of steady-state errors related to the operating current value

It is not easy to verify the accuracy of the operating current value  $k \times I_B$  directly, due to the very long operating time near the threshold. However, in order to check the basic current value  $I_B$ , the specified limiting value of the current for which the thermal relay is required not to operate, the following test is performed.

A current equal to  $I_B$  shall be applied to the thermal relay during a period longer than 10 times the heating thermal constant setting. The operate output contact of the element shall be monitored, and no tripping shall occur.

This test shall be done with the following settings.

- The minimum heating thermal constant of the setting range.
- If the factor  $k$  is a setting value,  $k$  is set to the specified accuracy level, declared by the manufacturer (i.e. with a specified accuracy level of 5 %, the factor  $k$  is set to 1,05).
- If the factor  $k$  is a fixed value, it is generally defined to cover the current measuring accuracy to ensure no operation for a continuous current  $I_B$ . In the particular case where  $k$  is a fixed value equal to 1, a reduced current shall be applied according to the declared accuracy level (i.e. with a specified accuracy level of 5 %, the injected current is equal to  $0,95 \times I_B$ ).
- The basic current  $I_B$  is set to 3 test points: minimum setting (or 0 % of the range); 50 %; maximum setting (or 100 % of the range).

The test can be done with or without previous thermal level. The impact of the previous thermal level after the duration of the current injection (10 times the heating thermal time constant) is not significant.

At the end of the test and, if the relay displays the thermal level of the protected equipment, the thermal level shall be less than 100 %.

## 6.3 Determination of steady-state errors related to the characteristic quantity and the operate time

### 6.3.1 Accuracy determination of the cold curve

The verification of the specified cold curve is required to indirectly verify the stated accuracies for the characteristic quantity and operate time. To determine the cold curve response the

thermal model of thermal protection relay shall be reset prior to instantly applying the calculated test signal.

According to Equation (5) the cold curve is verified with sufficient test points to assess the performance over the entire basic current and heating thermal time constant setting range, at various current values throughout the effective range of the thermal characteristic. The times recorded for the operate output contact provides a measure of the cold curve operating time accuracy. The suggested test points are indicated in the Table 2. Each test point shall be tested one time, except for the minimum thermal time constant setting where each test point shall be repeated at least 5 times to ensure repeatability of results, with the maximum and average error values of all the tests being used for the accuracy claim.

If the factor  $k$  is a setting, the operating current value is defined with a combination of the basic current  $I_B$  and the factor  $k$ , in their setting ranges. For example, assuming the available setting range for the basic current  $I_B$  is 1 A to 5 A and the setting range of the factor  $k$  is 1,0 to 1,5, the actual operating current value to be used would be: 1 A; 3,75 A; 7,5 A.

**Table 2 – Test points of the cold curve**

Operating current value ( $k \times I_B$ )	Heating thermal time constant ( $\tau_1$ )	Initial test current value	End test current value
Minimum (0 %) for $I_B$ and $k$	Minimum (0 %)	Zero	$1,2 \times k \times I_B$
50 % for $I_B$ and $k$	50 %	Zero	$1,6 \times k \times I_B$
Maximum (100 %) for $I_B$ and $k$	Maximum (100 %)	Zero	$2 \times k \times I_B$
		Zero	$5 \times k \times I_B$
		Zero	$10 \times k \times I_B$
NOTE The total number of test points is 45 (with repetitions a total of 105 tests). Five test points defined by the end test current values, with the 3 defined settings for the operating current value ( $k \times I_B$ ), and the 3 defined settings for the thermal time constant.			

If test points specified in Table 2 exceed the effective range of the device under test, the test is performed until the maximum allowed characteristic quantity. None of the test points shall be outside the specified accuracy that result from the specified accuracies for the characteristic quantity and operate time.

For the cold curve test: The input current shall be suddenly changed from zero to the appropriate multiple of  $I_B$ . The relay shall then be allowed sufficient time to return to its initial condition before re-application of current.

To reduce the testing time of cold curve a forced reset by logic input or a setting can be used to reset the thermal memory between each test point.

**6.3.2 Accuracy determination of the hot curves**

The verification of the specified hot curve is required to indirectly verify the stated accuracies for the characteristic quantity and operate time. The test will be carried out, at least, for 5 different preload levels (10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 %).

These tests are defined to check the impact of the preload levels on the operating time (hot curves). The test points can be done with only one setting value for the operating current and the heating thermal time constant ( $\tau_1$ ). The tests points are suggested in the following Table 3. Each test point shall be tested once.

**Table 3 – Test points of the hot curve**

Operating current value ( $k \times I_B$ )	Heating thermal time constant ( $\tau_1$ )	Preload levels (in % of $I_p$ )	End test current value
50 % for $I_B$ and $k$	50 %	10 %	$1,2 \times k \times I_B$
-	-	30 %	$1,6 \times k \times I_B$
-	-	50 %	$2 \times k \times I_B$
-	-	70 %	$5 \times k \times I_B$
-	-	90 %	$10 \times k \times I_B$

NOTE The total number of test points is 25; five end test current values times 5 defined preload levels.

If test points specified in Table 3 exceed the effective range of the device under test, the test is performed until the maximum allowed characteristic quantity. None of the test points shall be outside the specified accuracy that result from the specified accuracies for the characteristic quantity and operate time.

For the hot curve test: the protective device shall be energized with an equivalent current corresponding to the preload level for a time to allow the relay to reach thermal equilibrium at that point. The protective device shall then be energized at the appropriate multiple of the basic current  $I_B$ .

The protective device shall then be allowed sufficient time as specified by the manufacturer to return to and stabilize at the previous load current before further testing.

#### 6.4 Performance with specific cooling thermal time constant

If the relay can handle different heating and cooling thermal time constants ( $\tau_1$  and  $\tau_2$ ), the following test shall be performed.

A current above the operating current value  $k \times I_B$  is applied to the thermal relay until operation. When the relay operation occurs, the current injection is switched off during a time  $T_{cooling}$ . After this time  $T_{cooling}$ , a current  $I_{fault}$  above the operating current value  $k \times I_B$  is applied again to the thermal relay. The time  $T_{fault}$  recorded between the injection of the current  $I_{fault}$  and the operate output contact shall be equal to the following equation.

$$T_{fault} = \tau_1 \cdot \ln \left( \frac{I_{fault}^2 - (k \cdot I_B)^2 \cdot e^{(-T_{cooling}/\tau_2)}}{I_{fault}^2 - (k \cdot I_B)^2} \right) \quad (11)$$

where

- $\tau_1$  is the heating thermal time constant 1 of the equipment to be thermally protected;
- $\tau_2$  is the cooling thermal time constant 2 of the equipment to be thermally protected;
- $I_{fault}$  is the current applied to the thermal relay after the cooling period;
- $T_{cooling}$  is the time duration of the cooling period previous to the overload;
- $k \cdot I_B$  is the operating current value.

The test shall be performed with 2 different settings (0 % and 50 %) for the cooling thermal time constant ( $\tau_2$ ), in the following conditions.

- The operating current value ( $k \times I_B$ ) shall be set at 50 % of the setting range.

- The heating thermal time constant ( $\tau_1$ ) shall be selected as 50 % of the setting range.
- The current  $I_{\text{fault}}$  shall be equal to 2 times the operating current value ( $k \times I_B$ ).

None of the test points shall be outside the specified accuracy that result from the specified accuracies for the characteristic quantity and operate time.

**6.5 Performance with harmonics**

At least one curve test for cold curve shall be carried out while the characteristic quantity includes 10 % of 3<sup>rd</sup> harmonic.

At least one curve test for cold curve shall be carried out while the characteristic quantity includes 25 % of 5<sup>th</sup> harmonic.

At least one curve test for cold curve shall be carried out while the characteristic quantity includes 15 % of 7<sup>th</sup> harmonic.

The percentage harmonic is based on the fundamental frequency component with a phase angle between the fundamental and harmonic component at zero degrees. Three test points are suggested in the following Table 4.

**Table 4 – Test points of the cold curve with harmonics**

Operating current value ( $k \times I_B$ )	Heating thermal time constant ( $\tau_1$ )	Initial test current value	End test current value
50 % for $I_B$ and $k$	Minimum (0 %)	Zero	$1,2 \times k \times I_B$
		Zero	$2 \times k \times I_B$
		Zero	$10 \times k \times I_B$

If test points specified in Table 4 exceed the effective range of the device under test, the test is performed until the maximum allowed characteristic quantity is reached. None of the test point results shall be outside the specified accuracy that result from the specified accuracies for the characteristic quantity and operate time.

**6.6 Performance during frequency variations**

At least one curve test for cold curve shall be carried out while the characteristic quantity fundamental frequency is set to  $f_{\text{min}}$  as specified by the manufacturer.

At least one curve test for cold curve shall be carried out while the characteristic quantity fundamental frequency is set to  $f_{\text{max}}$  as specified by the manufacturer.

Three test points are suggested in the following Table 5.

**Table 5 – Test points of the cold curve during frequency variations**

Operating current value ( $k \times I_B$ )	Heating thermal time constant ( $\tau_1$ )	Initial test current value	End test current value
50 % for $I_B$ and $k$	Minimum (0 %)	Zero	$1,2 \times k \times I_B$
		Zero	$2 \times k \times I_B$
		Zero	$10 \times k \times I_B$

If the test points specified in Table 5 exceed the effective range of the device under test, the test is performed until the maximum allowed characteristic quantity is reached.

None of the test point results shall be outside the specified accuracy that result from the specified accuracies for the characteristic quantity and operate time.

## 6.7 Performance during different ambient temperatures

If the thermal protection relay is equipped with temperature sensor to measure the ambient temperature of the protected equipment, the following test shall be performed in order to check that the thermal level calculation takes into account the factor  $F_a$ , defined by the Equation (9).

The tests described in 6.3 shall be done with the following conditions:

- thermal insulation class of the protected equipment: Class F –  $T_{\max} = 155\text{ °C}$
- 2 test points for ambient temperature: 20 °C and 60 °C:
  - for 20 °C test points, the factor  $F_a = 0,852$
  - for 60 °C test points, the factor  $F_a = 1,21$
- determination of one cold curve (see Table 1) for both ambient temperatures, with the following settings:
  - operating current value ( $k \times I_B$ ): 50 % for  $I_B$  and  $k$
  - heating thermal time constant ( $\tau_1$ ): 50 %
- determination of one hot curve (see Table 2) for both ambient temperatures, with the following settings:
  - operating current value ( $k \times I_B$ ): 50 % for  $I_B$  and  $k$
  - heating thermal time constant ( $\tau_1$ ): 50 %
  - preload level: 50 %

With the factor  $F_a$ , the cold and hot time-current limit characteristic is given by the following equation:

$$t(I_{\text{eq}}) = \tau \cdot \ln \left( \frac{F_a \cdot I_{\text{eq}}^2 - I_p^2}{F_a \cdot I_{\text{eq}}^2 - (k \cdot I_B)^2} \right) \quad (12)$$

where

- $t(I_{\text{eq}})$  is the theoretical operate time with a constant phase current  $I_{\text{eq}}$ ;
- $I_{\text{eq}}$  is the end test equivalent heating current value;
- $\tau$  is the heating thermal time constant of the protected equipment;
- $k$  is a constant (fixed) value or a setting, declared by the thermal relay manufacturer;
- $I_B$  is the basic current value expressed as permissible current of the equipment to be thermally protected;
- $I_p$  is the steady-state load current prior the overload ( $I_p = 0$  for the cold curve).

None of the test point results shall be outside the specified accuracy that result from the specified accuracies for the characteristic quantity and operate time.

## 7 Documentation requirements

### 7.1 Type test report

The type test report for the thermal protection function described in this standard shall be in accordance with IEC 60255-1.

As a minimum the following aspects shall be recorded:

Protective device under test: This includes details of the protective device/IED/function under test as well as specific details such as model number, firmware version which shall be recorded as applicable.

- Test equipment: equipment name, model number, calibration information.
- Functional block diagram showing the conceptual operation of the element including interaction of all binary input and output signals with the function.
- Details of the input energizing quantity and the type of measurement being used by the protection function.
- Details of the available characteristic curves/operation for both operating and stopped states that have been implemented in the function, preferably by means of an equation.
- Details of the effective range ( $I_{\min}$  and  $I_{\max}$  values) and the behaviour of the function for currents above the effective range, under high fault current conditions (e.g. if the function is blocked or  $I_{\text{eq}}$  is limited to  $I_{\max}$ ).
- Details of all settings utilised by the function, including  $k$ ,  $q$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ , and  $F_a$ .
- Details of any specific algorithms that are implemented to improve the applicability of this thermal function to a real power system and their performance claims. In the case of generic algorithms that are used by more than one function, for example current transformer or RTD supervision for ambient temperature, coolant temperature, top oil temperature or winding temperature, it is sufficient to describe the operation of the algorithm once within the user documentation but its effect on the operation of all functions shall be described.
- Test method and settings: This includes details of the test procedure being used as well as the settings that are applied to the equipment under test to facilitate the testing. This may include settings other than those for the function being tested. This permits repeated testing to be performed with confidence that the same test conditions are being used.
- Test results: For every test case outlined in the test method and settings, the complete sets of results are recorded as well as a reference to the particular test case. From these results, accuracy claims are established.
- Test conclusions: Based upon the recorded test results, all claims required by Clause 5 of this standard shall be clearly stated. Where appropriate, these claims are compared with the performance specifications contained in this standard to allow individual pass/fail decisions to be given, as well as an overall pass/fail decision for the entire function.

### 7.2 Other user documentation

Not all users insist on viewing the complete type test documentation, but require a subset of the information that it contains. For this purpose, as a minimum the following aspects shall be recorded in generally available user documentation although this may not be required in a single document.

Functional block diagram showing the conceptual operation of the thermal protection element including interaction of all binary input and output signals with the function;

- details of the input energizing quantity and the type of measurement being used by the thermal protection function;
- details of the available characteristic curves/operation for both operating and stopped states that have been implemented in the function, preferably by means of an equation;

- details of the effective range ( $I_{\min}$  and  $I_{\max}$  values) and the behaviour of the function for currents above the effective range, under high fault current conditions (e.g. if the function is blocked or  $I_{\text{eq}}$  is limited to  $I_{\max}$ );
- details of all settings utilised by the function, including  $k$ ,  $q$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ , and  $F_a$ ;
- details of the safety behaviour of the actual thermal level memory, in case of power supply failure, default/factory settings, user options and setting procedures;
- details of any specific algorithms that are implemented to improve the applicability of this thermal function to a real power system and their performance claims. In the case of generic algorithms that are used by more than one function, for example current transformer or RTD supervision for ambient temperature, coolant temperature, top oil temperature or winding temperature, it is sufficient to describe the operation of the algorithm once within the user documentation but its effect on the operation of all functions shall be described;
- all declarations required by Clause 5 of this standard shall be clearly stated.

## Annex A (informative)

### Simple first-order thermal model of electrical equipment

#### A.1 General

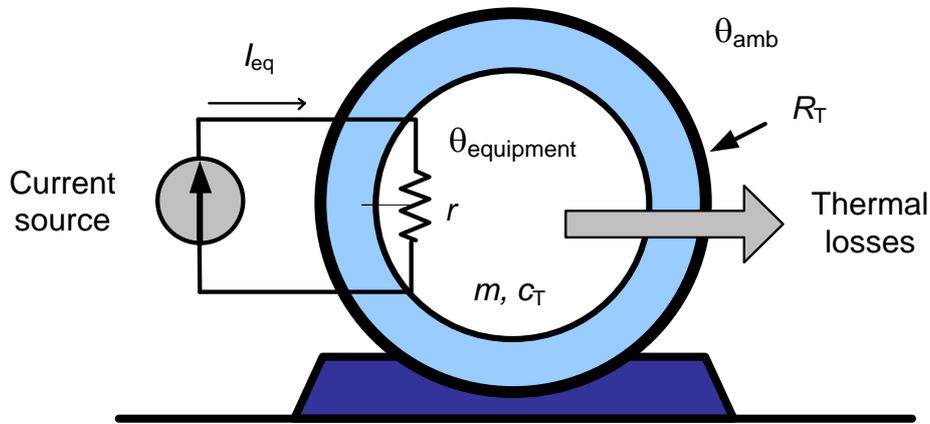
This Annex A introduces the basics of differential and time-current equations and dynamics found in thermal protection modelling. A simple first-order thermal process is used to represent the electrical equipment to be thermally protected.

This Annex A also introduces a recursive algorithm for continuously calculating and keeping track, in real time, the actual thermal level of a simple first-order thermal process which is suitable for digital implementation in microprocessor-based protection devices.

#### A.2 Simple first-order thermal process representation of electrical equipment

##### A.2.1 General

Considering a simple first-order thermal system represented by generic electrical equipment to be thermally protected, modelled as a resistor ( $r$ ), representing the ohmic winding resistance through which an equivalent heating current ( $I_{eq}$ ) is being circulated as shown in Figure A.1.



IEC 1849/13

**Figure A.1 – An electrical equipment to be thermally protected represented as a simple first-order thermal system**

##### A.2.2 Calculation of the equivalent heating current ( $I_{eq}$ )

The heating source is represented by an equivalent heating current  $I_{eq}$ .

In general the equivalent heating current ( $I_{eq}$ ) is the same as rms phase current. However, for motor protection applications other heating sources need to be considered and they are described here.

In case of motor protection applications, the thermal model shall be biased to reflect the additional heating that is caused by negative sequence current when the motor is running. This biasing can be done by creating an equivalent motor heating current rather than simply using average three-phase rms current values.

Unbalanced motor phase currents will cause rotor heating that is not shown in the motor thermal damage curve. When the motor is running, the rotor will rotate in the direction of the positive sequence current at near synchronous speed. Negative sequence current, which has a phase rotation that is opposite to the positive sequence current, and hence opposite to the direction of rotor rotation, will generate a rotor voltage that will produce a substantial current in the rotor. This current will have a frequency that is approximately twice the line frequency: 100 Hz for a 50 Hz system or 120 Hz for a 60 Hz system.

Skin effect in the rotor bars at this frequency will cause a significant increase in rotor resistance and therefore, a significant increase in rotor heating. This extra heating is not accounted for in the thermal limit curves supplied by the motor manufacturer as these curves assume positive sequence currents from a perfectly balanced supply voltage and motor design.

To take into account the effect of unbalanced conditions, the equivalent heating current can be computed in accordance with the following equation:

$$I_{\text{eq}} = \sqrt{I_{\text{rms}}^2 + q \cdot I_2^2} \quad (\text{A.1})$$

where

$I_{\text{eq}}$  is the equivalent heating current;

$I_{\text{rms}}$  is the rms value of the phase current;

$I_2$  is the negative sequence phase current;

$q$  is the unbalance factor, a user settable constant, proportional to the thermal capacity of the electrical motor (equipment to be thermally protected).

The coefficient  $q$  is a factor relating to the additional heat produced by negative sequence phase current ( $I_2$ ) relative to the positive sequence phase currents ( $I_{\text{rms}}$ ). The factor  $q$  is used to account for the influence of negative sequence phase current on the equivalent heating current ( $I_{\text{eq}}$ ) in thermal motor protection applications. This factor should be set equal to the ratio of negative sequence rotor resistance to positive sequence rotor resistance at rated motor speed.

The values of positive and negative rotor resistance shall be obtained from motor manufacturer data sheet or motor documentation.

NOTE 1 When an exact setting of the positive/negative rotor resistance is not published by motor manufacturer or cannot be calculated, typical values of  $q$  from 3 (three) to 5 (five) could be used. This is a typical setting and will be adequate for most of the motor thermal protection applications.

NOTE 2 For thermal protection applications of electrical equipment such as power transformers, cables, lines, and capacitors, the factor  $q$  could be set to zero.

### A.2.3 First-order thermal model of electrical equipment

The ambient temperature is  $\theta_{\text{amb}}$  and the equipment temperature is  $\theta_{\text{equipment}}$ . The equipment temperature shall not go beyond the thermal limit temperature according to its Electrical Insulation System (EIS) thermal classification class, in accordance with IEC 60085 and IEC 60034-11. This temperature is defined as the maximum or hot-spot temperature  $\theta_{\text{max}}$  and above this point the input equivalent heating current shall be switched off by a protective device.

A simple first-order thermal system can be modelled by a single lumped thermal resistivity to the surrounding environment ( $R_T$ , expressed in °C/W), by a mass ( $m$ , expressed in kg) and the thermal system specific heat capacity ( $c_T$ , expressed in J/kg/°C).

The thermal resistivity ( $R_T$ ) is a constant that depends upon the thermal system insulation level to the environment and mechanical properties. The higher the value of  $R_T$ , the less heat

is transferred to the surrounding environment. The smaller the value of  $R_T$ , the more heat is transferred to the surrounding environment.

It can be defined  $\theta$  as the temperature of the thermal system (equipment) above the ambient temperature, in accordance with the following equation:

$$\theta = \theta_{\text{equipment}} - \theta_{\text{amb}} \quad (\text{A.2})$$

The rate of increase of the equipment (thermal system) is provided by the differential equation expressing the thermal equilibrium:

$$\text{Power supplied} - \text{Thermal losses} = mc_T \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (\text{A.3})$$

where

$m$  is the thermal system (equipment) mass, considering a lumped model (kg)

$c_T$  is the specific heat of the thermal system (equipment), considering a lumped model (J/kg/°C)

The thermal system (equipment) thermal capacitance ( $C_T$ ) is the product of its mass ( $m$ ) and its specific heat ( $c_T$ ), in accordance with the following equation:

$$C_T = m \times c_T \quad (\text{A.4})$$

The thermal losses or the quantity of heat transferred by the equipment (thermal system) to the surrounding environment can be expressed by the following equation:

$$\text{Thermal losses} = \frac{\theta_{\text{equipment}} - \theta_{\text{amb}}}{R_T} = \frac{\theta(t)}{R_T} \quad (\text{A.5})$$

From Equations (A.4) and (A.5) Equation (A.3) can be expressed as:

$$R_T^2 \frac{d\theta(t)}{dt} - \frac{\theta(t)}{R_T} = C_T \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (\text{A.6})$$

or

$$R_T R_{\text{eq}}^2 = R_T C_T \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (\text{A.7})$$

The product of the thermal resistance ( $R_T$ ) and the thermal capacitance ( $C_T$ ) has units of seconds and represents the thermal time constant ( $\tau$ ) of a first-order thermal system:

$$\tau = R_T \cdot C_T \quad (\text{A.8})$$

Equation (A.7) can be expressed as:

$$R_T R_{\text{eq}}^2 = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (\text{A.9})$$

The steady-state temperature raise, above ambient, for an operating equipment with current  $I_{eq}$  is obtained by setting  $d\theta(t)/dt = 0$  in Equation (A.9). At this condition, the nominal temperature raise ( $\theta_{nom}$ ), resulting from equivalent nominal operating current ( $I_{eq\ nom}$ ) is given by:

$$R_T r_{eq\ nom}^2 = \theta_{nom} \quad (A.10)$$

Using per unit values, the actual operating equipment current, measured by the protection relay, considering the heating effects of both positive and negative sequence currents for motor applications, using the nominal equipment current, is given by:

$$I_{eq} = I_{eq\ pu} \cdot I_{eq\ nom} \quad (A.11)$$

Using this per unit current value, Equation (A.9) can be written as:

$$R_T r_{eq\ pu}^2 \cdot I_{eq\ nom}^2 = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (A.12)$$

Making the substitution of Equation (A.10) into Equation (A.12) yields:

$$I_{eq\ pu}^2 \theta_{nom} = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (A.13)$$

or

$$I_{eq\ pu}^2 = \tau \frac{d\theta(t)/\theta_{nom}}{dt} + \frac{\theta(t)}{\theta_{nom}} \quad (A.14)$$

Thermal protection relays based on current measurement do not measure the temperature directly. The variable  $\theta(t)/\theta_{nom}$  represents the equipment (thermal system) temperature raise, above ambient, in per unit values when nominal current is flowing through the equipment. This variable can be considered as the actual equipment thermal level and denoted as  $H(t)$ :

$$H(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_{nom}} \quad (A.15)$$

Equation (A.14) can now be written as:

$$I_{eq\ pu}^2 = \tau \frac{dH(t)}{dt} + H(t) \quad (A.16)$$

It can be noticed that the actual equipment thermal level ( $H(t)$ ) is proportional to the actual equipment per unit current squared ( $I_{eq}^2$ ).

### A.3 Analogue thermal and electrical circuit models

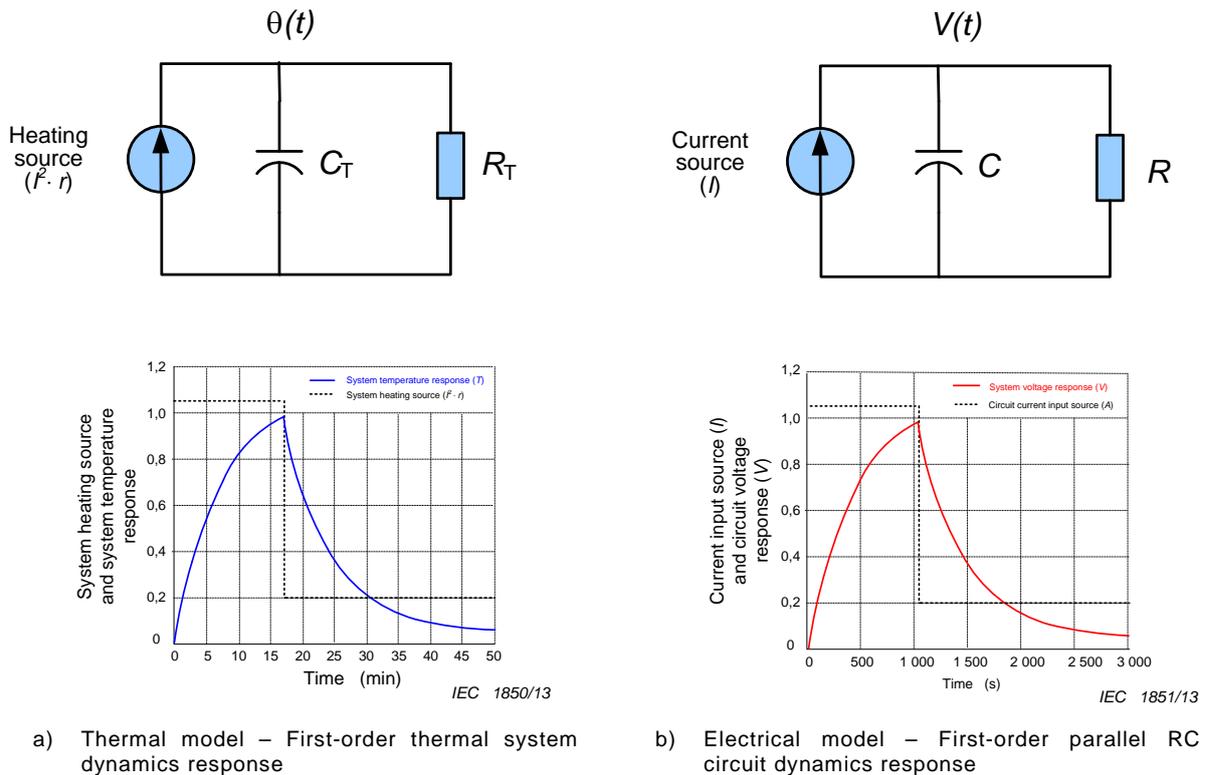
Equation (A.7) is a first-order differential equation and has an electrical equivalent of an RC circuit supplied by a current source. The power supplied to the equipment in the thermal process ( $I^2 r$ ) is equivalent to the current source ( $I$ ) supplying the electric parallel RC circuit.

The temperature in the thermal process ( $\theta(t)$ ) is equivalent to the voltage ( $V(t)$ ) across the capacitor in the RC circuit. The equivalence between the two systems is shown in Figure A.2 and shown in Table A.1. When fed by a current step function, the response times of temperature in the thermal model and voltage in the electrical model have the same form.

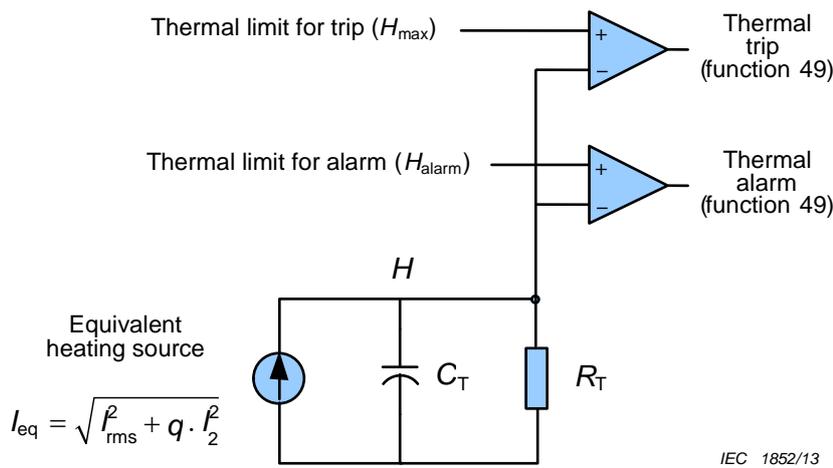
**Table A.1 – Thermal and electrical models**

Thermal model	Electrical model
Analogue thermal circuit of a first-order thermal system	Analogue electric circuit of a parallel RC circuit
$I^2 \cdot r = C_T \cdot R_T \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t)$	$I = C \cdot \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R}$
Differential equation of a first-order thermal system	Differential equation of a first-order electrical system
Thermal system response to a step heating current input	Electrical system response to a step current input

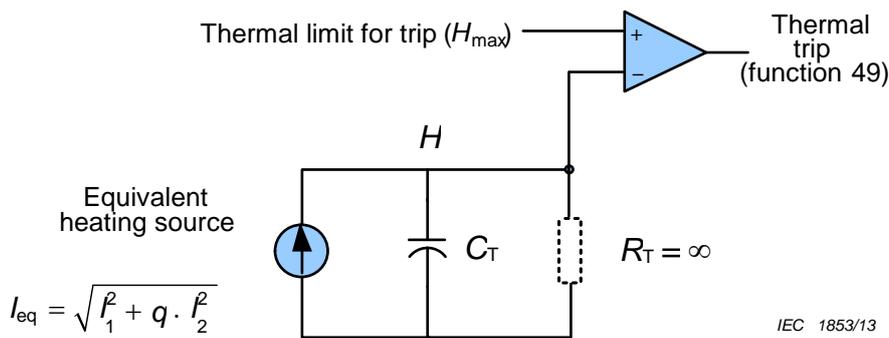
The analogue thermal circuit representations of a thermal process are given in Figures A.3, A.4 and A.5. In these figures the voltage across the thermal capacity ( $C_T$ ) has a value proportional to the temperature rise above the ambient temperature. When the applied current is zero, this voltage becomes zero.



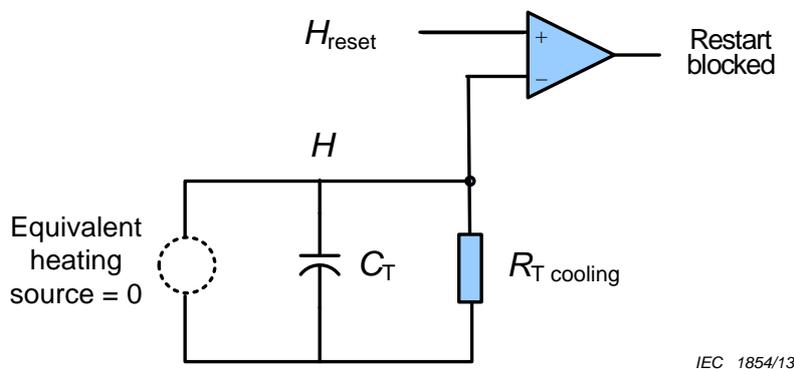
**Figure A.2 – Equivalence between a first-order thermal system and an electric parallel RC circuit**



**Figure A.3 – Analogue thermal circuit representation of a simple first-order thermal system**



**Figure A.4 – Analogue thermal circuit representation of a simple first-order thermal system – motor starting condition**



The restart blocked state has the logic value of one (attempt for new motor starting disabled) when  $H > H_{reset}$ . Otherwise, if  $H < H_{reset}$ , the restart blocked state from the logic has a value of 0 (attempt for new motor starting enabled).

**Figure A.5 – Analogue thermal circuit representation of a simple first-order thermal system – motor stopped condition**

#### A.4 Dynamics of a thermal protection system based on a simple first-order thermal process

The differential equation of a first-order thermal system can be written as a recursive discrete time algorithm, suitable for implementation in a microprocessor-based protection device.

Equation (A.16), in discrete-time form can be written as:

$$I_{\text{eq pu}}^2 = \tau \cdot \frac{H_n - H_{n-1}}{\Delta t} + H_n \quad (\text{A.17})$$

where

$H_n$  and  $H_{n-1}$  are two consecutive values of the actual equipment thermal level, relating to a two consecutive samples of current, displaced by one time interval, in a recursive discrete process of the measured equivalent current (sampled values  $n$  and  $n-1$  of  $I_{\text{eq}}$ );

$\Delta t$  is the time interval between two consecutive samples of input current.

Solving Equation (A.17) for  $H_n$  provides the following recursive discrete-time form of the differential equation, which is processed at each sample period to calculate the actual value of the thermal model response:

$$H_n = I_{\text{eq pu}}^2 \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H_{n-1} \quad (\text{A.18})$$

The value of the thermal time constant ( $\tau$ ) to be utilized by the algorithm shall be in accordance with the actual state of the protected equipment. For self-ventilated motor applications, for example, the motor thermal time constant for running state ( $\tau_1$ ) is normally smaller than the motor thermal time constant for the stopped state ( $\tau_2$ ).

For equipment in operation,  $I_{\text{eq}}(t) \geq 0$  or  $I_{\text{eq}}(t)$  greater than a fixed input current threshold stated by the thermal protective device manufacturer, then the thermal time constant  $\tau_1$  is applicable, and the equipment thermal level can be computed by the following equation:

$$H_n = I_{\text{eq pu}}^2 \frac{\Delta t}{\tau_1 + \Delta t} + \frac{\tau_1}{\tau_1 + \Delta t} \cdot H_{n-1} \quad (\text{A.19})$$

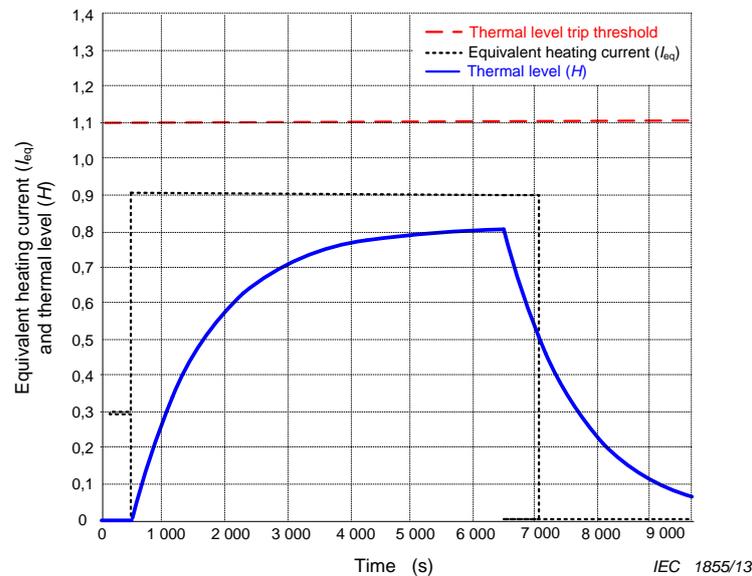
Otherwise, in a similar way, for a de-energized equipment,  $I_{\text{eq}}(t) \approx 0$  or  $I_{\text{eq}}(t)$  is lower than a fixed input current threshold stated by the thermal protective device manufacturer, then the thermal time constant  $\tau_2$  is applicable and, the equipment thermal level can be computed by the following equation:

$$H_n = I_{\text{eq pu}}^2 \frac{\Delta t}{\tau_2 + \Delta t} + \frac{\tau_2}{\tau_2 + \Delta t} \cdot H_{n-1} \quad (\text{A.20})$$

Equation (A.18) can be considered as a basis of a discrete-time algorithm that enables a thermal electrical microprocessor-based protection relay to continuously compute, in real time, the actual thermal level of a first-order thermal system during different operating conditions, such as starting, normal load and overload conditions.

By implementing this algorithm it is also possible to monitor and keep track of the thermal level, and assert a trip or an alarm signal when it exceeds predetermined thresholds.

Figure A.6 shows an example of a dynamic response of a simple first-order thermal model algorithm to a current below pickup (0,9 pu, in the example, considering  $k = 1,05$ ). The thermal level rises exponentially, according to the input heating source and the thermal time constant, up to the steady-state thermal equilibrium level of  $0,9^2$ .



**Figure A.6 – Dynamic step response of a simple first-order thermal system algorithm to a current below pickup**

Figures A.7 and A.8 show examples of dynamic response when subject to an overload equivalent current (1,15 pu, in the example, considering  $k = 1,05$ ), followed by a load constant current below pickup (0,5 pu in the example).

In the example of the dynamic response shown in Figure A.7, the equipment is at an initial cold condition ( $H_0 = 0$ ). In the example of the dynamic response shown in Figure A.8, equipment is at an initial hot condition ( $H_0 = 0,6$ , in the example). In both cases the first-order thermal model response shows an exponential rise to a peak, according to the thermal time constant of the thermal system, followed by an exponential decay to the final value, corresponding to the load equivalent current ( $0,5^2 = 0,25$ , in the example).

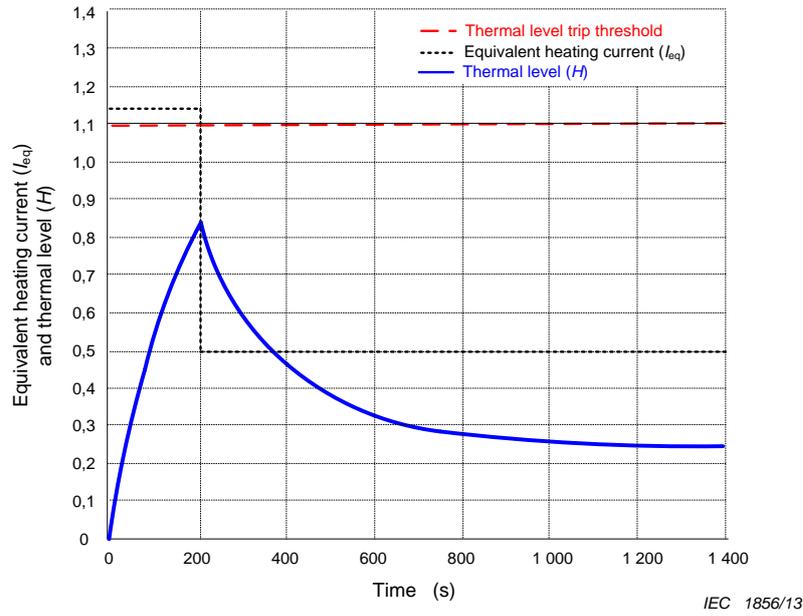


Figure A.7 – Dynamic step response of a first-order thermal system (cold initial state)

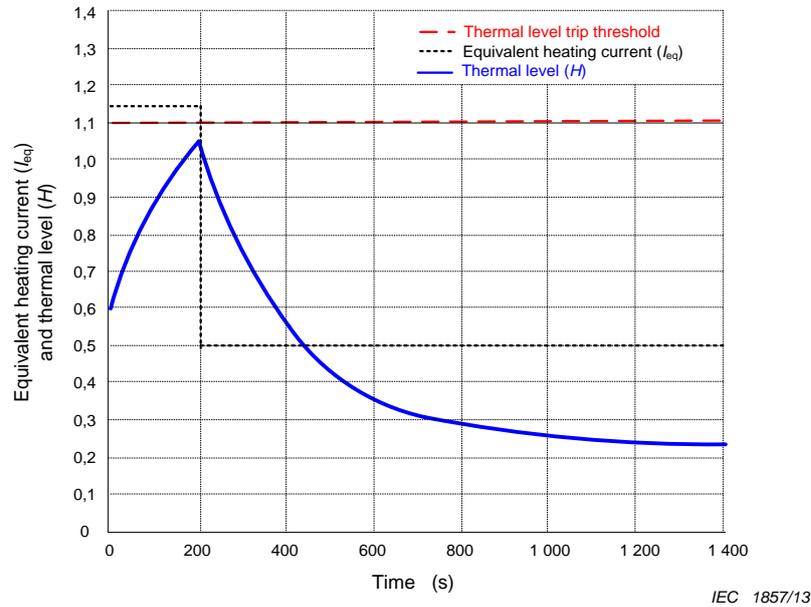
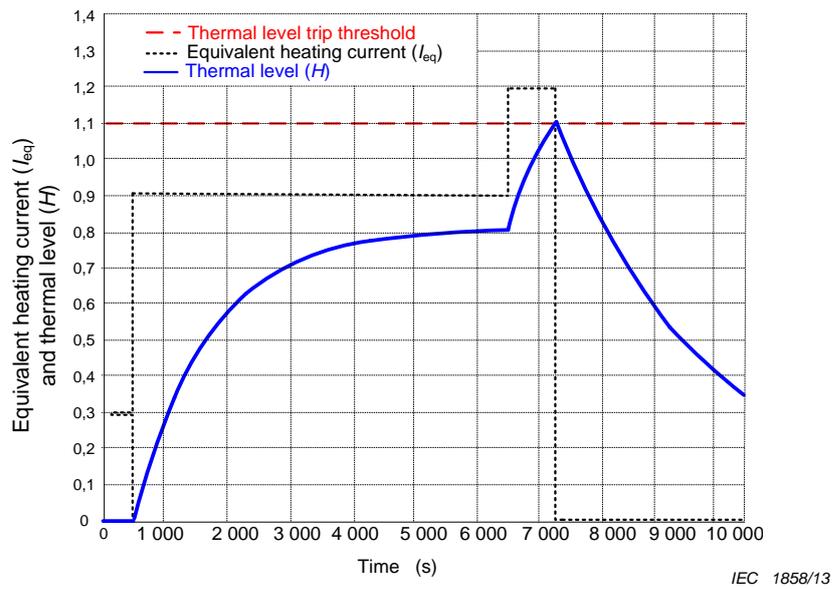


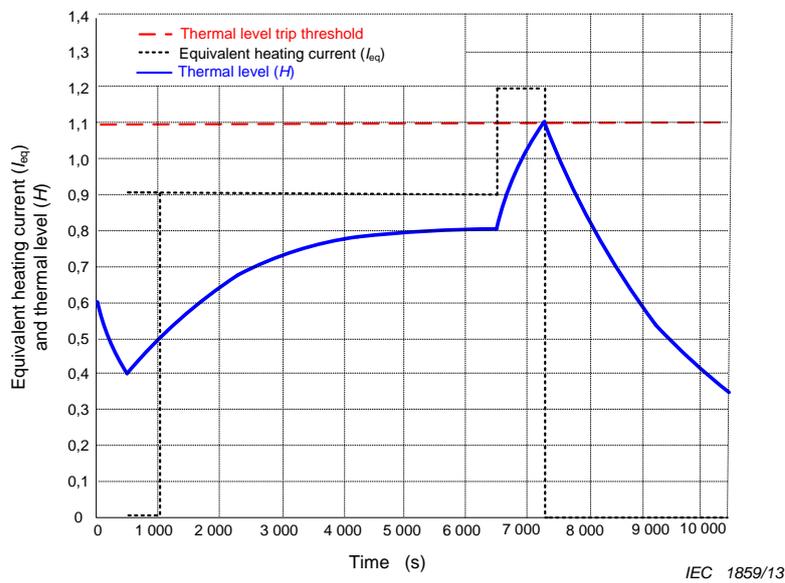
Figure A.8 – Dynamic step response of a first-order thermal system (hot initial state)

Figure A.9 shows an example of a dynamic response when subject to load equivalent current (0,9 pu, in the example), followed by an overload equivalent current (1,2 pu, in the example, considering  $k = 1,05$ ). Initial state: cold (prior thermal level = 0). The thermal limit threshold is  $k^2 = 1,10$ , which causes the thermal protection device to operate.



**Figure A.9 – Dynamic step response of a first-order thermal system to a load current followed by an overload current (initial state: cold)**

Figure A.10 shows an example of dynamics response when subject to load equivalent current (0,9 pu, in the example), followed by an overload equivalent current (1,2 pu, in the example, considering  $k = 1,05$ ). Initial state: hot (prior thermal level = 0,6). The thermal limit threshold is  $k^2 = 1,10$ , which causes the thermal protection device to operate.



**Figure A.10 – Dynamic step response of a first-order thermal system to a load current followed by an overload current (initial state: hot)**

### A.5 Solution in time domain for the thermal model differential equation as a function of current and time limit

The solution in the time domain of Equation (A.9) is the time required for the temperature to raise from the initial temperature (determined by the previous load current) up to the preset thermal limit, which determines the operation (trip) of the protection relay.

The solution in the time domain for the thermal model as a function of time and equivalent load current (assuming  $I_{eq}$  is constant) is (considering  $\theta_0 = 0$ ):

$$\theta(t) = R_T r I_{eq}^2 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (A.21)$$

Remembering that  $\theta$  is the temperature above ambient, it can be obtained for the expression of the thermal system (equipment) temperature:

$$\theta_{equipment}(t) = R_T r I_{eq}^2 (1 - e^{-t/\tau}) + \theta_{amb} \quad (A.22)$$

Whatever the equivalent load current supplied to the thermal system, there will always be an increase in the thermal system temperature. The final steady-state equipment (thermal system) temperature for a constant equivalent load current is in accordance with the following equation:

$$\theta_{equipment}(t \rightarrow \infty) = R_T r I_{eq}^2 + \theta_{amb} \quad (A.23)$$

Assuming that the thermal system (equipment) has a previous rated operating equivalent current  $I_{eq\ op}$ , which is otherwise called the load current in some applications, the equipment (thermal system) steady-state operating temperature is given by the following equation:

$$\theta_{op} = R_T r I_{eq\ op}^2 + \theta_{amb} \quad (A.24)$$

The thermal system (equipment) temperature shall not go beyond a maximum temperature  $\theta_{max}$ , established for its electrical insulation thermal system. Then the equation with time as a variable is:

$$\theta_{max} = R_T r I_{eq}^2 (1 - e^{-t_{trip}/\tau}) + \theta_{amb} \quad (A.25)$$

Solving Equation (A.25) for the variable  $t_{trip}$  yields the following time-current equation:

$$t_{trip} = \tau \cdot \ln \frac{R_T r I_{eq}^2}{R_T r I_{eq}^2 - (\theta_{max} - \theta_{amb})} \quad (A.26)$$

Defining the current  $I_{eq\ max}$  as the maximum current that can be supplied by the heating source to the heating resistor without the thermal system (equipment) reaching the maximum temperature as time goes to infinity; the maximum current would have to satisfy Equation (A.24) as in:

$$\theta_{max} = R_T r I_{eq\ max}^2 + \theta_{amb} \quad (A.27)$$

or

$$\theta_{\max} - \theta_{\text{amb}} = R_T r_{\text{eq max}}^2 \quad (\text{A.28})$$

Substituting the expression  $\theta_{\max} - \theta_{\text{amb}}$  given in Equation (A.28) in Equation (A.26) yields:

$$t_{\text{trip cold}} = \tau \cdot \ln \frac{R_T r_{\text{eq}}^2}{R_T r_{\text{eq}}^2 - R_T r_{\text{eq max}}^2} \quad (\text{A.29})$$

or

$$t_{\text{trip cold}} = \tau \cdot \ln \frac{I_{\text{eq}}^2}{I_{\text{eq}}^2 - I_{\text{eq max}}^2} \quad (\text{A.30})$$

The Equation (A.30) finally gives the time to reach the maximum (hot-spot) temperature as a function of the equivalent maximum current. Equation (A.30) is also important because it removes references of all temperature variables and replaces them with the maximum current  $I_{\text{eq max}}$ .

It should be noted that Equation (A.30) has no solution unless:

$$I_{\text{eq}} > I_{\text{eq max}} \quad (\text{A.31})$$

Any current less than  $I_{\text{eq max}}$  will raise exponentially the thermal system temperature to a steady-state temperature given by Equation (A.21).

In Equation (A.30), the time to maximum temperature is expressed implicitly with reference to the ambient temperature or with the initial load current equal to zero.

It is needed to develop an equation for the time to maximum (hot-spot) thermal level when the steady-state current is the operating current  $I_{\text{eq op}}$ .

In Equation (A.22), the time to maximum temperature starts with the temperature at ambient (or with the load current supplied at zero value). With the newer equation, the time to maximum temperature starts with the temperature at operating or the current at equivalent load current.

The time to reach the maximum temperature for some equivalent operating current  $I_{\text{eq op}}$  from the operating current is equal to the time to reach the maximum temperature from ambient with the same current minus the time to reach the operating temperature from ambient with the same current.

The steady-state operation temperature  $\theta_{\text{op}}$  can be calculated from Equation (A.23), in accordance with the following equation:

$$\theta_{\text{op}} = R_T r_{\text{eq op}}^2 + \theta_{\text{amb}} \quad (\text{A.32})$$

or

$$\theta_{\text{op}} - \theta_{\text{amb}} = R_T r_{\text{eq op}}^2 \quad (\text{A.33})$$

The time  $t_{op}$  to reach the operating temperature from ambient for an equivalent current  $I_{eq}$  can be calculated from Equation (A.22):

$$\theta_{op} = I_{eq}^2 r R_T \left(1 - e^{-t_{op}/\tau}\right) + \theta_{amb} \quad (A.34)$$

From this Equation (A.34) it can be calculated the operating time ( $t_{op}$ ), solving as follows:

$$t_{op} = \tau \ln \frac{R_T r I_{eq}^2}{R_T r I_{eq}^2 - (\theta_{op} - \theta_{amb})} \quad (A.35)$$

Replacing the expression  $\theta_{op} - \theta_{amb}$  by its value given in Equation (A.33) in Equation (A.35) yields:

$$t_{op} = \tau \ln \frac{R_T r I_{eq}^2}{R_T r I_{eq}^2 - R_T r I_{eq\ op}^2} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2} \quad (A.36)$$

Finally, the time to trip from operating current or temperature is provided by the following equation:

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ max}^2} - \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2} \quad (A.37)$$

or

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ max}^2} \quad (A.38)$$

This Equation (A.38) provides the time to reach the maximum (hot-spot) temperature for an equivalent current  $I_{eq}$  when starting from a previous equivalent operating current  $I_{eq\ op}$  or operating temperature.

The maximum equivalent current is defined by the  $k$  factor (see 3.4) as:

$$I_{eq\ max} = k I_B \quad (A.39)$$

Replacing the expression (A.39) in (A.38) yields:

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2}{I_{eq}^2 - (k I_B)^2} \quad (A.40)$$

Equation (A.40) is the time to trip based on the hot characteristic curve, as indicated in Equation (A.6) of this standard. Thus, in the algorithm indicated in Equation (A.18), implementing a recursive process of a time-discrete differential equation of a first order thermal system, the time current equations for cold and hot states given in Equations (A.30) and (A.40) are intrinsically embedded in the process.

When thermal protection is implemented by using the algorithm indicated in Equation (A.18), the cold and hot time-current limit characteristic equations given in Equation (A.5) (cold state) and Equation (A.6) (hot state) of this standard are intrinsically embedded in the process, irrespective of the starting thermal level or previous equipment load current.

The algorithm indicated in Equation (A.18) continuously calculates, in real time, the actual state of the thermal model, which is appropriate for digital implementation in microprocessor-based protection devices. Thermal history recording and a pre-alarm setting before trip when overload occurs, prevent undesired trips and process shutdowns.

## A.6 Derivation of the ambient temperature factor $F_a$

In the Equation (A.15), which defines the thermal level  $H(t)$  of the equipment, the variable  $\theta_{nom}$  can be replaced by the expression defined by the Equation (A.10):

$$H(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_{nom}} = \frac{\theta_{equipment} - \theta_{amb}}{\theta_{nom}} = \frac{\theta_{equipment} - \theta_{amb}}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \quad (A.41)$$

When the equipment temperature  $\theta_{equipment}$  reaches the maximum temperature  $\theta_{max}$  allowed by the insulation class, the thermal level  $H(t)$  is equal to the following equation:

$$H_{max} = \frac{\theta_{max} - \theta_{amb}}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \quad (A.42)$$

where

$H_{max}$  is the maximum thermal level to be reached which causes the thermal protection function to operate.

The thermal protection device calculates the thermal level  $H(t)$ , which takes into account the ambient (or environmental) temperature  $\theta_{amb}$ . In general applications, the threshold is generally defined for an ambient temperature of 40 °C. In this case, the setting for the thermal level threshold is equivalent to a maximum thermal level, according to the following equation:

$$H_{setting} = \frac{\theta_{max} - 40}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \quad (A.43)$$

where

$H_{setting}$  is the maximum thermal level to be reached by the equipment to be thermally protected, considering an ambient temperature other than 40 °C, which causes the thermal protection function to operate.

When the ambient (or environmental) temperature fluctuates and is not equal to 40 °C, the setting applied to the thermal level calculation is not equal to the maximum thermal level authorized by the insulation class.

The relation between the 2 thresholds is defined as the correction factor  $F_a$ , according to the following equation:

$$\frac{H_{setting}}{H_{max}} = \frac{\theta_{max} - 40}{\theta_{max} - \theta_{amb}} = F_a \quad (A.44)$$

Where applicable and when the thermal protection device has an ambient temperature measurement input, the thermal level calculation  $H(t)$  can be increased by the factor  $F_a$ , to take into account the real ambient (or environmental) equipment temperature  $T_a$ . The condition to operate the output signal will be defined according to the following inequality:

$$H(t) \geq H_{\max} \Leftrightarrow H(t) \cdot \frac{H_{\text{setting}}}{H_{\max}} \geq H_{\text{setting}} \Leftrightarrow H(t) \cdot F_a \geq H_{\text{setting}} \tag{A.45}$$

IEC 60085 defines the maximum temperature  $T_{\max}$  according to the thermal insulation class, as indicated in Table A.2.

**Table A.2 – Thermal insulation classes and maximum temperatures, according to IEC 60085**

<b>Thermal class</b>	Y	A	E	B	F	H	N	R	250
<b><math>T_{\max}</math></b>	90 °C	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C	200 °C	220 °C	250 °C

Based on the Equation (A.44) the particular values of the thermal level threshold correction factor  $F_a$ , for typical industrial equipment with insulation class F (155 °C) according to IEC 60085, such as industrial electrical motor, for various equipment ambient temperatures are shown in Table A.3.

**Table A.3 – Example of correction factor values ( $F_a$ ) for class F equipment according to the ambient temperature ( $T_a$ )**

<b>Equipment ambient temperature (<math>T_a</math>)</b>	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
<b>Correction factor <math>F_a</math> for class F equipment</b>	1,0	1,045	1,095	1,15	1,21

## Annex B (informative)

### Thermal electrical relays which use temperature as setting parameters

#### B.1 General

This Annex B provides information about setting and testing the thermal electrical relays which use temperatures as setting parameters.

#### B.2 Interpretation of the thermal differential equation in terms of temperatures

The form of the first-order thermal differential Equation (B.1) below can be derived if  $I_{\text{eq,pu}}$  from Equation (A.11) is substituted into Equation (A.13):

$$I_{\text{eq}}^2 \frac{\theta_{\text{nom}}}{I_{\text{eq,nom}}^2} = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (\text{B.1})$$

where

$\theta(t)$  is the temperature above the ambient temperature, varying with time;

$I_{\text{eq,nom}}$  is the nominal (rated) value of the equivalent heating current;

$\theta_{\text{nom}}$  is the steady-state temperature above the ambient temperature if  $I_{\text{eq,nom}}$  continuous current is flowing.

In Equation (B.1), the factor  $\frac{\theta_{\text{nom}}}{I_{\text{eq,nom}}^2}$  is the scaling factor between the temperature  $\theta$  and the current square  $I^2$ . The value of the scaling factor is the same if  $I_{\text{eq,ref}}$  reference current is given and the corresponding  $\theta_{\text{ref}}$  steady-state temperature above the ambient temperature is substituted. i.e.:

$$\frac{\theta_{\text{nom}}}{I_{\text{eq,nom}}^2} = \frac{\theta_{\text{ref}}}{I_{\text{eq,ref}}^2} = \dots = \frac{\theta_0}{I_0^2} = \frac{\theta_{\text{max}}}{I_{\text{max}}^2} \quad (\text{B.2})$$

where

$I_{\text{eq,ref}}$  is the reference value of the equivalent heating current;

$\theta_{\text{ref}}$  is the steady-state reference temperature above the ambient temperature, if  $I_{\text{eq,ref}}$  current is flowing continuously.

The index "0" or "max" means here any current and corresponding temperature.

The reference current can be any value (e.g. rated current of the protected object, rated current of the CT,) but the reference temperature shall be the steady-state temperature above the ambient temperature, which is reached when reference current is flowing.

The manufacturer shall clearly define how the equivalent heating current is calculated (asymmetry, harmonics).

### B.3 Discrete-time solution of the thermal differential equation in terms of temperatures

In microprocessor-based protection devices the discrete-time solution of the first-order thermal differential Equation (B.1) is implemented and it is given in Equation (B.3) as follows:

$$\theta(t) = I_{\text{eq.ref}}^2 \frac{\theta_{\text{ref}}}{I_{\text{eq.ref}}^2} \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \theta(t - \Delta t) \quad (\text{B.3})$$

The result is the temperature above the ambient temperature. To obtain the temperature of the protected equipment, the ambient temperature  $\theta_{\text{amb}}$  shall be added (See also Equation (A.2)):

$$\theta_{\text{equipment}}(t) = I_{\text{eq}}^2 \frac{\theta_{\text{ref}}}{I_{\text{eq.ref}}^2} \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \theta(t - \Delta t) + \theta_{\text{amb}} \quad (\text{B.4})$$

The application of this equation assumes that during the  $\Delta t$  calculation time step, the  $I_{\text{eq}}$  equivalent current can be considered constant and during the time step, the curve of the temperature changing in time can be substituted by a straight line. Both criteria are fulfilled if the  $\Delta t$  calculation time step is much smaller than the  $\tau$  time constant of the thermal process. This is the responsibility of the relay manufacturer.

Equations (B.3) or (B.4) clearly show the memory functions of the thermal electric relays. The calculated temperature in the preceding time step shall be known to calculate the subsequent temperature value. It is not important, if the temperature in the preceding step was reached in a heating or cooling process or if it was a steady-state temperature value.

#### Main parameters to be provided by the user to calculate the temperature above the ambient temperature

$I_{\text{eq.ref}}$  is the reference value of the equivalent heating current;

$\theta_{\text{ref}}$  is the steady-state reference temperature above the ambient temperature, if  $I_{\text{eq.ref}}$  current is flowing continuously;

$\tau$  time constant of the thermal process.

When defining  $\theta_{\text{ref}}$  the user shall clearly define if the value is given as temperature above the assumed ambient temperature or as the difference of the measured equipment temperature and the ambient temperature at the time of the measurement.

The time constant of the thermal process depends on the state of the protected equipment. E.g. for a motor it is different in a rotating state from standstill; for transformers it is different for natural cooling or in a forced cooling state; etc. The manufacturer shall state how the time constant is handled.

#### Parameters defining the relay operation

The objects are protected against high temperatures according to thermal insulation classes, as defined in IEC 60085. It is indicated also as  $T_{\text{max}}$  in Table A.2 of this standard. These temperatures are maximum  $\theta_{\text{equipment}}$  temperatures.

The easiest way to define the operating temperatures is as described in Table A.2:

$\theta_{\text{TRIP}}$	maximum temperature as $T_{\text{max}}$ in Table A.2,
$\theta_{\text{ALARM}}$	alarm temperature (if this temperature is reached, the relay generates an alarm signal),
$\theta_{\text{RESTART}}$	restart temperature (the equipment may not be restarted, only if the temperature is below this level).

The manufacturer shall clearly declare how these values are interpreted (e.g.: equipment temperature in °C, above the ambient temperature related to a reference value, temperature in %, etc.)

### About the temperature of the environment

The equipment temperature is calculated according to Equation (B.4). This calculation needs the value of  $\varphi_{\text{amb}}$  ambient temperature. It is obvious from Equation (B.4) that under low ambient temperature conditions, the equipment can be more overloaded than in hot ambient temperature. To track this, the measurement of the ambient temperature is needed. According to the manufacturer's declaration:

- the ambient temperature can be measured,
- it can be a parameter setting, or
- only the temperature above the ambient is calculated, and the setting for the operating values shall be defined, taking the hottest temperature of the environment into consideration.

The manufacturer shall clearly define which solution is used.

## B.4 Testing thermal electrical relays operating in terms of temperatures

As the thermal electrical relays calculate the temperature which is not easy to measure, there is usually no possibility to check the coincidence of the calculated and the real temperature values. For testing a transformation is needed. As the thermal electrical relays measure basically currents, it is obvious that it is necessary to perform a transformation from temperature to currents, and perform the testing similarly to the test procedures for overcurrent relays.

The testing is intended to be performed using symmetrical, basic harmonic currents, so  $I_{\text{eq}}=I$ , (the index "eq" can be neglected).

Equations (B.3) or (B.4) perform a calculation which is valid for continuously varying currents as well, but tests are easier to perform using steady-state continuous currents. To do this the well-known solution of the thermal differential Equation (B.1) for constant current is applied:

$$\varphi_{\text{equipment}}(t) = \frac{I^2 \varphi_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \varphi_{\text{amb}} e^{-\frac{t}{\tau}} + \varphi_{\text{amb}} \quad (\text{B.5})$$

or:

$$\Phi(t) = \varphi_{\text{equipment}}(t) - \varphi_{\text{amb}} = \frac{I^2 \varphi_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \varphi_{\text{amb}} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{B.6})$$

In Equations (B.5) and (B.6):

- $\varphi$  The temperature of the protected object above the ambient temperature at  $t = 0$ .

When substituting  $\theta(t)$  by  $\theta_{\max} = \theta_{\text{TRIP}} - \theta_{\text{amb}}$  in Equation (B.6) and resolving the temperatures in Equation (B.6), using Equation (B.2) the following Equation (B.7) results:

$$k_{\omega} = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\text{ref}}} = \frac{l_{\max}^2}{l_{\text{ref}}^2} = \frac{l^2}{l_{\text{ref}}^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \frac{l_0^2}{l_{\text{ref}}^2} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{B.7})$$

where

$\theta_{\max}$  is the permitted maximum temperature above the temperature of the environment  
 $\theta_{\max} = \theta_{\text{TRIP}} - \theta_{\text{amb}}$ ;

$\theta_{\text{ref}}$  is the steady-state reference temperature above the ambient temperature, if  $I_{\text{ref}}$  current is flowing continuously (setting value);

$I_{\max}$  is the steady-state current, needed to reach the  $\theta_{\max}$  steady-state temperature above the ambient temperature;

$I_0$  is the steady-state current, needed to reach the  $\theta_0$  steady-state temperature (temperature above the ambient temperature at  $t = 0$ );

$I_{\text{ref}}$  is the reference value of the equivalent heating current, (setting value);

$\tau$  is the time constant of the thermal process (setting value).

From Equation (B.7) the expected time to trip “ $t$ ” can be derived:

$$t = \tau \ln \frac{l^2 - I_0^2}{l^2 - I_{\max}^2} \quad (\text{B.8})$$

where

$I$  is the injected steady-state current, needed to reach a  $\theta$  steady-state temperature above the ambient temperature, (this temperature would be above the  $\theta_{\max}$  temperature),

$I_{\max}$  is the steady-state current, needed to reach the  $\theta_{\max}$  steady-state temperature. It can be calculated using the formula from Equation (B.2):

$$I_{\max}^2 = \frac{I_{\text{eq.ref}}}{\theta_{\text{ref}}} \theta_{\max} \quad (\text{B.9})$$

$I_0$  is the supposed steady-state current, needed to reach the  $\theta_0$  steady-state temperature. The temperature above the ambient temperature at  $t=0$ , can be calculated using the formula from Equation (B.2):

$$I_0^2 = \frac{I_{\text{eq.ref}}}{\theta_{\text{ref}}} \theta_0 \quad (\text{B.10})$$

$\tau$  time constant of the thermal process, (setting value).

NOTE 1 Equation (B.8) is equivalent to Equation (A.38) (the definition of the hot curve).

NOTE 2 When substituting  $I_0 = 0$ , the definition of the cold curve is derived, with the meaning that the heating procedure starts when the protected object is at the temperature of the environment.

## B.5 About $\varphi$ , the starting temperature

Because of the long thermal time constants of the protected object, during a test, a long time would be needed to reach this  $\varphi$  starting temperature value. The manufacturer shall provide guidance to accelerate the test procedure: e.g. reset the accumulated thermal level, then high current injection during a well-defined time; or parameter setting for the starting temperature, which is activated by a dedicated binary input signal; etc.

## B.6 Factors $k$ and $k_\theta$

The factor  $k_\theta$  is defined in Equation (B.7):

$$k_\theta = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\text{ref}}} = \frac{I_{\max}^2}{I_{\text{ref}}^2} \quad (\text{B.11})$$

It can be seen that

$$k_\theta = \frac{I_{\max}^2}{I_{\text{ref}}^2} = k^2 \quad (\text{B.12})$$

The manufacturer shall clearly define the meaning of the factor to be set (if applicable).

## Bibliography

IEC 60034-11, *Rotating electrical machines – Part 11: Thermal protection*

IEC 60947-4-1, *Low-voltage switchgear and control gear – Part 4-1: Contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters*

IEC 60947-4-2, *Low-voltage switchgear and control gear – Part 4-2: Contactors and motor-starters – AC semiconductor motor controllers and starters*

IEC 61850-9-2, *Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3*

ABOU-EI-ELA, M.S., MEGAHED, A.I., MALIK, O.P., Thermal model based digital relaying algorithm for induction motor protection, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE, 1996

ANSI/IEEE Std. 37.96, *Guide for AC motor protection*

ANSI/IEEE Std. 620, *Guide for the presentation of thermal limit curves for squirrel cage induction machines*

ELTOM, A. H., MOHARI, N.S., Motor temperature estimation incorporating dynamic rotor impedance, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 1, 1991

LEBENHAFT, E., ZELLER, M., Advanced thermal motor protection using digital relays, SEL Technical Paper 6338, 2008

MIT, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Advanced System Dynamics and Control, Review of first and second-order system response, 2004

ZOCHOLL, S. E., AC Motor Protection, WA, USA, 2003

ZOCHOLL, S. E., BENMOUYAL, G., On the protection of thermal processes, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005

ZOCHOLL, S. E., GUZMAN, A., Thermal models in power system protection, SEL, WA, USA 1999

---



## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	50
1 Domaine d'application .....	52
2 Références normatives .....	52
3 Termes et définitions .....	53
4 Spécification de la fonction .....	54
4.1 Généralités .....	54
4.2 Grandeurs d'alimentation d'entrée/grandeurs d'alimentation .....	55
4.3 Signaux d'entrée binaires .....	55
4.4 Logique fonctionnelle .....	56
4.4.1 Courant d'échauffement équivalent .....	56
4.4.2 Valeurs de courant de fonctionnement et de base (réglage) pour la protection thermique .....	56
4.4.3 Calcul du niveau thermique .....	57
4.4.4 Courbes et équations des caractéristiques temps-courant de déclenchement .....	59
4.4.5 Seuil d'alarme de niveau thermique .....	61
4.5 Signaux de sortie binaires .....	62
4.5.1 Généralités .....	62
4.5.2 Signal de sortie de fonctionnement (déclenchement) .....	62
4.5.3 Signal d'alarme .....	62
4.5.4 Autres signaux de sortie binaires .....	62
4.6 Facteurs d'influence supplémentaires sur la protection thermique .....	62
4.6.1 Généralités .....	62
4.6.2 Influence de la température ambiante sur la protection thermique .....	63
4.6.3 Equipement de réinitialisation thermique .....	63
4.7 Comportement du dispositif de protection thermique pendant une défaillance de l'alimentation secondaire .....	63
5 Spécification des performances .....	64
5.1 Précision liée à la grandeur caractéristique .....	64
5.2 Précision liée au temps de fonctionnement .....	64
5.3 Performances pendant des variations de fréquence .....	65
6 Méthodologie d'essais fonctionnels .....	65
6.1 Généralités .....	65
6.2 Détermination des erreurs en régime établi liées à la valeur du courant de fonctionnement .....	66
6.3 Détermination des erreurs en régime établi liées à la grandeur caractéristique et au temps de fonctionnement .....	67
6.3.1 Détermination de la précision de la courbe à froid .....	67
6.3.2 Détermination de la précision des courbes à chaud .....	68
6.4 Performances avec une constante de temps thermique de refroidissement spécifique .....	68
6.5 Performances avec des harmoniques .....	69
6.6 Performances pendant des variations de fréquence .....	70
6.7 Performances pendant différentes températures ambiantes .....	70
7 Exigences relatives à la documentation .....	71
7.1 Rapport d'essai de type .....	71
7.2 Documentation pour d'autres utilisateurs .....	72

Annexe A (informative) Modèle thermique du premier ordre simple d'un dispositif électrique.....	73
Annexe B (informative) Relais électriques thermiques qui utilisent la température comme paramètres de réglage.....	88
Bibliographie.....	93
Figure 1 – Schéma simplifié de la fonction de protection thermique .....	55
Figure 2 – Exemples typiques de courbes caractéristiques pour l'état froid d'un système thermique du premier ordre sans charge préalable avant la surcharge .....	60
Figure 3 – Exemples typiques de courbes caractéristiques pour des états chauds d'un système thermique du premier ordre avec différentes valeurs de charge préalable avant la surcharge .....	61
Figure A.1 – Dispositif électrique à protéger thermiquement représenté comme un système thermique du premier ordre simple.....	73
Figure A.2 – Équivalence entre un système thermique du premier ordre et un circuit électrique RC parallèle .....	77
Figure A.3 – Représentation d'un circuit thermique analogique d'un système thermique du premier ordre simple .....	78
Figure A.4 – Représentation d'un circuit thermique analogique d'un système thermique du premier ordre simple – condition de démarrage de moteur .....	78
Figure A.5 – Représentation d'un circuit thermique analogique d'un système thermique du premier ordre simple – condition de moteur arrêté .....	78
Figure A.6 – Réponse dynamique indicielle d'un algorithme de système thermique du premier ordre pour un courant inférieur au seuil de fonctionnement .....	80
Figure A.7 – Réponse dynamique indicielle d'un système thermique du premier ordre (état initial froid) .....	81
Figure A.8 – Réponse dynamique indicielle d'un système thermique du premier ordre (état initial chaud) .....	81
Figure A.9 – Réponse dynamique indicielle d'un système thermique du premier ordre pour un courant de charge suivi d'un courant de surcharge (état initial: froid) .....	82
Figure A.10 – Réponse dynamique indicielle d'un système thermique du premier ordre pour un courant de charge suivi d'un courant de surcharge (état initial: chaud).....	82
Tableau 1 – Erreur limite sous la forme de multiples d'une erreur attribuée.....	65
Tableau 2 – Points d'essai de la courbe à froid .....	67
Tableau 3 – Points d'essai de la courbe à chaud .....	68
Tableau 4 – Points d'essai de la courbe à froid avec harmoniques.....	69
Tableau 5 – Points d'essai de la courbe à froid pendant des variations de fréquence.....	70
Tableau A.1 – Modèles thermique et électrique.....	77
Tableau A.2 – Classes d'isolation thermique et températures maximales, selon la CEI 60085.....	87
Tableau A.3 – Exemple de valeurs de facteur de correction ( $F_a$ ) pour un dispositif de classe F en fonction de la température ambiante ( $T_a$ ).....	87

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### RELAIS DE MESURE ET DISPOSITIFS DE PROTECTION –

#### Partie 149: Exigences fonctionnelles pour relais électriques thermiques

##### 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 elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à 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 brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60255-149 a été établie par le comité d'études 95 de la CEI: Relais de mesure et dispositifs de protection.

La présente première édition annule et remplace la CEI 60255-8, publiée en 1990.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
95/313/FDIS	95/317/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.

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60255, présentées sous le titre général *Relais de mesure et dispositifs de protection*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Les normes futures de cette série porteront dorénavant le nouveau titre général cité ci-dessus. Le titre des normes existant déjà dans cette série sera mis à jour lors d'une prochaine édition.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité 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.

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

## RELAIS DE MESURE ET DISPOSITIFS DE PROTECTION –

### Partie 149: Exigences fonctionnelles pour relais électriques thermiques

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de la série CEI 60255 spécifie les exigences minimales relatives aux relais de protection thermique. Cette norme inclut la spécification de la fonction de protection, les caractéristiques de mesure et les méthodes d'essais. L'objet de cette norme est d'établir une référence commune et reproductible pour des relais à temps dépendant qui protègent un dispositif contre les détériorations thermiques par la mesure du courant alternatif circulant dans le dispositif. Des grandeurs d'alimentation d'entrée complémentaire, telles que la mesure de la température ambiante, du liquide de refroidissement, de l'huile isolante, des enroulements, peuvent être applicables pour la spécification de protection thermique définie dans la présente norme. La présente norme couvre les relais de protection basés sur un modèle thermique à fonction de mémoire

Les méthodologies d'essai pour vérifier les caractéristiques de performance de la fonction de protection thermique et la précision font également partie de la présente norme.

La présente norme n'est pas destinée à couvrir les classes de déclenchement de protection contre les surcharges thermiques indiquées dans les normes CEI 60947-4-1 et CEI 60947-4-2, portant sur des dispositifs de protection électroniques et électromécaniques pour démarreurs de moteur basse tension.

Les fonctions de protection thermique couvertes par la présente norme sont les suivantes:

Fonction de protection	CEI 61850-7-4	IEEE C37.2
Protection contre les surcharges thermiques	<b>PTTR</b>	49
Protection contre les surcharges thermiques du rotor	<b>PROL</b>	49R
Protection contre les surcharges thermiques du stator	<b>PSOL</b>	49S

Les exigences générales relatives aux relais de mesure et aux dispositifs de protection sont spécifiées dans la CEI 60255-1.

#### 2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. 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 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Electrotechnique International* (disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org>)

CEI 60085, *Isolation électrique – Evaluation et désignation thermiques*

CEI 60255-1, *Relais de mesure et dispositifs de protection – Partie 1: Exigences communes*

IEC 61850-7-4, *Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-4: Basic communication structure – Compatible logical node classes and data classes* (disponible en anglais seulement)

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de la CEI 60050-447, ainsi que les suivants, s'appliquent.

#### 3.1

##### **courbe à chaud**

pour un relais électrique thermique à fonction de mémoire totale, courbe caractéristique représentant la relation entre le temps de fonctionnement spécifié et le courant, tenant compte de l'effet thermique d'un courant de charge spécifié en régime établi avant une surcharge

Note 1 à l'article: Une courbe à chaud est un tracé d'une solution temps-courant particulière pour une équation différentielle d'un système thermique du premier ordre, en supposant un courant de surcharge constant spécifique et un courant de pré-charge spécifique.

#### 3.2

##### **courbe à froid**

pour un relais électrique thermique, courbe caractéristique représentant la relation entre le temps de fonctionnement spécifié et le courant, le relais étant aux conditions de référence et en régime établi de courant nul avant une surcharge

Note 1 à l'article: Une courbe à froid est un tracé d'une solution temps-courant particulière pour une équation différentielle d'un système thermique du premier ordre, en supposant un courant de surcharge constant spécifique et pas de pré-charge.

#### 3.3

##### **courant de base**

$I_B$

valeur (nominale) limite spécifiée du courant pour laquelle le relais ne fonctionne pas en régime établi du dispositif à protéger thermiquement

Note 1 à l'article: Le courant de base sert de référence pour la définition des caractéristiques opérationnelles des relais électriques thermiques. Les réglages de base d'une fonction de protection électrique thermique sont effectués sur ce courant de base ( $I_B$ ) et sur la constante de temps thermique ( $\tau$ ) du dispositif protégé.

#### 3.4

##### **courant d'échauffement équivalent**

$I_{eq}$

courant qui tient compte des sources d'échauffement supplémentaires telle que le courant de déséquilibre et/ou les harmoniques

#### 3.5

##### **facteur $k$**

constante par laquelle le courant de base ( $I_B$ ) est multiplié pour obtenir la valeur du courant de fonctionnement continu maximal admissible du dispositif à protéger thermiquement, qui est utilisée dans la fonction de caractéristique thermique

Note 1 à l'article: Le facteur  $k$  indique le rapport maximal admissible entre un courant de charge permanent et le courant de base (nominal) du matériel protégé.

#### 3.6

##### **rapport de charge préalable**

rapport entre le courant de charge existant avant une surcharge et le courant de base, dans des conditions spécifiées

### 3.7

#### **erreur limite de référence**

erreur limite déterminée dans des conditions de référence

[SOURCE: CEI 60050:2010, 447-08-07]

### 3.8

#### **échauffement**

différence entre la température de la partie considérée et une température de référence

Note 1 à l'article: La température de référence peut être par exemple la température de l'air ambiant ou celle d'un fluide de refroidissement.

[SOURCE: CEI 60050:2001, 151-16-26]

### 3.9

#### **équilibre thermique**

état atteint lorsque les échauffements des diverses parties de la machine ne varient pas de plus d'un gradient de 2 K par heure

[SOURCE: CEI 60050:1996, 411-51-08]

### 3.10

#### **constante de temps thermique**

$T_{th}$

temps nécessaire pour que l'élévation de température du dispositif protégé par rapport à sa température initiale, atteigne 63,2 % de sa valeur asymptotique finale après l'application d'un échelon de courant

Note 1 à l'article: La température initiale peut être par exemple la température ambiante.

### 3.11

#### **niveau thermique**

$H$

rapport exprimé en pourcentage entre la température réelle estimée du dispositif et la température du dispositif lorsqu'il fonctionne à son courant maximal ( $k \times I_B$ ) pendant une longue période de temps, suffisante pour lui permettre d'atteindre son équilibre thermique

## 4 Spécification de la fonction

### 4.1 Généralités

Un exemple de fonction de protection thermique est présenté à la Figure 1, avec ses grandeurs d'alimentation d'entrée, ses signaux d'entrée binaires, son signal de fonctionnement (déclenchement), son signal d'alarme et autres signaux de sorties binaires, et sa logique fonctionnelle qui inclut un élément de mesure, un calcul de niveau thermique, des réglages et des seuils. Le fabricant doit fournir le schéma fonctionnel qui décrit la mise en œuvre de protection thermique proposée..

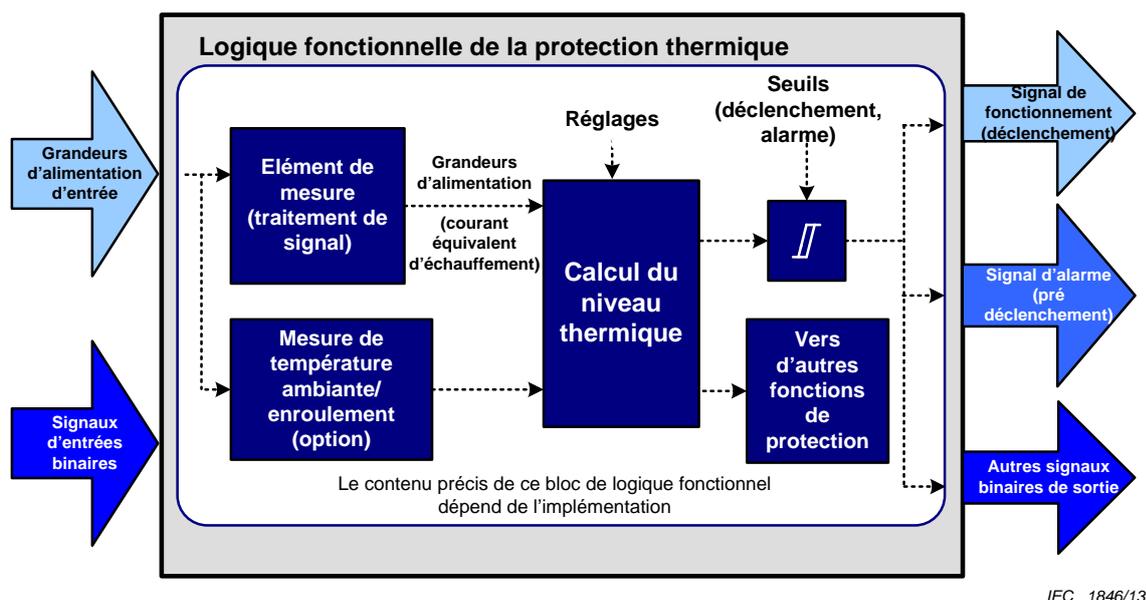


Figure 1 – Schéma simplifié de la fonction de protection thermique

#### 4.2 Grandeurs d'alimentation d'entrée/grandeurs d'alimentation

Les grandeurs d'alimentation d'entrée sont les signaux de mesure, par exemple les courants de phase (ou de ligne), la température ambiante ou de l'environnement, ou éventuellement les températures des enroulements (si nécessaire ou applicable). Leurs valeurs assignées et les exigences applicables sont spécifiées dans la CEI 60255-1.

Les grandeurs d'alimentation d'entrée peuvent être délivrées à la logique fonctionnelle de protection thermique soit par des liaisons filaires venant des transformateurs de courant, et éventuellement d'autres grandeurs d'entrée telle que la température d'enroulement ou ambiante soit sous la forme d'un paquet de données via les ports de communication utilisant un protocole de communication approprié, tel que celui de la CEI 61850-9-2.

Les grandeurs d'alimentation d'entrée utilisées par la fonction de protection thermique peuvent ne pas être directement le courant côté secondaire des transformateurs de courant. Par conséquent, la documentation sur le relais de protection doit faire état du type de grandeurs d'alimentation utilisé par la fonction de protection thermique.

Des exemples de grandeurs d'alimentation d'entrée sont:

- la mesure de courant en monophasé;
- la mesure de courant en triphasé;
- la mesure de la composante directe et/ou inverse des courants phase;
- un capteur de température d'enroulement ou température ambiante.

NOTE La température ambiante, la température du liquide de refroidissement, la température de l'huile isolante ou la température des enroulements du dispositif à protéger thermiquement peuvent être mesurées par des capteurs de température, tels qu'un détecteur de température résistif (RTD), dont les valeurs peuvent être utilisées pour baisser le calcul du niveau thermique spécifié dans la présente norme. Les valeurs ou les signaux de sortie de ces capteurs de température peuvent être pris en compte par l'algorithme du modèle thermique de premier ordre qui peut influencer et compenser le niveau thermique calculé (en se basant sur les valeurs du courant d'échauffement équivalent et les constantes de temps thermiques d'échauffement).

#### 4.3 Signaux d'entrée binaires

Si des signaux d'entrée binaires (pilotés extérieurement ou intérieurement) sont utilisés, leur influence sur la fonction de protection thermique doit être clairement décrite par le schéma logique fonctionnel ou dans la documentation du dispositif de protection fourni par le

fabricant. En plus, une description textuelle peut aussi être fournie, si celle-ci peut apporter des clarifications sur le fonctionnement des signaux d'entrées, avec les différentes utilisations ou applications prévues.

Les signaux d'entrée binaires entrant dans cette fonction peuvent émaner de différentes sources. On peut citer les exemples suivants.

- câblés de manière traditionnelle sur des entrées physiques;
- via un port de communication depuis des dispositifs externes;
- via des connexions logiques internes depuis d'autres éléments fonctionnels à l'intérieur du relais.

La méthode de réception du signal importe peu sauf qu'elle doit être conforme aux exigences fonctionnelles.

Les définitions, les valeurs assignées et les normes pour les signaux physiques d'entrée binaires sont spécifiées dans la CEI 60255-1.

Des exemples d'application de signaux d'entrée binaires dans une protection thermique sont:

- 1) Lorsque la fonction de protection thermique est mise en œuvre avec deux modes de fonctionnement du dispositif protégé, par exemple des transformateurs de puissance avec ventilation naturelle ou forcée, des moteurs à deux vitesses ou un moteur de démarrage en étoile / triangle, une entrée binaire peut être mise en œuvre pour distinguer les différents modes de fonctionnement et pour sélectionner le groupe de réglages requis pour assurer une protection thermique correcte.
- 2) Un autre exemple d'entrée binaire consiste à mettre en œuvre une fonction de réinitialisation de la mémoire thermique pendant des procédures d'essai ou de mise en service, en utilisant une entrée binaire soit câblée directement, soit par communication de données.

## **4.4 Logique fonctionnelle**

### **4.4.1 Courant d'échauffement équivalent**

Le courant d'échauffement équivalent  $I_{eq}$  tient compte des sources d'échauffement supplémentaires telle que des courants de déséquilibre et / ou des harmoniques. Le type de mesure du courant d'échauffement équivalent doit être mentionné dans la documentation du relais de protection.

Pour la mesure de la valeur efficace, le fabricant doit spécifier la bande passante en fréquence de la mesure du courant efficace et définir les harmoniques qui sont pris en compte dans le calcul du courant d'échauffement équivalent.

L'Annexe A donne une explication sur la définition du courant d'échauffement équivalent et différents cas de mise en œuvre pour des applications de la protection thermique de dispositif électrique.

### **4.4.2 Valeurs de courant de fonctionnement et de base (réglage) pour la protection thermique**

Pour le relais électrique thermique, la valeur du courant de base (réglage)  $I_B$  est la valeur limite spécifiée du courant pour lequel il est garanti que le relais ne fonctionne pas. Pour des applications moteurs ou transformateurs, le courant de base est généralement réglé sur le courant nominal du dispositif protégé.

Pour tenir compte du courant continu maximal de charge du dispositif protégé, un facteur  $k$  est appliqué à la valeur du courant de base (réglage), pour déterminer le courant de fonctionnement pour la protection thermique.

Par conséquent, la valeur  $k \times I_B$  définit le courant de fonctionnement des relais de protection thermique,

où:

$k$  peut être une constante ou un réglage de l'utilisateur, selon les indications du fabricant de relais thermiques;

$I_B$  est la valeur du courant de base (réglage) exprimée comme le courant admissible du dispositif à protéger thermiquement.

Avec le facteur  $k$ , aucun fonctionnement du relais thermique n'est garanti pour des courants de phase égaux à la valeur de réglage  $I_B$ . Si le facteur  $k$  est un réglage de l'utilisateur, il convient d'inclure une plage de réglage d'au moins 1,0 à 1,5. Pour des applications moteurs ou transformateurs, le facteur  $k$  est généralement réglé par l'utilisateur, avec une valeur de  $k \times I_B$  inférieure ou égale au courant de fonctionnement maximal (charge permanente maximale) du dispositif à protéger thermiquement. Pour les relais dont le facteur  $k$  ne se règle pas (supposé fixe à 1,0), il convient d'ajuster le réglage de  $I_B$  pour tenir compte du facteur  $k$ .

Dans certains cas une valeur fixe de  $k$  peut être définie par le fabricant, égale à la précision de la mesure du courant du relais électrique thermique. Ceci garantit que le relais thermique ne doit pas fonctionner pour un courant de fonctionnement de  $I_B$ . Dans ce cas le rapport entre le courant de surcharge et le courant nominal du dispositif à protéger peut être intégré dans le réglage du courant de base  $I_B$ .

#### 4.4.3 Calcul du niveau thermique

Le calcul du niveau thermique du dispositif protégé est basé sur la mesure du courant d'échauffement équivalent et le calcul récursif d'une équation discrète qui régit le modèle thermique basé sur une équation différentielle du premier ordre.

Le niveau thermique  $H(t)$  du dispositif protégé est calculé par l'équation suivante:

$$H(t) = \left( \frac{I_{eq}(t)}{k \cdot I_B} \right)^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad (1)$$

où:

$H(t)$  est le niveau thermique à l'instant  $t$ ;

$H(t-\Delta t)$  est le niveau thermique à l'instant  $t-\Delta t$ ;

$\Delta t$  est la période d'échantillon qui est l'intervalle de temps entre deux échantillons consécutifs de courants d'entrée;

$I_{eq}(t)$  est le courant d'échauffement équivalent à l'instant  $t$  (voir 4.4.1 et Annexe A);

$k \cdot I_B$  est la valeur du courant de charge permanent maximal, incluant le facteur  $k$ ;

$\tau$  est la constante de temps thermique d'échauffement/refroidissement du dispositif à protéger thermiquement, on suppose  $\tau \gg \Delta t$ .

La détermination des équations temps-courants et des équations différentielles qui régissent un modèle thermique du premier ordre sont présentées en détail à l'Annexe A.

Pour un cas particulier en régime établi avec  $I_{eq}$  constant, le niveau thermique  $H$  peut être calculé par l'équation particulière et simplifiée suivante:

$$H = \left( \frac{I_{eq}}{k \cdot I_B} \right)^2 \quad (2)$$

Le relais électrique thermique déclenche si le niveau thermique atteint 100 % du seuil de niveau thermique maximal.

En fonction de la conception mécanique du dispositif électrique à protéger thermiquement, la constante de temps thermique d'échauffement et la constante de temps thermique de refroidissement peuvent être différentes. Par exemple, pour la protection d'un moteur électrique, la constante de temps thermique d'échauffement est inférieure à la constante de temps thermique de refroidissement en raison de la rotation du rotor et de l'auto-ventilation quand le moteur fonctionne. Dans ces cas, le niveau thermique est calculé en fonction du niveau de courant de phase, avec deux constantes de temps thermiques différentes, selon les équations suivantes.

Si  $I_{eq}(t) \geq 0$  (ou si  $I_{eq}(t)$  est supérieur à un seuil de courant d'entrée fixe, indiqué par le fabricant de relais thermiques), le niveau thermique peut être calculé par l'équation suivante:

$$H(t) = \left( \frac{I_{eq}(t)}{k.I_B} \right)^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau_1 + \Delta t} + \frac{\tau_1}{\tau_1 + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad (3)$$

Si  $I_{eq}(t) \approx 0$  (ou si  $I_{eq}(t)$  est inférieur à un seuil de courant d'entrée fixe, indiqué par le fabricant de relais thermiques), le niveau thermique peut être calculé par l'équation suivante:

$$H(t) = \frac{\tau_2}{\tau_2 + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad (4)$$

où

$\tau_1$  est la constante de temps thermique d'échauffement du dispositif à protéger thermiquement;

$\tau_2$  est la constante de temps thermique de refroidissement du dispositif à protéger thermiquement.

NOTE 1 En général,  $\tau_1$  est utilisé quand le dispositif protégé est alimenté et  $\tau_2$  est utilisé quand le dispositif protégé n'est pas alimenté.

NOTE 2 La constante de temps thermique d'échauffement  $\tau_1$  est également utilisé quand le dispositif est alimenté et le courant de phase est réduit à un niveau plus bas, ce qui cause une diminution du niveau thermique du dispositif, entraînant une diminution de la température du dispositif.

NOTE 3 Les fabricants peuvent mettre en œuvre plusieurs constantes de temps d'échauffement et plusieurs constantes de temps de refroidissement pour couvrir la variété de conditions d'échauffement et de refroidissement. Par exemple, pendant le démarrage direct d'un moteur, la constante de temps utilisée dans le modèle thermique pourrait être modifiée (diminuée) pour prendre en compte le refroidissement réduit du rotor à l'arrêt ou à vitesse réduite, puis revenir à une constante de temps plus longue avec une vitesse de fonctionnement normale.

Pour la plupart des applications de protection thermique, telles qu'un générateur et un moteur auto-ventilés, des moteurs à deux vitesses, des moteurs de démarrage en étoile / triangle, les constantes de temps thermiques  $\tau_1$  et  $\tau_2$  sont différentes. Pour d'autres applications, telles que des moteurs équipés de systèmes de refroidissement ou de ventilation forcée séparés, indépendants, des transformateurs de puissance avec ou sans système de refroidissement ou de ventilation forcée, des câbles et des condensateurs, les constantes de temps thermiques  $\tau_1$  et  $\tau_2$  peuvent avoir la même valeur. Pour certaines applications spécifiques, telles que des moteurs à deux vitesses ou lorsqu'un démarrage en étoile / triangle est utilisé, d'autres constantes de temps d'échauffement peuvent être utilisées.

#### 4.4.4 Courbes et équations des caractéristiques temps-courant de déclenchement

##### 4.4.4.1 Généralité

Les caractéristiques temps-courant doivent être publiées par le fabricant de relais sous forme d'équations ou par des méthodes graphiques. Les équations temps-courant pour un modèle thermique simple sont données ici pour l'état froid et l'état chaud.

##### 4.4.4.2 Courbe à froid

La courbe à froid pour des relais de protection thermiques est une solution particulière de l'Équation différentielle du premier ordre (1) dans les conditions suivantes.

- A partir d'un niveau thermique sans courant de charge initial avant la surcharge. Ainsi, la température du dispositif est considérée comme la température ambiante et son niveau thermique est considéré égal à zéro.
- Un courant de phase constant pendant la surcharge.

La caractéristique temps-courant de déclenchement à froid est donnée par l'équation temps-courant suivante:

$$t(I_{\text{eq}}) = \tau \cdot \ln \left( \frac{I_{\text{eq}}^2}{I_{\text{eq}}^2 - (k \cdot I_{\text{B}})^2} \right) \quad (5)$$

où

$t(I_{\text{eq}})$  est le temps de fonctionnement théorique avec un courant de phase constant  $I_{\text{eq}}$ , sans courant de charge avant la surcharge;

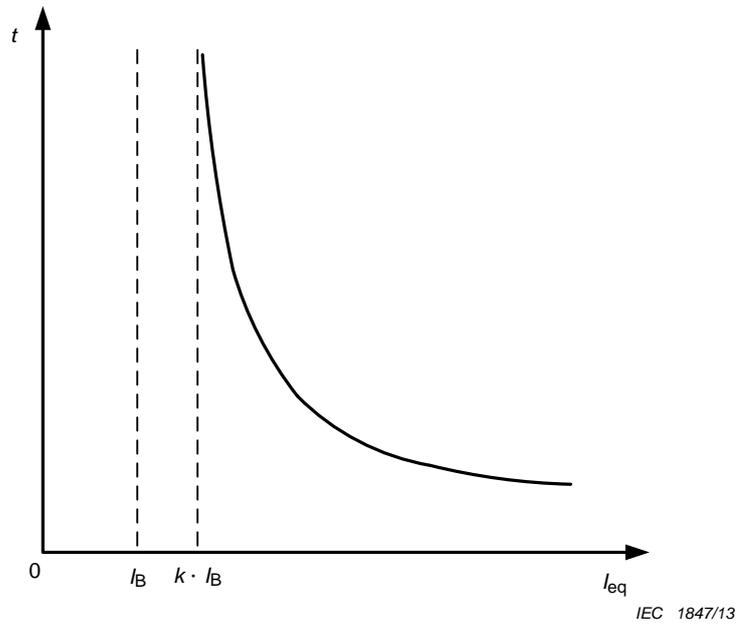
$I_{\text{eq}}$  est le courant d'échauffement équivalent;

$\tau$  est la constante de temps thermique d'échauffement du dispositif protégé;

$k$  est une constante (fixe) ou un réglage, selon les indications du fabricant de relais thermiques;

$I_{\text{B}}$  est la valeur du courant de base exprimé comme le courant admissible du dispositif à protéger thermiquement.

Un exemple typique de courbe caractéristique temps-courant pour l'état froid d'un système thermique du premier ordre sans charge préalable avant la surcharge est représenté à la Figure 2.



**Figure 2 – Exemples typiques de courbes caractéristiques pour l'état froid d'un système thermique du premier ordre sans charge préalable avant la surcharge**

L'Annexe A présente et développe l'obtention de la caractéristique temps-courant pour l'état froid à partir de l'équation différentielle du premier ordre qui régit le modèle thermique.

**4.4.4.3 Courbe à chaud**

La courbe à chaud pour des relais de protection thermiques est une solution particulière de l'Équation différentielle du premier ordre (1). Elle est donnée par l'équation temps-courant suivante:

$$t(I_{eq}) = \tau \cdot \ln \left( \frac{I_{eq}^2 - I_p^2}{I_{eq}^2 - (k \cdot I_B)^2} \right) \tag{6}$$

où

$t(I_{eq})$  est le temps de fonctionnement théorique avec un courant de phase constant  $I_{eq}$ , avec un courant constant  $I_p$  avant la surcharge;

$I_{eq}$  est le courant d'échauffement équivalent;

$I_p$  est le courant de charge en régime établi avant la surcharge pendant une durée qui entraînerait un niveau thermique constant (la durée est supérieure à plusieurs constantes de temps thermiques d'échauffement  $\tau$ ); avec  $I_p = 0$  l'équation est identique à la courbe à froid;

$\tau$  est la constante de temps thermique d'échauffement du dispositif à protéger thermiquement;

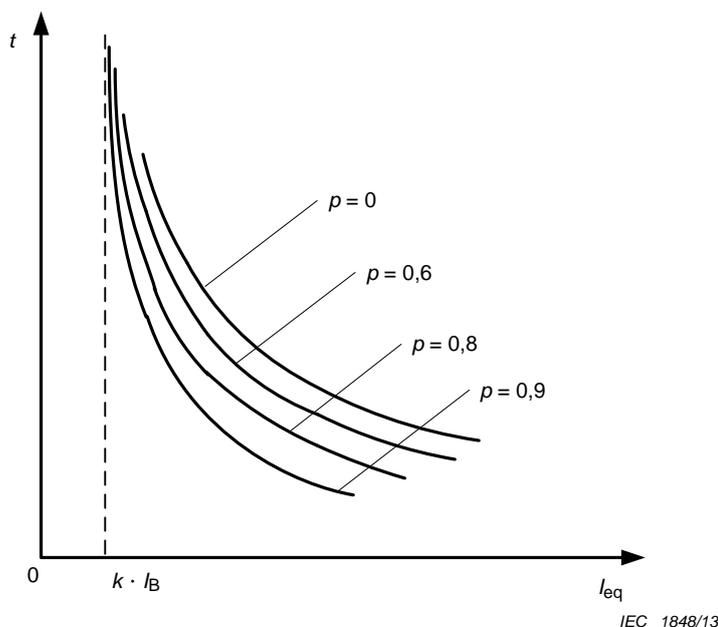
$k$  est une constante (fixe) ou un réglage, selon les indications du fabricant de relais thermiques;

$I_B$  est la valeur du courant de base exprimé comme le courant admissible du dispositif à protéger thermiquement.

Le fabricant de relais peut publier des courbes de déclenchement thermiques comme dans l'exemple donné ci-dessous avec le rapport de charge préalable  $p$  comme paramètre, décrit par l'équation suivante:

$$\rho = \frac{I_p}{I_B} \quad (7)$$

Des exemples typiques de courbes caractéristiques temps-courant pour des états chauds d'un système thermique du premier ordre pour différentes valeurs de charge préalable avant la surcharge sont représentés à la Figure 3.



**Figure 3 – Exemples typiques de courbes caractéristiques pour des états chauds d'un système thermique du premier ordre avec différentes valeurs de charge préalable avant la surcharge**

L'Annexe A présente et développe la dérivation de l'équation différentielle détaillée, l'algorithme, le modèle dynamique et l'obtention de la caractéristique temps-courant pour l'état chaud pour le modèle thermique du premier ordre.

#### 4.4.5 Seuil d'alarme de niveau thermique

Si le relais de protection thermique dispose d'un seuil d'alarme, il peut produire un signal de sortie d'alarme quand le niveau thermique dépasse le seuil d'alarme réglé. Ce seuil peut être défini comme un pourcentage de la limite thermique nominale (assignée) du dispositif à protéger thermiquement.

La limite thermique nominale (assignée) ( $H_{\text{nominale}} = 100\%$ ) est considérée comme le niveau thermique maximal que le dispositif à protéger thermiquement peut supporter en permanence pour éviter une température excessive. Une température excessive au-delà de la limite autorisée pourrait dégrader les propriétés chimiques/physiques des matériaux isolants et réduire la durée de vie prévue.

Ce réglage du seuil d'alarme de surcharge prédictive, si il est proposé par le constructeur du relais, doit inclure au moins une gamme réglage de 50 % à 100 % de la limite thermique nominale (assignée).

NOTE 1 Le niveau thermique  $H$  peut être compensé pour le niveau de température ambiante du dispositif. Ceci est détaillé dans les Equations (8) et (9).

NOTE 2 Pour des applications de protection thermique moteur, le niveau thermique réel, mesuré par le dispositif de protection thermique utilisant les équations présentées dans la présente norme, peut être utilisé comme un signal de blocage de redémarrage, pour servir de référence d'entrée à la fonction de protection de blocage de

redémarrage (fonction 66), pour un moteur à l'état arrêté (au repos), dans un état chaud, après fonctionnement. Pour cette application, le temps restant pour la prochaine tentative de démarrage de moteur permise peut être indiqué sur l'afficheur du dispositif de protection thermique, en tenant compte de la constante de temps thermique de refroidissement pour le moteur arrêté, du niveau thermique réel du moteur et du niveau thermique estimé ou calculé requis pour démarrer le moteur (calculé en se basant sur la constante de temps thermique d'échauffement du moteur, sur le courant de démarrage et sur le temps de démarrage).

## 4.5 Signaux de sortie binaires

### 4.5.1 Généralités

Les signaux de sortie binaires sortant de cette fonction peuvent se présenter sous différentes formes. On peut citer les exemples suivants:

- câblés traditionnellement depuis des contacts physiques des relais de sortie,
- via un port de communication provenant de dispositifs externes,
- via des connexions logiques internes vers d'autres éléments fonctionnels à l'intérieur du relais.

La méthode permettant de délivrer le signal importe peu sauf qu'elle doit être conforme aux exigences fonctionnelles.

Les définitions, les valeurs assignées et les normes pour les signaux physiques de sortie binaires sont spécifiées dans la CEI 60255-1.

### 4.5.2 Signal de sortie de fonctionnement (déclenchement)

Le signal de fonctionnement (déclenchement) est issu des éléments de mesure et de seuil, lorsque le niveau thermique calculé  $H(t)$ , défini dans l'Equation (1), dépasse 100 % (1,0 pu) du niveau thermique nominal (assigné) du dispositif à protéger thermiquement.

NOTE Il se peut que le signal de déclenchement fonctionne quand le niveau thermique calculé de n'importe laquelle des trois phases dépasse le niveau thermique nominal.

### 4.5.3 Signal d'alarme

Le signal d'alarme est issu des éléments de mesure et de seuil, lorsque le niveau thermique calculé  $H(t)$ , défini dans l'Equation (1), dépasse le réglage de seuil d'alarme de surcharge prédéterminé.

### 4.5.4 Autres signaux de sortie binaires

Si d'autres signaux de sortie binaires sont disponibles, leur mode de fonctionnement doit être clairement indiqué sur le schéma logique fonctionnel ou dans la documentation du dispositif de protection du fabricant. En plus, une description textuelle peut aussi être fournie, si celle-ci peut apporter davantage de clarification sur le fonctionnement du signal de sortie et sur son utilisation prévue.

## 4.6 Facteurs d'influence supplémentaires sur la protection thermique

### 4.6.1 Généralités

Le fabricant doit déclarer si des algorithmes spécifiques sont mis en œuvre dans le relais. Ces algorithmes doivent être décrits par le fabricant dans la documentation du dispositif de protection thermique.

Par exemple, si le relais de protection thermique est doté d'équipement de mesure de la température, la protection thermique peut tenir compte de la température ambiante ou de la température du liquide de refroidissement. Une mise en œuvre possible de compensation de la température ambiante est décrite dans les paragraphes suivants, mais d'autres méthodes pourraient être utilisées.

#### 4.6.2 Influence de la température ambiante sur la protection thermique

Des machines électriques, telles que des moteurs et des transformateurs de puissance, sont conçues pour fonctionner dans une gamme de température ambiante spécifiée. Si la machine fonctionne à une température ambiante plus élevée que celle spécifiée, les enroulements peuvent surchauffer, entraînant une détérioration de l'isolation, même si la machine électrique fonctionne à la charge assignée et au courant d'échauffement équivalent. Dans ce cas, il est bénéfique d'ajuster le niveau thermique calculé de la machine pour maintenir une protection thermique adaptée en mesurant directement la température ambiante.

Typiquement, la limite spécifiée (ou la température ambiante maximale) de la machine protégée est au environ de 40 °C. Quand la mesure de température ambiante est différente de la limite spécifiée, le niveau thermique  $H(t)$  peut être compensé d'un facteur  $F_a$  défini par l'équation suivante.

$$F_a = \frac{T_{\max} - T_{\text{limit}}}{T_{\max} - T_a} \quad (8)$$

où

$T_{\max}$  est la température maximale du matériel (selon la classe d'isolation thermique du dispositif, comme indiqué dans la CEI 60085);

$T_a$  est la température ambiante (d'environnement) du dispositif, mesurée par le relais de protection thermique;

$T_{\text{limit}}$  est la température ambiante limite spécifiée pour un fonctionnement à la charge assignée sans causer de dégradation thermique de l'isolation, typiquement 40 °C.

Dans le cas d'un relais de protection thermique équipé d'un capteur de température ambiante et du facteur de correction de la température ambiante, le niveau thermique  $H(t)$  du dispositif est calculé par l'équation suivante:

$$H(t) = \left( \frac{I_{\text{eq}}(t)}{k \cdot I_B} \right)^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} \cdot F_a + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad (9)$$

La détermination théorique du facteur de température ambiante  $F_a$  est développée dans l'Annexe A.

#### 4.6.3 Equipement de réinitialisation thermique

Pendant les essais de l'élément thermique, il est préférable de pouvoir forcer l'élément thermique dans un état nul (remise à zéro de l'échauffement initial), ou toute autre valeur connue. Si un tel équipement est prévu sur le dispositif, il convient de présenter clairement son mode de fonctionnement, sa capacité et les réglages applicables sur le schéma fonctionnel et dans la documentation du relais.

#### 4.7 Comportement du dispositif de protection thermique pendant une défaillance de l'alimentation secondaire

La fonction de protection thermique calcule et stocke en permanence le niveau thermique dans sa "mémoire" thermique en utilisant l'équation récursive.

Lors de l'alimentation du dispositif de protection thermique, l'état de la mémoire thermique doit être clairement défini et indiqué par le fabricant de relais dans la documentation sur le dispositif de protection.

Dans certains cas, il s'agit d'un réglage de paramètre qui définit le niveau de départ de la mémoire thermique. En fonction du réglage du dispositif de protection thermique, il convient que la valeur du niveau thermique du dispositif protégé stockée soit remise à zéro (en cas de défaillance de l'alimentation auxiliaire) ou stockée dans une mémoire de type non-volatile, de sorte que le niveau thermique préalable soit maintenu si l'alimentation auxiliaire est défaillante.

Le fabricant doit déclarer dans la documentation du dispositif de protection thermique le comportement du niveau thermique en cas de défaillance de l'alimentation en fonction des réglages définis par l'utilisateur et des réglages d'usine (par défaut).

## 5 Spécification des performances

### 5.1 Précision liée à la grandeur caractéristique

La précision associée à la grandeur caractéristique doit être déclarée par le fabricant à la valeur de fonctionnement  $k \times I_B$ , dans la gamme des valeurs de réglage sur laquelle elle est applicable.

La gamme de  $k$  prise en charge par le relais électrique thermique doit être spécifiée (par exemple  $1,0 \leq k \leq 1,5$ ). Le fabricant doit prouver qu'à  $I_B$  aucun fonctionnement n'a lieu du fait des imprécisions de mesure du courant et de la température ainsi que du calcul thermique.

Pour des fonctions avec une mesure de la température ambiante, le fabricant doit déclarer l'influence de la mesure de la température ambiante sur la précision de la caractéristique. Afin d'éviter la combinaison d'une grandeur caractéristique variable et d'une température ambiante variable, il est suffisant de spécifier la précision avec une mesure de la température ambiante  $T_a$  inférieure à 40 °C et une valeur supérieure à 40 °C (par exemple  $T_a = 0$  °C et  $T_a = 0,5 T_{max}$ ).

### 5.2 Précision liée au temps de fonctionnement

La plage de fonctionnement des caractéristiques temps-courant doit être spécifiée par le fabricant ( $I_{min} \leq I_{eq} \leq I_{max}$ ).  $I_{min}$  et  $I_{max}$  doivent être indiqués par le fabricant et  $I_{min}$  doit être compris entre  $k \times I_B$  et  $1,2 \times k \times I_B$ . Ceci donne un temps de fonctionnement maximal pour une valeur de  $I_{eq} = I_{min}$  et un temps de fonctionnement minimal pour une valeur de  $I_{eq} = I_{max}$ . La précision de la caractéristique est spécifiée dans cette plage de fonctionnement. En outre, le fabricant doit déclarer le comportement de la fonction au-delà de sa plage de fonctionnement, dans des conditions de courant de défaut plus élevé (par exemple si la fonction est bloquée ou si  $I_{eq}$  est limité à  $I_{max}$ ).

L'erreur limite de référence est identifiée par une erreur attribuée déclarée par le fabricant, qui peut être multipliée par des facteurs correspondant à différentes valeurs de la grandeur caractéristique. La valeur de l'erreur attribuée doit être déclarée à la limite maximale de la plage de fonctionnement ( $I_{max}$ ). L'erreur limite de référence peut être déclarée comme:

- 1) une courbe théorique du temps tracée en fonction de multiples de la valeur de réglage de la grandeur caractéristique limitée par deux courbes représentant les limites maximale et minimale de l'erreur limite sur la plage de fonctionnement, ou
- 2) une erreur définie pour la limite haute de la plage de fonctionnement de la caractéristique temps-courant, associée à des facteurs multiplicateurs prédéfinies, fonction de la valeur de la grandeur caractéristique dans sa plage de fonctionnement, comme spécifié dans le Tableau 1.

**Tableau 1 – Erreur limite sous la forme de multiples d'une erreur attribuée**

Valeur de la grandeur caractéristique comme un multiple de la valeur de réglage ( $k \times I_B$ )	1,2 à 1,5	1,5 à 2	2 à $I_{max}$
Erreur limite sous la forme de multiples d'une erreur attribuée	2,5	1,5	1

NOTE La grandeur caractéristique peut être différente selon la nature de la protection thermique prévue. Par exemple, il peut s'agir d'un courant de phase associé ou non à la composante inverse dans le cas de la protection thermique d'un moteur.

Le fabricant doit déclarer si la compensation du temps de mesure interne de la grandeur caractéristique et du fonctionnement du contact de sortie est incluse dans le temps de fonctionnement et dans la précision associée.

La précision nominale sera indiquée en se basant sur une entrée sinusoïdale à la fréquence nominale. Toutefois, le fabricant doit indiquer l'effet des harmoniques sur la grandeur caractéristique et la gamme de fréquences de fonctionnement dans laquelle la précision nominale est satisfaite. En outre, le fabricant doit indiquer si des harmoniques sont incluses dans le calcul de la grandeur caractéristique.

### 5.3 Performances pendant des variations de fréquence

Le but de ces essais est de vérifier les performances du relais quand la fréquence des grandeurs d'alimentation s'écarte de la valeur nominale. L'influence de l'écart de fréquence de  $f_{min}$  à  $f_{max}$  est déterminée en procédant à des essais sur la précision quand la fréquence de la grandeur caractéristique varie entre  $f_{min}$  et  $f_{max}$ .

## 6 Méthodologie d'essais fonctionnels

### 6.1 Généralités

Les essais décrits dans cet article concernent les essais de type. Ces essais doivent être conçus de manière à couvrir tous les aspects matériels et logiciels embarqués (le cas échéant) du relais de protection thermique. Ceci signifie que l'injection de courant doit se faire à l'interface du relais, soit directement aux bornes d'entrée de transformateur de courant conventionnels, soit à partir d'un signal équivalent au niveau de l'interface approuvée.

Le fabricant doit indiquer clairement la méthodologie, la procédure, la structure et l'architecture des essais utilisées pour réaliser les essais de performances du dispositif de protection.

Chaque fois que cela est applicable, d'autres grandeurs d'entrée ayant une influence, par exemple des entrées pour la mesure de la température ambiante, des entrées de réinitialisation ou des fonctions de défaillance d'alimentation, doivent être considérées dans les essais de type. De même, le fonctionnement doit être considéré à partir des contacts de sortie, dans la mesure du possible, ou à partir de signaux équivalents, au niveau de l'interface approuvée.

La précision du relais doit être déterminée en régime établi. La grandeur caractéristique injectée doit être un signal sinusoïdal à la fréquence assignée et son amplitude doit varier en fonction des exigences des essais.

Pour déterminer l'influence des harmoniques, la grandeur caractéristique injectée doit être constitué de signaux sinusoïdaux superposés au signal fondamental à la fréquence assignée et son amplitude doit varier en fonction des exigences des essais.

Pour déterminer l'influence des fréquences anormales, la grandeur caractéristique injectée doit être un signal sinusoïdal à la fréquence d'essai requise et son amplitude doit varier en fonction des exigences des essais.

Conformément à la CEI 60255-1, chaque point d'essai lié à la précision doit être répété 5 fois pour assurer la répétabilité des résultats, avec les valeurs d'erreur maximales et moyennes de tous les essais utilisées pour la déclaration des précisions. Il convient d'utiliser suffisamment de points d'essai pour évaluer les performances sur toute la plage de réglage de l'élément, mais au minimum trois réglages doivent être utilisés. Les valeurs préférentielles sont: réglage minimum (ou 0 % de la gamme); 50 %; réglage maximum (ou 100 % de la gamme).

Dans les paragraphes suivants, les réglages définis pour les essais sont exprimés en pourcentage de la gamme disponible avec 0 % représentant le réglage minimum disponible et 100 % représentant le réglage maximum disponible. De même, 50 % représenteraient le point milieu de la plage de réglage disponible. Le réglage réel à utiliser peut être calculé en utilisant l'équation suivante:

$$S_{AV} = (S_{MAX} - S_{MIN}) X + S_{MIN} \quad (10)$$

où

- $S_{AV}$  est la valeur de réglage réelle à utiliser dans l'essai;
- $S_{MAX}$  est la valeur de réglage maximum disponible;
- $S_{MIN}$  est la valeur de réglage minimum disponible;
- $X$  est la valeur du pourcentage du point d'essai exprimée dans la méthodologie d'essai.

## 6.2 Détermination des erreurs en régime établi liées à la valeur du courant de fonctionnement

Il n'est pas simple de vérifier la précision de la valeur du courant de fonctionnement  $k \times I_B$  directement, compte tenu du temps de fonctionnement très long à proximité du seuil. Toutefois, pour contrôler la valeur du courant de base  $I_B$ , la valeur limite spécifiée du courant pour lequel il est nécessaire que le relais thermique ne fonctionne pas, l'essai suivant est réalisé.

Un courant égal à  $I_B$  doit être appliqué au relais thermique pendant une période supérieure à 10 fois le réglage de la constante thermique d'échauffement. Le contact de sortie de fonctionnement de l'élément doit être surveillé, et aucun déclenchement ne doit se produire.

Cet essai peut être réalisé avec les réglages suivants.

- La constante thermique d'échauffement minimale dans la plage de réglage;
- Si le facteur  $k$  est un réglage,  $k$  est réglé au niveau de précision spécifié, déclaré par le fabricant (c'est-à-dire, avec un niveau de précision spécifié de 5 %, le facteur  $k$  est réglé à 1,05);
- Si le facteur  $k$  est une valeur fixe, il est généralement défini pour couvrir la précision de mesure du courant pour garantir qu'aucun fonctionnement n'a lieu pour un courant permanent  $I_B$ . Dans le cas particulier où  $k$  est une valeur fixe égale à 1, un courant réduit doit être appliqué conformément au niveau de précision déclaré (c'est-à-dire, avec un niveau de précision spécifié de 5 %, le courant injecté est égal à  $0,95 \times I_B$ );
- Le courant de base  $I_B$  est réglé pour réaliser 3 points d'essai: réglage minimum (ou 0 % de la gamme); 50 %; réglage maximum (ou 100 % de la gamme).

L'essai peut être réalisé avec ou sans niveau thermique préalable. L'impact du niveau thermique préalable après la durée de l'injection de courant (10 fois la constante de temps thermique d'échauffement) n'est pas significatif.

A la fin de l'essai et, si le relais affiche le niveau thermique du dispositif protégé, le niveau thermique doit être inférieur à 100 %.

### 6.3 Détermination des erreurs en régime établi liées à la grandeur caractéristique et au temps de fonctionnement

#### 6.3.1 Détermination de la précision de la courbe à froid

La vérification de la courbe à froid est nécessaire pour vérifier indirectement les précisions indiquées pour la grandeur caractéristique et pour le temps de fonctionnement. Pour déterminer la réponse de la courbe à froid, le modèle thermique du relais de protection thermique doit être réinitialisé avant d'appliquer le signal d'essai calculé.

À partir de l'Equation (5), la courbe à froid est vérifiée avec suffisamment de points d'essai pour évaluer les performances sur toute la plage de réglage de la constante de temps thermique d'échauffement et du courant de base, et pour différentes valeurs de courant sur la plage de fonctionnement de la caractéristique thermique. Les temps enregistrés avec le contact de sortie de fonctionnement permettent de calculer la précision du temps de fonctionnement de la courbe à froid. Les points d'essai suggérés sont indiqués dans le Tableau 2. Chaque point d'essai doit être réalisé une seule fois, sauf pour le réglage de la constante de temps thermique minimale pour laquelle chaque point d'essai doit être répété au moins 5 fois pour garantir la répétabilité des résultats, avec une indication des valeurs d'erreur maximales et moyennes de tous les essais utilisées pour la déclaration de précision.

Si le facteur  $k$  est un réglage, la valeur du courant de fonctionnement est définie avec une combinaison du courant de base  $I_B$  et du facteur  $k$ , dans leurs plage de réglage. Par exemple, en supposant que la plage de réglage disponible pour le courant de base  $I_B$  soit 1 A à 5 A et la plage de réglage du facteur  $k$  soit 1,0 à 1,5, la valeur réelle de courant de fonctionnement à utiliser serait: 1 A; 3,75 A; 7,5 A.

**Tableau 2 – Points d'essai de la courbe à froid**

Valeur du courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ )	Constante de temps thermique d'échauffement ( $\tau_1$ )	Valeur initiale du courant d'essai	Valeur finale du courant d'essai
Minimum (0 %) pour $I_B$ et $k$	Minimum (0 %)	Zéro	$1,2 \times k \times I_B$
50 % pour $I_B$ et $k$	50 %	Zéro	$1,6 \times k \times I_B$
Maximum (100 %) pour $I_B$ et $k$	Maximum (100 %)	Zéro	$2 \times k \times I_B$
		Zéro	$5 \times k \times I_B$
		Zéro	$10 \times k \times I_B$

NOTE Le nombre total de points d'essai est 45 (avec les répétitions, cela donne un total de 105 essais). Cinq points d'essai définis par les valeurs finales du courant d'essai, avec les 3 réglages définis pour la valeur de courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ ), et les 3 réglages définis pour la constante de temps thermique.

Si les points d'essai spécifiés dans le Tableau 2 dépassent la plage de fonctionnement du dispositif en essai, l'essai est effectué jusqu'à la grandeur caractéristique maximale autorisée. Aucun des points d'essai ne doit sortir des bandes de précision spécifiées qui résultent des précisions définies pour la grandeur caractéristique et le temps de fonctionnement.

Pour l'essai de la courbe à froid: le courant d'entrée doit brusquement passer de zéro au multiple approprié de  $I_B$ . Le relais doit ensuite avoir suffisamment de temps pour retourner à son état initial avant une nouvelle application du courant.

Pour réduire le temps d'essai de la courbe à froid, une réinitialisation forcée par une entrée logique ou un réglage peut être utilisée pour réinitialiser la mémoire thermique entre chaque point d'essai.

### 6.3.2 Détermination de la précision des courbes à chaud

La vérification de la courbe à chaud est nécessaire pour vérifier indirectement les précisions indiquées pour la grandeur caractéristique et pour le temps de fonctionnement. L'essai sera réalisé pour au moins 5 niveaux de pré-charge différents (10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 %).

Ces essais sont définis pour vérifier l'impact des niveaux de pré-charge sur le temps de fonctionnement (courbes à chaud). Les points d'essai peuvent être effectués avec une seule valeur de réglage pour le courant de fonctionnement  $k \times I_B$  et la constante de temps thermique d'échauffement ( $\tau_1$ ). Les points d'essais sont suggérés dans le Tableau 3 ci-dessous. Chaque point d'essai doit être réalisé une seule fois.

**Tableau 3 – Points d'essai de la courbe à chaud**

Valeur du courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ )	Constante de temps thermique d'échauffement ( $\tau_1$ )	Niveaux de pré-charge (en % de $I_p$ )	Valeur finale du courant d'essai
50 % pour $I_B$ et $k$	50 %	10 %	$1,2 \times k \times I_B$
-	-	30 %	$1,6 \times k \times I_B$
-	-	50 %	$2 \times k \times I_B$
-	-	70 %	$5 \times k \times I_B$
-	-	90 %	$10 \times k \times I_B$

NOTE Le nombre total de points d'essai est 25; cinq valeurs finales du courant d'essai multiplié par 5 niveaux de pré-charge définis.

Si les points d'essai spécifiés dans le Tableau 3 dépassent la plage de fonctionnement du dispositif en essai, l'essai est effectué jusqu'à la grandeur caractéristique maximale autorisée. Aucun des points d'essai ne doit sortir des bandes de précision spécifiées qui résultent des précisions définies pour la grandeur caractéristique et le temps de fonctionnement.

Pour l'essai de la courbe à chaud: le dispositif de protection doit être alimenté avec un courant équivalent au niveau de pré-charge pendant un temps permettant au relais d'atteindre l'équilibre thermique à ce point. Le dispositif de protection doit alors être alimenté au multiple approprié du courant de base  $I_B$ .

Le dispositif de protection doit alors avoir suffisamment de temps, comme spécifié par le fabricant, pour retourner et se stabiliser au courant de charge préalable avant de continuer l'essai.

### 6.4 Performances avec une constante de temps thermique de refroidissement spécifique

Si le relais peut prendre en charge différentes constantes de temps thermiques d'échauffement et de refroidissement ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ), l'essai suivant doit être effectué.

Un courant supérieur à la valeur de courant de fonctionnement  $k \times I_B$  est appliqué au relais thermique jusqu'au fonctionnement. Quand le relais fonctionne, l'injection de courant est arrêtée pendant un temps  $T_{cooling}$ . Après ce temps  $T_{cooling}$ , un courant  $I_{fault}$  supérieur à la valeur de courant de fonctionnement  $k \times I_B$  est appliqué une nouvelle fois au relais thermique. Le temps  $T_{fault}$  enregistré entre l'injection du courant  $I_{fault}$  et le contact de sortie de fonctionnement doit être égal à celui donné par l'équation suivante.

$$T_{\text{fault}} = \tau_1 \cdot \ln \left( \frac{I_{\text{fault}}^2 - (k \cdot I_B)^2 \cdot e^{(-T_{\text{cooling}}/\tau_2)}}{I_{\text{fault}}^2 - (k \cdot I_B)^2} \right) \quad (11)$$

où

- $\tau_1$  est la constante de temps thermique d'échauffement du dispositif à protéger thermiquement;
- $\tau_2$  est la constante de temps thermique de refroidissement du dispositif à protéger thermiquement;
- $I_{\text{fault}}$  est le courant appliqué au relais thermique après la période de refroidissement;
- $T_{\text{cooling}}$  est la durée de la période de refroidissement avant la surcharge;
- $k \times I_B$  est la valeur du courant de fonctionnement.

L'essai doit être effectué avec 2 réglages différents (0 % et 50 %) pour la constante de temps thermique de refroidissement ( $\tau_2$ ), dans les conditions suivantes.

- La valeur du courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ ) doit être réglée à 50 % de la plage de réglage.
- La constante de temps thermique d'échauffement ( $\tau_1$ ) doit être réglée à 50 % de la plage de réglage.
- Le courant  $I_{\text{fault}}$  doit être égal à 2 fois la valeur du courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ ).

Aucun des points d'essai ne doit sortir des bandes de précision spécifiées qui résultent des précisions définies pour la grandeur caractéristique et le temps de fonctionnement.

## 6.5 Performances avec des harmoniques

Au moins un essai pour la courbe à froid doit être effectué lorsque la grandeur caractéristique inclut 10 % du 3<sup>ème</sup> harmonique.

Au moins un essai pour la courbe à froid doit être effectué lorsque la grandeur caractéristique inclut 25 % du 5<sup>ème</sup> harmonique.

Au moins un essai pour la courbe à froid doit être effectué lorsque la grandeur caractéristique inclut 15 % du 7<sup>ème</sup> harmonique.

Le pourcentage d'harmonique est basé sur la composante de la fréquence fondamentale avec un angle de phase entre la composante fondamentale et harmonique à zéro degré. Trois points d'essais sont suggérés dans le Tableau 4 ci-dessous.

**Tableau 4 – Points d'essai de la courbe à froid avec harmoniques**

Valeur du courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ )	Constante de temps thermique d'échauffement ( $\tau_1$ )	Valeur initiale du courant d'essai	Valeur finale du courant d'essai
50 % pour $I_B$ et $k$	Minimum (0 %)	Zéro	$1,2 \times k \times I_B$
		Zéro	$2 \times k \times I_B$
		Zéro	$10 \times k \times I_B$

Si les points d'essai spécifiés dans le Tableau 4 dépassent la plage de fonctionnement du dispositif en essai, l'essai est effectué jusqu'à ce que la grandeur caractéristique maximale autorisée soit atteinte. Aucun des résultats des points d'essai ne doit sortir des bandes de

précision spécifiées qui résultent des précisions définies pour la grandeur caractéristique et le temps de fonctionnement.

### 6.6 Performances pendant des variations de fréquence

Au moins un essai pour la courbe à froid doit être effectué lorsque la fréquence fondamentale de la grandeur caractéristique est réglée à  $f_{min}$ , comme spécifié par le fabricant.

Au moins un essai pour la courbe à froid doit être effectué lorsque la fréquence fondamentale de la grandeur caractéristique est réglée à  $f_{max}$ , comme spécifié par le fabricant.

Trois points d'essais sont suggérés dans le Tableau 5 ci-dessous.

**Tableau 5 – Points d'essai de la courbe à froid pendant des variations de fréquence**

Valeur du courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ )	Constante de temps thermique d'échauffement ( $\tau_1$ )	Valeur initiale du courant d'essai	Valeur finale du courant d'essai
50 % pour $I_B$ et $k$	Minimum (0 %)	Zéro	$1,2 \times k \times I_B$
		Zéro	$2 \times k \times I_B$
		Zéro	$10 \times k \times I_B$

Si les points d'essai spécifiés dans le Tableau 5 dépassent la plage de fonctionnement du dispositif en essai, l'essai est effectué jusqu'à ce que la grandeur caractéristique maximale autorisée soit atteinte.

Aucun des résultats des points d'essai ne doit sortir des bandes de précision spécifiées qui résultent des précisions définies pour la grandeur caractéristique et le temps de fonctionnement.

### 6.7 Performances pendant différentes températures ambiantes

Si le relais de protection thermique est équipé d'un capteur de température pour mesurer la température ambiante du dispositif protégé, l'essai suivant doit être effectué afin de vérifier que le calcul du niveau thermique tient compte du facteur  $F_a$ , défini par l'Equation (9).

Les essais décrits en 6.3 doivent être réalisés dans les conditions suivantes:

- classe d'isolation thermique du dispositif protégé: classe F –  $T_{max} = 155 \text{ °C}$ ,
- 2 points d'essai pour la température ambiante: 20 °C et 60 °C:
  - pour les points d'essai à 20 °C, le facteur  $F_a = 0,852$
  - pour les points d'essai à 60 °C, le facteur  $F_a = 1,21$
- détermination d'une courbe à froid (voir Tableau 1) pour les deux températures ambiantes, avec les réglages suivants:
  - valeur du courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ ): 50 % pour  $I_B$  et  $k$
  - constante de temps thermique d'échauffement ( $\tau_1$ ): 50 %
- détermination d'une courbe à chaud (voir Tableau 2) pour les deux températures ambiantes, avec les réglages suivants:
  - valeur du courant de fonctionnement ( $k \times I_B$ ): 50 % pour  $I_B$  et  $k$
  - constante de temps thermique d'échauffement ( $\tau_1$ ): 50 %
  - niveau de pré-charge: 50 %

Avec le facteur  $F_a$ , la caractéristique limite temps-courant à froid et à chaud est donnée par l'équation suivante:

$$t(I_{eq}) = \tau \cdot \ln \left( \frac{F_a \cdot I_{eq}^2 - I_p^2}{F_a \cdot I_{eq}^2 - (k \cdot I_B)^2} \right) \quad (12)$$

où

- $t(I_{eq})$  est le temps de fonctionnement théorique avec un courant de phase constant  $I_{eq}$ ;
- $I_{eq}$  est la valeur du courant d'échauffement équivalent en fin d'essai;
- $\tau$  est la constante de temps thermique d'échauffement du dispositif protégé;
- $k$  est une constante (fixe) ou un réglage, selon les indications du fabricant de relais thermiques;
- $I_B$  est la valeur du courant de base exprimé comme le courant admissible du dispositif à protéger thermiquement;
- $I_p$  est le courant de charge en régime établi avant la surcharge ( $I_p = 0$  pour la courbe à froid).

Aucun des résultats des points d'essai ne doit sortir des bandes de précision spécifiées qui résultent des précisions définies pour la grandeur caractéristique et le temps de fonctionnement.

## 7 Exigences relatives à la documentation

### 7.1 Rapport d'essai de type

Le rapport d'essai de type pour la fonction de protection thermique décrite dans la présente norme doit être conforme à la CEI 60255-1.

Au minimum, les points suivants doivent être consignés:

Dispositif de protection en essai: cela inclut les détails concernant le dispositif de protection / IED / la fonction en essai, ainsi que des détails spécifiques tels que le numéro de modèle, la version du logiciel qui doivent être enregistrés dans le cas où cela est applicable.

- Matériels d'essai: nom du matériel, numéro de modèle, informations d'étalonnage.
- Le schéma fonctionnel montrant le fonctionnement conceptuel de l'élément, y compris l'interaction de tous les signaux binaires d'entrée et de sortie avec la fonction.
- Les détails de la grandeur d'alimentation d'entrée et le type de mesure utilisée par la fonction de protection.
- Les détails des courbes caractéristiques de fonctionnement disponibles pour les états de fonctionnement et de dégagement, qui ont été mis en œuvre dans la fonction, de préférence au moyen d'une équation.
- Les détails de la plage de fonctionnement (valeurs  $I_{min}$  et  $I_{max}$ ) et le comportement de la fonction pour des courants supérieurs à la plage de fonctionnement, dans des conditions de courant de défaut élevé (par exemple si la fonction est bloquée ou  $I_{eq}$  est limité à  $I_{max}$ ).
- Les détails de tous les réglages utilisés par la fonction, y compris  $k$ ,  $q$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  et  $F_a$ .
- Les détails de tout algorithme spécifique mis en œuvre pour améliorer l'applicabilité de cette fonction thermique à un réseau électrique réel et leurs déclarations de performance. Dans le cas des algorithmes génériques utilisés par plusieurs fonctions, par exemple, supervision de transformateur de courant ou RTD pour la température ambiante, la température du liquide de refroidissement, la température de l'huile isolante ou la température des enroulements, il est suffisant de décrire une fois le fonctionnement de

l'algorithme dans la documentation utilisateur, mais son effet sur le fonctionnement de toutes les fonctions doit être décrit.

- Méthode d'essai et réglages: elle inclut les détails de la procédure d'essai utilisée, ainsi que les réglages qui sont appliqués à l'équipement en essai pour faciliter les essais. Cela peut comprendre des réglages autres que ceux relatifs à la fonction soumise aux essais. Ceci permet la répétition des essais à effectuer avec l'assurance que les mêmes conditions d'essai seront utilisées.
- Résultats des essais: pour chaque cas d'essai décrit dans la méthode d'essai pour les différents réglages, l'ensemble complet des résultats sont consignés, avec une référence au cas d'essai. Les déclarations de précision sont établies à partir de ces résultats.
- Conclusions des essais: basées sur les résultats des essais enregistrés, toutes les déclarations requises par l'Article 5 de la présente norme doivent être clairement formulées. Le cas échéant, ces déclarations sont comparées aux spécifications de performance contenues dans la présente norme, pour permettre de prendre les décisions individuelles de réussite / échec, ainsi qu'une décision globale de réussite / échec pour l'ensemble de la fonction.

## 7.2 Documentation pour d'autres utilisateurs

Certains utilisateurs ne souhaitent pas consulter l'ensemble de la documentation relative aux essais de type, mais ne veulent voir qu'une partie des informations qu'elle contient. Dans ce but, au minimum, les aspects suivants doivent être consignés dans la documentation utilisateur généralement disponible, bien que celle-ci puisse ne pas être demandée dans un document unique.

Le schéma bloc montrant le principe de fonctionnement de l'élément de protection thermique, y compris l'interaction de tous les signaux binaires d'entrée et de sortie avec la fonction;

- les détails de la grandeur d'alimentation d'entrée et le type de mesure utilisée par la fonction de protection thermique;
- les détails des courbes caractéristiques de fonctionnement disponibles pour les états de fonctionnement et de dégagement, qui ont été mis en œuvre dans la fonction, de préférence au moyen d'une équation;
- les détails de la plage de fonctionnement (valeurs  $I_{\min}$  et  $I_{\max}$ ) et le comportement de la fonction pour des courants supérieurs à la plage de fonctionnement, dans des conditions de courant de défaut élevé (par exemple si la fonction est bloquée ou  $I_{\text{eq}}$  est limité à  $I_{\max}$ );
- les détails de tous les réglages utilisés par la fonction, y compris  $k$ ,  $q$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  et  $F_a$ ;
- les détails du comportement lié à la sécurité par rapport à la gestion de la mémoire du niveau thermique en cours en cas de perte de l'alimentation auxiliaire, aux réglages par défaut ou réglages usine, aux réglages d'utilisateur et aux procédures de réglage associés;
- les détails de tout algorithme spécifique mis en œuvre pour améliorer l'applicabilité de cette fonction thermique à un réseau électrique réel et leurs déclarations de performance. Dans le cas des algorithmes génériques utilisés par plusieurs fonctions, par exemple, supervision de transformateur de courant ou RTD pour la température ambiante, la température du liquide de refroidissement, la température de l'huile isolante ou la température des enroulements, il est suffisant de décrire une fois le fonctionnement de l'algorithme dans la documentation utilisateur, mais son effet sur le fonctionnement de toutes les fonctions doit être décrit;
- toutes les déclarations requises par l'Article 5 de la présente norme doivent être clairement formulées.

## Annexe A (informative)

### Modèle thermique du premier ordre simple d'un dispositif électrique

#### A.1 Généralités

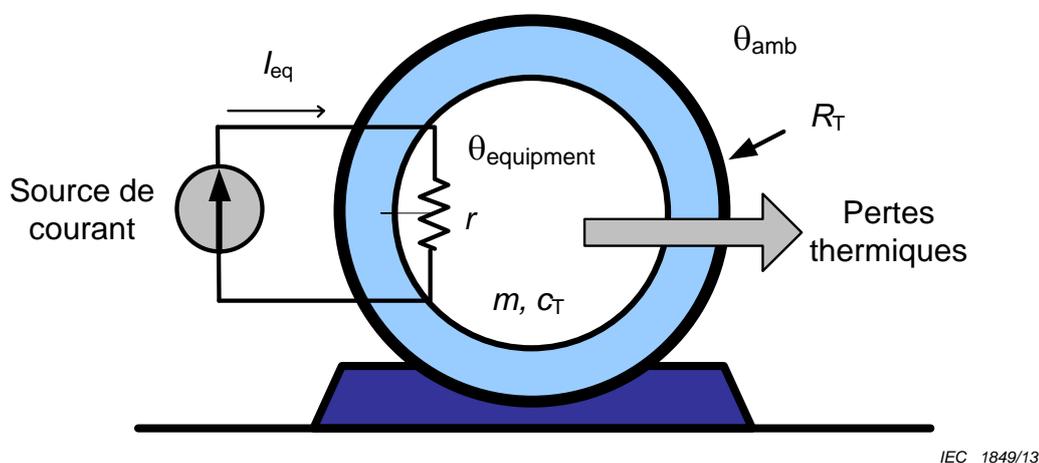
Cette Annexe A présente les bases des équations différentielles temps-courant utilisées pour la modélisation de la protection thermique. Un modèle thermique du premier ordre est utilisé pour représenter le dispositif électrique à protéger thermiquement.

Cette Annexe A présente également un algorithme récursif pour calculer et suivre en permanence et en temps réel, le niveau thermique réel d'un processus thermique du premier ordre simple qui convient à une mise en œuvre numérique dans des dispositifs de protection basés sur un microprocesseur.

#### A.2 Représentation de processus thermique du premier ordre simple d'un dispositif électrique

##### A.2.1 Généralités

On considère un système thermique du premier ordre simple représenté par un dispositif électrique générique à protéger thermiquement, modélisé par une résistance ( $r$ ), représentant la résistance ohmique de l'enroulement à travers lequel un courant équivalent d'échauffement ( $I_{eq}$ ) circule, comme cela est représenté à la Figure A.1.



IEC 1849/13

Figure A.1 – Dispositif électrique à protéger thermiquement représenté comme un système thermique du premier ordre simple

##### A.2.2 Calcul du courant d'échauffement équivalent ( $I_{eq}$ )

La source de chaleur est représentée par un courant d'échauffement équivalent  $I_{eq}$ .

En général, le courant d'échauffement équivalent ( $I_{eq}$ ) est égal au courant de phase en valeur efficace. Toutefois, pour les applications de protection moteur, d'autres sources de chaleur doivent être considérées et elles sont décrites ci-après.

Pour une application de protection moteur, le modèle thermique doit être complété pour refléter l'échauffement supplémentaire provoqué par la composante inverse des courants phase, quand le moteur fonctionne. Cet impact peut être pris en compte en définissant un

courant d'échauffement de moteur équivalent plutôt qu'en utilisant simplement des valeurs moyennes du courant efficace dans les 3 phases.

Des courants de phase du moteur non équilibrés entraîneront un échauffement du rotor qui n'est pas représenté sur la courbe des dommages thermiques du moteur. Quand le moteur fonctionne, le rotor tourne dans la direction de la composante directe des courants de phase à une vitesse presque synchrone. La composante inverse des courants de phase, qui a une rotation de phase opposée à la composante directe, et par conséquent opposée à la direction de la rotation du rotor, produira une tension au niveau du rotor qui générera un courant important dans les circuits du rotor. Ce courant aura une fréquence environ deux fois supérieure à la fréquence de ligne: 100 Hz pour un système 50 Hz ou 120 Hz pour un système 60 Hz.

L'effet de peau dans les barres du rotor à cette fréquence causera une augmentation importante de la résistance du rotor et donc, une augmentation importante de l'échauffement du rotor. Cet échauffement supplémentaire n'est pas pris en compte dans les courbes de limite thermique fournies par le fabricant de moteurs, parce que ces courbes supposent des courants phase sans composante inverse issus d'une conception de moteur et d'une tension d'alimentation parfaitement équilibrées.

Pour tenir compte de l'effet des conditions non équilibrées, le courant d'échauffement équivalent peut être calculé selon l'équation suivante:

$$I_{eq} = \sqrt{I_{rms}^2 + q \cdot I_2^2} \quad (A.1)$$

où

$I_{eq}$  est le courant d'échauffement équivalent;

$I_{rms}$  est la valeur efficace du courant de phase;

$I_2$  est la composante inverse des courants de phase;

$q$  est le facteur de déséquilibre, une constante réglable par l'utilisateur, proportionnelle à la capacité thermique du moteur électrique (dispositif à protéger thermiquement).

Le coefficient  $q$  est un facteur se rapportant à l'échauffement supplémentaire produit par la composante inverse des courants de phase ( $I_2$ ) par rapport à la composante directe ( $I_{rms}$ ). Le facteur  $q$  est utilisé pour tenir compte de l'influence de la composante inverse sur le courant d'échauffement équivalent ( $I_{eq}$ ) dans des applications de protection thermique de moteur. Il convient de régler ce facteur égal au rapport entre la résistance du rotor de séquence négative et la résistance du rotor de séquence positive à une vitesse assignée du moteur.

Les valeurs de résistance de rotor positive et négative doivent être obtenues à partir des fiches techniques ou de la documentation sur le moteur du fabricant de moteurs.

NOTE 1 Quand un réglage exact de la résistance de rotor positive/négative n'est pas publié par le fabricant de moteurs ou ne peut pas être calculé, on peut utiliser des valeurs typiques de  $q$  allant de 3 (trois) à 5 (cinq). C'est un réglage typique qui conviendra à la plupart des applications de protection thermiques de moteur.

NOTE 2 Pour des applications de protection thermique de dispositif électrique tels que des transformateurs de puissance, des câbles, des lignes et des condensateurs, on peut mettre à zéro le facteur  $q$ .

### A.2.3 Modèle thermique du premier ordre de dispositif électrique

La température ambiante est  $\theta_{amb}$  et la température du dispositif est  $\theta_{equipment}$ . La température du dispositif ne doit pas dépasser la température thermique limite selon sa classe de catégorie thermique d'isolation électrique (EIS: Electrical Insulation System), conformément à la CEI 60085 et la CEI 60034-11. Cette température est définie comme la température maximale du point chaud  $\theta_{max}$  et au-delà de ce point, le courant d'échauffement équivalent d'entrée doit être coupé par un dispositif de protection.

Un système thermique du premier ordre simple peut être modélisé par une résistivité thermique localisée sur l'environnement voisin ( $R_T$ , exprimée en °C/W), par une masse ( $m$ , exprimée en kg) et par la capacité d'échauffement spécifique du système thermique ( $c_T$ , exprimée en J/kg/°C).

La résistivité thermique ( $R_T$ ) est une constante qui dépend du niveau d'isolation du système thermique par rapport à l'environnement et des propriétés mécaniques. Plus la valeur de  $R_T$  est grande, moins la chaleur est transférée à l'environnement voisin. Plus la valeur de  $R_T$  est petite, plus la chaleur est transférée à l'environnement voisin.

On peut définir  $\theta$  comme la température du système thermique (dispositif) au-delà de la température ambiante, selon l'équation suivante:

$$\theta = \theta_{\text{equipment}} - \theta_{\text{amb}} \quad (\text{A.2})$$

L'augmentation de l'échauffement du dispositif (système thermique) est obtenue par l'équation différentielle exprimant l'équilibre thermique:

$$\text{Puissance}_{\text{fournie}} - \text{Pertes}_{\text{thermiques}} = m c_T \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (\text{A.3})$$

où

$m$  est la masse du système thermique (dispositif), en considérant un modèle localisé (kg)

$c_T$  est l'échauffement spécifique du système thermique (dispositif), en considérant un modèle localisé (J/kg/°C)

La capacité thermique ( $C_T$ ) du système thermique (dispositif) est le produit de sa masse ( $m$ ) par son échauffement spécifique ( $c_T$ ), conformément à l'équation suivante:

$$C_T = m \times c_T \quad (\text{A.4})$$

Les pertes thermiques ou l'échauffement transféré par le dispositif (système thermique) à l'environnement voisin peuvent être exprimés par l'équation suivante:

$$\text{Pertes}_{\text{thermiques}} = \frac{\theta_{\text{equipment}} - \theta_{\text{amb}}}{R_T} = \frac{\theta(t)}{R_T} \quad (\text{A.5})$$

À partir des Equations (A.4) et (A.5), l'Equation (A.3) peut s'écrire sous la forme:

$$r_{\text{eq}}^2 - \frac{\theta(t)}{R_T} = C_T \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (\text{A.6})$$

ou

$$R_T r_{\text{eq}}^2 = R_T C_T \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (\text{A.7})$$

Le produit de la résistance thermique ( $R_T$ ) par la capacité thermique ( $C_T$ ) s'exprime en secondes et représente la constante de temps thermique ( $\tau$ ) d'un système thermique du premier ordre:

$$\tau = R_T \cdot C_T \quad (\text{A.8})$$

L'Equation (A.7) peut s'exprimer sous la forme:

$$R_T r_{\text{eq}}^2 = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (\text{A.9})$$

L'augmentation de température en régime établi au-delà de la température ambiante pour un dispositif fonctionnant avec un courant  $I_{\text{eq}}$  est obtenue en réglant  $d\theta(t) / dt = 0$  dans l'Equation (A.9). Dans cette condition, l'augmentation de la température nominale ( $\theta_{\text{nom}}$ ), résultant du courant de fonctionnement nominal équivalent ( $I_{\text{eq nom}}$ ) est donnée par:

$$R_T r_{\text{eq nom}}^2 = \theta_{\text{nom}} \quad (\text{A.10})$$

En utilisant des valeurs par unité, le courant réel du dispositif fonctionnant, mesuré par le relais de protection, en tenant compte des effets d'échauffement des composantes directe et inverse des courants pour des applications de moteur, utilisant le courant nominal du dispositif, est donné par:

$$I_{\text{eq}} = I_{\text{eq pu}} \cdot I_{\text{eq nom}} \quad (\text{A.11})$$

En utilisant cette valeur de courant par unité, l'Equation (A.9) peut s'écrire sous la forme:

$$R_T r_{\text{eq pu}}^2 \cdot I_{\text{eq nom}}^2 = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (\text{A.12})$$

En remplaçant l'Equation (A.10) dans l'Equation (A.12) on obtient:

$$I_{\text{eq pu}}^2 \theta_{\text{nom}} = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad (\text{A.13})$$

ou

$$I_{\text{eq pu}}^2 = \tau \frac{d\theta(t) / \theta_{\text{nom}}}{dt} + \frac{\theta(t)}{\theta_{\text{nom}}} \quad (\text{A.14})$$

Les relais de protection thermique basés sur la mesure de courant ne mesurent pas la température directement. La variable  $\theta(t) / \theta_{\text{nom}}$  représente l'augmentation de température du dispositif (système thermique), au-delà de la température ambiante, en valeurs par unité lorsque le courant nominal circule dans le dispositif. Cette variable peut être considérée comme le niveau thermique réel du dispositif et appelée  $H(t)$ :

$$H(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_{\text{nom}}} \quad (\text{A.15})$$

L'Equation (A.14) peut donc s'écrire sous la forme:

$$I_{\text{eq pu}}^2 = \tau \frac{dH(t)}{dt} + H(t) \quad (\text{A.16})$$

On peut remarquer que le niveau thermique réel du dispositif ( $H(t)$ ) est proportionnel au courant par unité réel du dispositif, élevé au carré ( $I_{\text{eq}}^2$ ).

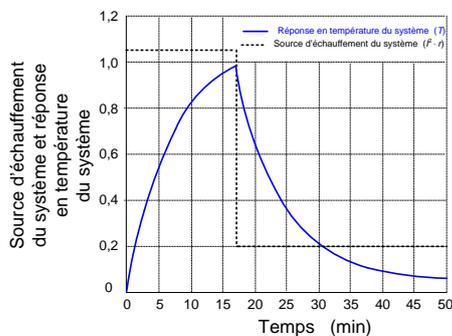
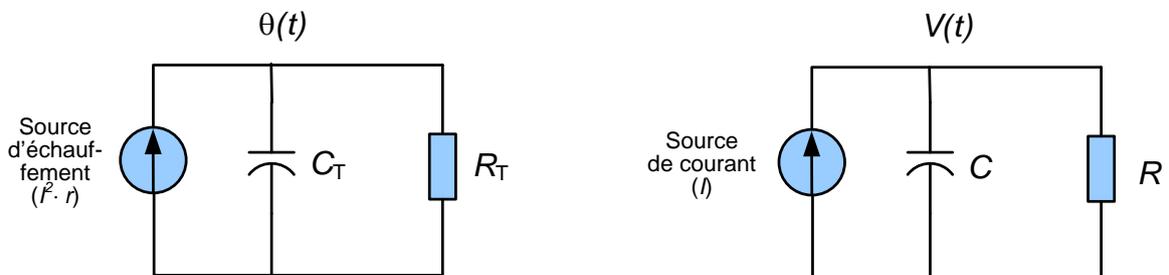
### A.3 Modèles de circuits thermiques et électriques analogiques

L'Equation (A.7) est une équation différentielle du premier ordre et présente une équivalence avec un circuit électrique de type RC alimenté par une source de courant. La puissance délivrée au dispositif dans le processus thermique ( $I^2.r$ ) est équivalente à la source de courant ( $I$ ) alimentant le circuit électrique RC parallèle. La température dans le processus thermique ( $\theta(t)$ ) est équivalente à la tension ( $V(t)$ ) aux bornes du condensateur dans le circuit RC. L'équivalence entre les deux systèmes est représentée à la Figure A.2 et dans le Tableau A.1. Quand l'alimentation est une fonction d'échelon de courant, les temps de réponse de la température dans le modèle thermique et de la tension dans le modèle électrique ont la même forme.

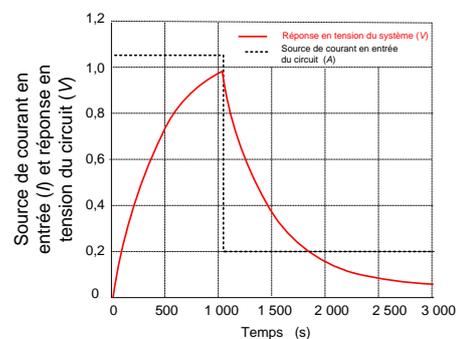
Tableau A.1 – Modèles thermique et électrique

Modèle thermique	Modèle électrique
Circuit thermique analogique d'un système thermique du premier ordre	Circuit électrique analogique d'un circuit RC parallèle
$I^2.r = C_T.R_T \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t)$	$I = C \cdot \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R}$
Equation différentielle d'un système thermique du premier ordre	Equation différentielle d'un système électrique du premier ordre
Réponse du système thermique à une entrée d'échelon de courant d'échauffement	Réponse du système électrique à une entrée d'échelon de courant

Les représentations des circuits thermiques analogiques d'un processus thermique sont données dans les Figures A.3, A.4 et A.5. Dans ces figures, la tension aux bornes de la capacité thermique ( $C_T$ ) a une valeur proportionnelle à l'élévation de température au-delà de la température ambiante. Quand le courant appliqué est nul, cette tension devient nulle.



IEC 1850/13

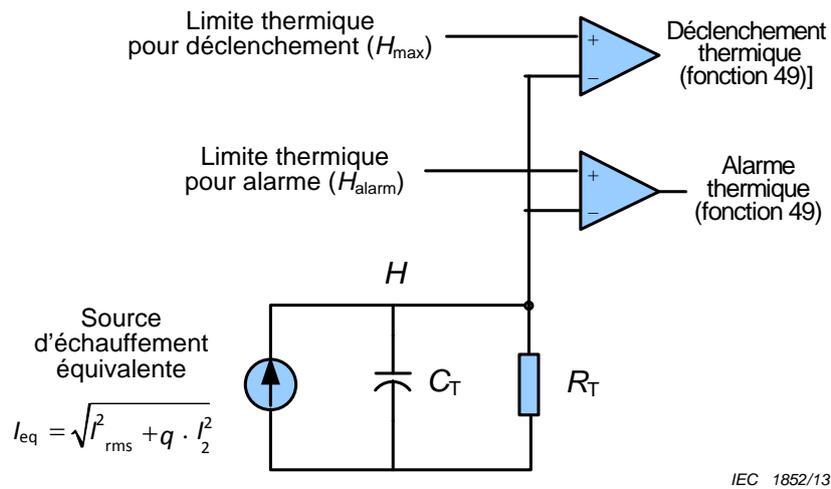


IEC 1851/13

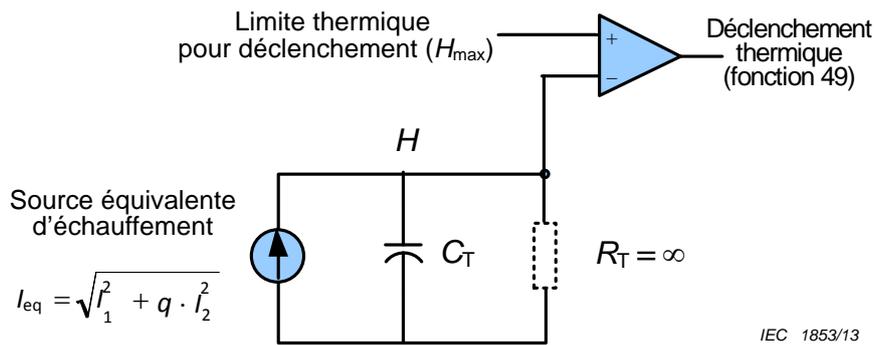
a) Modèle thermique – Réponse dynamique d'un système thermique du premier ordre

b) Modèle électrique – Réponse dynamique d'un circuit RC parallèle du premier ordre

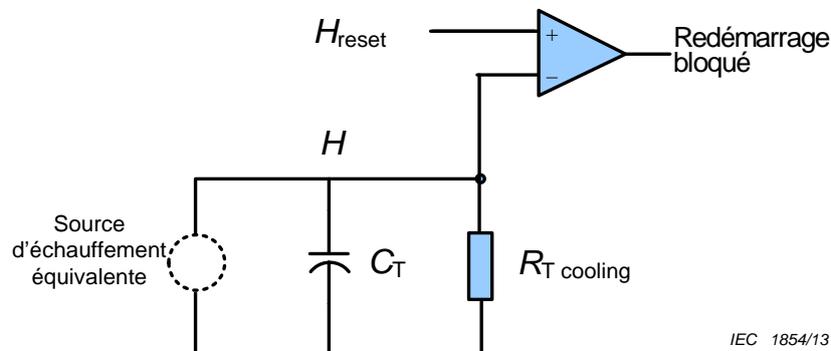
Figure A.2 – Équivalence entre un système thermique du premier ordre et un circuit électrique RC parallèle



**Figure A.3 – Représentation d'un circuit thermique analogique d'un système thermique du premier ordre simple**



**Figure A.4 – Représentation d'un circuit thermique analogique d'un système thermique du premier ordre simple – condition de démarrage de moteur**



NOTE L'état de la sortie "redémarrage bloqué" a une valeur logique 1 quand  $H > H_{reset}$  (blocage des ordres de démarrage du moteur) Sinon, si  $H < H_{reset}$ , l'état de la sortie «redémarrage bloqué» est à la valeur logique 0 (tentative d'un nouveau démarrage du moteur autorisée).

**Figure A.5 – Représentation d'un circuit thermique analogique d'un système thermique du premier ordre simple – condition de moteur arrêté**

#### A.4 Dynamique d'un système de protection thermique basée sur un processus thermique du premier ordre simple

L'équation différentielle d'un système thermique du premier ordre peut être écrite comme un algorithme temporel discret récursif, approprié pour la mise en œuvre dans un dispositif de protection basé sur un microprocesseur.

L'Equation (A.16) sous forme discrète, peut donc s'écrire:

$$I_{\text{eq pu}}^2 = \tau \cdot \frac{H_n - H_{n-1}}{\Delta t} + H_n \quad (\text{A.17})$$

où

$H_n$  et  $H_{n-1}$  sont deux valeurs consécutives du niveau thermique du dispositif réel, se rapportant à deux échantillons consécutifs de courant, déplacés d'un intervalle de temps, dans un processus discret récursif du courant équivalent mesuré (valeurs prélevées  $n$  et  $n-1$  de  $I_{\text{eq}}$ );

$\Delta t$  est l'intervalle de temps entre deux échantillons consécutifs de courant d'entrée.

La solution de l'Equation (A.17) pour  $H_n$  donne la forme récursive en temps discret suivante de l'équation différentielle, qui est traitée à chaque période d'échantillon pour calculer la valeur réelle de la réponse du modèle thermique:

$$H_n = I_{\text{eq pu}}^2 \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H_{n-1} \quad (\text{A.18})$$

La valeur de la constante de temps thermique ( $\tau$ ) à utiliser par l'algorithme doit être conforme à l'état réel du dispositif protégé. Pour des applications de moteur auto-ventilé, par exemple, la constante de temps thermique du moteur pour l'état fonctionnant ( $\tau_1$ ) est normalement plus petite que la constante de temps thermique du moteur pour l'état arrêté ( $\tau_2$ ).

Pour un dispositif en fonctionnement,  $I_{\text{eq}}(t) \geq 0$  ou  $I_{\text{eq}}(t)$  supérieur à un seuil de courant d'entrée fixe indiqué par le fabricant de la protection thermique, la constante de temps thermique  $\tau_1$  est applicable, et le niveau thermique du dispositif peut être calculé par l'équation suivante:

$$H_n = I_{\text{eq pu}}^2 \frac{\Delta t}{\tau_1 + \Delta t} + \frac{\tau_1}{\tau_1 + \Delta t} \cdot H_{n-1} \quad (\text{A.19})$$

Sinon, de manière similaire, pour un dispositif non alimenté,  $I_{\text{eq}}(t) \approx 0$  ou  $I_{\text{eq}}(t)$  inférieur à un seuil de courant d'entrée fixe indiqué par le fabricant de la protection thermique, la constante de temps thermique  $\tau_2$  est applicable, et le niveau thermique du dispositif peut être calculé par l'équation suivante:

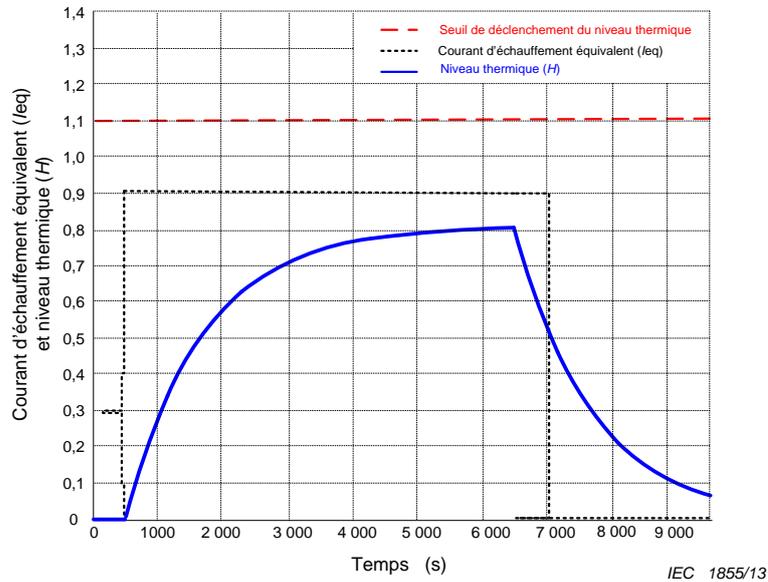
$$H_n = I_{\text{eq pu}}^2 \frac{\Delta t}{\tau_2 + \Delta t} + \frac{\tau_2}{\tau_2 + \Delta t} \cdot H_{n-1} \quad (\text{A.20})$$

L'Equation (A.18) peut être considérée comme la base d'un algorithme de temps discret qui permet à un relais électrique thermique de protection basé sur microprocesseur de calculer en permanence et en temps réel, le niveau thermique réel d'un système thermique du premier

ordre pendant différentes conditions de fonctionnement, telles que le démarrage, une charge normale et des conditions de surcharge.

En mettant en œuvre cet algorithme il est également possible de surveiller et suivre le niveau thermique, et de confirmer un déclenchement ou un signal d'alarme quand il dépasse des seuils prédéterminés.

La Figure A.6 représente un exemple de réponse dynamique d'un algorithme de modèle thermique du premier ordre à un courant inférieur au seuil de fonctionnement (0,9 pu, dans l'exemple, en considérant  $k = 1,05$ ). Le niveau thermique augmente exponentiellement, en fonction de la source d'échauffement d'entrée et de la constante de temps thermique, jusqu'au niveau d'équilibre thermique en régime établi de  $0,9^2$ .



**Figure A.6 – Réponse dynamique indicielle d'un algorithme de système thermique du premier ordre pour un courant inférieur au seuil de fonctionnement**

Les Figures A.7 et A.8 représentent des exemples de réponses dynamiques lorsqu'on soumet un courant équivalent de surcharge (1,15 pu, dans l'exemple, en considérant  $k = 1,05$ ), suivi d'un courant de charge constant inférieur au seuil de fonctionnement (0,5 pu dans l'exemple).

Dans l'exemple de la réponse dynamique représenté à la Figure A.7, le dispositif est à l'état froid initial ( $H_0 = 0$ ). Dans l'exemple de la réponse dynamique représenté à la Figure A.8, le dispositif est à l'état chaud initial ( $H_0 = 0,6$ , dans l'exemple). Dans les deux cas, la réponse du modèle thermique du premier ordre montre une augmentation exponentielle jusqu'à une valeur maximum, conformément à la constante de temps thermique du système thermique, suivie d'une diminution exponentielle jusqu'à la valeur finale, correspondant au courant équivalent à la charge ( $0,5^2 = 0,25$ , dans l'exemple).

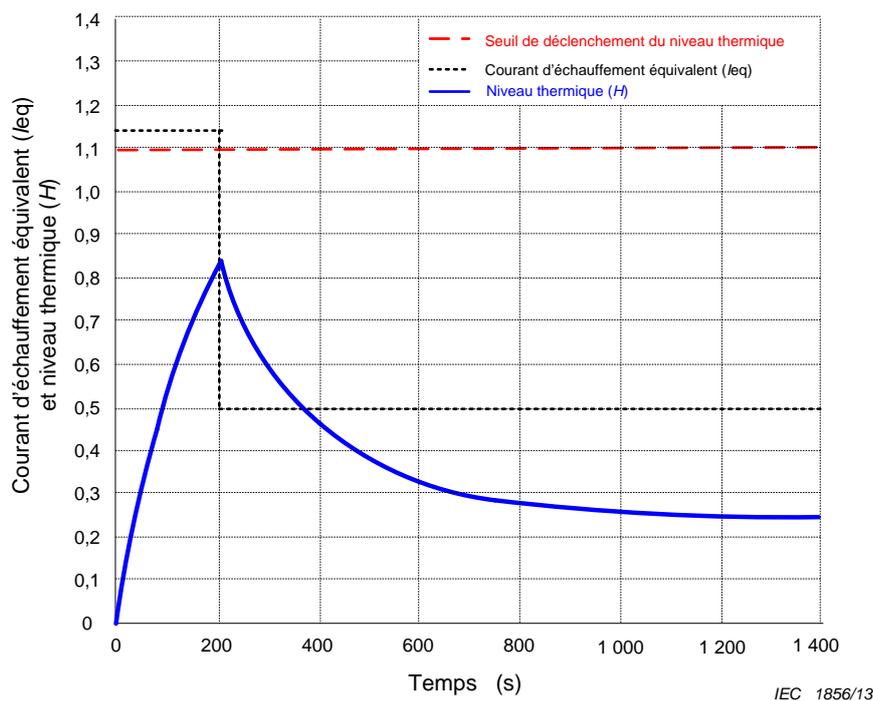


Figure A.7 – Réponse dynamique indicelle d'un système thermique du premier ordre (état initial froid)

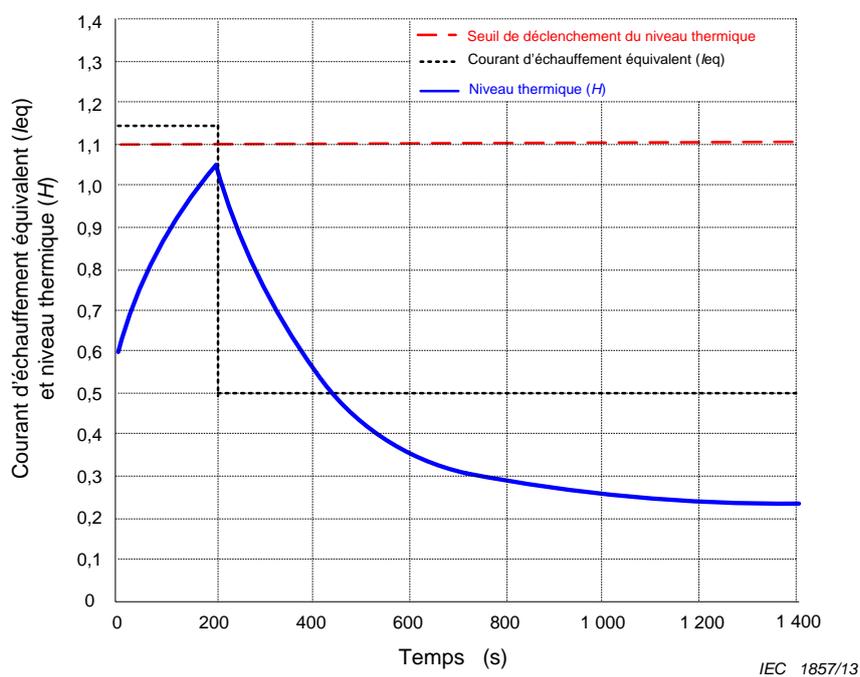
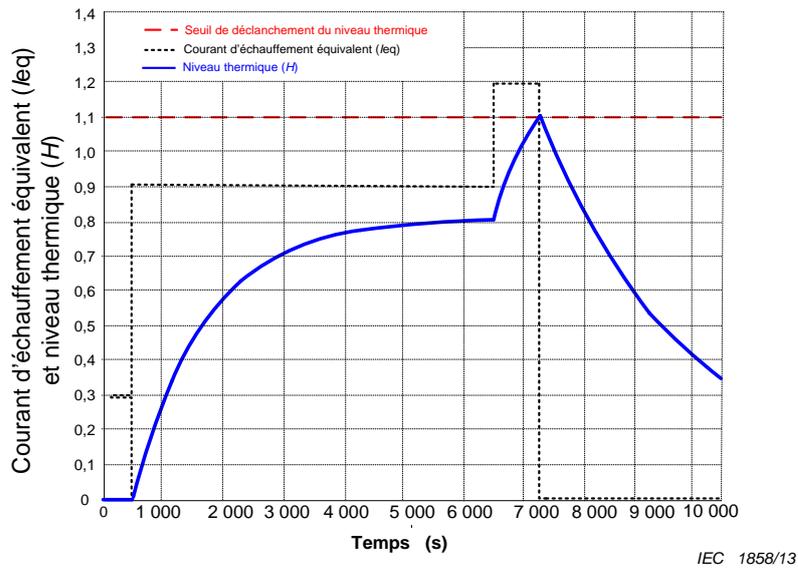


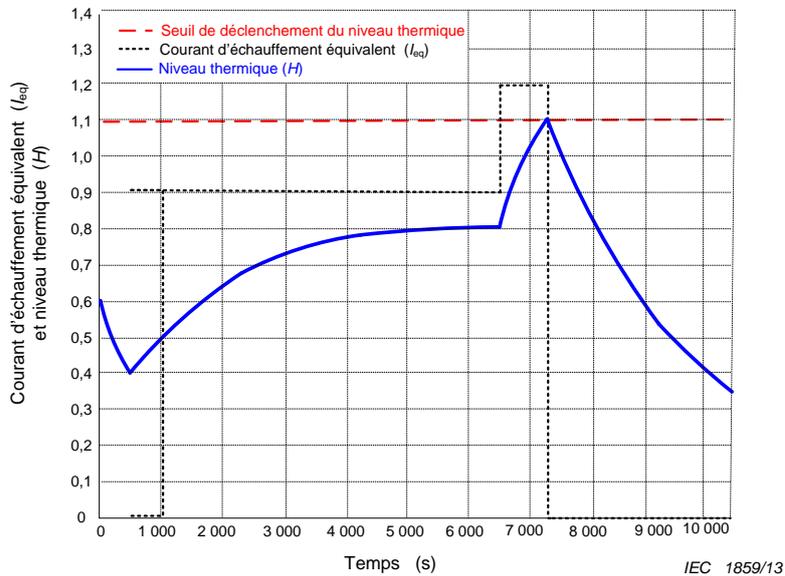
Figure A.8 – Réponse dynamique indicelle d'un système thermique du premier ordre (état initial chaud)

La Figure A.9 représente un exemple de réponse dynamique lorsqu'on soumet un courant équivalent de charge (0,9 pu, dans l'exemple), suivi d'un courant correspondant à une surcharge (1,2 pu dans l'exemple, en considérant  $k = 1,05$ ). État initial: froid (niveau thermique préalable = 0). Le seuil thermique de fonctionnement est  $k^2 = 1,10$ , ce qui entraîne un fonctionnement du dispositif de protection thermique.



**Figure A.9 – Réponse dynamique indicielle d'un système thermique du premier ordre pour un courant de charge suivi d'un courant de surcharge (état initial: froid)**

La Figure A.10 représente un exemple de réponse dynamique lorsqu'on soumet un courant équivalent de charge (0,9 pu, dans l'exemple), suivi d'un courant de surcharge (1,2 pu dans l'exemple, en considérant  $k = 1,05$ ). État initial: chaud (niveau thermique préalable = 0,6). Le seuil thermique de fonctionnement est  $k^2 = 1,10$ , ce qui entraîne un fonctionnement du dispositif de protection thermique.



**Figure A.10 – Réponse dynamique indicielle d'un système thermique du premier ordre pour un courant de charge suivi d'un courant de surcharge (état initial: chaud)**

### A.5 Solution dans le domaine temporel pour l'équation différentielle d'un modèle thermique en fonction de la limite de courant et de temps

La solution dans le domaine temporel de l'Equation (A.9) est le temps nécessaire pour que la température augmente de la température initiale (déterminée par le courant de charge

préalable) à la limite thermique pré-réglée, qui détermine le fonctionnement (déclenchement) du relais de protection.

La solution dans le domaine temporel pour le modèle thermique en fonction du temps et du courant de charge équivalent (en supposant  $I_{eq}$  constant) est (en considérant  $\theta_0 = 0$ ):

$$\theta(t) = R_T r_{eq}^2 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (A.21)$$

Sachant que  $\theta$  est la température au-delà de la température ambiante, elle peut être obtenue pour l'expression de la température du système thermique (dispositif):

$$\theta_{equipment}(t) = R_T r_{eq}^2 (1 - e^{-t/\tau}) + \theta_{amb} \quad (A.22)$$

Quel que soit le courant de charge équivalent délivré au système thermique, il y aura toujours une augmentation de la température du système thermique. La température finale du dispositif en régime établi (système thermique) pour un courant de charge équivalent constant est conforme à l'équation suivante:

$$\theta_{equipment}(t \rightarrow \infty) = R_T r_{eq}^2 + \theta_{amb} \quad (A.23)$$

En supposant que le système thermique (dispositif) a un courant équivalent de fonctionnement  $I_{eq\ op}$  assigné préalable, que l'on appelle également courant de charge dans certaines applications, la température de fonctionnement en régime établi du dispositif (système thermique) est donnée par l'équation suivante:

$$\theta_{op} = R_T r_{eq\ op}^2 + \theta_{amb} \quad (A.24)$$

La température du système thermique (dispositif) ne doit pas dépasser une température maximale  $\theta_{max}$ , établie pour son système thermique d'isolation électrique. Alors, l'équation avec le temps comme variable est:

$$\theta_{max} = R_T r_{eq}^2 (1 - e^{-t_{trip}/\tau}) + \theta_{amb} \quad (A.25)$$

La résolution de l'Equation (A.25) pour la variable  $t_{trip}$  donne l'équation temps-courant suivante:

$$t_{trip} = \tau \cdot \ln \frac{R_T r_{eq}^2}{R_T r_{eq}^2 - (\theta_{max} - \theta_{amb})} \quad (A.26)$$

Définissant le courant  $I_{eq\ max}$  comme le courant maximal qui peut être délivré par la source de chaleur à la résistance d'échauffement sans que le système thermique (dispositif) n'atteigne la température maximale quand le temps tend vers l'infini. Le courant maximal devrait satisfaire à l'Equation (A.24) comme dans:

$$\theta_{max} = R_T r_{eq\ max}^2 + \theta_{amb} \quad (A.27)$$

ou

$$\theta_{\max} - \theta_{\text{amb}} = R_T r_{\text{eq max}}^2 \quad (\text{A.28})$$

En remplaçant l'expression  $\theta_{\max} - \theta_{\text{amb}}$  de l'Equation (A.28) dans l'Equation (A.26), on obtient:

$$t_{\text{trip cold}} = \tau \cdot \ln \frac{R_T r_{\text{eq}}^2}{R_T r_{\text{eq}}^2 - R_T r_{\text{eq max}}^2} \quad (\text{A.29})$$

ou

$$t_{\text{trip cold}} = \tau \cdot \ln \frac{I_{\text{eq}}^2}{I_{\text{eq}}^2 - I_{\text{eq max}}^2} \quad (\text{A.30})$$

L'Equation (A.30) donne finalement le temps pour atteindre la température maximale (point chaud) en fonction du courant maximal équivalent. L'Equation (A.30) est également importante parce qu'elle supprime les références à toutes les variables de température et les remplace par le courant maximal  $I_{\text{eq max}}$ .

Il convient de noter que l'Equation (A.30) n'a pas de solution sauf si:

$$I_{\text{eq}} > I_{\text{eq max}} \quad (\text{A.31})$$

Tout courant inférieur à  $I_{\text{eq max}}$  augmentera exponentiellement la température du système thermique à une température en régime établi donnée par l'Equation (A.21).

Dans l'Equation (A.30), le temps pour atteindre la température maximale est exprimé implicitement par rapport à la température ambiante ou avec un courant de charge initial égal à zéro.

Il est nécessaire de développer une équation pour le temps pour atteindre le niveau thermique maximal (point chaud) quand le courant en régime établi est le courant de fonctionnement  $I_{\text{eq op}}$ .

Dans l'Equation (A.22), le temps pour atteindre la température maximale commence avec la température ambiante (ou avec le courant de charge délivré égal à zéro). Avec la nouvelle équation, le temps pour atteindre la température maximale commence avec la température de fonctionnement ou avec le courant égal au courant de charge équivalent.

Le temps pour atteindre la température maximale avec un certain courant de fonctionnement équivalent  $I_{\text{eq op}}$  à partir du courant de fonctionnement est égal au temps pour atteindre la température maximale depuis la température ambiante avec le même courant moins le temps pour atteindre la température de fonctionnement depuis la température ambiante avec le même courant.

La température de fonctionnement en régime établi  $\theta_{\text{op}}$  peut être calculée à partir de l'Equation (A.23), conformément à l'équation suivante:

$$\theta_{\text{op}} = R_T r_{\text{eq op}}^2 + \theta_{\text{amb}} \quad (\text{A.32})$$

ou

$$\theta_{op} - \theta_{amb} = R_T r I_{eq}^2 \quad (A.33)$$

Le temps  $t_{op}$  pour atteindre la température de fonctionnement depuis la température ambiante pour un courant équivalent  $I_{eq}$  peut être calculé à partir de l'Equation (A.22):

$$\theta_{op} = I_{eq}^2 r R_T \left(1 - e^{-t_{op}/\tau}\right) + \theta_{amb} \quad (A.34)$$

À partir de cette équation (A.34), on peut calculer le temps de fonctionnement ( $t_{op}$ ), en résolvant comme suit:

$$t_{op} = \tau \ln \frac{R_T r I_{eq}^2}{R_T r I_{eq}^2 - (\theta_{op} - \theta_{amb})} \quad (A.35)$$

En remplaçant l'expression  $\theta_{op} - \theta_{amb}$  par sa valeur donnée dans l'Equation (A.33) dans l'Equation (A.35), on obtient:

$$t_{op} = \tau \ln \frac{R_T r I_{eq}^2}{R_T r I_{eq}^2 - R_T r I_{eq}^2} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2} \quad (A.36)$$

Finalement, le temps nécessaire au déclenchement à partir de la température ou du courant de fonctionnement est donné par l'équation suivante:

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ max}^2} - \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2} \quad (A.37)$$

ou

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ max}^2} \quad (A.38)$$

Cette équation (A.38) donne le temps pour atteindre la température maximale (point chaud) pour un courant équivalent  $I_{eq}$  en commençant depuis une température de fonctionnement ou un courant de fonctionnement équivalent  $I_{eq\ op}$  préalable.

Le courant équivalent maximal est défini par le facteur  $k$  (voir 3.4) comme:

$$I_{eq\ max} = k I_B \quad (A.39)$$

En remplaçant l'expression (A.39) dans (A.38), on obtient:

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2}{I_{eq}^2 - (k I_B)^2} \quad (A.40)$$

L'Equation (A.40) est le temps nécessaire au déclenchement basé sur la courbe caractéristique à chaud, comme indiqué dans l'Equation (A.6) de cette norme. Ainsi, dans l'algorithme indiqué dans l'Equation (A.18), en mettant en œuvre un processus récursif d'une équation différentielle en temps discret d'un système thermique du premier ordre, les équations temps-courant pour les états froid et chaud données dans les Equations (A.30) et (A.40) sont intégrées de manière intrinsèque dans le processus.

Quand la protection thermique est mise en œuvre en utilisant l'algorithme indiqué dans l'Equation (A.18), les équations caractéristiques de limite temps-courant à froid et à chaud données dans l'Equation (A.5) (état froid) et l'Equation (A.6) (état chaud) de cette norme sont intégrées de manière intrinsèque dans le processus, indépendamment du niveau thermique de début ou du courant de charge préalable du dispositif.

L'algorithme indiqué dans l'Equation (A.18) calcule en permanence et en temps réel, l'état réel du modèle thermique, qui est approprié pour une mise en œuvre numérique dans des dispositifs de protection basés sur un microprocesseur. L'enregistrement de l'historique thermique et un réglage de pré-alarme avant le déclenchement quand une surcharge se produit, empêchent des déclenchements accidentels et des arrêts du processus.

## A.6 Dérivation du facteur de température ambiante $F_a$

Dans l'Equation (A.15), qui définit le niveau thermique  $H(t)$  du dispositif, la variable  $\theta_{nom}$  peut être remplacée par l'expression définie par l'Equation (A.10):

$$H(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_{nom}} = \frac{\theta_{equipment} - \theta_{amb}}{\theta_{nom}} = \frac{\theta_{equipment} - \theta_{amb}}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \quad (A.41)$$

Quand la température du dispositif  $\theta_{equipment}$  atteint la température maximale  $\theta_{max}$  permise par la classe d'isolation, le niveau thermique  $H(t)$  est égal à l'équation suivante:

$$H_{max} = \frac{\theta_{max} - \theta_{amb}}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \quad (A.42)$$

où

$H_{max}$  est le niveau thermique maximal à atteindre qui fait fonctionner la protection thermique.

Le dispositif de protection thermique calcule le niveau thermique  $H(t)$ , qui tient compte de la température ambiante (ou d'environnement)  $\theta_{amb}$ . Dans les applications usuelles, le seuil est généralement défini pour une température ambiante de 40 °C. Dans ce cas, le réglage pour le seuil de niveau thermique est équivalent à un niveau thermique maximal, selon l'équation suivante:

$$H_{setting} = \frac{\theta_{max} - 40}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \quad (A.43)$$

où

$H_{setting}$  est le niveau thermique maximal à atteindre par le dispositif pour être protégé thermiquement, en considérant une température ambiante différente de 40 °C, ce qui fait fonctionner la fonction de protection thermique.

Quand la température ambiante (ou d'environnement) fluctue et n'est pas égale à 40 °C, le réglage appliqué au calcul de niveau thermique n'est pas égal au niveau thermique maximal autorisé par la classe d'isolation.

La relation entre les 2 seuils est définie comme le facteur de correction  $F_a$ , conformément à l'équation suivante:

$$\frac{H_{\text{setting}}}{H_{\text{max}}} = \frac{\theta_{\text{max}} - 40}{\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{amb}}} = F_a \quad (\text{A.44})$$

Lorsque cela est applicable et quand le dispositif de protection thermique a une entrée de mesure de la température ambiante, le calcul du niveau thermique  $H(t)$  peut être augmenté par le facteur  $F_a$ , pour tenir compte de la température ambiante (ou d'environnement) réelle  $T_a$ . La condition pour activer le signal de sortie sera définie conformément à l'inégalité suivante:

$$H(t) \geq H_{\text{max}} \Leftrightarrow H(t) \cdot \frac{H_{\text{setting}}}{H_{\text{max}}} \geq H_{\text{setting}} \Leftrightarrow H(t) \cdot F_a \geq H_{\text{setting}} \quad (\text{A.45})$$

La CEI 60085 définit la température maximale  $T_{\text{max}}$  en fonction de la classe d'isolation thermique, comme indiqué dans le Tableau A.2.

**Tableau A.2 – Classes d'isolation thermique et températures maximales, selon la CEI 60085**

<b>Classe thermique</b>	Y	A	E	B	F	H	N	R	250
$T_{\text{max}}$	90 °C	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C	200 °C	220 °C	250 °C

En se basant sur l'Equation (A.44), les valeurs particulières du facteur de correction de seuil de niveau thermique  $F_a$ , pour un dispositif industriel typique avec une classe d'isolation F (155 °C) conformément à la CEI 60085, tel qu'un moteur électrique industriel, pour différentes températures ambiantes de dispositifs sont indiquées dans le Tableau A.3.

**Tableau A.3 – Exemple de valeurs de facteur de correction ( $F_a$ ) pour un dispositif de classe F en fonction de la température ambiante ( $T_a$ )**

<b>Température ambiante du dispositif (<math>T_a</math>)</b>	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
<b>Facteur de correction <math>F_a</math> pour un dispositif de classe F</b>	1,0	1,045	1,095	1,15	1,21

## Annexe B (informative)

### Relais électriques thermiques qui utilisent la température comme paramètres de réglage

#### B.1 Généralités

Cette Annexe fournit des informations sur le réglage et les essais des relais électriques thermiques qui utilisent des températures comme paramètres de réglage.

#### B.2 Interprétation de l'équation thermique différentielle en termes de températures

La formule de l'équation thermique différentielle du premier ordre (B.1) ci-dessous peut être dérivée si  $I_{eq,pu}$  de l'Equation (A.11) est placé dans l'Equation (A.13):

$$I_{eq}^2 \frac{\theta_{nom}}{I_{eq,nom}^2} = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \tag{B.1}$$

où

$\theta$  est la température au-delà de la température ambiante, variant avec le temps;  
 $I_{eq,nom}$  est la valeur nominale (assignée) du courant d'échauffement équivalent;  
 $\theta_{nom}$  est la température en régime établi au-delà de la température ambiante si le courant continu  $I_{eq,nom}$  circule.

Dans l'Equation (B.1), le facteur  $\frac{\theta_{nom}}{I_{eq,nom}^2}$  est le facteur d'échelle entre la température  $\theta$  et le carré du courant  $I^2$ . La valeur du facteur d'échelle est la même si le courant de référence  $I_{eq,ref}$  est donné et la température en régime établi  $\theta_{ref}$  correspondante au-delà de la température ambiante est remplacée, c'est-à-dire.

$$\frac{\theta_{nom}}{I_{eq,nom}^2} = \frac{\theta_{ref}}{I_{eq,ref}^2} = \dots = \frac{\theta_0}{I_0^2} = \frac{\theta_{max}}{I_{max}^2} \tag{B.2}$$

où

$I_{eq,ref}$  est la valeur de référence du courant d'échauffement équivalent;  
 $\theta_{ref}$  est la température de référence en régime établi au-delà de la température ambiante, si le courant  $I_{eq,ref}$  circule en permanence.

L'indice "0" ou "max" signifie ici tout courant et la température correspondante.

Le courant de référence peut prendre n'importe quelle valeur (par exemple un courant assigné de l'objet protégé, un courant assigné du CT), mais la température de référence doit être la température en régime établi au-delà de la température ambiante, qui est atteinte quand le courant de référence circule.

Le fabricant doit définir clairement comment le courant d'échauffement équivalent est calculé (asymétrie, harmoniques).

### B.3 Solution en temps discret de l'équation thermique différentielle en termes de températures

Dans des dispositifs de protection basés sur un microprocesseur, la solution en temps discret de l'équation thermique différentielle du premier ordre (B.1) est mise en œuvre et elle est donnée dans l'Equation (B.3) comme suit:

$$\theta(t) = I_{\text{eq.ref}}^2 \frac{\theta_{\text{ref}}}{I_{\text{eq.ref}}^2} \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \theta(t - \Delta t) \quad (\text{B.3})$$

Le résultat est la température au-delà de la température ambiante. Pour obtenir la température du dispositif protégé, la température ambiante  $\theta_{\text{amb}}$  doit être ajoutée (Voir aussi l'Equation (A.2)):

$$\theta_{\text{equipment}}(t) = I_{\text{eq}}^2 \frac{\theta_{\text{ref}}}{I_{\text{eq.ref}}^2} \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \theta(t - \Delta t) + \theta_{\text{amb}} \quad (\text{B.4})$$

L'application de cette équation suppose que pendant l'intervalle de temps de calcul  $\Delta t$ , le courant équivalent  $I_{\text{eq}}$  puisse être considéré constant, et pendant l'intervalle de temps, la courbe de température variant avec le temps puisse être remplacée par une ligne droite. Les deux critères sont satisfaits si l'intervalle de temps de calcul  $\Delta t$  est bien plus petit que la constante de temps  $\tau$  du processus thermique. Le fabricant doit s'assurer de ceci.

Les Equations (B.3) ou (B.4) montrent clairement les fonctions de mémoire des relais électriques thermiques. La température calculée dans l'intervalle de temps précédent doit être connue pour calculer la valeur suivante de la température. Ceci n'est pas important, si la température de l'intervalle précédent était atteinte dans un processus d'échauffement ou de refroidissement ou si elle avait déjà une valeur de régime établi.

#### Paramètres principaux à fournir par l'utilisateur pour calculer la température au-delà de la température ambiante

- $I_{\text{eq.ref}}$  est la valeur de référence du courant d'échauffement équivalent;
- $\theta_{\text{ref}}$  est la température de référence en régime établi au-delà de la température ambiante, si le courant  $I_{\text{eq.ref}}$  circule en permanence;
- $\tau$  est la constante de temps du processus thermique.

Pour définir  $\theta_{\text{ref}}$ , l'utilisateur doit clairement définir si la valeur doit être indiquée comme la température au-delà de la température ambiante supposée ou comme la différence entre la température mesurée du dispositif et la température ambiante au moment de la mesure.

La constante de temps du processus thermique dépend de l'état du dispositif protégé. Par exemple, pour un moteur, elle n'est pas la même dans un état tournant et à l'arrêt; pour des transformateurs, elle n'est pas la même pour un refroidissement naturel et pour un refroidissement forcé, etc. Le fabricant doit indiquer comment la constante de temps est traitée.

#### Paramètres définissant le fonctionnement d'un relais

Les objets sont protégés contre les températures élevées selon les classes d'isolation thermique, comme indiqué dans la CEI 60085. Ceci est également indiqué comme  $T_{\max}$  dans le Tableau A.2 de la présente norme. Ces températures sont les températures  $\theta_{\text{equipment}}$  maximales.

La manière la plus simple de définir ces températures de fonctionnement est décrite dans le Tableau A.2:

$\theta_{\text{TRIP}}$	température maximale comme " $T_{\max}$ " dans le Tableau A.2,
$\theta_{\text{ALARM}}$	température d'alarme (si cette température est atteinte, le relais génère un signal d'alarme),
$\theta_{\text{RESTART}}$	température de redémarrage (le dispositif peut ne pas être redémarré, uniquement si la température est inférieure à ce niveau).

Le fabricant doit déclarer clairement comment ces valeurs sont interprétées (par exemple: la température du dispositif en °C, au-delà de la température ambiante par rapport à une valeur de référence, la température en %, etc.)

### À propos de la température de l'environnement

La température du dispositif est calculée conformément à l'Equation (B.4.) Pour ce calcul, on doit connaître la valeur de la température ambiante  $\vartheta_{\text{amb}}$ . Il est évident à partir de l'Equation (B.4), que dans des conditions de basse température ambiante, le dispositif peut être davantage surchargé que dans des conditions de haute température ambiante. Pour suivre ceci, la mesure de la température ambiante est nécessaire. En fonction la déclaration du fabricant:

- la température ambiante peut être mesurée,
- il peut s'agir d'un réglage de paramètre, ou
- seule la température au-delà de la température ambiante est calculée, et le réglage pour les valeurs de fonctionnement doit être défini, en tenant compte de la température de l'environnement la plus élevée.

Le fabricant doit clairement définir la solution utilisée.

## B.4 Essais de relais électriques thermiques fonctionnant en termes de températures

Puisque les relais électriques thermiques calculent la température, ce qui n'est pas facile à mesurer, il n'est généralement pas possible de vérifier la coïncidence des valeurs calculées et des valeurs de température réelle. Pour les essais, une transformation est nécessaire. Puisque les relais électriques thermiques mesurent essentiellement des courants, il est évident qu'il est nécessaire d'effectuer une transformation de la température en courants, et d'effectuer les essais de manière similaire aux procédures d'essai pour des relais de surintensité.

Les essais sont destinés à être effectués en utilisant des courants harmoniques de base symétriques, et ainsi  $I_{\text{eq}}=I$ , (l'indice "eq" peut être négligé).

Les Equations (B.3) ou (B.4) effectuent un calcul qui est également valide pour des courants variant en permanence, mais il est plus facile d'effectuer les essais en utilisant ses courants continus en régime établi. Pour ceci, on applique la solution bien connue de l'équation thermique différentielle (B.1) pour un courant constant:

$$\vartheta_{\text{equipment}}(t) = \frac{I^2 \vartheta_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \vartheta e^{-\frac{t}{\tau}} + \vartheta_{\text{amb}} \quad (\text{B.5})$$

ou:

$$\vartheta(t) = \vartheta_{\text{equipment}}(t) - \vartheta_{\text{amb}} = \frac{I^2 \vartheta_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \vartheta e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{B.6})$$

Dans les Equations (B.5) et (B.6):

$\vartheta$  est la température de l'objet protégé au-delà de la température ambiante à  $t = 0$ .

En remplaçant  $\theta(t)$  par  $\theta_{\text{max}} = \theta_{\text{TRIP}} - \theta_{\text{amb}}$  dans l'Equation (B.6) et en déterminant les températures à partir de l'Equation (B.6), à l'aide de l'Equation (B.2) on obtient l'Equation (B.7) suivante:

$$k_{\omega} = \frac{\theta_{\text{max}}}{\theta_{\text{ref}}} = \frac{I_{\text{max}}^2}{I_{\text{ref}}^2} = \frac{I^2}{I_{\text{ref}}^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \frac{I_0^2}{I_{\text{ref}}^2} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{B.7})$$

où

$\theta_{\text{max}}$  est la température maximale permise au-delà de la température de l'environnement  
 $\theta_{\text{max}} = \theta_{\text{TRIP}} - \theta_{\text{amb}}$  ;

$\vartheta_{\text{ref}}$  est la température de référence en régime établi au-delà de la température ambiante, si le courant  $I_{\text{ref}}$  circule en continu (valeur de réglage);

$I_{\text{max}}$  est le courant en régime établi, nécessaire pour atteindre la température en régime établi  $\theta_{\text{max}}$  au-delà de la température ambiante;

$I_0$  est le courant en régime établi, nécessaire pour atteindre la température en régime établi  $\theta_0$  (température au-delà de la température ambiante à  $t = 0$ );

$I_{\text{ref}}$  est la valeur de référence du courant d'échauffement équivalent (valeur de réglage);

$\tau$  est la constante de temps du processus thermique (valeur de réglage).

L'Equation (B.7) permet d'obtenir le temps  $t$  prévu pour déclencher:

$$t = \tau \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_{\text{max}}^2} \quad (\text{B.8})$$

où

$I$  est le courant injecté en régime établi, nécessaire pour atteindre une température en régime établi  $\theta$  au-delà de la température ambiante, (cette température serait supérieure à la température  $\theta_{\text{max}}$ );

$I_{\text{max}}$  est le courant en régime établi, nécessaire pour atteindre la température en régime établi  $\theta_{\text{max}}$ . Il peut être calculé en utilisant la formule de l'Equation (B.2):

$$I_{\max}^2 = \frac{I_{\text{eq.ref}}}{\theta_{\text{ref}}} \theta_{\max} \quad (\text{B.9})$$

$I_0$  est le courant en régime établi supposé, nécessaire pour atteindre la température en régime établi  $\theta_0$ . La température au-delà de la température ambiante à  $t = 0$  peut être calculée en utilisant la formule de l'Equation (B.2) :

$$I_0^2 = \frac{I_{\text{eq.ref}}^2}{\theta_{\text{ref}}} \theta_0 \quad (\text{B.10})$$

$\tau$  est la constante de temps du processus thermique (valeur de réglage).

NOTE 1 L'Equation (B.8) est équivalente à l'Equation (A.38) (la définition de la courbe à chaud).

NOTE 2 En remplaçant  $I_0 = 0$ , on obtient la définition de la courbe à froid, avec la signification que la procédure d'échauffement commencé quand l'objet protégé est à la température de l'environnement.

### B.5 À propos de la température de début $\varphi$

En raison des longues constantes de temps thermiques de l'objet protégé, pendant un essai, une longue période de temps serait nécessaire pour atteindre cette température de début  $\varphi$ . Le constructeur doit fournir des lignes directrices pour accélérer la procédure d'essai: par exemple, la réinitialisation du niveau thermique accumulé, puis l'injection d'un courant élevé pendant un temps bien défini; ou un réglage de paramètre pour la température de début, qui est activée par un signal d'entrée binaire dédié; etc.

### B.6 Les facteurs $k$ et $k_\theta$

Le facteur  $k_\theta$  est défini à l'Equation (B.7):

$$k_\theta = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\text{ref}}} = \frac{I_{\max}^2}{I_{\text{ref}}^2} \quad (\text{B.11})$$

On peut voir que:

$$k_\theta = \frac{I_{\max}^2}{I_{\text{ref}}^2} = k^2 \quad (\text{B.12})$$

Le fabricant doit clairement définir la signification du facteur à régler (le cas échéant).

## Bibliographie

CEI 60034-11, *Machines électriques tournantes – Partie 11: Protection thermique*

CEI 60947-4-1, *Appareillage à basse tension – Partie 4-1: Contacteurs et démarreurs de moteurs – Contacteurs et démarreurs électromécaniques*

CEI 60947-4-2, *Appareillage à basse tension – Partie 4-2: Contacteurs et démarreurs de moteurs – Gradateurs et démarreurs à semiconducteurs de moteurs à courant alternatif*

CEI 61850-9-2, *Réseaux et systèmes de communication pour l'automatisation des systèmes électriques – Partie 9-2: Mise en correspondance des services de communication spécifiques (SCSM) – Valeurs échantillonnées sur ISO/CEI 8802-3*

ABOU-EI-ELA, M.S., MEGAHED, A.I., MALIK, O.P, Thermal model based digital relaying algorithm for induction motor protection, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE, 1996

ANSI/IEEE Std. 37.96, *Guide for AC motor protection*

ANSI/IEEE Std. 620, *Guide for the presentation of thermal limit curves for squirrel cage induction machines*

ELTOM, A. H., MOHARI, N.S., Motor temperature estimation incorporating dynamic rotor impedance, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 1, 1991

LEBENHAFT, E., ZELLER, M., Advanced thermal motor protection using digital relays, SEL Technical Paper 6338, 2008

MIT, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Advanced System Dynamics and Control, Review of first and second-order system response, 2004

ZOCHOLL, S. E., AC Motor Protection, WA, USA, 2003

ZOCHOLL, S. E., BENMOUYAL, G., On the protection of thermal processes, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005

ZOCHOLL, S. E., GUZMAN, A., Thermal models in power system protection, SEL, WA, USA 1999

---





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](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)