

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60853-2

Première édition
First edition
1989-07

**Calcul des capacités de transport des câbles
pour les régimes de charge cycliques et de
surcharge de secours**

Deuxième partie:

Régime cyclique pour des câbles de tensions
supérieures à 18/30 (36) kV et régimes
de secours pour des câbles de toutes tensions

**Calculation of the cyclic and emergency
current rating of cables**

Part 2:

Cyclic rating of câbles greater than 18/30 (36) kV
and emergency ratings for câbles of all voltages



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60853-2: 1989

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60853-2

Première édition
First edition
1989-07

**Calcul des capacités de transport des câbles
pour les régimes de charge cycliques et de
surcharge de secours**

Deuxième partie:

Régime cyclique pour des câbles de tensions
supérieures à 18/30 (36) kV et régimes
de secours pour des câbles de toutes tensions

**Calculation of the cyclic and emergency
current rating of cables**

Part 2:

Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV
and emergency ratings for cables of all voltages

© IEC 1989 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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 photo-
copie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE **XA**

*Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue*

LICENSED TO MECON Limited - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6

SECTION UN — DONNÉES DE BASE

Articles

1. Introduction et domaine d'application	8
1.1 Généralités	8
1.2 Prise en compte de la capacité thermique du câble	8
1.3 Conditions permettant de négliger la capacité thermique	10
1.4 Indication des articles applicables aux types particuliers de câbles	12
1.4.1 Calcul des réponses transitoires et des capacités de transport en régime de secours	12
1.4.2 Capacités de transport en régime cyclique	12
2. Symboles	14
3. Plan de la présente norme	18

SECTION DEUX — RÉPONSE TRANSITOIRE EN TEMPÉRATURE

4. Réponse transitoire en température à l'application d'un échelon de courant	18
4.1 Aspects généraux	18
4.1.1 Données de base	18
4.1.2 Critères permettant l'utilisation d'un facteur d'approche égal à l'unité	20
4.1.3 Représentation du câble	20
4.1.4 Critères de choix du circuit thermique	22
4.2 Calcul des réponses transitoires partielles pour les longues durées ($> \frac{1}{3} T \cdot Q$) et les régimes de charge cycliques	24
4.2.1 Représentation de l'isolant	24
4.2.2 Représentation du câble	26
4.2.3 Calcul de la réponse transitoire partielle du câble	32
4.2.4 Calcul de la réponse transitoire partielle de l'environnement des câbles	32
4.3 Calcul des réponses transitoires partielles pour les courtes durées ($\leq \frac{1}{3} T \cdot Q$)	34
4.3.1 Représentation de l'isolant (câbles unipolaires et tripolaires)	34
4.3.2 Représentation du câble	36
4.3.3 Calcul de la réponse transitoire partielle du câble	40
4.3.4 Calcul de la réponse transitoire partielle de l'environnement des câbles	42
4.4 Calcul de la réponse transitoire complète en température	42
4.4.1 Réponse transitoire en température	42
4.4.2 Correction à la réponse transitoire en température pour tenir compte de la variation des pertes dans l'âme avec la température (régimes de secours seulement)	44
4.4.3 Réponse transitoire en température causée par l'application brusque de tension (régime transitoire dû aux pertes diélectriques)	44

SECTION TROIS — CAPACITÉS DE TRANSPORT EN RÉGIME CYCLIQUE

5. Calcul du facteur de capacité de transport cyclique (M)	46
5.1 Généralités	46
5.2 Calcul du facteur de capacité de transport cyclique (en tenant compte de la capacité thermique du câble)	48
5.2.1 Cycle de charge quelconque de forme connue	48
5.2.2 Cycle de charge plafonné à une valeur constante	50
5.2.3 Cycle de charge de forme inconnue mais dont le facteur de charge des pertes (μ) est connu	50
6. Calcul du facteur de charge des pertes (μ)	50
7. Calcul de $\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$	52
7.1 Un seul câble tripolaire	52
7.2 Un seul circuit	54
7.3 Groupe de «N» câbles ayant des pertes égales; câbles ou fourreaux non jointifs	54
7.4 Groupe de «N» circuits, composé de trois câbles unipolaires ou fourreaux identiques et jointifs, tous les câbles ayant des pertes égales	56

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7

SECTION ONE — BACKGROUND

Clause

1. Introduction and scope	9
1.1 General	9
1.2 Inclusion of cable thermal capacitance	9
1.3 Conditions where thermal capacitance can be neglected	11
1.4 Guide to clauses applicable to particular types of cable	13
1.4.1 Transient calculation and emergency rating	13
1.4.2 Cyclic rating	13
2. Symbols	15
3. Layout of this standard	19

SECTION TWO — TRANSIENT TEMPERATURE RESPONSE

4. Transient temperature response to a step function of current	19
4.1 General aspects	19
4.1.1 Background	19
4.1.2 Criteria for the attainment factor to be unity	21
4.1.3 Representation of the cable	21
4.1.4 Criteria for selecting the thermal circuit	23
4.2 Calculation of partial transients for long durations ($> \frac{1}{3} T \cdot Q$) and cyclic rating	25
4.2.1 Representation of the dielectric	25
4.2.2 Representation of the cable	27
4.2.3 Calculation of cable partial transient	33
4.2.4 Calculation of cable environment partial transient	33
4.3 Calculation of partial transients for short duration ($\leq \frac{1}{3} T \cdot Q$)	35
4.3.1 Representation of the dielectric (single and 3-core cables)	35
4.3.2 Representation of the cable	37
4.3.3 Calculation of cable partial transient	41
4.3.4 Calculation of cable environment partial transient	43
4.4 Calculation of the complete temperature transient	43
4.4.1 Transient temperature response	43
4.4.2 Correction to transient temperature response for variation in conductor losses with temperature (emergency ratings only)	45
4.4.3 Transient temperature response caused by sudden application of voltage (transient due to dielectric loss)	45

SECTION THREE — CYCLIC RATINGS

5. Computation of the cyclic rating factor (M)	47
5.1 General	47
5.2 Calculation of cyclic rating factor (including cable thermal capacitance)	49
5.2.1 Any load cycle of known shape	49
5.2.2 Flat top load cycle	51
5.2.3 Load cycle of unknown shape but with a known loss-load factor (μ)	51
6. Calculation of loss-load factor (μ)	51
7. Calculation of $\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$	53
7.1 Single isolated 3-core cable	53
7.2 Single isolated circuit	55
7.3 Group of "N" cables with equal losses; cables or ducts not touching	55
7.4 Group of "N" circuits, each of three single-core identical touching cables or ducts, all cables having equal losses	57

Articles	SECTION QUATRE — CAPACITÉS DE TRANSPORT EN RÉGIME DE SECOURS	Pages
8.	Calcul des capacités de transport en régime de secours	56
8.1	Circuits thermiquement séparés	56
8.2	Groupes de circuits	58
9.	Bibliographie	60
ANNEXE A	— Réduction d'un circuit thermique multiple à un circuit à deux cellules	62
ANNEXE B	— Variation de température transitoire moyenne à travers l'isolant ou à travers l'huile de remplissage des tuyaux	66
ANNEXE C	— Méthode applicable à différentes valeurs de résistivité du sol, diffusivité thermique du sol et profondeur de pose	70
ANNEXE D	— Diffusivité du sol	72
ANNEXE E	— Constantes physiques des matériaux	74
ANNEXE F	— Exemples	78
FIGURES		97

Clause	SECTION FOUR — EMERGENCY RATINGS	Page
8. Calculation of emergency ratings		57
8.1 Thermally isolated circuits		57
8.2 Groups of circuits		59
9. Bibliography		61
APPENDIX A — Reduction of a multiple thermal circuit to one having two sections		63
APPENDIX B — Transient average temperature variation through dielectric or through oil filling in pipes		67
APPENDIX C — Method for dealing with different soil resistivities, thermal diffusivities and depths of laying		71
APPENDIX D — Diffusivity of soil		73
APPENDIX E — Physical constants of materials		75
APPENDIX F — Examples		79
FIGURES		97

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CALCUL DES CAPACITÉS DE TRANSPORT DES CÂBLES
POUR LES RÉGIMES DE CHARGE CYCLIQUES
ET DE SURCHARGE DE SECOURS**

**Deuxième partie: Régime cyclique pour des câbles de tensions supérieures
à 18/30 (36) kV et régimes de secours pour des câbles de toutes tensions**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Sous-Comité 20A: Câbles de haute tension, du Comité d'Etudes n° 20 de la CEI: Câbles électriques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
20A(BC)104	20A(BC)111

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

Les publications suivantes de la CEI sont citées dans la présente norme:

- Publications n°s 287 (1982): Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%).
 853-1 (1985): Calcul des capacités de transport des câbles pour les régimes de charge cycliques et de surcharge de secours, Première partie: Facteurs de capacité de transport cyclique pour des câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**CALCULATION OF THE CYCLIC AND
EMERGENCY CURRENT RATING OF CABLES****Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and
emergency ratings for cables of all voltages**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules insofar as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by Sub-Committee 20A: High-voltage Cables, of IEC Technical Committee No. 20: Electric Cables.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
20A(CO)104	20A(CO)111

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

The following IEC publications are quoted in this standard:

- Publications Nos. 287 (1982): Calculation of the continuous current rating of cables (100% Load Factor).
853-1 (1985): Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables, Part 1: Cyclic rating factor for cables up to and including 18/30 (36) kV.

CALCUL DES CAPACITÉS DE TRANSPORT DES CÂBLES POUR LES RÉGIMES DE CHARGE CYCLIQUES ET DE SURCHARGE DE SECOURS

Deuxième partie: Régime cyclique pour des câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV et régimes de secours pour des câbles de toutes tensions

SECTION UN — DONNÉES DE BASE

1. Introduction et domaine d'application

1.1 Généralités

La présente norme fournit des méthodes manuelles de calcul des facteurs de capacité de transport en régime cyclique pour des câbles dont la capacité thermique interne ne peut pas être négligée; il s'agit généralement de câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV. Cette norme donne également une méthode de calcul des capacités de transport en régime de secours pour des câbles de tout niveau de tension. La première partie de la norme traite des facteurs de capacité de transport cyclique de câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV dont la capacité thermique interne peut être négligée.

Dans les cas où cette capacité thermique interne doit être prise en compte, le calcul de la réponse transitoire en température du câble et de son environnement est nécessaire pour déterminer les facteurs de capacité de transport cyclique.

Les formules recommandées dans cette norme contiennent des grandeurs qui varient avec la constitution du câble et les matériaux utilisés. Les valeurs données dans les tableaux sont soit approuvées au plan international, par exemple les coefficients de température de la résistance, soit généralement utilisées dans la pratique, par exemple les résistivités thermiques et les capacités thermiques volumiques des matériaux. Afin que les résultats uniformes et comparables puissent être obtenus, il est recommandé que le calcul des capacités de transport pour les régimes de charge cycliques et de surcharge de secours soit effectué avec les valeurs indiquées dans la présente norme. Cependant, lorsque l'on sait avec certitude que d'autres valeurs sont plus appropriées aux matériaux et à la constitution d'un câble donné, elles peuvent être utilisées, à condition de l'indiquer lors du calcul des intensités de courant en régimes cycliques et de secours correspondant à ces valeurs.

Jusqu'à présent, on n'a pas tenu compte des effets éventuels de la migration de l'humidité sur la résistivité thermique du sol. Cette approche est en accord avec celle qui a déjà été utilisée dans la Publication 287 de la CEI pour le calcul de capacités de transport en régime permanent dans un sol uniforme. Des méthodes permettant de tenir compte des zones du sol ayant des caractéristiques thermiques différentes ainsi que de l'assèchement du sol sont à l'étude.

La façon de tenir compte de la variation de la résistance de l'âme avec la température est indiquée plus loin.

1.2 Prise en compte de la capacité thermique du câble

Dans le cas où la capacité thermique du câble ne peut pas être négligée, il est nécessaire de calculer la réponse interne transitoire en température du ou des câbles. Les méthodes manuelles recommandées pour ce calcul sont les suivantes:

CALCULATION OF THE CYCLIC AND EMERGENCY CURRENT RATING OF CABLES

Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages

SECTION ONE — BACKGROUND

1. Introduction and scope

1.1 General

This standard gives manual methods for calculating cyclic rating factors for cables whose internal thermal capacitance cannot be neglected; in general this applies to cables for voltages greater than 18/30 (36) kV. It also gives a method for calculating the emergency rating for cables of any voltage. Part I of the standard dealt with cyclic rating factors for cables of voltages not greater than 18/30 (36) kV where the internal thermal capacitance could be neglected.

To determine the cyclic rating factors where the internal thermal capacitance cannot be neglected it is necessary to calculate the transient temperature response of the cable and its environment.

The formulae recommended in this standard contain quantities which vary with cable design and materials used. The values given in the tables are either internationally agreed, for example, resistance temperature coefficients, or are those which are generally accepted in practice, for example, thermal resistivities and volumetric specific heats of materials. In order that uniform and comparable results may be obtained, the cyclic and/or emergency current ratings should be calculated with the values given in this standard. However, where it is known with certainty that other values are more appropriate to the materials and design, then these may be used, and the corresponding cyclic/emergency current rating declared in addition, provided that the different values are quoted.

No account has been taken at present of possible effects of moisture migration on the thermal resistivity of the soil. This is in line with the approach already adopted for the calculation of steady state ratings in uniform soil as given in IEC Publication 287. Methods for dealing with regions having different thermal characteristics and with drying out of the soil are under consideration.

A means of incorporating the effect of change in conductor resistance with temperature is included.

1.2 Inclusion of cable thermal capacitance

When a cable thermal capacitance cannot be neglected, it is necessary to calculate the internal transient temperature response of the cable(s). The manual methods recommended for this computation are:

a) Calcul des facteurs de capacité de transport cyclique:

L'utilisation de circuits équivalents à constantes thermiques localisées pour représenter les câbles est uniquement applicable pour des durées supérieures à environ 1 h [1]*. (Une telle limitation est sans importance pour le calcul des régimes correspondant à des charges cycliques journalières.) Cette méthode peut être utilisée soit manuellement, soit sur ordinateur pour tous les types de câbles.

Note. — Les régimes transitoires thermiques d'un câble peuvent également être calculés au moyen d'une méthode numérique dans laquelle les constituants du câble peuvent être séparés en plusieurs éléments concentriques cylindriques, de manière à atteindre une précision satisfaisante pour une période de temps quelconque [2]*. Cette méthode s'applique uniquement aux câbles unipolaires et n'entre pas dans le domaine de cette norme.

Dans la présente norme, les méthodes de calcul de capacités de transport cycliques s'appliquent aux câbles enterrés dans le sol, soit directement soit en fourreaux, lorsque ces câbles supportent des charges variant de manière cyclique sur une période de 24 h, la forme de chaque cycle journalier étant sensiblement identique. Pour ces méthodes d'installation, on a admis que la tension a été appliquée pendant une durée suffisante pour que l'échauffement de l'âme dû aux pertes diélectriques ait atteint son état stationnaire. L'échauffement total de l'âme au-dessus de la température ambiante est alors la somme de l'échauffement stationnaire dû aux pertes diélectriques (tel qu'il est donné dans la Publication 287 de la CEI) et des variations de température transitoires dues aux variations du courant. Pour le calcul du facteur de capacité de transport cyclique, il suffit d'effectuer séparément le calcul des variations de température transitoires dues aux variations de courant.

En ce qui concerne les câbles posés à l'air libre, la température de l'âme suit les variations de courant de charge de manière suffisamment rapide pour que les cycles journaliers habituels ne permettent pas des charges dont la valeur de pointe soit supérieure à la valeur en régime permanent.

Des valeurs numériques sont données pour l'évaluation des facteurs de capacité de transport cyclique pour des câbles enterrés à 1 m de profondeur dans un sol dont la diffusivité est de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Des méthodes permettant de prendre en compte d'autres conditions sont également indiquées. On suppose que les propriétés du sol sont constantes à la fois dans le temps et dans l'espace.

b) Calcul des facteurs de capacité de transport en régime de secours:

- i) Pour des durées supérieures à 1 h environ, on utilise la même méthode que pour les facteurs de capacité de transport cyclique (voir le point a) ci-dessus).
- ii) Pour des durées allant de 10 min à moins de 1 h, on utilise une version modifiée du point a), avec un circuit thermique plus détaillé [3]*.

Note. — Voir également la note du point a).

Les méthodes de calcul des capacités de transport pour les régimes de secours s'appliquent aux câbles enterrés dans le sol, soit directement, soit en fourreaux, et aux câbles posés à l'air libre. Il est prévu de tenir compte du régime transitoire dû à l'application soudaine d'une tension (à savoir le régime transitoire dû aux pertes diélectriques).

Les méthodes de calcul des facteurs de capacité de transport en régime de secours sont prévues pour des charges ne dépassant pas environ 2,5 fois le courant de la pleine charge nominale (facteur de charge 100%).

1.3 Conditions permettant de négliger la capacité thermique

Si les durées considérées sont assez longues comparées à la constante de temps thermique du câble, la capacité thermique du câble peut alors être négligée. Cela s'applique en pratique à tous les

*Les chiffres entre crochets se rapportent à la «Bibliographie», article 9, page 60.

a) For the computation of cyclic rating factors:

The use of analogous lumped thermal constant circuits to represent the cables, applicable only where time periods greater than about 1 h are involved [1]*. (For the calculation of ratings for daily load cycles such a limitation is not important.) This method can be used manually or on a computer and is capable of dealing with all types of cable.

Note. — The cable thermal transient can also be calculated by a numerical method, where the division of cable components into numerous concentric cylindrical elements can be arranged so as to yield adequate accuracy for any time period [2]*. This method applies to single-core cables only and is outside the scope of this standard.

The methods for cyclic ratings in this standard apply to cables buried in the ground, either directly or in ducts, when carrying a load which varies cyclically over a 24 h period, the shape of each daily cycle being substantially the same. For these installation methods it has been assumed that the voltage had been applied for a sufficiently long time for the conductor temperature rise due to dielectric loss to have reached a steady state. The total temperature rise of the conductor above ambient is then the sum of the steady state temperature rise due to the dielectric loss (as given by IEC Publication 287) and the transient temperature variations due to change of current. For cyclic rating factor purposes it is sufficient to independently calculate the transient temperature variations due to changes in current.

For cables in air, the conductor temperature follows changes in load current sufficiently rapidly so that the usual daily cycles do not permit peak loads greater than the steady-state value.

Numerical data are provided for the evaluation of cyclic rating factors for cables buried at 1 m depth in soil having a diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, but methods for dealing with other conditions are included. It is assumed that the soil properties are constant in both time and space.

b) For the computation of emergency rating factors:

- i) For time periods longer than about 1 h, use the same method as for cyclic rating factor purposes (see Item a) above).
- ii) For time periods less than 1 h down to 10 min, a modified version of Item a) is used having a more detailed thermal circuit [3]*.

Note. — See also note under Item a).

The methods for calculating the emergency ratings apply to cables buried in the ground, either directly or in ducts, and to cables in air. Provision is made for incorporating the transient caused by a sudden application of voltage (i.e. the transient due to dielectric loss).

Methods for calculating emergency rating factors are intended for emergency loads not greater than about 2.5 times rated full load current (100% load factor).

1.3 Conditions where thermal capacitance can be neglected

If the time periods being considered are sufficiently long compared with the thermal time constant of the cable, then the cable thermal capacitance may be neglected. In practice this applies to all

* The figures in square brackets refer to "Bibliography", Clause 9, page 61.

câbles de tensions assignées inférieures ou égales à 18/30 (36) kV et permet l'utilisation d'une procédure simplifiée. Cette procédure est détaillée dans la première partie de la norme.

On considère que la capacité thermique des câbles peut être négligée pour:

- a) toutes les sections d'âme et tous les types de câbles de tensions assignées inférieures ou égales à 18/30 (36) kV, avec un cycle de charge de forme quelconque;
- b) tous les câbles auxquels les conditions suivantes s'appliquent simultanément:
 - i) le facteur de charge des pertes μ n'est pas inférieur à 0,65;
 - ii) la moyenne des ordonnées Y_0 , Y_1 et Y_2 n'est pas inférieure à 0,9 (voir article 6);
 - iii) la moyenne de Y_3 , Y_4 et Y_5 n'est pas inférieure à 0,7 (voir article 6).
- c) les câbles à pression sous gaine métallique auxquels les conditions suivantes s'appliquent simultanément:
 - i) le facteur de charge des pertes μ n'est pas inférieur à 0,4;
 - ii) la moyenne des ordonnées Y_0 , Y_1 et Y_2 n'est pas inférieure à 0,9 (voir article 6);
 - iii) la moyenne de Y_3 , Y_4 et Y_5 n'est pas inférieure à 0,7 (voir article 6).

1.4 Indication des articles applicables aux types particuliers de câbles

1.4.1 Calcul des réponses transitoires et des capacités de transport en régime de secours

Type de câble	Calcul des réponses transitoires		Régime de secours	
	Durée du régime transitoire	Paragraphes	Durée du régime transitoire	Articles et paragraphes
Tous types de câbles unipolaires	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
Câbles en tuyau	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
Câbles tripolaires (excepté câbles en tuyau)	$> \frac{1}{2}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{2}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	(totalité du câble) $\leq T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	(totalité du câble) $\leq T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
	(un conducteur isolé) intermédiaire	4.1, 4.2, 4.3, 4.4	(un conducteur isolé) intermédiaire	8, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4

Note. — T = résistance thermique d'un câble ou d'un conducteur isolé selon le cas considéré

Q = capacité thermique d'un câble ou d'un conducteur isolé selon le cas considéré

1.4.2 Capacités de transport en régime cyclique

Les articles et paragraphes à appliquer sont 4.1, 4.2, 4.4, 5, 6 et 7, ainsi que ceux qui sont indiqués ci-dessous.

Type de câble	Type de cycle de charge	Paragraphes
Tous types	Quelconque de forme connue	5.2.1
	Plafonné à une valeur constante	5.2.2
	Facteur de charge des pertes seul connu	5.2.3

cables up to and including 18/30 (36) kV and allows a simplified procedure to be used. Full details of this simplified procedure are given in Part I of this standard.

It has been estimated that cable thermal capacitance can be neglected for:

- a) all conductor cross-sections and types of cable for nominal voltages up to and including 18/30 (36) kV, for any shape of load cycle;
- b) all cables where the following conditions apply together:
 - i) the loss-load factor μ is not less than 0.65;
 - ii) the average of the ordinates Y_0 , Y_1 and Y_2 is not less than 0.9 (see Clause 6);
 - iii) the average of Y_3 , Y_4 and Y_5 is not less than 0.7 (see Clause 6).
- c) self-contained cables where the following conditions apply together:
 - i) the loss-load factor μ is not less than 0.4;
 - ii) the average of the ordinates Y_0 , Y_1 and Y_2 is not less than 0.9 (see Clause 6);
 - iii) the average of Y_3 , Y_4 and Y_5 is not less than 0.7 (see Clause 6).

1.4 Guide to clauses applicable to particular types of cable

1.4.1 Transient calculation and emergency rating

Cable type	Transient calculation		Emergency rating	
	Duration of transient	Sub-clauses	Duration of transient	Clauses and sub-clauses
All types of single-core cables	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
Pipe-type cables	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
Three-core cables (except pipe type)	$> \frac{1}{2}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{2}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	(whole cable) $\leq T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	(whole cable) $\leq T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
	one core (intermediate)	4.1, 4.2, 4.3, 4.4	one core (intermediate)	8, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4

Note. — T = thermal resistance of cable or one core as appropriate
 Q = thermal capacitance of cable or one core as appropriate

1.4.2 Cyclic rating

The applicable clauses and sub-clauses are 4.1, 4.2, 4.4, 5, 6 and 7 and as noted below.

Cable type	Load cycle type	Sub-clauses
All types	Any known shape	5.2.1
	Flat top	5.2.2
	Where only the loss-load factor is known	5.2.3

2. Symboles

Symboles	Définitions	Unités
D_e	= diamètre extérieur du revêtement du câble	m
D_i	= diamètre extérieur de l'enveloppe isolante	m
D_s	= diamètre intérieur du revêtement du câble	m
$-Ei(-x)$	= fonction exponentielle intégrale	
F	= coefficient d'échauffement mutuel d'un groupe de câbles	
I	= intensité de courant admissible pour une condition donnée (normalisée)	A
I_1	= courant constant parcourant le câble avant l'application d'une charge de secours	A
I_2	= courant de surcharge de secours qui peut être appliqué pendant un temps t tel que l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante soit $\theta_{\max}$ à la fin de la période de surcharge	A
$I_{\max}$	= courant le plus élevé du cycle de charge journalier: utilisé comme dénominateur lors de la détermination des ordonnées du cycle de charge des pertes	A
I_R	= courant nominal permanent (facteur de charge 100%) tel que l'âme atteigne, sans la dépasser, sa température maximale admissible	A
L	= profondeur de pose mesurée au centre d'un câble ou d'un fourreau	m
M	= facteur de capacité de transport cyclique	
N	= nombre de câbles d'un groupe	
M_o, N_o	= coefficients utilisés pour calculer l'échauffement partiel transitoire d'un câble (voir paragraphes 4.2.3 et 4.3.3)	s, s ²
Q	= capacité thermique totale d'un câble	J/m.K
Q_A, Q_B	= éléments du circuit thermique à deux cellules (voir paragraphes 4.2.2 et 4.3.2)	J/m.K
Q_a	= capacité thermique de l'armure	J/m.K
Q_c	= capacité thermique de l'âme	J/m.K
Q_d	= capacité thermique d'un fourreau	J/m.K
Q_f	= capacité thermique des bourrages dans un câble triplomb ou de la matière de remplissage entre conducteurs isolés d'un câble en tuyau à pression de gaz	J/m.K
Q_i	= capacité thermique de l'isolant de chaque conducteur	J/m.K
Q_{i1}	= capacité thermique de la première partie de l'enveloppe isolante	J/m.K
Q_{i2}	= capacité thermique de la seconde partie de l'enveloppe isolante	J/m.K
Q_j	= capacité thermique du revêtement extérieur du câble	J/m.K
Q_o	= capacité thermique de l'huile dans un câble en tuyau	J/m.K
Q_p	= capacité thermique d'un tuyau	J/m.K
Q_s	= capacité thermique d'une gaine et de son frettage	J/m.K
R_1	= résistance de l'âme en courant alternatif avant l'application du courant de secours	Ω/m
R_R	= résistance de l'âme en courant alternatif sous le courant nominal permanent I_R , c'est-à-dire à la température maximale admissible à l'âme	Ω/m
$R_{\max}$	= résistance de l'âme en courant alternatif à la fin de la charge de secours	Ω/m
T	= résistance thermique totale d'un câble entre l'âme et la surface extérieure	K.m/W
T_A, T_B, T_C	= éléments du circuit thermique équivalent	K.m/W
T_1	= résistance thermique de l'isolant de chaque conducteur	K.m/W
T_2	= résistance thermique du gaz dans un câble en tuyau à pression de gaz	K.m/W
T_3	= résistance thermique du revêtement extérieur d'un câble	K.m/W
T_4	= résistance thermique extérieure d'un câble ou d'un fourreau	K.m/W
T'_4	= résistance thermique de l'espace d'air dans un fourreau	K.m/W
T''_4	= résistance thermique d'un fourreau	K.m/W
ΔT_4	= résistance thermique extérieure additionnelle causée par l'échauffement dû à d'autres câbles du groupe	K.m/W
T_a, T_b	= résistances thermiques apparentes utilisées pour calculer l'échauffement transitoire partiel du câble (voir paragraphes 4.2.3 et 4.3.3)	K.m/W
T_f	= résistance thermique des bourrages entre conducteurs isolés d'un câble triplomb ou d'un câble en tuyau à pression de gaz	K.m/W
T_o	= résistance thermique de l'huile dans un câble en tuyau	K.m/W
W_c	= pertes dissipées dans une âme ou dans l'âme d'un conducteur équivalent	W/m
W_1	= pertes totales par effet Joule de chaque câble	W/m
W_d	= pertes diélectriques dans l'isolant d'un câble	W/m
$Y_o...Y_{23}$	= ordonnées réduites dans un diagramme en (charges) ² utilisé pour le calcul du facteur de capacité de transport cyclique	
a, b	= coefficients utilisés pour calculer l'échauffement partiel transitoire	1/s
d	= masse volumique du sol à sec	kg/m ³
d_c	= diamètre extérieur de l'âme	m
d_f	= distance du centre du câble le plus chaud pour une source unifilaire représentant l'effet d'échauffement dû à tous les autres câbles d'un groupe	m
d_{pk}	= distance du centre du $p^{\text{ème}}$ câble, dont on détermine la capacité de transport, à un câble adjacent k	m

2. Symbols

Symbol	Definition	Unit
D_e	= external diameter of cable covering	m
D_i	= external diameter of dielectric	m
D_s	= internal diameter of cable covering	m
$-Ei(-x)$	= exponential integral function	
F	= mutual heating coefficient for a group of cables	
I	= permissible current for given (standard) condition	A
I_1	= constant current applied to cable prior to emergency load	A
I_2	= emergency load current which may subsequently be applied for time t so that the conductor temperature rise above ambient at the end of the period of emergency load is $\theta_{\max}$	A
$I_{\max}$	= highest current of daily load cycle: used as denominator when determining loss-load ordinates	A
I_R	= sustained (100% load factor) rated current to attain, but not exceed, the permissible maximum conductor temperature	A
L	= axial depth of burial of a cable or duct	m
M	= cyclic rating factor	
N	= number of cables in a group	
M_o, N_o	= coefficients used for calculating cable partial transient temperature rise (see Sub-clauses 4.2.3 and 4.3.3)	s, s ²
Q	= total thermal capacitance of a cable	J/m.K
Q_A, Q_B	= elements of two part thermal circuit (see Sub-clauses 4.2.2 and 4.3.2)	J/m.K
Q_a	= thermal capacitance of armour	J/m.K
Q_c	= thermal capacitance of conductor	J/m.K
Q_d	= thermal capacitance of a duct	J/m.K
Q_f	= thermal capacitance of filling in S.L type cables, or of filling between cores of a gas-pressure pipe-type cable	J/m.K
Q_i	= thermal capacitance of dielectric per conductor	J/m.K
Q_{i1}	= thermal capacitance of first portion of insulation	J/m.K
Q_{i2}	= thermal capacitance of second portion of insulation	J/m.K
Q_j	= thermal capacitance of outer covering of cable	J/m.K
Q_o	= thermal capacitance of oil in a pipe type cable	J/m.K
Q_p	= thermal capacitance of a pipe	J/m.K
Q_s	= thermal capacitance of sheath and reinforcement	J/m.K
R_1	= A.C. resistance of conductor before application of emergency current	Ω/m
R_R	= A.C. resistance of conductor with sustained application of rated current I_R , i.e. at standard maximum permissible temperature	Ω/m
$R_{\max}$	= A.C. resistance of conductor at end of period of emergency loading	Ω/m
T	= total thermal resistance of a cable from conductor to outer surface	K.m/W
T_A, T_B, T_C	= elements of equivalent thermal circuit	K.m/W
T_1	= thermal resistance of dielectric per conductor	K.m/W
T_2	= thermal resistance of gas in a gas-pressure pipe-type cable	K.m/W
T_3	= thermal resistance of outer covering of a cable	K.m/W
T_4	= external thermal resistance of a cable or a duct	K.m/W
T_4'	= thermal resistance of air space in a duct	K.m/W
T_4''	= thermal resistance of a duct	K.m/W
ΔT_4	= additional external thermal resistance caused by heating from other cables in a group	K.m/W
T_a, T_b	= apparent thermal resistances used to calculate cable partial transient temperature rise (see Sub-clauses 4.2.3 and 4.3.3)	K.m/W
T_f	= thermal resistance of filling between cores of SL type cable and of gas-pressure pipe-type cable	K.m/W
T_o	= thermal resistance of the oil in a pipe-type cable	K.m/W
W_c	= power loss in a conductor or equivalent conductor	W/m
W_1	= total P_R power loss of each cable	W/m
W_d	= power loss in cable dielectric	W/m
$Y_0 \dots Y_{23}$	= scaled ordinate in (load) ² graph, used in calculation of cyclic rating factor	
a, b	= coefficients used for calculating cable partial transient temperature rise	1/s
d	= dry density of soil	kg/m ³
d_c	= external diameter of conductor	m
d_f	= spacing from centre of hottest cable for a single line source representing the heating effect of all other cables in a group	m
d_{pk}	= distance from centre of p^{th} cable, where rating is being determined to an adjacent cable k	m

Symboles	Définitions	Unités
d'_{pk}	= distance du centre du $p^{\text{ème}}$ câble, dont on détermine la capacité de transport, à l'image d'un câble adjacent k (voir figure 9)	m
h	= coefficient d'émission de chaleur d'un câble dans l'air	W/m ² .K ^{5/4}
h_1	= rapport I_V/I_R	
i	= temps	h
k	= rapport de l'échauffement au-dessus de la température ambiante de la surface extérieure d'un câble, d'un tuyau ou d'un fourreau, à l'échauffement au-dessus de la température ambiante de l'âme en régime permanent	
k_1	= valeur de k pour un câble d'un groupe	
n	= nombre de conducteurs isolés dans un câble	
p	= facteur pour la répartition de la capacité thermique d'un isolant (pour des durées supérieures à $\frac{1}{3} T.Q$)	
p^*	= facteur pour la répartition de la capacité thermique d'un isolant (pour des durées inférieures ou égales à $\frac{1}{3} T.Q$)	
p'	= facteur pour la répartition de la capacité thermique des revêtements d'un câble	
p_d	= facteur pour la répartition de la capacité thermique d'un isolant lors du régime transitoire causé par les pertes diélectriques	
q_a	= rapport: <u>pertes dans (âmes + gaines + armure)</u>	
q_e	= rapport: <u>pertes dans (âmes + écrans + tuyau)</u>	
q_j	= rapport: <u>pertes dans (âmes + gaines + armure + tuyau)</u>	
q_s	= rapport: <u>pertes dans [âme + gaine (ou écran)]</u>	
r	= rapport $\theta_{\max}/\theta_R(\infty)$	
t	= temps écoulé depuis le début d'application d'un échauffement, symbole général pour le temps, généralement en secondes ($t = 3\ 600i$)	s
a	= coefficient de température de la résistivité électrique du matériau de l'âme	1/K
$a(t), \beta(t)$	= facteurs d'approche pour les échauffements de l'âme par rapport à la surface du câble d'une part, de la surface du câble par rapport à la température ambiante d'autre part	
β	= inverse du coefficient de température de la résistivité électrique à 0 °C	K
$\gamma(t)$	= fonction utilisée dans les calculs du facteur de capacité de transport cyclique pour groupes de câbles	
δ	= diffusivité thermique du sol	m ² /s
η	= teneur en humidité du sol en pourcentage du poids à sec	
μ	= facteur de charge des pertes d'un cycle de charge	
ρ_T	= résistivité thermique du sol	K.m/W
ρ_i	= résistivité thermique de l'isolant	K.m/W
θ_i	= température de l'âme au début du régime transitoire	°C
$\theta(t)$	= échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température ambiante, sans correction pour variations des pertes dans l'âme	K
$\theta_c(t)$	= échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température de la surface extérieure d'un câble	K
$\theta_d(t)$	= échauffement transitoire moyen dans l'épaisseur de l'isolant au-dessus de la surface extérieure d'un câble	K
$\theta_e(t)$	= échauffement transitoire de la surface extérieure d'un câble (ou du câble le plus chaud d'un groupe de câbles également chargés) au-dessus de la température ambiante	K
$\theta_o(t)$	= échauffement transitoire moyen de l'huile dans un câble en tuyau au-dessus de la température de la surface extérieure du tuyau	K
$\theta_R(t)$	= échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante au temps t après application du courant I_R , en négligeant la variation de la résistance de l'âme. $\theta_R(t)$ est calculé par les méthodes données dans l'article 8	K
$\theta_R(i)$	= $\theta(t)$, lorsque l'amplitude de l'échelon de courant est égale au courant nominal en service permanent (facteur de charge 100%, i étant exprimé en heures)	K
$\theta_R(\infty)$	= valeur de θ_R en régime permanent, c'est-à-dire échauffement maximal admissible prescrit	K
$\theta_d(t)$	= échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température ambiante, corrigée pour tenir compte de la variation des pertes dans l'âme en fonction de la température	K
$\theta(\infty)$	= échauffement de l'âme en régime permanent au-dessus de la température ambiante	K
$\theta_{\max}$	= échauffement maximal admissible au-dessus de la température ambiante, a) pour une charge cyclique journalière, b) à la fin de la période de surcharge	K
σ	= capacité thermique volumique de l'isolant (voir annexe E)	J/K.m ³

Symbol	Definition	Units
d'_{pk}	= distance from centre of p^{th} cable, whose rating is being determined, to the image of an adjacent cable k (see Figure 9)	m
h	= heat emission coefficient for a cable in air	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}^{5/4}$
h_1	= ratio I_1/I_R	
i	= time	h
k	= ratio of cable, pipe or duct external-surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady conditions	
k_1	= value of k for a cable in a group	
n	= number of cores in a cable	
p	= factor for apportioning the thermal capacitance of a dielectric (durations greater than $\frac{1}{3} T.Q$)	
p^*	= factor for apportioning the thermal capacitance of a dielectric (durations less than or equal to $\frac{1}{3} T.Q$)	
p'	= factor for apportioning the thermal capacitance of cable coverings	
p_d	= factor for apportioning thermal capacitance of dielectric when calculating transient caused by dielectric loss	
q_a	= ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + armour)}}{\text{losses in conductors}}$	
q_e	= ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + screens + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$	
q_j	= ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + armour + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$	
q_s	= ratio: $\frac{\text{losses in [conductor + sheath (or screen)]}}{\text{loss in conductor}}$	
r	= ratio $\theta_{\text{max}}/\theta_R(\infty)$	
t	= time from start of application of heating, a general symbol for time, usually in seconds ($t = 3\,600i$)	s
a	= temperature coefficient of electrical resistivity of conductor material	1/K
$\alpha(t), \beta(t)$	= attainment factors for the conductor to cable surface and cable surface to ambient temperature rises respectively	
β	= reciprocal of temperature coefficient of electrical resistivity at 0°C	K
$\gamma(t)$	= function used in calculating cyclic rating factor for groups of cables	
δ	= soil thermal diffusivity	m^2/s
η	= moisture content of soil in per cent of dry weight	
μ	= loss-load factor of a load cycle	
ρ_T	= soil thermal resistivity	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
ρ_i	= dielectric thermal resistivity	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
θ_i	= conductor temperature at commencement of transient	$^\circ\text{C}$
$\theta(t)$	= transient temperature rise of conductor above ambient, without correction for variation in conductor loss	K
$\theta_c(t)$	= transient temperature rise of conductor above the outer surface of a cable	K
$\theta_d(t)$	= transient spatial average temperature rise of dielectric above the outer surface of a cable	K
$\theta_e(t)$	= transient temperature rise of outer surface of a cable (or hottest cable in a group of similarly loaded cables) above ambient temperature	K
$\theta_o(t)$	= transient average temperature rise of oil in a pipe-type cable above the outer surface of the pipe	K
$\theta_R(t)$	= conductor temperature rise above ambient at time t after application of current I_R , neglecting variation in conductor resistance, $\theta_R(t)$ is calculated by the methods given in Clause 8	K
$\theta_R(i)$	= $\theta(t)$, when the magnitude of the step function current is the sustained (100% load factor) rated current, and i is expressed in hours	K
$\theta_R(\infty)$	= value of θ_R in the steady state, i.e. the standard maximum permissible temperature rise	K
$\theta_a(t)$	= conductor transient temperature rise above ambient corrected for variation in conductor loss with temperature	K
$\theta(\infty)$	= conductor steady state temperature rise above ambient	K
θ_{max}	= maximum permissible temperature rise above ambient a) for a daily cyclic load, b) at end of period of emergency loading	K
δ	= volumetric specific heat of insulation (see Appendix E)	$\text{J}/\text{K}\cdot\text{m}^3$

3. Plan de la présente norme

La section deux donne les méthodes manuelles de calcul de la réponse transitoire en température d'un câble à l'application d'un échelon de courant. Les méthodes sont établies pour des durées allant de:

- a) 10 min à 1 h environ:
- b) égales ou supérieures à 1 h environ. L'utilisation de cette dernière méthode est aussi nécessaire dans la section trois.

Une méthode de calcul par ordinateur de la réponse transitoire de câbles unipolaires a été publiée par la CIGRÉ [2]*.

La section trois fixe la méthode générale de calcul du facteur de capacité de transport cyclique fondée sur la réponse transitoire obtenue dans la section deux.

La section quatre fixe la méthode de calcul du régime de secours d'un câble fondée sur les réponses transitoires obtenues dans la section deux.

L'annexe A donne une méthode détaillée pour la réduction d'un circuit thermique multiple à un circuit à deux cellules. L'application de cette technique est nécessaire pour les câbles non traités de manière détaillée par l'article 4.

L'annexe B donne une méthode de calcul de la variation moyenne de température transitoire à travers l'isolant ou à travers l'huile de remplissage des tuyaux. Cette méthode est indispensable pour le calcul des variations transitoires de pression d'huile dans les câbles à huile fluide.

L'annexe C définit les méthodes servant à modifier certains des facteurs transitoires utilisés pour le calcul de capacité de transport cyclique dans les cas où les propriétés du sol et la profondeur de pose ne sont pas standard.

L'annexe D indique les méthodes d'estimation de la diffusivité du sol à partir d'autres paramètres ayant trait au sol, lorsque la valeur réelle n'est pas connue.

L'annexe E donne les valeurs de la résistivité thermique des matériaux (prises dans la Publication 287 de la CEI) et les valeurs proposées pour la capacité thermique volumique des matériaux, provenant de sources diverses.

L'annexe F fournit des exemples d'application des méthodes énoncées dans la présente norme. Des calculs détaillés sont présentés pour un régime transitoire de câble, un régime de charge cyclique et un régime de secours.

SECTION DEUX — RÉPONSE TRANSITOIRE EN TEMPÉRATURE

4. Réponse transitoire en température à l'application d'un échelon de courant

4.1 Aspects généraux

Les formules de base utilisées dans les calculs sont données dans la Publication 287 de la CEI.

4.1.1 Données de base

La réponse transitoire en température d'un câble à un échelon de courant circulant dans son âme (ou dans ses âmes) dépend de la combinaison des capacités thermiques et des résistances thermiques des parties constitutives du câble lui-même et de son environnement. A titre d'exemple, dans le cas important de câbles directement posés dans le sol, si la réponse est demandée pour des temps courts, les capacités thermiques du câble et la façon dont il en est tenu compte jouent un rôle

*Les chiffres entre crochets se rapportent à la «Bibliographie», article 9, page 60.

3. Layout of this standard

Section Two gives the manual methods for calculating the transient temperature response of a cable to a step function of current. Methods are set out for durations of:

- a) from 10 min up to about 1 h;
- b) for durations of about 1 h or greater. This is also required for use in Section Three.

A computer method for calculating the transient response of single-core cables has been published by CIGRE [2]*.

Section Three sets out the general method of calculating the cyclic rating factor based on the calculated transient response from Section Two.

Section Four sets out the method of calculating the emergency rating of a cable based on the calculated transient responses from Section Two.

Appendix A gives a detailed method for reducing a multiple thermal circuit to one having two sections. This technique is required for cables not covered in detail in Clause 4.

Appendix B gives a method for calculating the transient average temperature variation through the dielectric or through oil filling in pipes. This is required when calculating transient oil-pressure variations in oil-filled cables.

Appendix C sets out methods of modifying some of the transient factors used in the cyclic rating calculation when the soil properties and depth of laying are non-standard.

Appendix D gives methods for estimating the diffusivity of the soil from other soil parameters when the actual value is unknown.

Appendix E gives values for thermal resistivity of materials (reproduced from IEC Publication 287) and suggested values for the volumetric specific heat of materials, gleaned from various sources.

Appendix F gives sample applications of the methods enounced in this standard. Detailed calculations are given for a cable transient, a cyclic rating and an emergency rating.

SECTION TWO — TRANSIENT TEMPERATURE RESPONSE

4. Transient temperature response to a step function of current

4.1 General aspects

Supporting formulae are given in IEC Publication 287.

4.1.1 Background

The transient temperature response of a cable to a step-function of current in its conductor (or conductors) depends on the combination of thermal capacitances and resistances formed by the constituent parts of the cable itself and its surroundings. As an example, in the important case of cables laid directly in the ground, if the response is required for short times the thermal capacitances of the cable, and the way in which these are taken into account, are important. At the same time the

* The figures in square brackets refer to "Bibliography", Clause 9, page 61.

important. La contribution du sol environnant est alors négligeable. Au contraire, quand la réponse est demandée pour des temps longs, les capacités thermiques associées au câble peuvent être négligeables et le facteur prépondérant est le régime transitoire thermique du sol environnant.

La méthode de calcul de la réponse en température d'un câble à l'application brusque d'une valeur constante du courant à l'âme consiste à considérer que l'ensemble du circuit thermique est divisible en deux parties indépendantes. La première partie comprend les constituants du câble situés à l'intérieur de sa surface externe, la seconde partie est l'environnement du câble. Les réponses individuelles de ces deux parties constituent des régimes transitoires partiels, à partir desquels on peut reconstituer le régime transitoire du système complet.

La méthode utilisée pour déterminer ces deux parties du circuit thermique et des régimes transitoires de température correspondants est donnée séparément dans les paragraphes 4.2 et 4.3. La méthode permettant de combiner ces régimes transitoires entre eux, au moyen du facteur d'approche $a(t)$, est décrite dans le paragraphe 4.4.

4.1.2 Critères permettant l'utilisation d'un facteur d'approche égal à l'unité

Lorsqu'on effectue des calculs destinés à donner la température atteinte par l'âme après un temps suffisamment long pour que s'amortisse complètement le régime transitoire de la première partie du circuit thermique, on peut admettre que le facteur d'approche $a(t)$ est égal à 1. En pratique, cela est valable lorsque le temps écoulé depuis l'apparition du régime transitoire thermique est supérieur :

- a) à 12 h pour tous les types de câbles;
- b) au produit $T.Q$: lorsqu'il s'agit de câbles en tuyau à pression d'huile et de tous les types de câbles sous gaine métallique pour lesquels le produit $T.Q \leq 2$ h;
- c) au produit $2.T.Q$: lorsqu'il s'agit de câbles en tuyau sous pression de gaz et de tous les types de câbles sous gaine métallique pour lesquels le produit $T.Q > 2$ h;

où T est la résistance thermique totale et Q la capacité thermique totale du câble.

Le tableau ci-dessous, fondé sur les critères de spécification couramment appliqués à l'heure actuelle pour déterminer les dimensions des câbles, montre les domaines d'application des cas b) et c).

Type de câble	Cas b)	Cas c)
Câbles à huile fluide	1) Toutes tensions < 220 kV 2) 220 kV: sections $\leq 150 \text{ mm}^2$	1) 220 kV: sections > 150 mm ² 2) toutes tensions > 220 kV
Câbles en tuyau à pression d'huile	1) Toutes tensions $\leq 220 \text{ kV}$ 2) 220 kV: sections $\leq 800 \text{ mm}^2$	1) 220 kV: sections > 800 mm ² 2) Toutes tensions > 220 kV
Câbles en tuyau à pression de gaz		1) $\leq 220 \text{ kV}$ 2) Sections $\leq 1\,000 \text{ mm}^2$
Câbles à isolation extrudée	1) Toutes tensions < 60 kV 2) 60 kV: sections $\leq 150 \text{ mm}^2$	1) 60 kV: sections > 150 mm ² 2) Toutes tensions > 60 kV

4.1.3 Représentation du câble

Pour les besoins de la présente norme, le câble, c'est-à-dire la première partie du circuit thermique, doit être défini pour chaque mode d'installation, à savoir les installations suivantes:

a) Câbles enterrés directement dans le sol

Le câble complet y compris son revêtement extérieur ou sa protection contre la corrosion. Pour les câbles en tuyau, cela comprend le tuyau et son rubanage de protection.

contribution of the surrounding soil is negligible. On the other hand, when the response for long times is required, the thermal capacitances associated with the cable may be negligible and the most important factor is the thermal transient in the surrounding soil.

The method for calculating the temperature response of a cable to a suddenly applied constant value of conductor current is to consider that the whole thermal circuit is divisible into two independent parts. One part is made up of the cable components out to the outer surface of the cable, the second part is the environment of the cable. The individual responses of these two parts are partial transients, with which the total transient for the complete system can be built up.

The method for determining these two parts of the thermal circuit and the temperature transients across them are given separately in Sub-clauses 4.2 and 4.3 and the method for combining the transients by means of the attainment factor $a(t)$ is described in Sub-clause 4.4.

4.1.2 Criteria for the attainment factor to be unity

When the calculations are required to give the conductor temperature occurring after a period long enough to complete the transient in the first part of the thermal circuit, then the attainment factor $a(t)$ may be assumed to be equal to 1. In practice this applies when the period from the initiation of the thermal transient is longer than:

- a) 12 h for all cables;
- b) the product $T.Q$: when dealing with oil-pressure pipe-types cables and all types of self-contained cables where the product $T.Q \leq 2$ h, and
- c) the product $2.T.Q$: when dealing with gas-pressure pipe-type cables and all types of self-contained cables where the product $T.Q > 2$ h.

where T is the total thermal resistance and Q is the total thermal capacitance of the cable.

The table below, based on design values at present commonly used to determine dimensions of cables, shows when cases b) and c) apply.

Type of cable	Case b)	Case c)
Oil-filled cables	1) All voltages < 220 kV 2) 220 kV: sections $\leq 150 \text{ mm}^2$	1) 220 kV: sections > 150 mm ² 2) All voltages > 220 kV
Pipe-type, oil-pressure cables	1) All voltages $\leq 220 \text{ kV}$ 2) 220 kV: sections $\leq 800 \text{ mm}^2$	1) 220 kV: sections > 800 mm ² 2) All voltages > 220 kV
Pipe-type, gas-pressure cables		1) $\leq 220 \text{ kV}$ 2) Sections $\leq 1\,000 \text{ mm}^2$
Cables with extruded insulation	1) All voltages < 60 kV 2) 60 kV: sections $\leq 150 \text{ mm}^2$	1) 60 kV: sections > 150 mm ² 2) All voltages > 60 kV

4.1.3 Representation of the cable

For the purpose of this standard, the cable or first part of the thermal circuit shall be defined for each type of installation to include the following:

- a) *Cables buried directly in soil*

The complete cable including its outermost serving or anticorrosion protection. For pipe-type cables this includes the pipe and its protective wrappings.

b) *Câbles en fourreaux*

Le câble, le fourreau et tout ce qui remplit l'espace libre dans le fourreau. Pour les fourreaux noyés dans du béton, le circuit de câble comprend le fourreau proprement dit. (Le béton doit, de même que le sol, être considéré comme appartenant à la deuxième partie du circuit thermique.) Dans le cas de fourreaux formés directement en coulant du béton, le mode de traitement est le même, mais la capacité thermique du fourreau, Q_d , est nulle.

c) *Câbles posés à l'air libre*

Le câble complet y compris son revêtement extérieur.

Les régimes transitoires de température calculés pour la première partie du circuit thermique donnent l'échauffement de l'âme par rapport à la température de la surface extérieure du câble, telle qu'elle est définie ci-dessus.

Le câble est représenté par un circuit à constantes localisées, dont la détermination est importante, et les méthodes données dans la présente norme doivent être suivies si l'on veut obtenir des résultats uniformes chez les différents utilisateurs. Cela s'applique en particulier aux câbles de structure complexe pour lesquels, afin de rendre les calculs suffisamment commodes, le circuit du câble a été simplifié en le ramenant à un nombre d'éléments aussi réduits que possible.

Il convient de noter que, dans un câble, toutes les résistances thermiques, capacités thermiques et pertes doivent être calculées comme des grandeurs ramenées à un conducteur, ou au conducteur équivalent dans le cas de câbles tripolaires (voir paragraphe 4.2.1.2).

4.1.4 *Critères de choix du circuit thermique*

Les critères de choix des circuits thermiques à utiliser pour le calcul des régimes transitoires individuels dépendent de la durée de ceux-ci et devront être sélectionnés dans le tableau ci-dessous:

Choix du circuit thermique

Type de câble	Durée du régime transitoire	Paragraphe
Tous types de câbles unipolaires	$> \frac{1}{3} T.Q$ (et régimes de charges cycliques)	4.2
	de 600 s (10 min) à $\leq \frac{1}{3} T.Q$	4.3
Câbles en tuyau	$> \frac{1}{3} T.Q$ (et régimes de charges cycliques)	4.2
	de 600 s (10 min) à $\leq \frac{1}{3} T.Q$	4.3
Câbles tripolaires	$> \frac{1}{2} T.Q$ (totalité du câble) (et régimes de charges cycliques)	4.2
	de 600 s (10 min) à $\leq T.Q$ (un conducteur isolé)*	4.3

* Dans ce cas précis, T et Q représentent la résistance thermique et la capacité thermique d'un conducteur isolé unique.

Note. — T et Q représentent la résistance thermique et la capacité thermique totales du câble, à l'exception du cas marqué d'un *. $T.Q$ est la constante de temps thermique du câble.

Pour les câbles tripolaires, on admet que la réponse transitoire en température pour des durées fixées entre les deux limites, $T.Q$ pour le conducteur isolé et $\frac{1}{2} T.Q$ pour la totalité du câble, est donnée par une interpolation linéaire de la courbe d'échauffement en coordonnées semi-logarithmiques (échauffement linéaire et temps logarithmique).

b) Cables in ducts

The cable, the duct and whatever occupies the duct-space. For ducts embedded in concrete, the cable circuit includes the duct itself. (The concrete is to be considered, with the soil, as belonging to the second part of the thermal circuit.) For ducts formed directly by casting concrete, the treatment is the same, but the thermal capacity of the duct, Q_d , is zero.

c) Cables in air

The complete cable including its outermost covering.

The temperature transients calculated for the first part of the thermal circuit will give the temperature rise of the conductor with respect to the outermost surface of the cable as defined above.

The cable is represented by a circuit with lumped constants, the derivation of which is important and the methods given in this standard must be followed if uniform results between users are to be obtained. This applies particularly to cables having complex constructions and where, in order to make calculation reasonably convenient, the cable circuit has been simplified to as few a number of elements as possible.

It should be noted that, in a cable, all thermal resistances, capacitances and losses are to be calculated as losses per conductor, or per equivalent conductor in the case of three-core cables (see Sub-clause 4.2.1.2).

4.1.4 Criteria for selecting the thermal circuit

The criteria for selecting the thermal circuits to be used for calculating the individual transients depends on the duration of the transient and should be selected from the table below:

Selection of thermal circuit

Cable type	Duration of transient	Sub-clause
Single-core cables, all types	$> \frac{1}{3} T.Q$ (and cyclic ratings)	4.2
	600 s (10 min) to $\leq \frac{1}{3} T.Q$	4.3
Pipe-type cables	$> \frac{1}{3} T.Q$ (and cyclic ratings)	4.2
	600 s (10 min) to $\leq \frac{1}{3} T.Q$	4.3
Three-core cables	$> \frac{1}{2} T.Q$ (total cable) (and cyclic ratings)	4.2
	600 s (10 min) to $\leq T.Q$ (one core)*	4.3

* In this case T and Q are the thermal resistance and thermal capacitance of *one core* only.

Note. — T and Q are the total thermal resistance and thermal capacitance of the cable except as marked *. $T.Q$ is the thermal time constant of the cable.

For three-core cables the transient temperature response for durations between the two limits, $T.Q$ for the core and $\frac{1}{2} T.Q$ for the whole cable, is assumed to be given by a straight line interpolation on linear temperature rise/logarithmic time axes.

Pour des durées supérieures à 1 h environ (et pour les régimes de charge cycliques), les formules données au paragraphe 4.2 conviennent généralement, tandis que celles qui sont données au paragraphe 4.3 peuvent être utilisées pour des durées comprises entre 10 min et 1 h environ.

4.2 Calcul des réponses transitoires partielles pour les longues durées ($> \frac{1}{3}T_1 Q$) et les régimes de charge cycliques

Ces formules conviennent habituellement pour des durées supérieures à 1 h environ: voir paragraphe 4.1.4 pour les durées précises.

4.2.1 Représentation de l'isolant

4.2.1.1 Câbles unipolaires

L'isolant est représenté par des constantes thermiques localisées. La capacité thermique totale de l'isolant (Q_i) est répartie entre l'âme et la gaine, de telle façon que la chaleur totale emmagasinée dans l'isolant demeure inchangée.

L'isolant est alors représenté par les éléments indiqués en trait plein sur la figure 1, où:

$$p = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1} \quad (4-1)$$

T_1 = résistance thermique totale de l'isolant par conducteur (ou par conducteur unipolaire équivalent dans le cas d'un câble tripolaire, voir paragraphe 4.2.1.2)

Q_i = capacité thermique totale de l'isolant par conducteur (ou par conducteur unipolaire équivalent dans le cas d'un câble tripolaire, voir paragraphe 4.2.1.2)

Q_c = capacité thermique de l'âme (ou de l'âme du conducteur unipolaire équivalent dans le cas d'un câble tripolaire, voir paragraphe 4.2.1.2)

D_i = diamètre extérieur de l'enveloppe isolante

d_c = diamètre extérieur de l'âme.

Note. — Dans le calcul des caractéristiques thermiques, lorsque le câble comporte des écrans: les rubans métalliques sont considérés comme faisant partie de l'âme ou de la gaine, tandis que les couches semi-conductrices (y compris les rubans en papier de carbone métallisé) sont considérés comme faisant partie de l'isolant. Les dimensions des constituants concernés devront être modifiées en conséquence.

4.2.1.2 Câbles tripolaires

Le câble tripolaire est remplacé par une structure équivalente unipolaire dissipant au total les mêmes pertes Joule. L'âme du conducteur unipolaire équivalent a un diamètre:

$$d_c = D_i e - \frac{2 \pi T_1}{\rho_i} \quad (4-2)$$

où D_i a pour valeur celle du diamètre extérieur de l'enveloppe isolante (sous la gaine) du câble tripolaire et T_1 est la résistance thermique du conducteur unipolaire équivalent. T_1 est égal au tiers de la valeur de celle d'une des phases d'un câble tripolaire telle quelle est donnée par la Publication 287 de la CEI. ρ_i est la résistivité thermique de l'isolant.

Les capacités thermiques sont calculées avec les hypothèses suivantes:

- Les âmes réelles sont considérées comme étant complètement situées à l'intérieur du diamètre de l'âme du conducteur unipolaire équivalent, le reste de ce conducteur étant occupé par l'isolation.

In general Sub-clause 4.2 can be used for durations greater than about 1 h (and for cyclic ratings) while Sub-clause 4.3 can be used for durations of about 1 h down to 10 min.

4.2 Calculation of partial transients for long durations ($> \frac{1}{3}T_1 Q$) and cyclic rating

These formulae are usually suitable for time durations greater than about 1 h: see Sub-clause 4.1.4 for exact durations.

4.2.1 Representation of the dielectric

4.2.1.1 Single-core cables

The dielectric is represented by lumped thermal constants. The total thermal capacity of the dielectric (Q_i) is divided between the conductor and the sheath, so that the total heat stored in the dielectric is unchanged.

The dielectric is then represented by the components shown in full lines in Figure 1, where:

$$p = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1} \quad (4-1)$$

T_1 = total thermal resistance of dielectric per conductor (or equivalent single-core conductor of a three-core cable, see Sub-clause 4.2.1.2)

Q_i = total thermal capacitance of dielectric per conductor (or equivalent single-core conductor of a three-core cable, see Sub-clause 4.2.1.2)

Q_c = thermal capacitance of conductor (or equivalent single-core conductor of a three-core cable, see Sub-clause 4.2.1.2)

D_i = external diameter of dielectric

d_c = external diameter of conductor

Note. — Where screening layers are present: for thermal calculations metallic tapes are considered to be part of the conductor or sheath while semi-conducting layers (including metallized carbon paper tapes) are considered as part of the insulation. The appropriate component dimensions should be modified accordingly.

4.2.1.2 Three-core cables

The three-core cable is replaced by an equivalent single-core construction dissipating the same total conductor losses. The equivalent single-core conductor has a diameter:

$$d_c = D_i e^{-\frac{2 \pi T_1}{\rho_i}} \quad (4-2)$$

where D_i is the same value of diameter over dielectric (under the sheath) as for the three-core cable and T_1 is the thermal resistance of the equivalent single-core cable. T_1 is one-third of the value for one of the cores of the three-core cable as given in IEC Publication 287, ρ_i is the thermal resistivity of the dielectric.

Thermal capacitances are calculated on the following assumptions:

- a) The actual conductors are considered to be completely inside the diameter of the equivalent single-core conductor, the remainder of the equivalent conductor being occupied by insulation.

- b) L'espace entre l'âme du conducteur unipolaire équivalent et la gaine est considéré comme complètement occupé par l'isolation (pour les câbles à huile fluide, cet espace est en partie rempli par le volume d'huile total inclus dans les conduits, le reste étant du papier imprégné d'huile).

Le facteur p est calculé en utilisant les dimensions du câble unipolaire équivalent et est appliqué à la capacité thermique de l'isolation fondée sur l'hypothèse b) ci-dessus.

4.2.2 Représentation du câble

4.2.2.1 Généralités

La première partie du circuit thermique qui simule le câble est toujours représentée par un réseau à deux cellules (voir figure 2). La première cellule comprend la capacité thermique de l'âme et la portion intérieure de l'isolant avec la résistance thermique de celui-ci, alors que la deuxième cellule comprend la capacité thermique et la résistance thermique du reste du câble. Un exemple typique fondé sur les câbles cités au point a) du paragraphe 4.2.2.2 ci-dessous est donné dans la figure 3. Il faut noter que toute capacité thermique extérieure à T_B a été négligée, la paire de bornes de droite étant mise en court-circuit lors du calcul du régime transitoire.

Les formules des constantes de la figure 2 pour les types les plus courants de câbles et d'installations sont données dans le paragraphe suivant.

4.2.2.2 Représentation des types courants de câbles

Note. — Les symboles sont définis uniquement lorsqu'ils sont utilisés pour la première fois.

- a) *Câbles isolés au papier imprégné de matière visqueuse ou d'huile fluide sous gaine métallique, câbles à isolant extrudé et autres structures analogues du point de vue thermique*

$$T_A = T_1 \quad (4-3)$$

$$T_B = q_s T_3 \quad (4-4)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-5)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + p' Q_j}{q_s} \quad (4-6)$$

où:

T_1 , Q_i et p sont définis au paragraphe 4.2.1.1

T_3 = résistance thermique du revêtement extérieur

Q_c = capacité thermique de l'âme ou de l'âme du conducteur unipolaire équivalent

Q_s = capacité thermique de la gaine et du fretage

Q_j = capacité thermique du revêtement extérieur

q_s = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âme + gaine)}}{\text{pertes dans l'âme}}$: il sert à tenir compte des pertes supplémentaires se produisant dans la gaine

Dans les câbles tripolaires, l'âme est celle du conducteur unipolaire équivalent.

p' est un facteur utilisé pour répartir la capacité thermique du revêtement extérieur de manière analogue à celle utilisée pour l'isolant.

$$p' = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_e}{D_s} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_s} \right)^2 - 1} \quad (4-7)$$

D_e et D_s sont les diamètres extérieur et intérieur du revêtement.

Note. — La partie extérieure de la capacité thermique du revêtement a été négligée, car il a été vérifié qu'elle ne jouait qu'un rôle insignifiant dans la détermination du régime transitoire de température de l'âme.

- b) The space between the equivalent single-core conductor and the sheath is considered to be completely occupied by insulation (for oil-filled cables this space is filled partly by the total volume of oil in the ducts and the remainder is oil-impregnated paper).

The factor p is then calculated using the dimensions of the equivalent single-core cable and is applied to the thermal capacitance of the insulation based on assumption b) above.

4.2.2 Representation of the cable

4.2.2.1 General

The first part of the thermal circuit simulates the cable, and is always represented by a two-section network (see Figure 2). The first section includes the thermal capacitance of the conductor and the inner portion of the dielectric along with the thermal resistance of the dielectric while the second section includes thermal capacitance and thermal resistance of the remainder of the cable. A typical example, based on the cables in Item a) of Sub-clause 4.2.2.2 below is given in Figure 3. Note that any thermal capacitance outside T_B is omitted, as the right-hand pair of terminals is short-circuited when calculating the transient.

Formulae for the constants in Figure 2 for the more common types of cables and installations are given in the following sub-clause.

4.2.2.2 Representation of common types of cable

Note. — Symbols are defined only where they are first used.

- a) *Solid and self-contained oil-filled paper insulated cables, extruded cables and thermally similar constructions*

$$T_A = T_1 \quad (4-3)$$

$$T_B = q_s T_3 \quad (4-4)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-5)$$

$$Q_B = (1 - p)Q_i + \frac{Q_s + p'Q_j}{q_s} \quad (4-6)$$

where:

T_1 , Q_i and p are defined in Sub-clause 4.2.1.1

T_3 = thermal resistance of outer covering

Q_c = thermal capacitance of conductor or equivalent single-core conductor

Q_s = thermal capacitance of sheath and reinforcement

Q_j = thermal capacitance of outer covering

q_s = ratio: $\frac{\text{losses in (conductor + sheath)}}{\text{losses in conductor}}$ and is used to take account of the extra losses occurring in the sheath

In three-core cables, the conductor is the equivalent single-core conductor.

p' is a factor used to allocate the thermal capacitance of the outer covering in a similar manner to that used for the dielectric.

$$p' = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_e}{D_s} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_s} \right)^2 - 1} \quad (4-7)$$

D_e and D_s are the outer and inner diameters of the covering.

Note. — The outer part of the thermal capacitance of the covering is omitted because it has been found to play only an insignificant part in determining the conductor temperature transient.

b) Câbles en tuyau (à huile fluide sous forte pression)

$$T_A = T_1 + \frac{1}{2} q_s T_o \quad (4-8)$$

$$T_B = \frac{1}{2} q_s T_o + q_e T_3 \quad (4-9)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-10)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_o}{q_s} \quad (4-11)$$

où:

T_1 , Q_i et p sont définis au paragraphe 4.2.1.1

q_s = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + écrans)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

T_o = résistance thermique de l'huile dans le tuyau

T_3 = résistance thermique du revêtement dans le tuyau

Q_o = résistance thermique de l'huile dans le tuyau

q_e = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + écrans + tuyau)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

c) Câbles en tuyau (à pression de gaz, câbles assemblés, à remplissage et armés)

$$T_A = T_1 \quad (4-12)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_2 + q_j T_3 \quad (4-13)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-14)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + Q_f}{q_s} + \frac{Q_a}{q_a} + \frac{0,5 Q_p}{q_j} \quad (4-15)$$

où:

q_a = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + gaines + armure)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

q_j = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + gaines + armure + tuyau)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

T_2 = résistance thermique du gaz dans le tuyau

T_f = résistance thermique de la matière de remplissage

Q_a = capacité thermique de l'armure

Q_f = capacité thermique de la matière de remplissage

Q_p = capacité thermique du tuyau

d) Câbles en tuyau (à pression de gaz, sans matière de remplissage ni armure)

$$T_A = T_1 \quad (4-16)$$

$$T_B = q_s T_2 + q_e T_3 \quad (4-17)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-18)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s}{q_s} + \frac{0,5 Q_p}{q_e} \quad (4-19)$$

où:

q_e = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + gaine + tuyau)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

b) Pipe-type cables (high pressure oil-filled)

$$T_A = T_1 + \frac{1}{2} q_s T_o \quad (4-8)$$

$$T_B = \frac{1}{2} q_s T_o + q_e T_3 \quad (4-9)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-10)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_o}{q_s} \quad (4-11)$$

where:

T_1 , Q_i and p are defined in Sub-clause 4.2.1.1,

q_s = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors and screens)}}{\text{losses in conductors}}$

T_o = thermal resistance of the oil in the pipe

T_3 = thermal resistance of covering on pipe

Q_o = thermal capacitance of the oil in the pipe

q_e = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + screens + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$

c) Pipe-type cables (gas pressure, cables laid up, filled and armoured)

$$T_A = T_1 \quad (4-12)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_2 + q_j T_3 \quad (4-13)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-14)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + Q_f}{q_s} + \frac{Q_a}{q_a} + \frac{0.5 Q_p}{q_j} \quad (4-15)$$

where:

q_a = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + armour)}}{\text{losses in conductors}}$

q_j = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + armour + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$

T_2 = thermal resistance of gas in the pipe

T_f = thermal resistance of filling

Q_a = thermal capacitance of armour

Q_f = thermal capacitance of filling

Q_p = thermal capacitance of pipe

d) Pipe-type cables (gas pressure, no filling material or armour)

$$T_A = T_1 \quad (4-16)$$

$$T_B = q_s T_2 + q_e T_3 \quad (4-17)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-18)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s}{q_s} + \frac{0.5 Q_p}{q_e} \quad (4-19)$$

where:

q_e = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$

e) Câbles en fourreau

$$T_A = T_1 \quad (4-20)$$

$$T_B = q_s (T_3 + T'_4 + T''_4) \quad (4-21)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-22)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + Q_j + 0,5 Q_d}{q_s} \quad (4-23)$$

où:

T'_4 = résistance thermique de l'espace d'air dans le fourreau

T''_4 = résistance thermique du fourreau

Q_d = capacité thermique du fourreau

f) Câbles triplomb armés

$$T_A = T_1 \quad (4-24)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_3 \quad (4-25)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-26)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + 0,5 Q_f}{q_s} + \left(\frac{q_a T_3}{q_s T_2 + q_a T_3} \right)^2 \left(\frac{0,5 Q_f}{q_s} + \frac{Q_a + Q_j}{q_a} \right) \quad (4-27)$$

4.2.2.3 Représentation des câbles et d'installations de types non spécifiés au paragraphe précédent

Le paragraphe précédent propose des circuits correspondant à la plupart des types de câbles. Néanmoins, afin de faire face aux imprévus, la méthode suivante est recommandée pour les cas qui ne sont pas traités spécifiquement dans la présente norme.

- a) Construire un bipôle en échelle représentant les résistances thermiques et capacités thermiques du câble. A cet effet, il convient de considérer le câble comme s'étendant jusqu'à la surface intérieure du sol pour câbles enterrés jusqu'à l'air libre pour les câbles posés à l'air.

Les résistances thermiques sont calculées par les méthodes utilisées par la détermination des capacités de transport en régime permanent (voir Publication 287 de la CEI).

Les capacités thermiques des parties métalliques sont représentées pour des grandeurs localisées correspondant à leur emplacement physique dans le câble. La capacité thermique des matériaux de haute résistivité thermique (par exemple l'isolation et les revêtements) est répartie selon la technique décrite au paragraphe 4.2.1 (par exemple comme pour le revêtement au point a) du paragraphe 4.2.2.2). Il est important que l'isolant soit traité exactement de la manière spécifiée au paragraphe 4.2.1.

- b) Le réseau peut comprendre parfois plus de deux cellules et il doit, pour permettre de trouver la solution, être réduit au schéma à deux cellules représenté par la figure 2. Quand le circuit thermique d'un câble ne peut pas être facilement réduit à ces deux cellules, la seconde cellule et les suivantes doivent être combinées en une seule, en employant la méthode donnée dans l'annexe A. Il est extrêmement important que la première cellule conserve la forme originale décrite au paragraphe 4.2.1.

e) Cables in ducts

$$T_A = T_1 \quad (4-20)$$

$$T_B = q_s (T_3 + T'_4 + T''_4) \quad (4-21)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-22)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + Q_j + 0.5 Q_d}{q_s} \quad (4-23)$$

where:

T'_4 = thermal resistance of the air space in the duct

T''_4 = thermal resistance of the duct

Q_d = thermal capacitance of the duct

f) Armoured cables with each core in a separate lead sheath (SL type)

$$T_A = T_1 \quad (4-24)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_3 \quad (4-25)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-26)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + 0.5 Q_f}{q_s} + \left(\frac{q_a T_3}{q_s T_2 + q_a T_3} \right)^2 \left(\frac{0.5 Q_f}{q_s} + \frac{Q_a + Q_j}{q_a} \right) \quad (4-27)$$

4.2.2.3 Representation of cables and installations of types not specified in previous sub-clause

The previous sub-clause provides circuits for most cable types. However, to cover contingencies, the following method is recommended for cases not specifically dealt with in this standard.

- a) Build up a ladder network representing the thermal resistances and capacitances of the cable. For this purpose the cable should be considered to extend as far as the inner surface of the soil for buried cables, and to free air for cables in air.

Thermal resistances are calculated by the methods used to determine the steady-state ratings. (See IEC Publication 287.)

Thermal capacitances of metallic parts are placed as lumped quantities corresponding to their physical position in the cable. The thermal capacitance of materials with a high thermal resistivity (e.g. insulation and coverings) is allocated by the technique described in Sub-clause 4.2.1 (e.g. the covering in Item a) of Sub-clause 4.2.2.2). It is important that the dielectric be treated exactly as specified in Sub-clause 4.2.1.

- b) Sometimes this network may contain more than two sections and to allow the solution to be found shall be reduced to the two section form shown in Figure 2. Where the thermal circuit of a cable is not easily reduced to two sections, then the second and subsequent sections are combined into one, using the method given in Appendix A. It is more important that the first section is left in the original form as derived in Sub-clause 4.2.1.