

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60853-1

Première édition
First edition
1985-01

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

Première partie:

Facteur de capacité de transport cyclique
pour des câbles de tensions inférieures ou
égales à 18/30 (36) kV

**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



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60853-1: 1985

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} 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**

60853-1

Première édition
First edition
1985-01

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

Première partie:

Facteur de capacité de transport cyclique
pour des câbles de tensions inférieures ou
égales à 18/30 (36) kV

**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

© IEC 1985 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
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

R

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Symboles	8
3. Calcul du facteur de capacité de transport cyclique	8
3.1 Un seul circuit	10
3.2 Groupe de câbles avec pertes égales, câbles ou fourreaux non jointifs	14
3.3 Groupe de circuits de trois câbles ou fourreaux identiques également chargés, jointifs et ayant des pertes égales	16
4. Méthode permettant d'utiliser d'autres valeurs de résistivité du sol, diffusivités thermiques du sol et profondeurs de pose	16
5. Diffusivité thermique du sol	18
6. Critères d'application de ces méthodes à des câbles de tension plus élevée	20
7. Exemples	22
ANNEXE A – Théorie fondamentale pour le calcul des facteurs de capacité de transport cyclique lorsque le cycle de charge est de forme quelconque	30
FIGURES	34

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1. Scope	7
2. Symbols	9
3. Calculation of cyclic rating factor	9
3.1 Single isolated circuit	11
3.2 Group of cables with equal losses, cables or ducts not touching	15
3.3 Group of circuits of three equally loaded, identical, touching cables or ducts having equal losses	17
4. Method of dealing with different soil resistivities, soil thermal diffusivities and depths of laying	17
5. Soil thermal diffusivity	19
6. Criteria for application of methods to cables of higher voltage	21
7. Examples	23
APPENDIX A – Basic theory for computation of cyclic rating factors with any shape of load cycle	31
FIGURES	34

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60853-1:1985

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CALCUL DES CAPACITÉS DE TRANSPORT DES CÂBLES POUR LES RÉGIMES
DE CHARGE CYCLIQUES ET DE SURCHARGE DE SECOURS****Première partie: Facteur de capacité de transport cyclique pour des câbles
de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV**

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)93	20A(BC)97

Pour de plus amples renseignements, consulter le rapport de vote mentionné dans le tableau ci-dessus.

La publication suivante de la CEI est citée dans la présente norme:

Publication n° 287 (1982): Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**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**

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 in so far 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)93	20A(CO)97

Further information can be found in the Report on Voting indicated in the table above.

The following IEC publication is quoted in this standard:

Publication No. 287 (1982): Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100% Load Factor).

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

Première partie: Facteur de capacité de transport cyclique pour des câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV

INTRODUCTION

La présente norme donne des méthodes de calcul du facteur de capacité de transport cyclique pour des câbles dont la capacité thermique intérieure peut être négligée. La méthode est fondée sur la procédure simplifiée, publiée dans un document CIGRÉ*.

Il est prévu de publier une seconde partie donnant la méthode complète (un bref résumé figure dans l'annexe A) qui traiterait des cas prenant en compte la capacité thermique du câble. Cette seconde partie inclurait également les méthodes de calcul des capacités de transport en surcharge de secours.

Les méthodes simplifiées de cette norme nécessitent uniquement la connaissance de la forme exacte de la variation de charge pendant une durée n'excédant pas les 6 h précédant immédiatement l'instant où la température atteint sa valeur maximale et une valeur moyenne de cette température pour les périodes précédentes. Cela réduit le travail à effectuer, mais introduit certaines restrictions sur le type de câble et la forme du cycle de charge susceptibles d'être traités. Les méthodes peuvent s'appliquer à toutes tailles et tous types de câbles de tension nominale n'excédant pas 18/30 (36) kV, pour une forme quelconque du cycle de charge avec une marge d'erreur ne dépassant pas 5% dans le sens de la sécurité. Des critères limitant l'application de ces méthodes simplifiées dans le cas des câbles de tension plus élevée sont donnés dans l'article 6.

La variation de la résistance de l'âme en fonction de la température est négligée. On peut démontrer qu'il en résulte une légère erreur dans le sens de la sécurité.

1. Domaine d'application

Il n'a pas été tenu compte pour le moment des effets éventuels de la migration d'humidité sur la résistivité thermique du sol. Cela correspond à la méthode déjà adoptée dans la Publication 287 de la CEI: Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%), pour le calcul des capacités de transport en régime permanent des câbles dans un sol uniforme. Des méthodes permettant de tenir compte des zones du sol ayant des caractéristiques thermiques différentes et de l'assèchement du sol sont à l'étude.

Les méthodes de cette norme s'appliquent aux câbles enterrés dans un sol uniforme, soit directement soit en fourreaux, lorsqu'ils transportent une charge variant de façon cyclique sur une durée de 24 h, la forme de chaque cycle journalier étant sensiblement la même. On suppose que la tension a été appliquée pendant une durée suffisante pour que l'échauffement de l'âme dû aux pertes diélectriques ait atteint un régime permanent. L'échauffement total de l'âme au-dessus de l'ambiante est alors égal à la somme de l'échauffement en régime permanent dû aux pertes diélectriques (donné dans la Publication 287) et des variations transitoires de température dues aux variations de courant.

* Capacité de transport des câbles pour les régimes de charge cycliques et de secours d'urgence, Partie 1: Electra n° 24, octobre 1972, page 63.

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

INTRODUCTION

This standard gives methods for calculating the cyclic rating factor for cables where the internal thermal capacitance can be neglected. The method is based on the simplified procedure published in a CIGRÉ document.*

It is intended to issue a second part detailing the full method (a brief résumé of which is set out in Appendix A) which will provide for those cables where the thermal capacitance should be included. This second part will also include methods for the calculation of emergency ratings.

The simplified methods in this standard require only a knowledge of the full shape of the load variation for not more than 6 h immediately preceding the time of maximum temperature and an average value for times before that. This reduces the amount of work involved, but places some restrictions on the type of cable and shape of load cycle that can be dealt with. The methods can be applied to all sizes and types of cable for nominal voltages up to and including 18/30 (36) kV, with any shape of load cycle, when the margin of error is not expected to exceed 5% on the safe side. Criteria for limited application of these simplified methods to cables for higher voltages are given in Clause 6.

Change in conductor resistance with temperature is neglected. This can be shown to result in a small error on the safe side.

1. Scope

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: Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100% Load Factor). Methods for dealing with regions having different thermal characteristics and with drying out of the soil are under consideration.

The methods in this standard apply to cables buried in uniform soil, 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. It is assumed that the voltage has 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 changes of current.

* Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads, Part 1: Electra No.24, October 1972, Page 63.

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

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

2. Symboles

Symboles	Définitions	Unités
B	= grandeur utilisée à l'article 3 et dans l'annexe A	
D_e	= diamètre extérieur d'un câble ou d'un fourreau,	m
F	= coefficient utilisé pour exprimer un échauffement mutuel permanent provoqué par les autres câbles d'un groupe	
I	= valeur du courant de charge observé à intervalles horaires durant un cycle de 24 h	A
$I_{\max}$	= valeur la plus élevée du courant de charge horaire	A
L	= profondeur de pose mesurée par rapport à l'axe du câble	m
M	= facteur de capacité de transport dû à une variation cyclique du courant de charge	
T_4	= résistance thermique extérieure d'un seul câble ou d'un fourreau, soit posé de manière isolée, soit faisant partie d'un groupe	K.m/W
ΔT_4	= augmentation de la résistance thermique extérieure du câble considéré, due à la présence d'autres câbles dans le groupe	K.m/W
W	= pertes totales par effet Joule (fonction du courant) par câble, déterminées en utilisant la résistance de l'âme à la température maximale de fonctionnement	W/m
$Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_i$	= coefficient proportionnel aux pertes, fonction du courant dans un câble entre les heures (i) et ($i+1$) précédant l'instant où la température de l'âme est la plus élevée	
i	= temps précédant le moment prévu pour la température maximale	h
k	= rapport de l'élévation de température au-dessus de l'ambiante de la surface extérieure d'un câble (ou d'un fourreau) à l'élévation de température de l'âme au-dessus de l'ambiante en régime permanent	
k_1	= valeur de k pour un câble dans un groupe	
p	= fraction du cycle journalier de charge durant laquelle la charge n'atteint pas sa valeur maximale	
t	= temps précédant le moment prévu pour la température maximale	s
$\theta(\infty)$	= élévation de la température de l'âme au-dessus de l'ambiante en régime permanent (mais voir paragraphe 3.1.1 lorsque les pertes diélectriques ne sont pas négligeables)	K
$\theta_R(i)$	= élévation de la température de l'âme au-dessus de l'ambiante au temps i en heures, due à l'application d'une fonction échelon de courant de charge égale au courant nominal en régime permanent (facteur de charge 100%). $\theta_R(\infty)$ représente l'élévation de température permanente de l'âme, due au courant nominal en régime permanent (voir aussi les remarques au symbole $\theta(\infty)$ lorsque les pertes diélectriques ne sont pas négligeables).	K
$\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i$	= fonction définie dans l'annexe A; valeurs numériques données au tableau II	
$\alpha(i)$	= facteur d'approche de la température de l'âme du câble au temps (i) en heures, $\alpha(\infty) = 1$	
$\beta(i)$	= facteur d'approche de la température de la surface extérieure du câble (ou du fourreau) au temps (i) en heures, $\beta(\infty) = 1$	
$\gamma(i)$	= fonction utilisée dans les calculs des facteurs de capacité de transport cyclique pour l'un des câbles d'un groupe	
δ	= diffusivité thermique du sol	m^2/s
μ	= facteur de charge des pertes du cycle de charge considéré	
ϱ_T	= résistivité thermique du sol	K.m/W

3. Calcul du facteur de capacité de transport cyclique

La méthode de calcul varie en fonction de la forme et des informations disponibles pour le cycle de charge. La méthode de base est donnée pour référence dans l'annexe A, et les formules données ici sont des simplifications susceptibles d'être faites en fonction des cas considérés. Le tableau I constitue un guide pour le choix de la méthode à retenir dans chacun des cas considérés.

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 values 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 soil properties are constant in both time and space.

2. Symbols

Symbol	Definition	Unit
B	= quality used in Clause 3 and Appendix A	
D_e	= external diameter of a cable or a duct	m
F	= coefficient used to express the steady state mutual heating caused by other cables in a group	
I	= value of load current observed at hourly intervals during a 24 h cycle	A
$I_{\max}$	= highest of the hourly values of load current	A
L	= depth of laying measured to cable axis	m
M	= rating factor due to a cyclic variation of load current	
T_4	= external thermal resistance of a single cable or duct either in isolation or as one of a group	K.m/W
ΔT_4	= increase in external thermal resistance of the cable under consideration due to the presence of other cables in the group	K.m/W
W	= total joule (current dependent) losses per cable determined using conductor resistance at maximum operating temperature	W/m
$Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_i$	= coefficient proportional to the current-dependent losses in a cable between (i) and $(i+1)$ hours prior to the instant of highest conductor temperature	
i	= time prior to expected time of maximum temperature	h
k	= ratio of cable (or duct) external surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady-state conditions	
k_1	= value of k for a cable in a group	
p	= fraction of daily load cycle during which the load is not at its maximum value	
t	= time prior to expected time of maximum temperature	s
$\theta(\infty)$	= conductor steady state temperature rise above ambient (but see Sub-clause 3.1.1 when dielectric loss is not negligible)	K
$\theta_R(i)$	= conductor temperature rise above ambient at time i hours due to the application of a step function of load current equal to the sustained (100% load factor) rated current. $\theta_R(\infty)$ is the steady state conductor temperature rise due to the sustained rated current (see also remarks to $\theta(\infty)$ when dielectric loss is not negligible)	K
$\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i$	= function defined in Appendix A. Numerical values given in Table II	
$\alpha(i)$	= cable conductor temperature attainment factor at time (i) hours, $\alpha(\infty) = 1$	
$\beta(i)$	= cable (or duct) outer surface temperature attainment factor at time (i) hours, $\beta(\infty) = 1$	
$\gamma(i)$	= function used in calculating cyclic rating factors for one of a group of cables	
δ	= soil thermal diffusivity	m^2/s
μ	= loss load factor for load current cycle under consideration	
ρ_T	= soil thermal resistivity	K.m/W

3. Calculation of cyclic rating factor

The method varies depending on the shape and the amount of detail known for the load cycle. The basic method is given for reference in Appendix A, and the formulae given here are simplifications which can be made according to the case being dealt with. Table I provides a guide to the method to be selected for each case.

TABLEAU I
Guide pour le choix des méthodes

Description du circuit	Description du cycle de charge	Paragraphes
Un seul câble ou Un seul circuit comportant trois câbles unipolaires. Posés directement dans le sol ou en fourreaux. Câbles ou fourreaux jointifs	Type quelconque de variation de charge	3.1.1
	Courant maintenu à sa valeur maximale pendant au moins 6 h, fraction constante pour le reste du cycle	3.1.2
	Courant maintenu à sa valeur maximale pendant au moins 6 h, type quelconque de variation pour le reste du cycle	3.1.3
	Cycle de charge inconnu à l'exception du facteur de charge des pertes μ	3.1.4
Groupe de câbles avec pertes égales Posés directement dans le sol ou en fourreaux. Câbles ou fourreaux non jointifs	Type quelconque de variation de charge	3.2.1
	Courant maintenu à sa valeur maximale pendant au moins 6 h, type quelconque de variation pour le reste du cycle	3.2.2
Groupe de circuits, chacun d'eux étant formé par trois câbles, tous les câbles ayant des pertes égales. Posés directement dans le sol ou en fourreaux. Câbles ou fourreaux jointifs dans chaque circuit, circuits espacés	Type quelconque de variation de charge	3.3
	Courant maintenu à sa valeur maximale pendant au moins 6 h, type quelconque de variation pour le reste du cycle	3.3

Le facteur de capacité de transport cyclique est dénoté par la lettre M et représente le facteur par lequel on peut multiplier le courant cyclique journalier ayant une valeur maximale égale au courant nominal admissible en régime permanent (facteur de charge 100%) pour que l'âme atteigne, sans la dépasser, la température maximale admissible normalisée.

3.1 Un seul circuit formé de:

- Un câble multiconducteur posé directement dans le sol ou dans un fourreau.
- Trois câbles jointifs disposés en trèfle ou en nappe.
- Trois câbles posés dans des fourreaux jointifs disposés en trèfle ou en nappe.

3.1.1 Cycle de charge quelconque de forme connue

Le cycle de charge journalier est tout d'abord exprimé en 24 valeurs horaires en graduant son échelle de manière que sa valeur maximale soit égale à l'unité (voir figures 1a et 1b, page 34). L'amplitude de chaque valeur horaire est ensuite élevée au carré pour donner 24 valeurs représentant le cycle des pertes par effet Joule du câble (voir figure 1c, page 34). Cette courbe est alors exprimée en une série de variations en échelons conduisant à une courbe discontinue en créneaux ayant approximativement la valeur moyenne de la courbe originale (voir figure 1d, page 34). On désigne par $Y_0, Y_1, Y_2 \dots Y_5$ les ordonnées de la courbe en créneaux pour les six périodes horaires précédant l'instant où la température atteint sa valeur maximale. On notera que la méthode particulière adoptée pour le tracé des courbes de charge et des pertes de la figure 1 suppose que les valeurs mesurées données dans l'exemple du paragraphe 7.1 s'appliquent à des durées s'étendant une demi-heure avant et après chaque période

TABLE I
Guide to selection of methods

Description of circuit	Description of load cycle	Sub-clause
Isolated cable or Isolated circuit of three single-core cables Direct buried or in ducts. Cables or ducts touching each other	Any type of load variation	3.1.1
	Sustained maximum for at least 6 h, constant fraction for remainder	3.1.2
	Sustained maximum for at least 6 h, any type of variation for remainder	3.1.3
	Nothing known about load cycle except the loss load factor μ	3.1.4
Group of cables with equal losses Direct buried or in ducts. Cables or ducts not touching	Any type of load variation	3.2.1
	Sustained maximum for at least 6 h, any type of variation for remainder	3.2.2
Group of circuits, each circuit having three cables, all cables having equal losses. Direct buried or in ducts. Cables or ducts in each circuit touching, circuits are spaced	Any type of load variation	3.3
	Sustained maximum for at least 6 h, any type of variation for remainder	3.3

The cyclic rating factor is denoted by the letter M , and is that factor by which a daily cyclic current, whose maximum value is equal to the sustained (100% load factor) rated current permissible under steady-state conditions, may be multiplied for the conductor to attain, but not exceed, the standard maximum permissible temperature.

3.1 Single isolated circuit of:

- One multicore cable, direct buried or in a duct.
- Three cables direct buried, in trefoil touching or flat touching formation.
- Three cables in ducts, in trefoil touching or flat touching formation.

3.1.1 Any load cycle of known shape

The daily load cycle is first expressed as 24 hourly values by scaling the whole cycle so that its maximum value is equal to unity (see Figures 1a and 1b, page 34). The magnitude of each hourly value is then squared to give 24 values representing the cycle of cable joule losses (see Figure 1c, page 34). This curve is then expressed as a series of step function changes so as to give a stepped curve having approximately the same average value as the original one (see Figure 1d, page 34). Denote the ordinates of the stepped curve for the six hourly periods before the occurrence of the highest temperature by $Y_0, Y_1, Y_2 \dots Y_5$. It should be noted that the particular way in which the load and loss-load curves of Figure 1 have been drawn assumes that the measured values as given in the example of Sub-clause 7.1 apply to periods of time which extend half an hour before and after each observation time. Location of the time of the highest temperature is done by inspection, bearing in mind that although it

d'observation. La détermination de l'instant où la température atteint sa valeur maximale est faite par examen en se rappelant que ce maximum apparaît généralement à la fin de la période où le courant est le plus élevé, mais que cela n'est pas toujours le cas. La température dépend également du niveau général de courant précédant cette période. Ainsi, dans l'exemple donné au paragraphe 7.1 et à la figure 1, la température la plus élevée se produit à 17,5 h, bien que le courant soit passé par sa valeur maximale à 8 h.

Le facteur de charge des pertes (μ) est donné par:

$$\mu = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} Y_i \quad (1)$$

Le facteur de capacité de transport cyclique (M) est donné par:

$$M = \frac{1}{((1-k)Y_0 + k\{B + \mu[1 - \beta(6)]\})^{1/2}} \quad (2)$$

où:

$$B = Y_0 \Phi_0 + Y_1 \Phi_1 + Y_2 \Phi_2 + Y_3 \Phi_3 + Y_4 \Phi_4 + Y_5 \Phi_5 \quad (3)$$

Les valeurs de Φ_0 à Φ_5 et de $[1 - \beta(6)]$ pour un câble enterré à 1 m de profondeur et une diffusivité thermique du sol de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ sont données dans le tableau IV. Ces valeurs peuvent être utilisées pour des profondeurs de câble ou de fourreau dans la gamme de 0,75 m à 1,5 m avec une erreur sur le facteur M généralement inférieure à 1,5%. Les méthodes à utiliser pour toutes autres valeurs de la profondeur et de la diffusivité thermique du sol sont données dans l'article 4.

$$k = \frac{WT_4}{\theta(\infty)} \quad (4)$$

où:

W sont les pertes totales par effet Joule par câble à la température maximale de fonctionnement, W/m

T_4 est la résistance thermique extérieure d'un seul câble ou d'un fourreau, K.m/W

$\theta(\infty)$ est l'élévation de la température de l'âme au-dessus de l'ambiante en régime permanent, K

Si les pertes diélectriques ne sont pas négligeables, $\theta(\infty)$ est alors défini comme l'élévation de la température de l'âme en régime permanent, due uniquement aux pertes par effet Joule, c'est-à-dire aux pertes W par unité de longueur de câble, calculées comme indiqué dans la Publication 287 de la CEI.

La résistance thermique extérieure (T_4) est donnée par:

i) Pour un seul câble ou un seul fourreau

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{4L}{D_e} \right) \quad (5)$$

où:

ρ_T est la résistivité thermique du sol, K.m/W

L est la profondeur de pose, mètres

D_e est la diamètre extérieur du câble ou du fourreau, mètres

ii) Pour des circuits isolés comportant trois câbles ou fourreaux jointifs, disposés en trèfle ou en nappe.

Les formules donnant T_4 seront prises dans la Publication 287 de la CEI.

La valeur du diamètre du câble ou du fourreau à utiliser pour obtenir les valeurs Φ_0 à Φ_5 et $[1 - \beta(6)]$ est celle d'un câble seul. On suppose ainsi qu'un groupe de câbles jointifs se comporte thermiquement comme une unité.

usually occurs at the end of the period of highest current, this may not always be the case. The temperature also depends on the general level of current preceding that period. Thus, in the example given in Sub-clause 7.1 and Figure 1, the highest temperature occurs at 17.5 h although the highest value of current was at 8 h.

The loss load factor (μ) is given by:

$$\mu = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} Y_i \quad (1)$$

The cyclic factor (M) is given by:

$$M = \frac{1}{((1-k)Y_0 + k\{B + \mu[1 - \beta(6)]\})^{1/2}} \quad (2)$$

where:

$$B = Y_0\Phi_0 + Y_1\Phi_1 + Y_2\Phi_2 + Y_3\Phi_3 + Y_4\Phi_4 + Y_5\Phi_5 \quad (3)$$

Values of Φ_0 to Φ_5 and of $[1 - \beta(6)]$ for a cable at a depth of 1 m and a soil thermal diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ are given in Table IV. These values may be used for cables or ducts at depths within the range 0.75 m to 1.5 m with an error generally less than 1.5% in the factor M . Methods for dealing with any other values of depth and soil thermal diffusivity are given in Clause 4.

$$k = \frac{WT_4}{\theta(\infty)} \quad (4)$$

where:

W are the total joule losses per cable at maximum operating temperature, W/m

T_4 is the external thermal resistance of single cable or duct, K.m/W

$\theta(\infty)$ is the conductor steady-state temperature rise above ambient, K

If the dielectric losses are not negligible then $\theta(\infty)$ is defined as the conductor temperature rise in the steady state which is due to joule losses only, i.e. to the losses W per unit length of cable as calculated in IEC Publication 287.

The external thermal resistance (T_4) is given by:

i) For a single isolated cable or duct

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{4L}{D_e} \right) \quad (5)$$

where:

ρ_T is the soil thermal resistivity, K.m/W

L is the depth of laying, metres

D_e is the external diameter of cable or duct, metres

ii) For isolated circuits of three cables or ducts touching each other, either in trefoil or flat formation.

Formulae for T_4 should be taken from IEC Publication 287.

The value of cable or duct diameter to be used for obtaining Φ_0 to Φ_5 and $[1 - \beta(6)]$ is that of a single cable. This treatment assumes that a group of cables touching each other acts thermally as one unit.

3.1.2 Cycle de charge plafonné à une valeur constante, dont le courant est maintenu à sa valeur maximale pendant au moins 6 h et à une fraction constante de ce courant pendant le reste du cycle

Si la charge est maintenue à sa valeur maximale pendant une durée de x heures ($x \geq 6$ h) et à une fraction constante p de cette charge pendant les $(24-x)$ heures restantes, alors:

$$M = \frac{1}{\left[1 - k(1-p^2) \left(\frac{24-x}{24}\right) [1 - \beta(6)]\right]^{1/2}} \quad (6)$$

3.1.3 Cycle de charge plafonné à une valeur constante, dont le courant est maintenu à sa valeur maximale pendant au moins 6 h et sans restriction quant à la forme du reste du cycle, sauf que l'élévation maximale de température se produit à la fin du palier de courant de valeur maximale

$$M = \frac{1}{(1 - k(1-\mu)[1 - \beta(6)])^{1/2}} \quad (7)$$

3.1.4 Cycle de charge de forme inconnue dont seul le facteur de charge des pertes μ est connu

Dans ce cas, on peut montrer que le cycle peut être considéré comme plafonné à une valeur constante et que l'équation (7) peut être utilisée.

3.2 Groupe de câbles avec pertes égales, câbles ou fourreaux non jointifs

3.2.1 Forme quelconque de cycle de charge

$$M = \frac{1}{\left(\left\{\sum_{i=0}^5 Y_i \left[\frac{\theta_R(i+1)}{\theta_R(\infty)} - \frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}\right]\right\} + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)}\right]\right)^{1/2}} \quad (8)$$

où:
 $\theta_R(0) = 0$

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = 1 - k_1 + k_1 \gamma(i) \quad (9)$$

$$\gamma(i) = \frac{-Ei\left(-\frac{D_e^2}{16t\delta}\right) + (N-1)\left\{-Ei\left(-\frac{d_i^2}{16t\delta}\right)\right\}}{2 \ln\left(\frac{4LF}{D_e}\right)} \quad (10)$$

$t = 3600 i$

δ est la diffusivité thermique du sol

$-Ei(-x)$ est la fonction exponentielle intégrale. L'évaluation de cette formule est facilitée par l'utilisation du nomogramme de l'exponentielle intégrale, donné aux figures 3 et 4, pages 36 et 37.

Note. — Il n'est pas nécessaire de faire figurer dans cette formule les termes provenant des images thermiques, les durées considérées étant uniquement inférieures à 6 h.

$$F = \frac{d'_{p1} \cdot d'_{p2} \cdots d'_{pk} \cdots d'_{p(N-1)}}{d_{p1} \cdot d_{p2} \cdots d_{pk} \cdots d_{p(N-1)}} \quad (11)$$

il y a $(N-1)$ termes, le terme $\frac{d'_{pp}}{d_{pp}}$ étant exclu.

$$d_i = \frac{4L}{F^{1/(N-1)}} \quad (12)$$

3.1.2 *Flat topped load cycle consisting of a sustained maximum current for at least 6 h and a constant fraction of that current for the rest of the cycle*

If the duration of the sustained maximum load is x hours ($x \geq 6$ h) and the duration of the constant fraction of the maximum load for the remaining $(24-x)$ hours is p , then:

$$M = \frac{1}{\left[1 - k(1-p^2) \left(\frac{24-x}{24}\right) [1 - \beta(6)]\right]^{1/2}} \quad (6)$$

3.1.3 *Flat topped load cycle having a sustained maximum current for at least 6 h and no restriction on the shape for the remainder of the cycle, except that the maximum temperature rise occurs at the end of the sustained maximum current*

$$M = \frac{1}{(1-k(1-\mu)[1-\beta(6)])^{1/2}} \quad (7)$$

3.1.4 *Load cycle where the shape is unknown and only the loss-load factor μ is known*

For this case it can be shown that the cycle may be considered as flat topped and equation (7) may be used.

3.2 *Group of cables with equal losses, cables or ducts not touching*

3.2.1 *Any shape of load cycle*

$$M = \frac{1}{\left(\left\{\sum_{i=0}^5 Y_i \left[\frac{\theta_R(i+1)}{\theta_R(\infty)} - \frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}\right]\right\} + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)}\right]\right)^{1/2}} \quad (8)$$

where:
 $\theta_R(0) = 0$

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = 1 - k_1 + k_1 \gamma(i) \quad (9)$$

$$\gamma(i) = \frac{-Ei\left(-\frac{D_c^2}{16t\delta}\right) + (N-1) \left\{-Ei\left(-\frac{d_i^2}{16t\delta}\right)\right\}}{2 \ln\left(\frac{4LF}{D_c}\right)} \quad (10)$$

$t = 3600 i$

δ is the soil thermal diffusivity

$-Ei(-x)$ is the exponential integral function. Evaluation of this formula is facilitated by using the nomogram for exponential integral provided in Figures 3 and 4, pages 36 and 37.

Note. – Image terms are not required in this formula as the time periods involved are only up to 6 h.

$$F = \frac{d'_{p1} \cdot d'_{p2} \cdots d'_{pk} \cdots d'_{p(N-1)}}{d_{p1} \cdot d_{p2} \cdots d_{pk} \cdots d_{p(N-1)}} \quad (11)$$

there are $(N-1)$ terms with the term $\frac{d'_{pp}}{d_{pp}}$ excluded.

$$d_t = \frac{4L}{F^{1/(N-1)}} \quad (12)$$

Les distances d_{pk} et d'_{pk} sont définies sur la figure 2, page 35. Les valeurs de D_e et L à utiliser pour le calcul de $\gamma(i)$ se rapportent au câble ou au fourreau contenant le câble le plus chaud du groupe.

$$k_1 = \frac{W(T_4 + \Delta T_4)}{\theta(\infty)} \quad (13)$$

T_4 représente la résistance thermique extérieure du câble le plus chaud du groupe considéré comme un câble seul, et

$$\Delta T_4 = \frac{\rho_T \ln F}{2\pi} \quad (14)$$

k_1 est le rapport de l'élévation de température au-dessus de l'ambiante de la surface extérieure du câble ou du fourreau à l'élévation de température au-dessus de l'ambiante de l'âme en régime permanent; tous les câbles du groupe sont également chargés et chacun d'eux a les mêmes pertes totales W par unité de longueur.

- 3.2.2 *Cycle de charge plafonné à une valeur constante dont le courant est maintenu à sa valeur maximale pendant au moins 6 h et sans restriction quant à la forme du reste du cycle, sauf que l'élévation maximale de température se produit à la fin du palier de courant de valeur maximale*

$$M = \frac{1}{\left(\frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} + \mu \left\{ 1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right\} \right)^{1/2}} \quad (15)$$

- 3.3 *Groupe de circuits de trois câbles ou fourreaux identiques également chargés, jointifs et ayant des pertes égales*

Les méthodes sont données au paragraphe 3.2 ci-dessus, excepté que:

- i) La résistance thermique extérieure T_4 , dont dépend la valeur de k_1 , concerne un circuit isolé de trois câbles ou fourreaux jointifs (voir paragraphe 3.1.1).
- ii) La valeur de N à utiliser pour le calcul de $\gamma(i)$, F et d_i dans les équations (10), (11) et (12) est le nombre de circuits (de trois câbles unipolaires par circuit) et les valeurs de d'_{pk} et d_{pk} sont données par:

d_{pk} = distance du centre du circuit k au centre du circuit contenant le câble le plus chaud,

d'_{pk} = distance de l'image du centre du circuit k au centre du circuit contenant le câble le plus chaud.
- iii) Le deuxième membre de l'équation (14) doit être multiplié par 3, F étant calculé comme il est dit au point ii).
- iv) W sont les pertes totales par unité de longueur d'un seul câble ou d'un fourreau unique.
- v) La valeur du diamètre du câble ou du fourreau à faire intervenir dans le calcul de $\gamma(i)$ est celle d'un seul câble ou fourreau isolé.

4. Méthode permettant d'utiliser d'autres valeurs de résistivité du sol, diffusivités thermiques du sol et profondeurs de pose

Les grandeurs Φ_0 à Φ_5 , $[1 - \beta(6)]$, k et k_1 dépendent des propriétés du sol et de la profondeur de pose. Les valeurs données dans le tableau IV peuvent être utilisées pour une gamme usuelle de conditions (voir paragraphe 3.1.1), mais il peut s'avérer nécessaire de les calculer pour des conditions différentes de cette gamme.

Distances d_{pk} and d'_{pk} are defined in Figure 2, page 35. The values of D_e and L to be used for calculating $\gamma(i)$ refer to the cable or duct containing the hottest cable of the group.

$$k_1 = \frac{W(T_4 + \Delta T_4)}{\theta(\infty)} \quad (13)$$

T_4 is the external thermal resistance of the hottest cable in the group regarded as an isolated cable, and

$$\Delta T_4 = \frac{q_T \ln F}{2\pi} \quad (14)$$

k_1 is the ratio of cable or duct outside surface temperature rise above ambient to the conductor temperature rise above ambient under steady state conditions with all cables of the group equally loaded and each having a total heat loss of W per unit length.

3.2.2 *Flat topped load cycle having a sustained maximum current for at least 6 h, no restriction on the shape of the rest of the cycle, except that the maximum temperature rise occurs at the end of the sustained maximum current*

$$M = \frac{1}{\left(\frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} + \mu \left\{ 1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right\} \right)^{1/2}} \quad (15)$$

3.3 *Group of circuits of three equally loaded, identical, touching cables or ducts having equal losses*

The methods are the same as those given in Sub-clause 3.2 above, except that

- i) The external thermal resistance T_4 , on which the value of k_1 is dependent, relates to an isolated circuit of three touching cables or ducts (see Sub-clause 3.1.1).
- ii) The value of N to be used for the calculation of $\gamma(i)$, F and d_i in equations (10), (11) and (12) is the number of circuits (of three single-core cables per circuit) and the values of d'_{pk} and d_{pk} are given by:

d_{pk} = distance from the centre of circuit k to centre of circuit containing the hottest cable,

d'_{pk} = distance of image of centre of circuit k to centre of circuit containing the hottest cable.
- iii) The right-hand side of equation (14) should be multiplied by 3, with F given by Item ii) above.
- iv) W is the total loss per unit length per single cable or duct.
- v) The value of the cable or duct diameter to be assumed for the calculation of $\gamma(i)$ is that of an isolated cable or duct.

4. Method of dealing with different soil resistivities, soil thermal diffusivities and depths of laying

The quantities Φ_0 to Φ_5 , $[1 - \beta(6)]$, k and k_1 are dependent on soil properties and depth of laying. The tabulated values (see Table IV) can be used over a popular range of conditions (see Sub-clause 3.1.1), but it may be necessary to compute them for conditions outside this range.

- i) Les valeurs numériques de Φ_0 à Φ_5 et $(1 - \beta(6))$ pour toute valeur de profondeur et diffusivité thermique du sol peuvent être obtenues à partir de:

$$\Phi_0 = \beta(1) \text{ et } \Phi_i = [\beta(i+1) - \beta(i)] \text{ pour } i = 1, 2 \dots 5$$

$$\beta(i) = \frac{-Ei \left(-\frac{D_e^2}{16t\delta} \right)}{2 \ln (4L/D_e)} \text{ où } t = 3600 i \quad (16)$$

- ii) Les facteurs k et k_1 dépendent de la profondeur de pose et de la résistivité du sol. Si les conditions de pose «a», pour lesquelles une valeur de k est connue, se transforment en conditions «b», la nouvelle valeur de k est donnée par:

$$k(b) = \frac{1}{1 + \frac{T_4}{T'_4} \left(\frac{1 - k(a)}{k(a)} \right)} \quad (17)$$

où T_4 et T'_4 sont les résistances thermiques extérieures pour les conditions «a» et «b» respectivement. Si la profondeur n'est pas modifiée, alors $T_4/T'_4 = \varrho(a)/\varrho(b)$.

Une nouvelle valeur de k_1 s'obtient de la même façon.

5. Diffusivité thermique du sol

Dans le calcul des facteurs de charge cyclique, il n'est pas nécessaire de connaître avec précision la valeur de la diffusivité thermique et il est en général satisfaisant d'utiliser les fonctions données dans la présente norme sous forme de tableau et calculées pour une valeur de diffusivité de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette valeur correspond en gros à un sol ayant une résistivité thermique de 1 K.m/W , ainsi qu'une teneur en humidité d'environ 7% de la masse sèche. Dans des cas exceptionnels et lorsque la teneur en humidité a une probabilité d'être beaucoup plus faible, il est recommandé d'utiliser les méthodes données ci-après pour calculer d'autres valeurs de diffusivité.

- i) La diffusivité thermique δ peut être estimée si l'on a pu mesurer les grandeurs suivantes: masse volumique, teneur massique en eau et résistivité thermique.

$$\delta = \frac{10^{-3}}{\varrho_T d (0,82 + 0,042 \eta)} \text{ m}^2/\text{s} \quad (18)$$

où:

ϱ_T est la résistivité thermique, K.m/W

d est la masse volumique à sec, kg/m^3

η est la teneur en humidité, % de la masse sèche.

Il existe en variante des méthodes de laboratoire bien connues pour mesurer la diffusivité thermique.

- i) Numerical values for Φ_0 to Φ_5 , and $[1 - \beta(6)]$ for any specified value of depth and soil thermal diffusivity may be obtained from:

$$\Phi_0 = \beta(1) \text{ and } \Phi_i = [\beta(i+1) - \beta(i)] \text{ for } i = 1, 2 \dots 5$$

$$\beta(i) = \frac{-Ei \left(-\frac{D_e^2}{16t\delta} \right)}{2 \ln(4L/D_e)} \text{ where } t = 3600 i \quad (16)$$

- ii) The factors k and k_1 are dependent on depth of laying and soil resistivity. If the laying conditions "a", for which a value of k is known, change to conditions "b" then the new value of k is given by:

$$k(b) = \frac{1}{1 + \frac{T_4}{T'_4} \left(\frac{1 - k(a)}{k(a)} \right)} \quad (17)$$

where T_4 and T'_4 are the external thermal resistances for conditions "a" and "b" respectively. If the depth is not changed then $T_4/T'_4 = \varrho(a)/\varrho(b)$.

A new value of k_1 is obtained in the same way.

5. Soil thermal diffusivity

For calculation of cyclic rating factors it is not necessary to know accurately the value of thermal diffusivity and it is generally satisfactory to use the tabulated functions given in this standard which are based on the value of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, and correspond roughly to a soil having a thermal resistivity of 1 K.m/W and a moisture content of around 7% of dry mass. For exceptional cases and where moisture content is likely to be much lower it is advisable to use the methods given below to calculate alternative values.

- i) The thermal diffusivity δ can be estimated if the following quantities have been measured: density, moisture content by mass and thermal resistivity.

$$\delta = \frac{10^{-3}}{\varrho_T d (0.82 + 0.042 \eta)} \text{ m}^2/\text{s} \quad (18)$$

where:

ϱ_T is the thermal resistivity, K.m/W

d is the dry density, kg/m^3

η is the moisture content, % of dry mass.

Alternatively there are well known laboratory methods for measuring thermal diffusivity.

- ii) Si l'on ne connaît que la résistivité thermique, la diffusivité thermique peut être obtenue à partir du tableau II.

TABLEAU II
Valeurs de la diffusivité thermique du sol

Résistivité thermique (K.m/W)	Diffusivité thermique (m ² /s)
0,5	$0,8 \times 10^{-6}$
0,6	$0,7 \times 10^{-6}$
0,7	$0,6 \times 10^{-6}$
0,8	$0,6 \times 10^{-6}$
0,9	$0,5 \times 10^{-6}$
1,0	$0,5 \times 10^{-6}$
1,2	$0,4 \times 10^{-6}$
1,5	$0,4 \times 10^{-6}$
2,0	$0,3 \times 10^{-6}$
2,5	$0,2 \times 10^{-6}$
3,0	$0,2 \times 10^{-6}$

Note. – Ces valeurs ont été obtenues à partir d'une relation empirique pour des sols homogènes et humides.

- iii) Si l'on ne dispose d'aucune donnée sur le sol, prendre une valeur de diffusivité thermique de $0,5 \times 10^{-6}$ m²/s.

6. Critères d'application de ces méthodes à des câbles de tension plus élevée

L'amplitude de l'erreur commise en négligeant la capacité thermique du câble*, qui est d'ailleurs dans le sens de la sécurité, dépend de la forme du cycle de charge, qui peut pour plus de commodité être représenté par le facteur de charge des pertes μ . En général on peut estimer que l'erreur commise sur un facteur de charge cyclique, calculé suivant les méthodes données dans le document CIGRÉ original a été estimé ne pas dépasser $\pm 3\%$ à condition que l'on tienne compte de la capacité thermique du câble et que μ ne soit pas inférieur à 0,4.

Dans les cas où μ n'est pas inférieur à 0,4 et où l'on néglige la capacité thermique, il peut y avoir des cas extrêmes où la marge dépasse 5% dans le sens de la sécurité.

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

- Toutes les dimensions et tous les types de câbles de tensions nominales inférieures ou égales à 18/30(36) kV, avec un cycle de charge de forme quelconque. On estime que la marge ne dépasse pas 5% dans le sens de la sécurité.
- Tous les câbles pour lesquels le facteur de charge des pertes μ n'est pas inférieur à 0,65, la moyenne des ordonnées Y_0 , Y_1 et Y_2 (voir annexe A) n'étant pas inférieure à 0,9 et la moyenne de Y_3 , Y_4 et Y_5 n'étant pas inférieure à 0,7. On estime que l'écart ne dépasse pas 3% dans le sens de la sécurité pour les câbles sous gaine métallique et 5% pour les câbles en tuyau.
- Les câbles sous gaine métallique pour lesquels le facteur de charge des pertes n'est pas inférieur à 0,4 et dont les ordonnées Y_0 à Y_5 ont les mêmes caractéristiques qu'au point b) ci-dessus. On estime que l'écart ne dépasse pas 5% dans le sens de la sécurité.

* Si l'on néglige la capacité thermique du câble $\alpha(i) = 1$, voir l'annexe A, équation 23.

- ii) If only the thermal resistivity is known, then the thermal diffusivity can be obtained from Table II.

TABLE II
Values of soil thermal diffusivity

Thermal resistivity (K.m/W)	Thermal diffusivity (m ² /s)
0.5	0.8×10^{-6}
0.6	0.7×10^{-6}
0.7	0.6×10^{-6}
0.8	0.6×10^{-6}
0.9	0.5×10^{-6}
1.0	0.5×10^{-6}
1.2	0.4×10^{-6}
1.5	0.4×10^{-6}
2.0	0.3×10^{-6}
2.5	0.2×10^{-6}
3.0	0.2×10^{-6}

Note. – These were obtained from an empirical relationship for homogeneous and moist soils.

- iii) If no data are available on the soil, use a value of thermal diffusivity of 0.5×10^{-6} m²/s.

6. Criteria for application of methods to cables of higher voltage

The magnitude of error, which will be on the safe side, involved in neglecting cable thermal capacitance* depends on the shape of the load cycle, which for convenience can be represented by the loss-load factor μ . In general, the error in cyclic rating factor calculated by methods given in the original CIGRÉ document was estimated not to exceed $\pm 3\%$ provided that the effect of cable thermal capacitance was included and μ was not less than 0.4.

In cases where μ is not less than 0.4 and thermal capacitance is neglected there may be extreme cases where the margin will exceed 5% on the safe side.

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

- All sizes and types of cable for nominal voltages up to and including 18/30 (36) kV for any shape of load cycle. The margin is estimated not to exceed 5% on the safe side.
- All cables where the loss-load factor μ is not less than 0.65, the average of the ordinates Y_0 , Y_1 and Y_2 (see Appendix A) is not less than 0.9 and the average of Y_3 , Y_4 and Y_5 is not less than 0.7. The margin is estimated to be not greater than 3% on the safe side for self-contained cables and 5% for pipe-type cables.
- Self-contained cables where the loss-load factor is not less than 0.4 and the ordinates Y_0 to Y_5 are as in Item b) above. The margin is estimated not to exceed 5% on the safe side.

* When cable thermal capacitance is neglected $\alpha(i) = 1$, see Appendix A, equation 23.

7. Exemples

- 7.1 Soit un câble multiconducteur d'un diamètre extérieur de 0,06 m posé directement à une profondeur de 1 m dans un sol ayant une diffusivité de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et une résistivité de 1,2 K.m/W. La température maximale de l'âme est de 70°C et la température du sol de 15°C. On suppose que la puissance dissipée est de 48,13 W/m.

Le cycle de charge est donné par les valeurs du courant figurant dans le tableau III.

TABLEAU III

Exemple

Temps (h)	Courant (A)	Charge cyclique/charge la plus élevée	Valeur de Y_i	Y_i
0	151	0,302	0,091	Y_{17}
1	124	0,247	0,061	Y_{16}
2	114	0,227	0,052	Y_{15}
3	116	0,232	0,054	Y_{14}
4	118	0,235	0,056	Y_{13}
5	123	0,246	0,061	Y_{12}
6	145	0,290	0,084	Y_{11}
7	300	0,600	0,360	Y_{10}
8	500	1,000	1,000	Y_9
9	475	0,950	0,902	Y_8
10	470	0,940	0,884	Y_7
11	455	0,910	0,828	Y_6
12	446	0,892	0,796	Y_5
13	385	0,770	0,593	Y_4
14	386	0,772	0,596	Y_3
15	400	0,800	0,640	Y_2
16	427	0,853	0,728	Y_1
17	498	0,996	0,992	Y_0
18	427	0,853	0,728	Y_{23}
19	395	0,790	0,624	Y_{22}
20	370	0,740	0,548	Y_{21}
21	370	0,740	0,548	Y_{20}
22	361	0,722	0,521	Y_{19}
23	300	0,600	0,360	Y_{18}

Ces valeurs sont portées sur les figures 1a à 1c, page 34.

$$\mu = \frac{0,091 + 0,061 + 0,052 + \dots + 0,360}{24} = 0,504, \text{ en utilisant l'équation (1)}$$

Le cycle en créneaux équivalent est représenté sur la figure 1d, page 34; les ordonnées figurent dans la dernière colonne (Y_i) de l'exemple (tableau III).

La courbe en créneaux a été tracée dans sa totalité uniquement pour illustrer l'exemple. Les ordonnées nécessaires au calcul du facteur de capacité de transport cyclique sont soulignées dans le tableau III et indiquées en traits gras sur la figure 1d. L'instant prévu où la température atteint sa valeur maximale est 17,5 h.

7. Examples

- 7.1 A single multicore cable having an external diameter of 0.06 m directly buried at a depth of 1 m in soil having a diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ and a resistivity of 1.2 K.m/W. The maximum conductor temperature is 70°C and the ground temperature is 15°C. A power loss of 48.13 W/m is assumed.

The load cycle is given by the values of current indicated in Table III.

TABLE III

Example

Time (h)	Current (A)	Cyclic load/highest load	Value of Y_i	Y_i
0	151	0.302	0.091	Y_{17}
1	124	0.247	0.061	Y_{16}
2	114	0.227	0.052	Y_{15}
3	116	0.232	0.054	Y_{14}
4	118	0.235	0.056	Y_{13}
5	123	0.246	0.061	Y_{12}
6	145	0.290	0.084	Y_{11}
7	300	0.600	0.360	Y_{10}
8	500	1.000	1.000	Y_9
9	475	0.950	0.902	Y_8
10	470	0.940	0.884	Y_7
11	455	0.910	0.828	Y_6
12	446	0.892	<u>0.796</u>	Y_5
13	385	0.770	<u>0.593</u>	Y_4
14	386	0.772	<u>0.596</u>	Y_3
15	400	0.800	<u>0.640</u>	Y_2
16	427	0.853	<u>0.728</u>	Y_1
17	498	0.996	<u>0.992</u>	Y_0
18	427	0.853	0.728	Y_{23}
19	395	0.790	0.624	Y_{22}
20	370	0.740	0.548	Y_{21}
21	370	0.740	0.548	Y_{20}
22	361	0.722	0.521	Y_{19}
23	300	0.600	0.360	Y_{18}

These are plotted in Figures 1a to 1c, page 34.

$$\mu = \frac{0.091 + 0.061 + 0.052 + \dots + 0.360}{24} = 0.504, \text{ from equation (1)}$$

The equivalent stepped cycle is shown in Figure 1d, page 34, having ordinates given in the last column (Y_i) of the example (Table III).

The whole of the stepped curve has been drawn in for the purpose of illustration of the example only. The ordinates required to calculate the cyclic rating factor are underlined in Table III and shown as heavy lines in Figure 1d. The expected time of occurrence of the highest temperature is 17.5 h.

En prenant Y_i dans le tableau III et Φ_i dans le tableau IV.

	Y_i	Φ_i	$(Y_i \Phi_i)$
Y_0	0,992	0,193	0,1915
Y_1	0,728	0,076	0,0553
Y_2	0,640	0,046	0,0294
Y_3	0,596	0,033	0,0197
Y_4	0,593	0,026	0,0154
Y_5	0,796	0,021	0,0167
$B = \Sigma Y_i \Phi_i =$			<u>0,3280</u>

$$\begin{aligned}
 B &= 0,328, \text{ en utilisant l'équation (3)} \\
 T_4 &= 0,8 \text{ K.m/W, en utilisant l'équation (5)} \\
 W &= 48,13 \text{ W/m} \\
 \theta_R(\infty) &= 55 \text{ K} \\
 k &= 0,7, \text{ en utilisant l'équation (4)} \\
 [1 - \beta(6)] &= 0,605, \text{ extrait du tableau IV}
 \end{aligned}$$

Ainsi, en utilisant l'équation (2):

$$M = \frac{1}{(1 - 0,7) 0,992 + 0,7 \{0,328 + 0,504 (0,605)\}^{1/2}}$$

$$M = \underline{1,16}$$

- 7.2 Soit trois câbles multiconducteurs d'un diamètre extérieur de 0,05 m, la distance entre axes étant de 0,2 m, posés à une profondeur de 1 m dans un sol ayant une diffusivité de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. La température maximale de l'âme est de 70°C et la température du sol est de 15°C . On suppose que la puissance dissipée est de 27,5 W/m par câble, dans un groupe de trois câbles. Le cycle de charge, qui est le même pour tous les câbles, a une valeur constante durant les 6 h précédant l'instant où la température atteint sa valeur la plus élevée; μ est égal à 0,6 pour tout le cycle. Le calcul est effectué pour le câble central.

En utilisant la figure 2 $d'_{p1} = d'_{p3} = \sqrt{(2^2 + 0,2^2)} = 2,01 \text{ m}$

$$d_{p1} = d_{p3} = 0,2 \text{ m}$$

$$F = \frac{2,01 \times 2,01}{0,2 \times 0,2} = 101 \quad N = 3 \quad (\text{en utilisant l'équation (11)})$$

$$d_f = \frac{4 \times 1}{(101)^{1/2}} = 0,398 \text{ m} \quad (\text{en utilisant l'équation (12)})$$

$\gamma(6)$ s'obtient à partir de l'équation (10), avec $i = 6 \text{ h}$ ($t = 21600 \text{ s}$)

$$t\delta = 21600 \times 0,5 \times 10^{-6} = 0,0108 \text{ m}^2$$

$$16t\delta = 0,1728 \text{ m}^2$$

$$\frac{D_c^2}{16t\delta} = \frac{0,05^2}{0,1728} = 0,01447; -Ei(-x) = 3,67 \quad (\text{voir figure 3})$$

$$\frac{d_f^2}{16t\delta} = \frac{0,398^2}{0,1728} = 0,9167; -Ei(-x) = 0,25 \quad (\text{voir figure 4})$$

$$\gamma(6) = \frac{3,67 + 2(0,25)}{17,994} = 0,232 \quad (\text{en utilisant l'équation (10)})$$

Taking Y_i from Table III and Φ_i from Table IV.

	Y_i	Φ_i	$(Y_i \Phi_i)$
Y_0	0.992	0.193	0.1915
Y_1	0.728	0.076	0.0553
Y_2	0.640	0.046	0.0294
Y_3	0.596	0.033	0.0197
Y_4	0.593	0.026	0.0154
Y_5	0.796	0.021	0.0167
$B = \Sigma Y_i \Phi_i =$			<u>0.3280</u>

$$\begin{aligned}
 B &= 0.328, \text{ from equation (3)} \\
 T_4 &= 0.8 \text{ K.m/W, from equation (5)} \\
 W &= 48.13 \text{ W/m} \\
 \theta_R (\infty) &= 55 \text{ K} \\
 k &= 0.7, \text{ from equation (4)} \\
 [1 - \beta(6)] &= 0.605, \text{ from Table IV}
 \end{aligned}$$

Thus from equation (2):

$$M = \frac{1}{(1 - 0.7) 0.992 + 0.7 \{0.328 + 0.504 (0.605)\}^{1/2}}$$

$$M = 1.16$$

- 7.2 Three multicore cables having an external diameter of 0.05 m laid spaced 0.2 m apart axially at a depth of 1 m in soil having a diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. The maximum conductor temperature is 70°C and the ground temperature is 15°C . A power loss of 27.5 W/m per cable in a group of three cables is assumed. The load cycle, which is the same for all cables, has a constant value for the 6 h preceding time of highest temperature; μ for the whole cycle is 0.6. The calculation is performed for the centre cable.

From Figure 2

$$d'_{p1} = d'_{p3} = \sqrt{(2^2 + 0.2^2)} = 2.01 \text{ m}$$

$$d_{p1} = d_{p3} = 0.2 \text{ m}$$

$$F = \frac{2.01 \times 2.01}{0.2 \times 0.2} = 101 \quad N = 3 \quad (\text{from equation (11)})$$

$$d_f = \frac{4 \times 1}{(101)^{1/2}} = 0.398 \text{ m} \quad (\text{from equation (12)})$$

$\gamma(6)$ is obtained from equation (10), with $i = 6 \text{ h}$ ($t = 21600 \text{ s}$)

$$t\delta = 21600 \times 0.5 \times 10^{-6} = 0.0108 \text{ m}^2$$

$$16t\delta = 0.1728 \text{ m}^2$$

$$\frac{D_e^2}{16t\delta} = \frac{0.05^2}{0.1728} = 0.01447; -Ei(-x) = 3.67 \quad (\text{see Figure 3})$$

$$\frac{d_f^2}{16t\delta} = \frac{0.398^2}{0.1728} = 0.9167; -Ei(-x) = 0.25 \quad (\text{see Figure 4})$$

$$\gamma(6) = \frac{3.67 + 2(0.25)}{17.994} = 0.232 \quad (\text{from equation (10)})$$

Les données concernant la capacité du transport sont:

$$\begin{aligned}\varrho_T &= 1,2 \text{ K.m/W} \\ T_4 &= 0,837 \text{ K.m/W (pour un câble seul isolé)} \quad (\text{en utilisant l'équation (5)}) \\ W &= 27,5 \text{ W/m} \\ \theta_R(\infty) &= 55 \text{ K}\end{aligned}$$

Pour un groupe de trois câbles:

$$\Delta T_4 = \frac{1,2 \ln(101)}{2\pi} = 0,881 \text{ K.m/W} \quad (\text{en utilisant l'équation (14)})$$

$$k_1 = \frac{27,5 (0,837 + 0,881)}{55} = 0,86 \quad (\text{en utilisant l'équation (13)})$$

$$\frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} = 1 - 0,86 + 0,86(0,232) = 0,3395 \quad (\text{en utilisant l'équation (9)})$$

Ainsi, en utilisant l'équation (15):

$$M = \frac{1}{(0,3395 + 0,6[1 - 0,3395])^{1/2}}$$

$$M = 1,17$$

TABLEAU IV

Valeurs de Φ_i , et de $1 - \beta(6)$ pour une diffusivité thermique du sol de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

	Diamètre du câble ou diamètre extérieur du fourreau (m)														
	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
Φ_0	0,298	0,277	0,257	0,239	0,223	0,207	0,193	0,180	0,168	0,156	0,145	0,135	0,126	0,117	0,100
Φ_1	0,069	0,071	0,072	0,073	0,074	0,075	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,075	0,074	0,074	0,073
Φ_2	0,041	0,042	0,043	0,044	0,045	0,045	0,046	0,046	0,047	0,047	0,047	0,048	0,048	0,048	0,048
Φ_3	0,029	0,030	0,031	0,031	0,032	0,033	0,033	0,034	0,034	0,034	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Φ_4	0,023	0,023	0,024	0,025	0,025	0,025	0,026	0,026	0,026	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,028
Φ_5	0,019	0,019	0,020	0,020	0,020	0,021	0,021	0,021	0,022	0,022	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023
$1 - \beta(6)$	0,521	0,538	0,553	0,568	0,581	0,594	0,605	0,617	0,627	0,638	0,648	0,657	0,667	0,676	0,684

	Diamètre du câble ou diamètre extérieur du fourreau (m)														
	0,105	0,110	0,115	0,120	0,125	0,130	0,135	0,140	0,145	0,150	0,155	0,160	0,165	0,170	0,175
Φ_0	0,101	0,093	0,086	0,080	0,074	0,068	0,063	0,058	0,053	0,049	0,045	0,041	0,038	0,034	0,031
Φ_1	0,072	0,071	0,070	0,069	0,068	0,067	0,065	0,063	0,062	0,060	0,059	0,057	0,056	0,054	0,052
Φ_2	0,048	0,048	0,047	0,047	0,047	0,046	0,046	0,046	0,045	0,045	0,044	0,044	0,043	0,043	0,042
Φ_3	0,035	0,035	0,036	0,036	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,034	0,034	0,034
Φ_4	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Φ_5	0,023	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
$1 - \beta(6)$	0,693	0,701	0,709	0,716	0,724	0,731	0,738	0,745	0,752	0,758	0,765	0,771	0,777	0,783	0,789

Rating data:

$$\begin{aligned}
 \varrho_T &= 1.2 \text{ K.m/W} \\
 T_4 &= 0.837 \text{ K.m/W (for a single isolated cable)} \quad (\text{from equation (5)}) \\
 W &= 27.5 \text{ W/m} \\
 \theta_R(\infty) &= 55 \text{ K}
 \end{aligned}$$

For a group of three cables:

$$\Delta T_4 = \frac{1.2 \ln(101)}{2\pi} = 0.881 \text{ K.m/W} \quad (\text{From equation (14)})$$

$$k_1 = \frac{27.5 (0.837 + 0.881)}{55} = 0.86 \quad (\text{from equation (13)})$$

$$\frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} = 1 - 0.86 + 0.86(0.232) = 0.3395 \quad (\text{from equation (9)})$$

Thus from equation (15):

$$M = \frac{1}{(0.3395 + 0.6[1 - 0.3395])^{1/2}}$$

$$M = 1.17$$

TABLE IV

Values of Φ_i , and $1 - \beta(6)$ for soil thermal diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

	Cable diameter or outer duct diameter (m)														
	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100
Φ_0	0.298	0.277	0.257	0.239	0.223	0.207	0.193	0.180	0.168	0.156	0.145	0.135	0.126	0.117	0.100
Φ_1	0.069	0.071	0.072	0.073	0.074	0.075	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.075	0.074	0.074	0.073
Φ_2	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.045	0.046	0.046	0.047	0.047	0.047	0.048	0.048	0.048	0.048
Φ_3	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033	0.033	0.034	0.034	0.034	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Φ_4	0.023	0.023	0.024	0.025	0.025	0.025	0.026	0.026	0.026	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.028
Φ_5	0.019	0.019	0.020	0.020	0.020	0.021	0.021	0.021	0.022	0.022	0.022	0.023	0.023	0.023	0.023
$1 - \beta(6)$	0.521	0.538	0.553	0.568	0.581	0.594	0.605	0.617	0.627	0.638	0.648	0.657	0.667	0.676	0.684

	Cable diameter or outer duct diameter (m)														
	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175
Φ_0	0.101	0.093	0.086	0.080	0.074	0.068	0.063	0.058	0.053	0.049	0.045	0.041	0.038	0.034	0.031
Φ_1	0.072	0.071	0.070	0.069	0.068	0.067	0.065	0.063	0.062	0.060	0.059	0.057	0.056	0.054	0.052
Φ_2	0.048	0.048	0.047	0.047	0.047	0.046	0.046	0.046	0.045	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.042
Φ_3	0.035	0.035	0.036	0.036	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.034	0.034
Φ_4	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
Φ_5	0.023	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
$1 - \beta(6)$	0.693	0.701	0.709	0.716	0.724	0.731	0.738	0.745	0.752	0.758	0.765	0.771	0.777	0.783	0.789

TABLEAU IV (suite)

Valeurs de Φ_i , et de $1 - \beta(6)$ pour une diffusivité thermique du sol de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

	Diamètre du câble ou diamètre extérieur du fourreau (m)														
	0,180	0,185	0,190	0,195	0,200	0,205	0,210	0,215	0,220	0,225	0,230	0,235	0,240	0,245	0,250
Φ_0	0,029	0,026	0,024	0,022	0,020	0,018	0,016	0,015	0,013	0,012	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007
Φ_1	0,050	0,048	0,047	0,045	0,043	0,042	0,040	0,038	0,037	0,035	0,033	0,032	0,030	0,029	0,027
Φ_2	0,041	0,041	0,040	0,039	0,038	0,037	0,037	0,036	0,035	0,034	0,033	0,033	0,032	0,031	0,030
Φ_3	0,034	0,033	0,033	0,032	0,032	0,032	0,031	0,031	0,031	0,030	0,030	0,029	0,029	0,028	0,028
Φ_4	0,028	0,028	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,026	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025	0,025
Φ_5	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,022	0,022	0,022
$1 - \beta(6)$	0,794	0,800	0,805	0,811	0,816	0,821	0,826	0,830	0,835	0,840	0,844	0,848	0,853	0,857	0,861

TABLE IV (continued)

Values of Φ_i and $1 - \beta(6)$ for soil thermal diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

	Cable diameter or outer duct diameter (m)														
	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
Φ_0	0.029	0.026	0.024	0.022	0.020	0.018	0.016	0.015	0.013	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007
Φ_1	0.050	0.048	0.047	0.045	0.043	0.042	0.040	0.038	0.037	0.035	0.033	0.032	0.030	0.029	0.027
Φ_2	0.041	0.041	0.040	0.039	0.038	0.037	0.037	0.036	0.035	0.034	0.033	0.033	0.032	0.031	0.030
Φ_3	0.034	0.033	0.033	0.032	0.032	0.032	0.031	0.031	0.031	0.030	0.030	0.029	0.029	0.028	0.028
Φ_4	0.028	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.026	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025
Φ_5	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.022	0.022	0.022
$1 - \beta(6)$	0.794	0.800	0.805	0.811	0.816	0.821	0.826	0.830	0.835	0.840	0.844	0.848	0.853	0.857	0.861

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60853-1:1985

ANNEXE A

THÉORIE FONDAMENTALE POUR LE CALCUL DES FACTEURS
DE CAPACITÉ DE TRANSPORT CYCLIQUE LORSQUE LE CYCLE DE CHARGE EST
DE FORME QUELCONQUE

L'objet du calcul d'un facteur de capacité de transport cyclique est de trouver, pour une forme donnée de cycle, le facteur M par lequel la capacité de transport en régime permanent (facteur de charge 100%) peut être multipliée pour obtenir la valeur de pointe du courant du cycle de charge, telle que la température cyclique de pointe de l'âme atteindra, sans la dépasser, la valeur utilisée pour déterminer la capacité de transport en régime permanent. Un facteur défini de cette manière a pour référence la température en régime permanent, qui est habituellement la température maximale admissible.

Le cycle journalier de courant est tout d'abord exprimé comme proportion de sa valeur maximale de telle sorte que cette dernière valeur est représentée par l'unité. Le cycle des pertes de chaleur du câble est ensuite déterminé en élevant au carré les ordonnées de ce cycle de courant. Le cycle de pertes est alors décomposé en créneaux horaires, l'amplitude de chaque créneau étant désignée par $Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_{23}$, où Y_i est une mesure du carré du courant équivalent de i à $(i+1)$ heures avant le moment où l'on prévoit que l'âme doit atteindre sa température maximale. Celle-ci est généralement facilement déterminée par examen, mais elle peut ne pas survenir après passage du courant par les valeurs les plus élevées, si ces périodes de fortes charges sont de courte durée. L'amplitude Y_0 est donc généralement, mais non nécessairement, égale à l'unité. La figure 1, page 34, montre un cycle typique de charge des pertes, traité de cette façon. Le facteur de charge des pertes pour ce cycle μ est donné par:

$$\mu = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} Y_i \quad (19)$$

La réponse thermique du câble au cycle de pertes peut être déterminée en considérant chaque variation d'amplitude comme une fonction échelon séparée produisant une réponse transitoire. La réponse totale est la somme de toutes ces transitoires.

Supposons connue l'élévation de température de l'âme au bout de i heures après l'application d'une fonction échelon de pertes correspondant au courant nominal I_R et soit $\theta_R(i)$ sa valeur. L'élévation de la température maximale de l'âme au-dessus de l'ambiante pour un courant cyclique journalier dont la valeur de pointe est égale au courant nominal, est alors:

$$\begin{aligned} \theta_m = & Y_0 \theta_R(1) + Y_1 [\theta_R(2) - \theta_R(1)] + Y_2 [\theta_R(3) - \theta_R(2)] + \dots \\ & \dots Y_5 [\theta_R(6) - \theta_R(5)] + \mu [\theta_R(\infty) - \theta_R(6)] \end{aligned} \quad (20)$$

On notera que le détail du cycle de charge est nécessaire sur une durée de 6 h seulement précédant l'instant où la température atteindra sa valeur maximale, les valeurs précédentes pouvant être représentées avec une précision suffisante en utilisant une valeur moyenne. Le facteur de charge des pertes du cycle μ donne cette valeur moyenne.

$$M = \sqrt{\frac{\theta_R(\infty)}{\theta_m}} \quad (21)$$

où

$$M = \frac{1}{\left(\sum_{i=0}^5 Y_i \left[\frac{\theta_R(i+1)}{\theta_R(\infty)} - \frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} \right] + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right] \right)^{1/2}} \quad (22)$$

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = \left[1 - k + k\beta(i) \right] \alpha(i) \quad (23)$$

$$\theta_R(0) = 0$$

APPENDIX A

BASIC THEORY FOR COMPUTATION OF CYCLIC RATING FACTORS
WITH ANY SHAPE OF LOAD CYCLE

The object of a cyclic rating factor calculation is to find, for a given shape of cycle, the factor M by which the steady-state rating (100% load factor) can be multiplied to give the peak current of the load cycle, when the peak cyclic conductor temperature will reach but not exceed the value used to determine the steady-state rating. A factor defined in this way has the steady-state temperature, which is usually the maximum permissible temperature, as its reference.

The daily current cycle is first expressed as a proportion of its maximum value so that the maximum value is unity. The cycle of cable heat-losses is then found by squaring the ordinates of the current cycle. The loss cycle is then decomposed into hourly rectangular pulses, each pulse magnitude being denoted by $Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_{23}$, where Y_i is a measure of the squared current between i and $(i+1)$ hours prior to the expected time of the maximum conductor temperature. The latter is usually easily determined by inspection, but may not occur after the highest current values if these are of short duration only. The magnitude of Y_0 is therefore usually, but not necessarily, unity. Figure 1, page 34, shows a typical loss-load cycle treated in this way. The loss-load factor for this cycle μ is given by

$$\mu = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} Y_i \quad (19)$$

The temperature response of the cable to the cycle of losses can be found by regarding each change of magnitude as a separate step function which produces a transient response. The total response is the sum of all the transients.

Let the conductor temperature rise at time i hours after the application of a step function of losses corresponding to the rated current I_R be $\theta_R(i)$. Then the maximum conductor temperature rise above ambient for a daily cyclic current whose peak value is the rated current is:

$$\theta_m = Y_0 \theta_R(1) + Y_1 [\theta_R(2) - \theta_R(1)] + Y_2 [\theta_R(3) - \theta_R(2)] + \dots \\ \dots Y_5 [\theta_R(6) - \theta_R(5)] + \mu [\theta_R(\infty) - \theta_R(6)] \quad (20)$$

It will be noted that detail of the load cycle is needed over a period of only 6 h before the time of maximum temperature, earlier values can be represented with sufficient accuracy by using an average. The loss-load factor μ provides this average.

$$M = \sqrt{\frac{\theta_R(\infty)}{\theta_m}} \quad (21)$$

where

$$M = \frac{1}{\left(\sum_{i=0}^5 Y_i \left[\frac{\theta_R(i+1)}{\theta_R(\infty)} - \frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} \right] + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right] \right)^{1/2}} \quad (22)$$

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = \left[1 - k + k\beta(i) \right] \alpha(i) \quad (23)$$

$$\theta_R(0) = 0$$