

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60287-1-3

Première édition
First edition
2002-05

**Câbles électriques –
Calcul du courant admissible –**

Partie 1-3:

**Equations de l'intensité du courant admissible
(facteur de charge 100 %) et calcul des pertes –
Répartition du courant entre des câbles unipolaires
disposés en parallèle et calcul des pertes
par courant de circulation**

**Electric cables –
Calculation of the current rating –**

Part 1-3:

**Current rating equations (100 % load factor)
and calculation of losses –
Current sharing between parallel single-core cables
and calculation of circulating current losses**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60287-1-3:2002

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions 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.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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 cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI** (www.iec.ch)
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/catlg-f.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/JP.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. 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.

Further information on IEC publications

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 this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. 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 also available from the following:

- **IEC Web Site** (www.iec.ch)
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/catlg-e.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/JP.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60287-1-3

Première édition
First edition
2002-05

**Câbles électriques –
Calcul du courant admissible –**

Partie 1-3:

**Equations de l'intensité du courant admissible
(facteur de charge 100 %) et calcul des pertes –
Répartition du courant entre des câbles unipolaires
disposés en parallèle et calcul des pertes
par courant de circulation**

**Electric cables –
Calculation of the current rating –**

Part 1-3:

**Current rating equations (100 % load factor)
and calculation of losses –
Current sharing between parallel single-core cables
and calculation of circulating current losses**

© IEC 2002 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 photocopie 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, 3, rue de Varembe, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: 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

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives	8
3 Symboles	8
4 Description de la méthode	10
4.1 Généralités	10
4.2 Résumé de la méthode	12
4.3 Solution matricielle	18
Annexe A (informative) Exemple de calculs	20
Annexe B (informative) Exemple de calcul du coefficient α pour les conducteurs à âme creuse	36
Bibliographie	38
Figure B.1 – Représentation d'un conducteur à âme creuse	36
Tableau 1 – Valeurs de α pour les âmes	16
Tableau A.1 – Valeurs calculées de $d_{j,k}$	28
Tableau A.2 – Valeurs calculées de $z_{j,k}$	28
Tableau A.3 – Matrice $[Z]$ comprenant les coefficients des courants	30

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	9
2 Normative references	9
3 Symbols	9
4 Description of method.....	11
4.1 General.....	11
4.2 Outline of method.....	13
4.3 Matrix solution.....	19
Annex A (informative) Example calculations.....	21
Annex B (informative) Example of the computation of the coefficient α for hollow core conductors	37
Bibliography.....	39
Figure B.1 – Representation of a hollow core conductor.....	37
Table 1 – Values of α for conductors	17
Table A.1 – Calculated values of $d_{j,k}$	29
Table A.2 – Calculated values of zz	29
Table A.3 – Array $[Z]$ including coefficients for currents.....	31

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60287-1-3:2002

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 1-3: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Répartition du courant entre des câbles unipolaires disposés en parallèle et calcul des pertes par courant de circulation

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60287-1-3 a été établie par le Comité d'études 20 de la CEI: Câbles électriques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
20/522/FDIS	20/535/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

Les annexes A et B sont données uniquement à titre d'information.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2008. A cette date, la publication sera

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRIC CABLES –
CALCULATION OF THE CURRENT RATING –****Part 1-3: Current rating equations (100 % load factor)
and calculation of losses –
Current sharing between parallel single-core cables
and calculation of circulating current losses**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60287-1-3 has been prepared by IEC technical committee 20: Electric cables.

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

FDIS	Report on voting
20/522/FDIS	20/535/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

Annexes A and B are for information only.

The committee has decided that this publication remains valid until 2008. At this date, in accordance with the committee's decision, the publication will be

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

INTRODUCTION

Lorsque des câbles unipolaires sont installés en parallèle, le courant de charge peut ne pas être réparti également entre les câbles. Les courants circulant dans les gaines des câbles peuvent également être de valeur différente. Cela est dû au fait qu'une proportion non négligeable de l'impédance des conducteurs de forte section provient de leur réactances propre et mutuelle. Ainsi l'espacement et la position de chaque câble par rapport aux autres auront un effet sur la répartition du courant et sur les courants de circulation. Les courants dépendent aussi du sens de rotation des phases. La méthode décrite dans la présente norme peut être utilisée pour le calcul de la répartition des courants entre les conducteurs de phase, ainsi que pour les pertes par courant de circulation.

Il n'y a pas de règle simple permettant d'estimer les pertes par courant de circulation dans des câbles parallèles: un calcul est nécessaire pour chaque configuration. Les principes et les formules des impédances sont simples; la difficulté réside dans la résolution du grand nombre d'équations simultanées ainsi générées. Le nombre d'équations à résoudre est généralement trop élevé pour permettre l'utilisation du calcul manuel, et une solution informatique est recommandée. Pour n câbles par phase dotés de gaines métalliques, dans un système triphasé, il y a six n équations qui contiennent le même nombre de variables complexes.

Pour des raisons de simplicité, les équations proposées dans cette norme partent de l'hypothèse que les conducteurs disposés en parallèle sont tous de même section. Si cette condition n'est pas vérifiée, les équations peuvent être ajustées pour tenir compte de la différence des résistances dans chaque conducteur. L'effet des conducteurs de neutre et de terre peut également être pris en compte en incluant ces conducteurs dans le calcul des boucles appropriées. La méthode proposée dans cette norme ne prend pas en compte la composante du courant circulant dans la gaine qui pourrait s'écouler par le réseau de terre ou toute autre voie.

Les courants dans les âmes et les courants de circulation dans les gaines des câbles unipolaires disposés en parallèle ont peu de risque d'être répartis de manière uniforme. Ainsi il convient que la résistance thermique externe des câbles souterrains disposés en parallèle soit calculée par la méthode décrite en 3.1 de la CEI 60287-2-1. En raison du fait que la résistance thermique externe et la température de la gaine sont conditionnées par la dissipation des pertes de chacun des câbles de l'ensemble, il est nécessaire de passer par une procédure itérative pour déterminer les pertes par courant de circulation et la résistance thermique externe.

INTRODUCTION

When single-core cables are installed in parallel the load current may not share equally between the parallel cables. The circulating currents in the sheaths of the parallel cables will also differ. This is because a significant proportion of the impedance of large conductors is due to self reactance and mutual reactance. Hence the spacing and relative location of each cable will have an effect on the current sharing and the circulating currents. The currents are also affected by phase rotation. The method described in this standard can be used to calculate the current sharing between conductors as well as the circulating current losses.

There is no simple rule by which the circulating current losses of parallel cables can be estimated. Calculation for each cable configuration is necessary. The principles and impedance formulae involved are straightforward but the difficulty arises in solving the large number of simultaneous equations generated. The number of equations to be solved generally precludes the use of manual calculations and solution by computer is recommended. For n cables per phase having metallic sheaths in a three-phase system there are six n equations containing the same number of complex variables.

For simplicity the equations set out in this standard assume that the parallel conductors all have the same cross-sectional area. If this is not the case, the equations may be adapted to allow for different resistances for each conductor. The effect of neutral and earth conductors can also be calculated by including these conductors in the appropriate loops. The method set out in this standard does not take account of any portion of the sheath circulating currents that may flow through the earth or other extraneous paths.

The conductor currents and sheath circulating currents in parallel single-core cables are unlikely to be equal. Because of this, the external thermal resistance for buried parallel cables should be calculated using the method set out in 3.1 of IEC 60287-2-1. Because the external thermal resistance and sheath temperatures are functions of the power dissipation from each cable in the group it is necessary to adopt an iterative procedure to determine the circulating current losses and the external thermal resistance.

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 1-3: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Répartition du courant entre des câbles unipolaires disposés en parallèle et calcul des pertes par courant de circulation

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60287 fournit une méthode de calcul des courants de phase et des pertes par courant de circulation dans des câbles unipolaires disposés en parallèle.

La méthode décrite dans cette norme peut être utilisée pour un nombre quelconque de câbles par phase lorsqu'ils sont disposés en parallèle, et quelle qu'en soit la disposition géométrique. Les courants de phase peuvent être calculés pour toutes les techniques de mise à la terre des gaines. Pour le calcul des pertes dans les gaines, l'hypothèse est faite que les gaines sont mises à la terre aux deux extrémités. La CEI 60287-1-2 donne une méthode de calcul des pertes dans les gaines par courants de Foucault pour deux circuits posés en nappe.

2 Références normatives

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

CEI 60287-1-2:1993, *Câbles électriques – Calcul du courant admissible – Partie 1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Section 2: Facteurs de pertes par courants de Foucault dans les gaines dans le cas de deux circuits disposés en nappe*

CEI 60287-2-1:1994, *Câbles électriques – Calcul du courant admissible – Partie 2: Résistance thermique – Section 1: Calcul de la résistance thermique*

3 Symboles

d_c	diamètre de l'âme, mm
d_s	diamètre moyen de la gaine, mm
f	fréquence, Hz
i, k	éléments de la série des conducteurs
m, n	éléments de la série des câbles
p	nombre de câbles par phase
D_{mn}	entraxe des câbles, mm
I_p	courant du conducteur du câble p , A
I_{sp}	courant de circulation dans la gaine du câble p , A
R	résistance d'un élément conducteur, Ω/m

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING –

Part 1-3: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Current sharing between parallel single-core cables and calculation of circulating current losses

1 Scope

This part of IEC 60287 provides a method for calculating the phase currents and circulating current losses in single-core cables arranged in parallel.

The method described in this standard can be used for any number of cables per phase in parallel in any physical layout. The phase currents can be calculated for any arrangement of sheath bonding. For the calculation of sheath losses, it is assumed that the sheaths are bonded at both ends. A method for calculating sheath eddy current losses in two circuits in flat formation is given in IEC 60287-1-2.

2 Normative references

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

IEC 60287-1-2:1993, *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Section 2: Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation*

IEC 60287-2-1:1994, *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2: Thermal resistance – Section 1: Calculation of thermal resistance*

3 Symbols

d_c	diameter of the conductor, mm
d_s	mean diameter of the sheath, mm
f	frequency, Hz
i, k	elements in the series of conductors
m, n	elements in the series of cables
p	number of cables per phase
D_{mn}	axial spacing between conductors, mm
I_p	current in the conductor of cable p , A
I_{sp}	circulating current in the sheath of cable p , A
R	resistance of a conducting element, Ω/m

R_c	résistance en courant alternatif de l'âme à la température d'exploitation maximale, Ω/m
R_s	résistance de la gaine à la température d'exploitation, Ω/m
$X_{i,k}$	réactance mutuelle apparente d'une paire de conducteurs
ΔV	chute de tension dans un conducteur
α	coefficient dépendant de la structure de l'âme
λ'_p	facteur de pertes dans la gaine du câble p dû aux courants de circulation
ω	pulsation (fréquence angulaire) du système ($2\pi f$), s^{-1}

4 Description de la méthode

4.1 Généralités

La méthode calcule la proportion du courant de phase transitée par chaque âme, ainsi que le courant circulant dans la gaine de chacun des câbles en parallèle. Le facteur de pertes (λ) pour chaque cas est ensuite calculé comme étant le rapport des pertes dans la gaine causées par les courants de circulation, aux pertes dans l'âme de ce même câble.

La méthode de calcul décrite ci-dessous prend en compte uniquement les chutes de tension le long des conducteurs. Elle n'intègre pas les déséquilibres de charge conduisant à des courants de phase déséquilibrés.

Les équations à résoudre pour le calcul des courants inconnus dans les conducteurs parallèles et leurs gaines sont construites à partir de formules de base donnant, d'une part, l'impédance d'une boucle comprenant deux conducteurs longs disposés en parallèle et, d'autre part l'impédance mutuelle entre une boucle et un conducteur avoisinant. La considération de ces équations permet d'aboutir à un système d'équations simultanées pour la chute de tension longitudinale dans les âmes et les gaines dans un système triphasé de câbles disposés en parallèle. Les chutes de tension longitudinales dans toutes les âmes en parallèle de la même phase sont égales, comme les chutes de tension longitudinales dans les gaines reliées entre elles. De sorte que les chutes de tension peuvent être éliminées des équations. La somme des courants dans les conducteurs parallèles est égale, soit au courant de phase connu, soit à zéro en ce qui concerne les gaines, ce qui fournit les informations supplémentaires nécessaires à la résolution des équations simultanées.

A noter que les courants en question sont des quantités complexes, contenant des composantes à la fois réelles et imaginaires.

L'impédance mutuelle entre les conducteurs est fonction de leur positionnement l'un par rapport à l'autre. Ainsi, lorsque le positionnement relatif des câbles varie le long du trajet ou que les gaines sont permutées, l'impédance pour chaque tronçon doit être calculée individuellement, avec sommation des résultats vectoriels, pour arriver à l'impédance totale pour chaque boucle. Si la longueur de la liaison est très courte, des erreurs non négligeables peuvent se produire au niveau du résultat calculé, en raison de la variation du positionnement des câbles les uns par rapport aux autres à proximité des extrémités du système.

Les équations décrites dans cette norme peuvent également servir à calculer la répartition du courant entre les câbles non pourvus de gaine métallique ou d'armure, et entre les câbles dont les gaines sont mises à la terre en un point, à une seule extrémité. Pour de tels calculs, le courant circulant dans chaque gaine est égal à zéro. Lorsque les gaines sont mises à la terre en un point à une seule extrémité, la montée en potentiel des gaines à l'extrémité ouverte peut également être déterminée par cette méthode.

En ce qui concerne la méthode décrite dans cette norme, il est recommandé d'effectuer la résolution des équations par un processus d'algèbre matriciel, dont un des avantages est que la solution est unique, et non fonction d'un processus itératif.

R_c	a.c. resistance of conductor at maximum operating temperature, Ω/m
R_s	resistance of sheath at operating temperature, Ω/m
$X_{i,k}$	apparent mutual reactance of a pair of conductors
ΔV	conductor voltage drop
α	coefficient depending on the construction of the conductor
λ'_p	sheath loss factor of cable p due to circulating currents
ω	angular frequency of system ($2\pi f$), s^{-1}

4 Description of method

4.1 General

The method calculates the proportion of the phase current carried by each parallel conductor and the circulating current in the sheath of each cable. The loss factor (λ) for each case is then calculated as the ratio of the losses in a sheath caused by circulating currents to the losses in the conductor of that cable.

The method of calculation set out below only considers voltage drop along the conductors. Any unbalance in the load which would lead to unbalanced phase currents is ignored.

The equations to be solved for the unknown currents in the parallel conductors and their sheaths are built up from a consideration of the basic formulae for the impedance associated with a loop consisting of two long conductors lying parallel to each other and the formulae for the mutual impedance between a loop and an adjacent conductor. Consideration of these equations leads to a system of simultaneous equations for the impedance voltage for all the conductors and sheaths in a three-phase parallel cable system. The impedance voltages for all conductors in parallel in the same phase are equal. Also for the conductors representing the bonded sheaths the voltages are equal. Hence the impedance voltages can be eliminated from the equations. The sum of the currents in the parallel conductors is equal to either the known phase current or zero for the sheaths. This provides the additional information needed for solution of the simultaneous equations.

It should be noted that all the currents are complex quantities containing both real and imaginary parts.

The mutual impedance between conductors is a function of their relative positions. Hence, if the relative positions of the cables vary along the route, or the sheaths are cross-bonded, then the impedance for each section shall be calculated individually and the vector results summed in order to obtain the total impedance of each loop. If the route length is very short, then significant errors may occur in the calculated result due to the change in the relative positions of the cables as they approach the terminations.

The equations set out in this standard can also be used to calculate the current sharing between cables without a metallic sheath or armour and between cables with the sheaths connected together at one end only, single-point bonded. For such calculations, the circulating current in each sheath is zero. Where cable sheaths are bonded at one end only, the standing voltage at the open circuit end of the sheath can also be determined using this method of calculation.

For the method set out in this standard, it is recommended that the solution of the equations is achieved by a process of matrix algebra. This has the advantage that the solution achieved is unique and not a function of an iterative process.

4.2 Résumé de la méthode

Le facteur de pertes dans la gaine, dans un câble donné, pour un circuit constitué de plusieurs câbles en parallèle, est représenté par:

$$\lambda'_p = \left(\frac{I_{sp}}{I_p} \right)^2 \frac{R_s}{R_c} \quad (1)$$

où

λ'_p est le facteur de pertes dans la gaine du câble p dû aux courants de circulation;

I_{sp} est le courant circulant dans la gaine du câble p, en A;

I_p est le courant dans l'âme du câble p, en A;

R_s est la résistance de la gaine à la température d'exploitation, en Ω/m ;

R_c est la résistance en courant alternatif de l'âme à la température d'exploitation, en Ω/m .

Les valeurs des courants I_{sp} et I_p sont obtenues par la résolution des équations ayant la forme indiquée ci-dessous, où il existe p conducteurs en parallèle et un nombre total de n conducteurs. Pour des raisons de commodité, les âmes et les gaines sont considérées comme autant de conducteurs simples. Les courants des conducteurs de phase sont I_1, I_2 , etc. Les courants dans les gaines sont $I_{3p+1}, I_{3p+2}, I_{3p+3}$, etc.

La notation suivante est utilisée par souci de simplicité dans les calculs:

Référence de câbles

Circuit	1	...	i	...	p
Phase R	1	...	i	...	p
Phase S	p + 1	...	p + i	...	2p
Phase T	2p + 1	...	2p + i	...	3p

Les conducteurs peuvent être identifiés comme suit:

Référence d'un conducteur de phase = référence du câble

Référence d'une gaine de conducteur = référence du câble + 3p

Pour chaque phase le courant est représenté par:

$$I_R[1 + j0] = \sum_{k=1}^p I_k$$

$$I_S[-0,5 - j0,866] = \sum_{k=p+1}^{2p} I_k \quad (2)$$

$$I_T[-0,5 + j0,866] = \sum_{k=2p+1}^{3p} I_k$$

4.2 Outline of method

The loss factor for the sheath in a given cable in a parallel circuit is given by:

$$\lambda'_p = \left(\frac{I_{sp}}{I_p} \right)^2 \frac{R_s}{R_c} \quad (1)$$

where

λ'_p is the sheath loss factor of cable p due to circulating currents;

I_{sp} is the circulating current in the sheath of cable p, in A;

I_p is the current in the conductor of cable p, in A;

R_s is the resistance of sheath at operating temperature, in Ω/m ;

R_c is the a.c. resistance of conductor at operating temperature, in Ω/m .

The currents I_{sp} and I_p are obtained by solution of equations of the following form where there are p conductors in parallel and a total of n conductors. To simplify matters, both the phase conductors and the sheaths are referred to as conductors. The phase conductor currents are I_1, I_2 etc. The sheath currents are $I_{3p+1}, I_{3p+2}, I_{3p+3}$, etc.

For convenience in the calculations, the following notation is used:

Cable references

Circuit	1	...	i	...	p
Phase R	1	...	i	...	p
Phase S	p + 1	...	p + i	...	2p
Phase T	2p + 1	...	2p + i	...	3p

The conductors can then be identified as follows:

Reference of a phase conductor = reference of the cable

Reference of a sheath conductor = reference of the cable + 3p

For each phase the current is given by:

$$\begin{aligned} I_R[1 + j0] &= \sum_{k=1}^p I_k \\ I_S[-0,5 - j0,866] &= \sum_{k=p+1}^{2p} I_k \\ I_T[-0,5 + j0,866] &= \sum_{k=2p+1}^{3p} I_k \end{aligned} \quad (2)$$

Les équations ci-dessus partent de l'hypothèse d'une rotation de phase directe. Si la rotation de phase n'est pas connue, le calcul doit être effectué pour les rotations directe et inverse.

Pour les boucles concernant les gaines, le courant est donné par:

$$0 + j0 = \sum_{k=3p+1}^{6p} I_k \quad (3)$$

La chute de tension dans chaque conducteur est ainsi

- pour les conducteurs de la phase R:

$$\Delta V_R = \sum_{k=1}^{6p} Z_{i,k} \times I_k \quad (4)$$

où $i = 1$ à p ,

- pour les conducteurs de la phase S:

$$\Delta V_S = \sum_{k=1}^{6p} Z_{i,k} \times I_k \quad (5)$$

où $i = p + 1$ à $2p$,

- pour les conducteurs de la phase T:

$$\Delta V_T = \sum_{k=1}^{6p} Z_{i,k} \times I_k \quad (6)$$

où $i = 2p+1$ à $3p$;

- pour les gaines:

$$\Delta V_A = \sum_{k=1}^{6p} Z_{i,k} \times I_k \quad (7)$$

où $i = 3p+1$ à $6p$.

L'élimination de la chute de tension pour cet ensemble d'équations donne $(6p - 4)$ équations de la forme suivante:

$$0 + j0 = \sum_{k=3p+1}^{6p} zz_{i,k} \times I_k \quad (8)$$

où $zz_{i,k} = Z_{i,k} - Z_{i+1,k} = R_{i,k} + j X_{i,k}$

et R est défini comme suit:

$$R = 0 \text{ si } i \neq k \quad R = 0 \text{ si } i \neq k - 1$$

The above equations assume forward phase rotation. If the phase rotation is not known, the calculation shall be carried out for both forward and reverse phase rotations.

For conductor loops representing the sheaths, the current is given by:

$$0 + j0 = \sum_{k=3p+1}^{6p} I_k \quad (3)$$

The voltage drop in each conductor is then

- for the conductors of phase R:

$$\Delta V_R = \sum_{k=1}^{6p} Z_{i,k} \times I_k \quad (4)$$

for $i = 1$ to p ;

- for the conductors of phase S:

$$\Delta V_S = \sum_{k=1}^{6p} Z_{i,k} \times I_k \quad (5)$$

for $i = p + 1$ to $2p$;

- for the conductors of phase T:

$$\Delta V_T = \sum_{k=1}^{6p} Z_{i,k} \times I_k \quad (6)$$

for $i = 2p + 1$ to $3p$;

- for the sheath conductors:

$$\Delta V_A = \sum_{k=1}^{6p} Z_{i,k} \times I_k \quad (7)$$

for $i = 3p + 1$ to $6p$.

Eliminating the voltage drop from this set of equations leads to $(6p - 4)$ equations having the following form:

$$0 + j0 = \sum_{k=3p+1}^{6p} zz_{i,k} \times I_k \quad (8)$$

where $zz_{i,k} = Z_{i,k} - Z_{i+1,k} = R_{i,k} + jX_{i,k}$

and R is defined as follows:

$$R = 0 \text{ if } i \neq k \quad R = 0 \text{ if } i \neq k-1$$

Pour les conducteurs de phase

$$R = R_c \text{ si } i = k \text{ et } i \leq 3p \quad R = -R_c \text{ si } i = k - 1 \text{ et } i \leq 3p$$

Pour les gaines

$$R = R_s \text{ si } i = k \text{ et } i > 3p \quad R = -R_s \text{ si } i = k - 1 \text{ et } i > 3p$$

$X_{i,k}$ est considéré comme une réactance et défini comme suit:

$$X_{i,k} = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{d_{i+1,k}}{d_{i,k}} \right) \quad (9)$$

où, si $i \neq k$, alors $d_{i,k} = D_{m,n}$ = espacement axial entre les câbles m et n,

avec $m = i$ si $i \leq 3p$ $m = i - 3p$ si $i > 3p$

et $n = k$ si $k \leq 3p$ $n = k - 3p$ si $k > 3p$

Si $i = k$ et $i \leq 3p$ alors $d_{i,k} = \alpha \frac{d_c}{2}$

si $i = k$ et $i > 3p$ alors $d_{i,k} = \frac{d_s}{2}$

où

ω est égale à $2\pi f$;

f est la fréquence, en Hz;

d_c est le diamètre de l'âme, en mm;

d_s est le diamètre moyen de la gaine, en mm;

α est le coefficient dépendant de la structure de l'âme, voir tableau 1.

Tableau 1 – Valeurs de α pour les âmes

Nombre de brins	Valeur de α
1 (âme massive)	0,779
3	0,678
7	0,726
19	0,758
37	0,768
61	0,772
91	0,774
127	0,776

Les valeurs données dans le tableau 1 sont applicables aux conducteurs non compactés. Pour les conducteurs compactés $\alpha = 0,779$ est recommandé. Les valeurs pour les conducteurs creux dépendent du diamètre intérieur et extérieur du conducteur. Un exemple de calcul de la valeur de α pour les conducteurs creux est donné à l'annexe B.

For the phase conductors

$$R = R_c \text{ if } i = k \text{ and } i \leq 3p \quad R = -R_c \text{ if } i = k - 1 \text{ and } i \leq 3p$$

For the sheath conductors

$$R = R_s \text{ if } i = k \text{ and } i > 3p \quad R = -R_s \text{ if } i = k - 1 \text{ and } i > 3p$$

$X_{i,k}$ is regarded as a reactance and is defined as follows:

$$X_{i,k} = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{d_{i+1,k}}{d_{i,k}} \right) \quad (9)$$

where, if, $i \neq k$, then $d_{i,k} = D_{m,n}$ = axial spacing between cables m and n ,

with $m = i$ if $i \leq 3p$ $m = i - 3p$ if $i > 3p$

and $n = k$ if $k \leq 3p$ $n = k - 3p$ if $k > 3p$

If $i = k$ and $i \leq 3p$ then $d_{i,k} = \alpha \frac{d_c}{2}$

if $i = k$ and $i > 3p$ then $d_{i,k} = \frac{d_s}{2}$

where

$$\omega = 2\pi f$$

f is the frequency, in Hz;

d_c is the diameter of the conductor, in mm;

d_s is the mean diameter of the sheath, in mm;

α is the coefficient depending on the construction of the conductor, see table 1.

Table 1 – Values of α for conductors

Number of wires	Value of α
1 (solid)	0,779
3	0,678
7	0,726
19	0,758
37	0,768
61	0,772
91	0,774
127	0,776

The values given in table 1 are applicable to non-compacted conductors. For compacted conductors $\alpha = 0,779$ should be used. The values for hollow conductors are dependant on the inner and outer diameter of the conductor. An example of the calculation of α for hollow conductors is given in annex B.

4.3 Solution matricielle

D'une manière générale, les équations développées auront la forme suivante:

$$Q_n = f(Z_n \times I_n)$$

où les valeurs de Q sont données par le côté gauche des équations (2), (3) et (8). Les valeurs de Z_n sont les coefficients multiplicatifs de I_n dans les équations, et les valeurs de I sont les courants inconnus des âmes et des gaines.

Sous forme matricielle, les équations deviennent:

$$[Q] = [Z] \times [I]$$

où $[Z]$ est la matrice carrée des coefficients I_1 à I_n dans les équations (2), (3) et (8).

Pour résoudre l'équation permettant de déterminer les courants inconnus $[I]$, celle-ci est écrite:

$$[I] = [Z]^{-1} \times [Q]$$

où $[Z]^{-1}$ est la matrice inverse de $[Z]$.

Des exemples de calcul utilisant la solution matricielle sont donnés à l'annexe A.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60287-1-3:2002

4.3 Matrix solution

In general the equations developed will be of the form:

$$Q_n = f(Z_n \times I_n)$$

where the values for Q are given by the left-hand side of equations (2), (3) and (8). The value for Z_n are the coefficients of I_n in these equations, and the values for I are the unknown currents in the conductors and sheaths.

In matrix form the equations become:

$$[Q] = [Z] \times [I]$$

where $[Z]$ is a square matrix of the coefficients of I_1 to I_n in equations (2), (3) and (8).

In order to solve for the unknown currents $[I]$ the equation is written as:

$$[I] = [Z]^{-1} \times [Q]$$

where $[Z]^{-1}$ is the inverse matrix of $[Z]$.

Example calculations using the matrix solution are given in annex A.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60287-1-3:2002

Annexe A (informative)

Exemple de calculs

A.1 Introduction

Les dimensions des câbles dans ces exemples sont arbitraires, et ne sont représentatives d'aucun type particulier de câble.

L'hypothèse est faite que le positionnement relatif des câbles est constant le long du parcours. L'hypothèse est également faite que les câbles de mise à la terre des gaines ont une impédance négligeable comparée à celle des gaines. Les effets de peau et de proximité sur la résistance en courant alternatif sont ignorés. Les différentes valeurs d'impédance calculées dans ces exemples le sont pour des câbles de longueur de 1 000 m.

Dans ces exemples, on a supposé une fréquence d'alimentation de 50 Hz.

Les paramètres des câbles et de l'installation sont les suivants:

Diamètre de l'âme en cuivre:	32,8 mm
Résistance de l'âme à 20 °C:	$28,3 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
Température d'exploitation maximale:	70 °C
Résistance de l'âme à 70 °C:	$33,86 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
Nombre de brins de l'âme:	127
Coefficient de l'âme pour 127 brins:	0,776
Résistance de la gaine en aluminium à 20 °C:	$0,18 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$
Diamètre moyen de la gaine:	48 mm
Température de la gaine:	60 °C
Résistance de la gaine à 60 °C:	$0,209 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$

A.2 Exemple 1

Les câbles sont posés en nappe avec un entraxe de 200 mm, à raison de deux câbles par phase, sans neutres. L'affectation des câbles est comme suit:

Câble 1	Câble 3	Câble 5	Câble 6	Câble 4	Câble 2
R1	S1	T1	T2	S2	R2

Pour la commodité du calcul, l'âme et la gaine de chaque câble sont numérotés de telle manière que les âmes ont des numéros entre 1 et 6 et les gaines entre 7 et 12. Le premier câble comporte ainsi l'âme 1 et la gaine 7, le deuxième câble 2, 8, etc., donnant un total de 12 conducteurs dans cet exemple.

Annex A (informative)

Example calculations

A.1 Introduction

The cable dimensions used in these examples are arbitrary and do not represent any particular type of cable.

It is assumed that the relative positions of the cables do not change over the length of the run. It is also assumed that the bonding conductors have an impedance which is negligible compared with the impedance of the conductors. The skin and proximity effects on a.c. resistance are ignored. The various impedance values calculated in these examples are for 1 000 m long cables.

These examples assume a supply frequency of 50 Hz.

The cable and installation parameters are as follows:

Copper conductor diameter:	32,8 mm
Conductor resistance at 20 °C:	$28,3 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
Maximum operating temperature:	70 °C
Conductor resistance at 70 °C:	$33,86 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
Number of wires in conductor:	127
Conductor coefficient for 127 strands:	0,776
Aluminium sheath resistance at 20 °C:	$0,18 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$
Mean diameter of sheath:	48 mm
Sheath temperature:	60 °C
Sheath resistance at 60 °C:	$0,209 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$

A.2 Example 1

The cables are laid in flat formation at 200 mm between centres with two cables per phase and no neutrals. The cable arrangement is as follows:

Cable 1	Cable 3	Cable 5	Cable 6	Cable 4	Cable 2
R1	S1	T1	T2	S2	R2

For convenience in the calculation, the conductors and sheath of each cable are numbered so that the conductors are numbered 1 to 6 and the sheaths 7 to 12. The first cable will have conductor 1 and sheath 7. The second cable being 2, 8 etc. This gives a total of 12 conductors in this example.

Pour un circuit simple installé en nappe avec un entraxe de 200 mm, avec un câble par phase, les facteurs de pertes dans la gaine calculés en conformité avec la CEI 60287-1-1 sont:

Latéral	Central	Latéral
1,99	1,50	2,62

Ces valeurs sont comparables à celles obtenues dans les exemples 1 et 2, mais considérablement différentes de celles de l'exemple 4.

A.2.1 Calculs

Les coordonnées de départ (0,0) peuvent être attribuées à n'importe quel point du système, mais il est plus simple de prendre l'axe du câble le plus bas à gauche comme point de départ (0,0). Les coordonnées des câbles sont entrées dans la matrice S ci-dessous:

	x	y	
$S =$	0	0	Câble 1, phase R
	1 000	0	Câble 2, phase R
	200	0	Câble 3, phase S
	800	0	Câble 4, phase S
	400	0	Câble 5, phase T
	600	0	Câble 6, phase T

Les entraxes des câbles sont calculés par l'équation suivante;

$$m = 1 \text{ à } 6 \quad n = 1 \text{ à } 6$$

$$D_{m,n} = \sqrt{(S_{m,1} - S_{n,1})^2 + (S_{m,2} - S_{n,2})^2}$$

Les entraxes sont donnés dans la matrice D ci-dessous:

$D =$	0	1 000	200	800	400	600
	1 000	0	800	200	600	400
	200	800	0	600	200	400
	800	200	600	0	400	200
	400	600	200	400	0	200
	600	400	400	200	200	0

Il est clair que cette matrice est symétrique par rapport à sa diagonale, et qu'il n'est pas nécessaire de calculer à la fois les entraxes entre les câbles m et n , et entre les câbles n et m .

Cette matrice est ensuite modifiée pour inclure toutes les valeurs de $d_{j,k}$ requises pour le calcul des $X_{i,k}$. La matrice modifiée est représentée dans le tableau A.1.

Les réactances efficaces $X_{i,k}$ sont calculées par l'équation (9):

$$X_{i,k} = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{d_{i+1,k}}{d_{i,k}} \right)$$

For a single circuit installed in flat formation at 200 mm centres, with one cable per phase, the sheath loss factors calculated in accordance with IEC 60287-1-1 are:

Outer	Middle	Outer
1,99	1,50	2,62

These values are similar to the values obtained in examples 1 and 2, but significantly different from those obtained in example 4.

A.2.1 Calculations

The zero co-ordinates (0,0) can be fixed at any point, but it is convenient to take the axis of the lower left-hand cable as (0,0). The cable co-ordinates are entered in to the array S below:

	x	y	
$S =$	0	0	Cable 1, phase R
	1 000	0	Cable 2, phase R
	200	0	Cable 3, phase S
	800	0	Cable 4, phase S
	400	0	Cable 5, phase T
	600	0	Cable 6, phase T

The axial cable spacings are calculated using the following equation:

$$m = 1 \text{ to } 6 \quad n = 1 \text{ to } 6$$

$$D_{m,n} = \sqrt{(S_{m,1} - S_{n,1})^2 - (S_{m,2} - S_{n,2})^2}$$

The spacings are given in the array D below:

$D =$	0	1 000	200	800	400	600
	1 000	0	800	200	600	400
	200	800	0	600	200	400
	800	200	600	0	400	200
	400	600	200	400	0	200
	600	400	400	200	200	0

Clearly this array is symmetrical about its diagonal and it is not necessary to calculate the spacing between cables m and n as well as between cables n and m .

This array is then modified to include all the values of $d_{j,k}$ required to calculate $X_{i,k}$. The modified array is given in table A1.

The effective reactances $X_{i,k}$ are calculated using equation (9):

$$X_{i,k} = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{d_{i+1,k}}{d_{i,k}} \right)$$

Les coefficients, zz , pour la partie droite de l'équation (8), sont calculés comme suit, et sont donnés dans la matrice zz , au tableau A.2.

$$zz_{i,k} = R_{i,k} + jX_{i,k}$$

où

$$\begin{array}{ll} R = 0 & \text{si } i \neq k \\ R = R_c & \text{si } i = k \text{ et } i \leq 3p \\ R = R_s & \text{si } i = k \text{ et } i > 3p \end{array} \quad \begin{array}{ll} R = 0 & \text{si } i \neq k - 1 \\ R = -R_c & \text{si } i = k - 1 \text{ et } i \leq 3p \\ R = -R_s & \text{si } i = k - 1 \text{ et } i > 3p \end{array}$$

Les coefficients pour le courant I , du côté droit des équations (2) et (3), sont indiqués dans la matrice H ci-dessous;

$$H = \begin{array}{c|cccccccccccc|l} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Phase R} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Phase S} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Phase T} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \text{Gaine} \end{array}$$

Pour la commodité du calcul, ces coefficients sont inclus dans la même matrice que ceux obtenus en considérant les boucles des âmes. La nouvelle matrice $[Z]$ est donnée dans le tableau A.3.

Les valeurs et coefficients pour le côté gauche des équations (2) et (3) sont donnés dans la matrice $[Q]$ ci-dessous:

$$[Q] = \begin{array}{c|c} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -0,5 - 0,866j \\ 0 \\ -0,5 + 0,866j \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$$

Les courants dans l'âme et dans la gaine peuvent ensuite être calculés pour chaque câble par résolution des équations simultanées exposées dans la matrice $[Z]$, le tableau A.3, et $[Q]$ ci-dessus. Les composantes résistive et réactive des courants sont données ci-dessous. La multiplication de l'inverse de la matrice $[Z]$ par $[Q]$ résout les équations.

The coefficients, zz , for the right-hand side of equation (8) are calculated as follows and are given in the array zz , as shown in table A.2.

$$zz_{i,k} = R_{i,k} + j X_{i,k}$$

where

$$\begin{array}{ll} R = 0 & \text{if } i \neq k \\ R = R_c & \text{if } i = k \text{ and } i \leq 3p \\ R = R_s & \text{if } i = k \text{ and } i > 3p \end{array} \quad \begin{array}{ll} R = 0 & \text{if } i \neq k-1 \\ R = -R_c & \text{if } i = k-1 \text{ and } i \leq 3p \\ R = -R_s & \text{if } i = k-1 \text{ and } i > 3p \end{array}$$

The coefficients for the current, I , for the right-hand side of equations (2) and (3) are shown in array H below;

$$H = \begin{array}{cccccccccccc|l} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Phase R} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Phase S} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Phase T} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \text{Sheath} \end{array}$$

For convenience of calculation these coefficients are included in the same matrix as those obtained from consideration of the conductor loops. The new array $[Z]$ is given in table A.3.

The values and coefficients for the left-hand side of equations (2) and (3) are given in array $[Q]$ below:

$$[Q] = \begin{array}{|c} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -0,5 - 0,866j \\ 0 \\ -0,5 + 0,866j \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$$

The phase and sheath currents in each conductor can then be calculated by solving the simultaneous equations set out in array $[Z]$, table A.3, and $[Q]$ above. These currents are given below in terms of the resistive and reactive components. Multiplying the inverse of matrix $[Z]$ by $[Q]$ solves the equations.

$$[I] = \begin{bmatrix} 0,5 \\ 0,5 \\ -0,25 - 0,433j \\ -0,25 - 0,433j \\ -0,25 + 0,433j \\ -0,25 + 0,433j \\ -0,216 - 0,1892j \\ -0,216 - 0,1892j \\ -0,1309 + 0,2164j \\ -0,1309 + 0,2164j \\ 0,3469 - 0,0272j \\ 0,3469 - 0,0272j \end{bmatrix}$$

Les intensités des courants de phase et de gaine, ainsi que le facteur de pertes dans la gaine sont donnés ci-dessous, avec l'hypothèse d'un courant de phase total de 100 A.

$$\text{Courant conducteur phase} = |I_m| \times 100 ; \quad \text{Courant de gaine} = |I_{3p+m}| \times 100 ;$$

$$\text{Facteur de pertes} = \frac{(|I_{3p+m}| \times 100)^2 \times R_s}{(|I_m| \times 100)^2 \times R_c}$$

	Courant de phase	Courant de gaine	Facteur de perte dans la gaine
Câble 1, phase R	50	28,7	2,036
Câble 2, phase R	50	28,7	2,036
Câble 3, phase S	50	25,3	1,58
Câble 4, phase S	50	25,3	1,58
Câble 5, phase T	50	34,8	2,99
Câble 6, phase T	50	34,8	2,99

$$[I] = \begin{bmatrix} 0,5 \\ 0,5 \\ -0,25 - 0,433j \\ -0,25 - 0,433j \\ -0,25 + 0,433j \\ -0,25 + 0,433j \\ -0,216 - 0,1892j \\ -0,216 - 0,1892j \\ -0,1309 + 0,2164j \\ -0,1309 + 0,2164j \\ 0,3469 - 0,0272j \\ 0,3469 - 0,0272j \end{bmatrix}$$

The magnitude of the phase conductor and sheath currents together with the sheath loss factor are given below, assuming a total phase current of 100 A.

$$\text{Phase conductor current} = |I_m| \times 100; \quad \text{Sheath current} = |I_{3p+m}| \times 100;$$

$$\text{Loss factor} = \frac{(|I_{3p+m}| \times 100)^2 \times R_s}{(|I_m| \times 100)^2 \times R_c}$$

	Phase current	Sheath current	Sheath loss factor
Cable 1, phase R	50	28,7	2,036
Cable 2, phase R	50	28,7	2,036
Cable 3, phase S	50	25,3	1,58
Cable 4, phase S	50	25,3	1,58
Cable 5, phase T	50	34,8	2,99
Cable 6, phase T	50	34,8	2,99

Tableau A.1 – Valeurs calculées de $d_{j,k}$

12,73	1 000	200	800	400	600	24	1 000	200	800	400	600
1 000	12,73	800	200	600	400	1 000	24	800	200	600	400
200	200	12,73	600	200	400	200	200	24	600	200	400
800	800	600	12,73	400	200	800	800	600	24	400	200
400	600	200	400	12,73	200	400	600	200	400	24	200
600	400	400	200	200	12,73	600	400	400	200	200	24
24	1 000	200	800	400	600	24	1 000	200	800	400	600
1 000	24	800	200	600	400	1 000	24	800	200	600	400
200	200	24	600	200	400	200	200	24	600	200	400
800	800	600	24	400	200	800	800	600	24	400	200
400	600	200	400	24	200	400	600	200	400	24	200
600	400	400	200	200	24	600	400	400	200	200	24

Tableau A.2 – Valeurs calculées de z_z

0,0339+0,2742j	-0,0339-0,2742j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j	0,2343j	-0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j
0,0871j	-0,0871j	0,0339+0,2421j	-0,0339-0,2421j	0,0436j	-0,0436j	0,0871j	-0,0871j	0,2022j	-0,2022j	0,0436j	-0,0436j
0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,0339+0,1731j	-0,0339-0,1731j	0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,1332j	-0,1332j
0,2343j	-0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0225j	0,209 + 0,2343j	-0,209 - 0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0225j
-0,1011j	0,2203j	-0,2203j	0,069j	-0,069j	0	-0,1011j	0,209+0,2203j	-0,209 - 0,2203j	0,069j	-0,069j	0
0,0871j	-0,0871j	0,2022j	-0,2022j	0,0436j	-0,0436j	0,0871j	-0,0871j	0,209 + 0,2022j	-0,209 - 0,2022j	-0,0436j	0,0436j
-0,0436j	0,069j	-0,069j	0,1766j	-0,1766j	0	-0,0436j	0,069j	-0,069j	0,209 + 0,1768j	-0,209 - 0,1768j	0
0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,1332j	-0,1332j	0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,209 + 0,1332j	-0,209 - 0,1332j

Table A.1 – Calculated values of $d_{j,k}$

12,73	1 000	200	800	400	600	24	1 000	200	800	400	600
1 000	12,73	800	200	600	400	1 000	24	800	200	600	400
200	200	12,73	600	200	400	200	200	24	600	200	400
800	800	600	12,73	400	200	800	800	600	24	400	200
400	600	200	400	12,73	200	400	600	200	400	24	200
600	400	400	200	200	12,73	600	400	400	200	200	24
24	1 000	200	800	400	600	24	1 000	200	800	400	600
1 000	24	800	200	600	400	1 000	24	800	200	600	400
200	200	24	600	200	400	200	200	24	600	200	400
800	800	600	24	400	200	800	800	600	24	400	200
400	600	200	400	24	200	400	600	200	400	24	200
600	400	400	200	200	24	600	400	400	200	200	24

Table A.2 – Calculated values of $z_{j,k}$

0,0339+0,2742j	-0,0339-0,2742j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j	0,2343j	0,0871j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j
0,0871j	-0,0871j	0,0339+0,2421j	-0,0339-0,2421j	0,0436j	-0,0436j	0,0871j	0,2022j	0,2022j	-0,2022j	0,0436j	-0,0436j
0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,0339+0,1731j	-0,0339-0,1731j	0,0255j	0,0436j	0,0436j	-0,0436j	0,1332j	-0,1332j
0,2343j	-0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0225j	0,209+0,2343j	0,0871j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0225j
-0,1011j	0,2203j	-0,2203j	0,069j	-0,069j	0	-0,1011j	0,209-0,2203j	0,069j	0,069j	-0,069j	0
0,0871j	-0,0871j	0,2022j	-0,2022j	0,0436j	-0,0436j	0,0871j	0,209+0,2022j	-0,209-0,2022j	-0,209+0,1768j	-0,0436j	-0,0436j
-0,0436j	0,069j	-0,069j	0,1768j	-0,1768j	0	-0,0436j	-0,069j	0,209+0,1768j	0,209-0,1768j	0	0
0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,1332j	-0,1332j	0,0255j	0,0436j	0,209+0,1332j	-0,209-0,1332j	0,209+0,1332j	-0,209-0,1332j

Tableau A.3 – Matrice [Z] comprenant les coefficients des courants

0,0339 + 0,2742j	-0,0339 – 0,2742j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j	0,2343j	-0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0871j	-0,0871j	0,0339 + 0,2421j	-0,0339 – 0,2421j	0,0436j	-0,0436j	0,0871j	-0,0871j	0,2022j	-0,2022j	0,0436j	-0,0436j
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,0339 + 0,1731j	-0,0339 – 0,1731j	0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,1332j	-0,1332j
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
0,2343j	-0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j	0,209 + 0,2343j	-0,209 – 0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j
-0,1011j	0,2203j	-0,2203j	0,069j	-0,069j	0	-0,1011j	0,209 + 0,2203j	-0,209 – 0,2203j	0,069j	-0,069j	0
0,0871j	-0,0871j	0,2022j	-0,2022j	0,0436j	-0,0436j	0,0871j	-0,0871j	0,209 + 0,2022j	-0,209 – 0,2022j	-0,0436j	0,0436j
-0,0436j	0,069j	-0,069j	0,1768j	-0,1768j	0	-0,0436j	0,069j	-0,069j	0,209 + 0,1768j	-0,209 – 0,1768j	0
0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,1332j	-0,1332j	0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,209 + 0,1332j	-0,209 – 0,1332j
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Table A.3 – Array [Z] including coefficients for currents

0,0339+0,2742j	-0,0339 – 0,2742j	0,0871j	0,0255j	-0,0255j	0,2343j	-0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0255j
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0871j	-0,0871j	0,0339 + 0,2421j	0,0436j	-0,0436j	0,0871j	-0,0871j	0,2022j	-0,2022j	0,0436j	-0,0436j
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0255j	-0,0255j	0,0436j	0,0339 + 0,1731j	-0,0339 – 0,1731j	0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,1332j	-0,1332j
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
0,2343j	-0,2343j	0,0871j	0,0255j	-0,0225j	0,209 + 0,2343j	-0,209 – 0,2343j	0,0871j	-0,0871j	0,0255j	-0,0225j
-0,1011j	0,2203j	-0,2203j	-0,069j	0	-0,1011j	0,209 + 0,2203j	-0,209 – 0,2203j	0,069j	-0,069j	0
0,0871j	-0,0871j	0,2022j	0,0436j	-0,0436j	0,0871j	-0,0871j	0,209+0,2022j	-0,209–0,2022j	-0,0436j	-0,0436j
-0,0436j	0,069j	-0,069j	-0,1768j	0	-0,0436j	0,069j	-0,069j	0,209+0,1768j	-0,209 – 0,1768j	0
0,0255j	-0,0255j	0,0436j	0,1332j	-0,1332j	0,0255j	-0,0255j	0,0436j	-0,0436j	0,209 + 0,1332j	-0,209 – 0,1332j
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Click to view the full PDF of IEC 60287-1-3:2002