

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
287-1-2**

Première édition
First edition
1993-11

**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

**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



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 287-1-2: 1993

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 auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

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 from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
287-1-2**

Première édition
First edition
1993-11

**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

**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

© CEI 1993 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 pro-
cédé, 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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

AVA Documents
Document Sharing Hub

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application	6
2 Références normatives	6
3 Symboles	8
4 Description de la méthode	10
4.1 Généralités	10
4.2 Grandes lignes de la méthode	10
4.3 Critères d'utilisation des formules et coefficients	14
5 Formules pour les facteurs de pertes dans les gaines de résistance élevée dans un circuit unique, λ_0	14
6 Calcul des coefficients H , N et J	14
6.1 Affectation des coefficients pour chaque câble, ordre de succession et identification des phases	14
6.2 Calcul des coefficients H (1, 2 et 3) tableau 1	18
6.3 Calcul des coefficients N (1, 2, 3, 4, 5 et 6) tableau 2	20
6.4 Calcul des coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 et 6), tableaux 3 à 11	20
6.5 Calcul des coefficients G_s et g_s	24
7 Notes sur la transposition des câbles	24
8 Exemples de calcul des pertes par courants de Foucault	26
8.1 Introduction	26
8.2 Exemple 1	26
8.3 Exemple 2	28
Tableaux	38

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Symbols	9
4 Description of method	11
4.1 General	11
4.2 Outline of method	11
4.3 Criteria for use of formulae and coefficients	15
5 Formulae for sheath loss factors for high-resistance sheaths in a single circuit, λ_0	15
6 Calculation of the coefficients H , N and J	15
6.1 Allocation of coefficients to each cable, time sequence and phase identification	15
6.2 Calculation of coefficients H (1, 2 and 3), table 1	19
6.3 Calculation of coefficients N (1, 2, 3, 4, 5 and 6), table 2	21
6.4 Calculation of coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 and 6), tables 3 to 11	21
6.5 Calculation of coefficients G_s and g_s	25
7 Notes on transposition of cables	25
8 Worked examples of calculation of eddy current losses	27
8.1 Introduction	27
8.2 Example 1	27
8.3 Example 2	29
Tables	39

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

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 en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études 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.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles 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.

La Norme internationale CEI 287-1-2 a été établie par le sous-comité 20A: Câbles de haute tension, du comité d'études 20 de la CEI: Câbles électriques.

La deuxième édition de la CEI 287 (1982) est en cours de révision et sera subdivisée en trois parties, chaque partie comprenant plusieurs sections publiées séparément. Au fur et à mesure que ces parties et ces sections seront publiées, elles annuleront et remplaceront les articles correspondants dans la deuxième édition de la CEI 287. Le nouveau titre de la CEI 287 est le suivant: Câbles électriques – Calcul du courant admissible.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
20A(BC)151	20A(BC)161

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**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**

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 cooperation 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, 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.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, 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.

International Standard IEC 287-1-2 has been prepared by sub-committee 20A: High-voltage cables, of IEC technical committee 20: Electric cables.

The second edition of IEC 287 (1982) is being revised and will be sub-divided into parts, each part containing several sections and issued separately. As these parts and sections are published, they will supersede and replace the relevant clauses in the second edition of IEC 287. The new title of IEC 287 is: Electric cables – Calculation of the current rating.

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

DIS	Report on voting
20A(CO)151	20A(CO)161

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

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

1 Domaine d'application

La présente section de la CEI 287-1 présente une méthode de calcul des pertes par courants de Foucault dans les gaines métalliques dans le cas de câbles unipolaires disposés en nappe en double circuit triphasé. Les gaines sont court-circuitées en un point ou sont permutées de manière qu'il n'y ait pas de courants de circulation notables dans les gaines. Lorsque les gaines métalliques sont court-circuitées aux deux extrémités, il se produit des courants de circulation notables qui entraînent une réduction du courant permanent admissible. Une méthode de calcul des pertes par courants de circulation dans le cas d'un double circuit est à l'étude.

Cette méthode donne des coefficients de correction à appliquer aux facteurs de pertes dans le cas des gaines d'un circuit triphasé isolé. Ces corrections sont négligeables pour les câbles où le paramètre m est inférieur à environ 0,1 ($m = \omega/10^7 R_s$), ce qui correspond à une résistance longitudinale de la gaine supérieure à 314 $\mu\Omega/\text{m}$ à 50 Hz.

Par conséquent, il convient d'utiliser cette méthode pour la plupart des sections de câbles à gaine en aluminium, mais il n'est pas nécessaire de l'appliquer aux câbles à gaine de plomb, à moins qu'ils ne soient très gros.

Les coefficients sont donnés sous forme de tableaux et ont été calculés à partir de formules fondamentales pour les pertes dans les gaines, dont l'évaluation nécessite une compétence en matière de programmation sur ordinateur parfois difficile à obtenir dans des situations commerciales courantes. Le développement de formules simplifiées pour certains coefficients donnés sous forme de tableaux est à l'étude.

Les pertes dans le cas de câbles en circuit unique seront couvertes dans la CEI 287-1-1 (à l'étude).

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente section de la CEI 287-1. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente section de la CEI 287-1 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 287: 1982, *Calcul de courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100 %)*

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

1 Scope

This section of IEC 287-1 provides a method for calculating the eddy current losses in the metallic sheaths of single-core cables arranged as a three-phase double circuit in flat formation. The sheaths are bonded at one point or are cross-bonded so that there are no significant sheath circulating currents. Where metallic sheaths are bonded at both ends there are significant circulating currents which result in a lower current-carrying capacity. A method of calculating circulating current losses for double circuits is under consideration.

The method provides coefficients which are applied as corrections to the loss factors for the sheaths of one isolated three-phase circuit. These corrections are negligible for cables where the parameter m is less than about 0,1 ($m = \omega/10^7 R_s$), which corresponds to a sheath longitudinal resistance higher than 314 $\mu\Omega/\text{m}$ at 50 Hz.

Consequently the method should be used for most sizes of aluminium-sheathed cables, but is not required for lead-sheathed cables unless they are unusually large:

The coefficients are provided in tabular form and have been computed from fundamental formulae for sheath losses, the evaluation of which calls for expertise in computer programming which might not be readily available in general commercial situations. The development of simplified formulae for some of the tabulated coefficients is under consideration.

Losses for cables in a single circuit will be covered in IEC 287-1-1 (under consideration).

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this section of IEC 287-1. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this section of IEC 287-1 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 287: 1982, *Calculation of the continuous current rating of cables (100 % load factor)*

CEI 287-1-1: 199X, *Câbles électriques – Calcul du courant admissible – Partie 1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calculs des pertes – Section 1: (à l'étude)*

3 Symboles

Les symboles utilisés dans la présente section de la CEI 287-1 et les grandeurs qu'ils représentent sont donnés dans la liste suivante. Quelques-uns des symboles utilisés dans cette section peuvent être utilisés pour représenter des grandeurs différentes dans d'autres sections de la CEI 287.

A, B, C, D sont les coefficients utilisés dans le calcul par interpolation de H et J

D_s est le diamètre extérieur de la gaine métallique (mm)

D_{it} est le diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface intérieure des creux (mm)

D_{oc} est le diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface extérieure des crêtes (mm)

G_s est le coefficient représentant les pertes par courants de Foucault dans l'épaisseur de la gaine, dues au courant dans l'âme

R est la résistance électrique de l'âme en courant alternatif à sa température maximale de service (Ω/m)

R_s est la résistance de la gaine (Ω/m)

S, T, U, V sont les coefficients utilisés dans le calcul par interpolation de J

c est la distance entre les centres des câbles dans des circuits adjacents (voir figure 1) (mm)

d est le diamètre moyen de la gaine (mm)

f est la fréquence du réseau (Hz)

g_s est le coefficient représentant les pertes par courants de Foucault dans l'épaisseur de la gaine, dues au courant dans les câbles adjacents

m égale $\frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7}$

s est la distance entre les centres d'un câble d'un même circuit (mm)

t_s est l'épaisseur de la gaine (mm)

y égale $\frac{s}{c}$

z égale $\frac{d}{2s}$

β_1 est le coefficient utilisé en 6.5

λ_0 est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance élevée, dans un circuit unique

λ'_1 est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance faible, dans un circuit unique

λ'_{1d} est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance faible, dans un double circuit

IEC 287-1-1: 199X, *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Section 1: (under consideration)*

3 Symbols

The symbols used in this section of IEC 287-1 and the quantities they represent are given in the following list. Some of the symbols used in this section may be used to represent different quantities in other section of IEC 287.

A, B, C, D are coefficients used to interpolate for H and J

D_s is the external diameter of the metal sheath (mm)

D_{it} is the diameter of the imaginary cylinder which just touches the inside surface of the troughs of a corrugated sheath (mm)

D_{oc} is the diameter of the imaginary coaxial cylinder which just touches the crests of a corrugated sheath (mm)

G_s is the coefficient which accounts for losses due to eddy currents across the thickness of the sheath due to the current in the conductor

R is the alternating current resistance of the conductor at its maximum operating temperature (Ω/m)

R_s is the resistance of the sheath (Ω/m)

S, T, U, V are the coefficients used to interpolate for J

c is the distance between centres of cables in adjoining circuits (see figure 1) (mm)

d is the mean diameter of the sheath (mm)

f is the system frequency (Hz)

g_s is the coefficient which accounts for losses due to eddy currents across the thickness of the sheath, due to currents in adjacent cables

m is equal to $\frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7}$

s is the distance between centres of cables in the same circuit (mm)

t_s is the thickness of the sheath (mm)

y is equal to $\frac{s}{c}$

z is equal to $\frac{d}{2s}$

β_1 is the coefficient used in 6.5

λ_0 is the sheath loss factor for a high-resistance sheath in a single circuit

λ_1'' is the sheath loss factor for a low-resistance sheath in a single circuit

λ_{1d}'' is the sheath loss factor for a low-resistance sheath in a double circuit

- ρ_s est la résistivité électrique du matériau de la gaine à la température de service ($\Omega \cdot m$)
- ω est la pulsation (fréquence angulaire $2\pi f$) (1/s)

4 Description de la méthode

4.1 Généralités

La méthode est utilisée de manière similaire à celle utilisée pour les circuits uniques dans la section 1 de la CEI 287-1-1. Là, les formules proposées pour les facteurs de pertes applicables à des gaines de résistance linéique longitudinale telle que m est inférieur à 0,1 ($R_s = 314 \mu\Omega/m$ à 50 Hz) sont données avec des formules empiriques permettant de calculer les coefficients de correction pour les gaines de résistance moins élevée.

Cependant, dans le cas d'un double circuit, ces formules empiriques précises, couvrant la gamme complète de coefficients, devraient contenir un si grand nombre de termes qu'elles ne présenteraient que peu ou pas d'avantage par rapport aux coefficients précis donnés sous forme de tableaux, avec possibilité d'interpolation. Cette dernière solution offre l'avantage que la précision des facteurs de pertes peut être sensiblement égale à celle des calculs d'origine et est supérieure à 1 %.

Le développement de formules empiriques pour une gamme limitée de coefficients est à l'étude.

Afin d'expliquer la méthode, celle-ci est décrite ci-après d'une manière adaptée à une réalisation manuelle des calculs. Mais, étant donné la longueur des calculs à effectuer pour obtenir les facteurs de pertes pour six câbles, ceux-ci seront généralement effectués par ordinateur. Dans ces conditions, il est tout à fait justifié d'interpoler (le cas échéant) entre les valeurs figurant dans les tableaux.

Cependant, dans bien des cas, les valeurs des paramètres correspondants seront telles que l'interpolation ne sera pas nécessaire ou sera réalisable avec une précision suffisante par simple examen.

Les mêmes formules que celles utilisées dans la CEI 287-1-1, peuvent servir à tenir compte de l'effet des courants de Foucault circulant dans l'épaisseur de la gaine.

4.2 Grandes lignes de la méthode

Le facteur de perte dans la gaine d'un câble donné, dans un circuit double posé en nappe (voir figure 1), est évalué comme suit:

$$\lambda''_{1d} = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H(1 \text{ à } 3) \cdot N(1 \text{ à } 6) \cdot J(1 \text{ à } 6) \cdot g_s + G_s] \quad (1)$$

où

λ''_{1d} est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance faible, dans un double circuit;

λ_0 est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance élevée, dans un circuit unique;

ρ_s is the electrical resistivity of sheath material at operating temperature ($\Omega \cdot m$)

ω is the angular frequency of system ($2\pi f$) (1/s)

4 Description of method

4.1 General

The method proceeds in a way similar to that used for single circuits in IEC 287-1-1. There, formulae for loss factors applicable to sheaths having a longitudinal resistance such that m is less than 0,1 ($R_s = 314 \mu\Omega/m$ at 50 Hz) are given, together with empirical formulae to calculate the correction coefficient for lower resistance sheaths.

However, for double circuits, accurate empirical formulae covering the complete range of coefficients would need to contain so many terms that their use would show little or no advantage over the use of precise, tabulated coefficients with interpolation, as necessary. This latter course has the advantage that the accuracy of the loss factors can be closely equal to that of the original calculations and is better than 1 %.

The development of empirical formulae for a limited range of coefficients is under consideration.

In order to explain the method, it is described here in a way appropriate to manual evaluation of the arithmetic. However, because of the appreciable effort required to provide loss factors for six cables, it is to be expected that calculations will usually be effected by means of a computer. Under these circumstances, the decision to use interpolation (as necessary) between tabulated values is fully justified.

However, in many cases, values of the relevant parameters will be such that interpolation is unnecessary or may be accomplished with sufficient accuracy by inspection.

Corrections to cover the effect of eddy currents circulating within the thickness of a sheath are derived with the use of the same formulae as those used in IEC 287-1-1.

4.2 Outline of method

The loss factor for the sheath of a given cable in a double-circuit flat formation (see figure 1) is evaluated as follows:

$$\lambda''_{1d} = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H(1 \text{ to } 3) \cdot N(1 \text{ to } 6) \cdot J(1 \text{ to } 6) \cdot g_s + G_s] \quad (1)$$

where

λ''_{1d} is the sheath loss factor for a low-resistance sheath in a double circuit;

λ_0 is the sheath loss factor for a high-resistance sheath in a single circuit;

- H (1 à 3) sont les coefficients de correction de la résistance de la gaine, se rapportant aux câbles 1, 2 ou 3 dans un circuit unique;
- N (1 à 6) sont les coefficients introduisant les influences mutuelles entre les circuits et dépendant de ce fait de l'ordre de succession des phases dans les câbles 1 à 3 et 4 à 6;
- J (1 à 6) sont les coefficients dépendant de la position des câbles 1 à 3 et 4 à 6, dans chaque circuit;
- g_s est le coefficient qui représente les pertes par courants de Foucault dans l'épaisseur de la gaine, dues aux courants dans les câbles adjacents;
- G_s est le coefficient qui représente les pertes par courants de Foucault dans l'épaisseur de la gaine, dues au courant dans l'âme.

Les rôles joués par les coefficients N et J ne sont pas directement liés à une fonction physique, mais ils ont été choisis pour simplifier la mise sous forme de tableaux. La nomenclature est arbitraire.

Les valeurs de H , N et J sont obtenues à partir des tableaux 1 à 11 et sont choisies en fonction des paramètres suivants, ainsi que de la position du câble et de l'ordre de succession des intensités de courant dans les âmes.

$$m = \frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7} \quad \omega = 2\pi f$$

où

f est la fréquence du réseau (Hz);

R_s est la résistance de la gaine à la température de fonctionnement (Ω/m);

$$z = \frac{d}{2s}$$

où

s est la distance entre les centres des câbles d'un même circuit (mm);

d est le diamètre moyen d'une gaine (mm);

$$y = \frac{s}{c}$$

où

c est la distance entre les centres des câbles dans des circuits adjacents (voir figure 1) (mm).

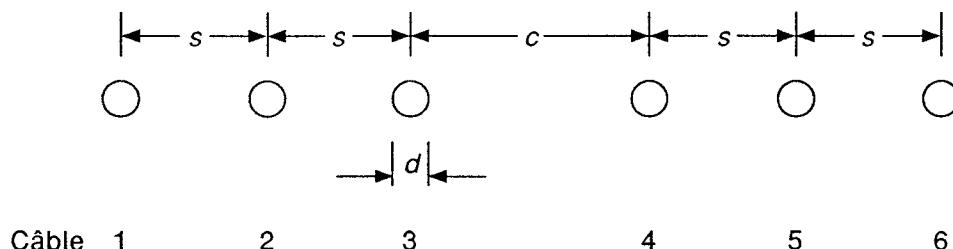


Figure 1 – Configuration de câbles

G_s is the coefficient which accounts for losses due to eddy currents across the thickness of the sheath, due to the current in the conductor.

Values of H , N and J are obtained from tables 1 to 11 and are chosen according to the following parameters together with the position of the cable and the phase sequence of the currents in the conductors.

$$m = \frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7} \quad \omega = 2\pi f$$

R_s is the sheath resistance at operating temperature (Ω/m);

$$z = \frac{d}{2s}$$

d is the mean diameter of a sheath (mm);

$$y = \frac{s}{c}$$

c is the distance between centres of cables in adjoining circuits (see figure 1) (mm).

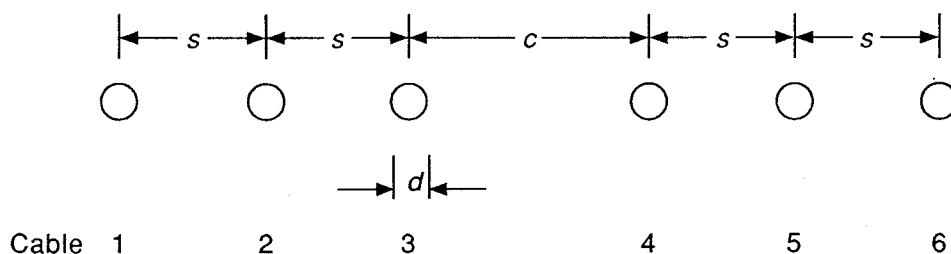


Figure 1 – Cable configuration

NOTE – Pour un circuit unique, avec des gaines de faibles résistances, les facteurs peuvent être obtenus en utilisant uniquement les coefficients H (1, 2 et 3), comme suit:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H(1 \text{ à } 3) \cdot g_s + G_s]$$

4.3 Critères d'utilisation des formules et coefficients

Pour les gaines dont la valeur de m est inférieure à 0,1, ce qui est applicable à la plupart des câbles à gaine de plomb, on peut supposer les coefficients H , N , J et g_s égaux à l'unité et G_s égal à zéro. Dans ces conditions, λ_0 peut être utilisé sans correction pour les circuits doubles.

Lorsque la valeur de m est égale ou supérieure à 0,1, ce qui est généralement le cas de tous les câbles à l'exception des câbles de petites dimensions à gaine en aluminium, il faut calculer les valeurs de H , N , J et g_s . Le coefficient G_s n'est important que lorsque la valeur de m est égale ou supérieure à l'unité.

5 Formules pour les facteurs de pertes dans les gaines de résistance élevée dans un circuit unique, λ_0

Le facteur de pertes dans les gaines λ_0 est donné par

$$\lambda_0 = C \frac{m^2}{(1 + m^2)} \left[\frac{d}{2s} \right]^2 \quad (2)$$

Pour trois câbles unipolaires posés en nappe, le coefficient C est donné par:

Câble	Coefficient C
Câble central	6
Câbles extérieurs	1,5

6 Calcul des coefficients H , N et J

6.1 Affectation des coefficients pour chaque câble, ordre de succession et identification des phases

Il est important de noter la façon dont les coefficients H , N et J dépendent de l'ordre de succession des intensités de courant et de la position physique des âmes.

Les câbles doivent être numérotés selon la figure 1.

Les coefficients H (1, 2 et 3), tableau 1, sont affectés en fonction de l'ordre de succession des intensités et associés à la position des câbles, de sorte que les dispositions de circuit unique suivantes aient la même séquence temporelle:

Numéro de câble	1	2	3
Séquence	R	S	T
ou	S	T	R
ou	T	R	S
avec les coefficients	H_1	H_2	H_3

NOTE – The factors for a single circuit having low-resistance sheaths can be obtained by using the coefficients H (1, 2 and 3) only, as follows:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H (1 \text{ to } 3) \cdot g_s + G_s]$$

4.3 Criteria for use of formulae and coefficients

For sheaths for which the value of m is less than 0,1, which includes most lead-sheathed cables, it may be assumed that the coefficients H , N , J and g_s are unity and G_s is zero. In such circumstances, λ_0 may be used for twin circuits without correction.

When the value of m is equal to 0,1 or greater, which is generally the case for all but the smaller aluminium-sheathed cables, values for H , N , J and g_s shall be calculated. The coefficient G_s is important only when the value of m is 1,0 or higher.

5 Formulae for sheath loss factors for high-resistance sheaths in a single circuit, λ_0

The sheath loss factor λ_0 is given by

$$\lambda_0 = C \frac{m^2}{(1 + m^2)} \left[\frac{d}{2s} \right]^2 \quad (2)$$

For three single-core cables in flat formation, the coefficient C is given by:

Cable	Coefficient C
Centre cable	6
Outer cables	1,5

6 Calculation of the coefficients H , N and J

6.1 Allocation of coefficients to each cable, time sequence and phase identification

It is important to note the way in which the coefficients H , N and J are dependent on the time sequence of the currents and the physical position of the conductors.

The cables shall be numbered according to figure 1.

The coefficients H (1, 2 and 3), table 1, are allocated on a basis of time sequence associated with the positions of the cables, so that the following single-circuit arrangements have the same time sequence:

Cable number	1	2	3
Sequence	R	S	T
or	S	T	R
or	T	R	S
with coefficients	H_1	H_2	H_3

Dans l'exemple ci-dessus, le câble 1 est toujours le conducteur extérieur d'une phase en avance et correspond au coefficient H_1 . Le câble 3 est le conducteur extérieur d'une phase en retard et correspond au coefficient H_3 .

Dans les cas ci-dessus, on notera que l'identification des phases indiquée par les symboles R, S et T* n'est pas importante, tandis que seul, l'ordre de succession est important.

Dans des doubles circuits, si l'un ou l'autre des circuits a un ordre de succession inverse, les valeurs de H doivent être attribuées au câble selon un ordre inversé. L'affectation du coefficient H dépend de l'ordre de succession dans chaque circuit.

Dans une configuration en double circuit, l'identification des phases indiquée par les symboles est importante dans la mesure où cette identification par rapport à la position des câbles dans un circuit unique doit être dans l'autre circuit soit identique, séquence directe, soit être une image obtenue par réflexion dans un miroir, séquence inverse.

Deux jeux de coefficients N (1, 2, 3, 4, 5 et 6) correspondant aux séquences directe et inverse sont donnés dans le tableau 2. Si les positions des câbles sont repérées de façon séquentielle et si l'on se conforme aux règles d'identification des phases, les coefficients sont affectés sur la même base que le coefficient H . Il convient de noter que les valeurs pour les câbles 4, 5 et 6 dans la séquence inverse constituent la réflexion des valeurs pour les câbles 1, 2 et 3.

Le nombre de paramètres d'entrée impliqués pour les coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 et 6) nécessite l'utilisation de plusieurs tableaux. Les tableaux 3 à 8 concernent l'installation en séquence directe pour chaque câble. Les tableaux 9 à 11 concernent la séquence inverse et les coefficients pour les câbles 1 à 3 sont également utilisés pour les câbles 6 à 4, dans cet ordre. L'affectation des coefficients figure sur les mêmes lignes que pour le coefficient N .

Les tableaux suivants donnent des exemples pour quatre cas courants:

Séquence directe

Numéro de câble	1	2	3	4	5	6	
Ordre de succession	R	S	T	R	S	T	
Affectation H	H_1	H_2	H_3	H_1	H_2	H_3	tableau 1
Affectation N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	tableau 2/directe
Affectation J	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	tableaux 3 à 8/directe

Séquence inverse

Numéro de câble	1	2	3	4	5	6	
Ordre de succession	T	S	R	T	S	R	
Affectation H	H_3	H_2	H_1	H_3	H_2	H_1	tableau 1
Affectation N	N_6	N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	tableau 2/directe
Affectation J	J_6	J_5	J_4	J_3	J_2	J_1	tableaux 3 à 8/directe

* Les lettres R, S, T sont utilisées ici par commodité et sont équivalentes à d'autres jeux de symboles connus pour indiquer l'ordre de succession et l'identification des phases, tels que L_1, L_2, L_3 ; a, b, c; R, Y, B; etc.

In the above example, cable 1 is always the outer conductor on a leading phase and takes coefficient H_1 . Cable 3 is the outer conductor on a lagging phase and takes coefficient H_3 .

It will be seen that, for these cases, the phase identification implied by the symbols R, S and T* is not important, it is only the time sequence which is of significance.

In double circuits, if either circuit has a reversed sequence, the values of H must be allocated to the cables in the reverse order. The allocation of coefficient H is dependent on the time sequence within each circuit.

In a double-circuit configuration, the phase identification implied by the symbols is significant to the extent that the phase identification in relation to cable position in one circuit must be either the same as, in the forward sequence, or a mirror image of, in the reverse sequence, that in the other.

Two sets of coefficients N (1, 2, 3, 4, and 6) are given in table 2 corresponding to the forward and reverse sequences. If the cable positions are labelled sequentially and the phase identification rules are adhered to, the coefficients are allocated on the same basis as coefficient H . Note that the values for cables 4, 5 and 6 in the reversed sequence are a reflection of the values for cables 1, 2 and 3.

The number of input parameters involved for the coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 and 6) makes it desirable to use several tables. Tables 3 to 8 are for each cable for the forward sequence installation. For the reverse sequence, tables 9 to 11 are provided and the coefficients for cables 1 to 3 are also used for cables 6 to 4, in that order. The allocation is on the same lines as those for coefficient N .

The following tables give examples of four common cases:

Forward sequence

Cable number	1	2	3	4	5	6	
Sequence	R	S	T	R	S	T	
Allocation H	H_1	H_2	H_3	H_1	H_2	H_3	table 1
Allocation N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	table 2, forward
Allocation J	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	tables 3 to 8, forward

Forward sequence

Cable number	1	2	3	4	5	6	
Sequence	T	S	R	T	S	R	
Allocation H	H_3	H_2	H_1	H_3	H_2	H_1	table 1
Allocation N	N_6	N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	table 2, forward
Allocation J	J_6	J_5	J_4	J_3	J_2	J_1	tables 3 to 8, forward

* The letters R, S, T are used here for convenience and are equivalent to other well-known sets of symbols to denote time sequence and phase identification, such as L_1 , L_2 , L_3 ; a, b, c; R, Y, B; etc.