

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
411-2**

Première édition
First edition
1978

Convertisseurs de puissance pour la traction

Deuxième partie:
Informations techniques supplémentaires

Power convertors for electric traction

Part 2:
Additional technical information



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 411-2: 1978

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.

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC**

411-2

Première édition
First edition
1978

Convertisseurs de puissance pour la traction

Deuxième partie: Informations techniques supplémentaires

Power convertors for electric traction

Part 2: Additional technical information

© CEI 1978 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

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

X

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Domaine d'application et objet	6
2. Descriptions générales	6
2.1 Montages applicables au matériel roulant électrique	6
2.2 Méthodes de commande de phase	6
2.3 Modes de fonctionnement	6
3. Caractéristiques d'un convertisseur homogène à simple étage et commande symétrique	8
4. Caractéristiques d'un convertisseur hétérogène à simple étage	10
5. Montage en cascade	10
ANNEXE A — Evaluation approximative des caractéristiques du montage en cascade	12
FIGURES	22

Withholding

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope and object	7
2. General description	7
2.1 Circuit connections applicable to electric rolling stock	7
2.2 Methods of phase control	7
2.3 Modes of operation	7
3. Characteristics in symmetrical control of single stage uniform convertor	9
4. Characteristics of single stage non-uniform convertor	11
5. Cascade connection	11
APPENDIX A — Approximate estimate of characteristics for cascade connection	13
FIGURES	22

Withholding

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CONVERTISSEURS DE PUISSANCE POUR LA TRACTION

Deuxième partie: Informations techniques supplémentaires

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Sous-Comité 22D: Convertisseurs de puissance pour le matériel roulant, du Comité d'Etudes N° 22 de la CEI: Electronique de puissance.

Il est issu d'un document préparé par le Comité national japonais.

Le projet, document 22D(Bureau Central)12, fut discuté lors de la réunion tenue à La Haye en 1975, puis soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en mai 1976.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')	Japon
Allemagne	Pays-Bas
Australie	Pologne
Belgique	Roumanie
Egypte	Royaume-Uni
France	Suède
Hongrie	Suisse
Italie	Turquie

Autres publications de la CEI citées dans le présent rapport:

- Publications n°s 411: Convertisseurs statiques monophasés de puissance pour la traction.
411-1: Convertisseurs de puissance pour la traction;
 Première partie: Convertisseurs monophasés de puissance à thyristors.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER CONVERTORS FOR ELECTRIC TRACTION

Part 2: Additional technical information

FOREWORD

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

PREFACE

This report has been prepared by Sub-Committee 22D, Power Convertors for Electric Rolling Stock, of IEC Technical Committee No. 22, Power Electronics.

It is based on a document prepared by the Japanese National Committee.

The draft, Document 22D(Central Office)12, was discussed at the meeting held in The Hague in 1975, and submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in May 1976.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Netherlands
Belgium	Poland
Egypt	Romania
France	South Africa (Republic of)
Germany	Sweden
Hungary	Switzerland
Italy	Turkey
Japan	United Kingdom

Other IEC publications quoted in this report:

- Publications Nos. 411: Single-phase Traction Power Convertors.
411-1: Power Convertors for Electric Traction;
Part 1: Single-phase Power Convertors using Thyristors.

CONVERTISSEURS DE PUISSANCE POUR LA TRACTION

Deuxième partie: Informations techniques supplémentaires

1. Domaine d'application et objet

Le présent rapport constitue un complément d'informations techniques aux Publications 411 de la CEI: Convertisseurs statiques monophasés de puissance pour la traction, et 411-1 de la CEI: Convertisseurs de puissance pour la traction, Première partie: Convertisseurs monophasés de puissance à thyristors.

On y indique les relations entre les méthodes de commande, les modes de fonctionnement et les caractéristiques de montages du schéma principal utilisant le circuit redresseur monophasé du matériel roulant électrique.

L'objet principal de ce rapport est de calculer, côté circuit de puissance, les grandeurs telles que le facteur de puissance, le facteur de déphasage et les harmoniques de rangs inférieurs. Pour cette raison, les circuits équivalents proposés côté courant alternatif peuvent se révéler insuffisants pour le cas des harmoniques de rangs plus élevés. Il n'est pas prévu d'utiliser les résultats contenus dans ce rapport pour des considérations d'effet perturbateur, du fait qu'est négligée la capacité répartie le long de la ligne d'alimentation.

2. Descriptions générales

2.1 *Montages applicables au matériel roulant électrique*

2.1.1 *Montages de base*

Le convertisseur comporte un pont unique.

Dans ce cas, deux schémas sont utilisés: l'un où tous les bras du pont sont uniformément composés soit de thyristors, soit de diodes (montage homogène), l'autre où les bras sont composés à la fois de thyristors et de diodes (montage hétérogène) (voir la figure 1, page 22).

2.1.2 *Montages en cascade*

Le convertisseur est composé de deux ou de plusieurs ponts montés en série.

Dans le cas où l'on utilise des thyristors, les ponts sont commandés successivement, l'un après l'autre (voir la figure 2, page 22).

2.2 *Méthodes de commande de phase*

Les méthodes de commande pour le montage homogène sont classées en commande symétrique et commande asymétrique. On peut considérer que le montage hétérogène constitue un cas particulier de la commande asymétrique (se reporter au tableau II de la Publication 411-1 de la CEI).

2.3 *Modes de fonctionnement*

Les caractéristiques d'un circuit redresseur dépendent non seulement du montage et de la méthode de commande de phase, mais aussi du mode de fonctionnement.

POWER CONVERTORS FOR ELECTRIC TRACTION

Part 2: Additional technical information

1. Scope and object

This report is intended to provide supplementary technical information for IEC Publications 411: Single-phase Traction Power Convertors, and 411-1: Power Convertors for Electric Traction, Part 1: Single-phase Power Convertors using Thyristors.

The relations between the control methods, the operation modes and the characteristics are shown for the principal circuit connections using single-phase rectifier circuits for electric rolling stock.

The main purpose of this report is to calculate power quantities such as power factor, displacement factor and low order harmonics. Therefore, the equivalent circuits proposed on the a.c. side may be insufficient in the case of higher harmonics. The results contained in this report are not intended to be used for noise current considerations because account has not been taken of the distributed capacitance along the supply line.

2. General descriptions

2.1 *Circuit connections applicable to electric rolling stock*

2.1.1 *Basic connections*

A convertor is composed of a single bridge circuit.

In this case, there are two circuit connections: the one where all the arms of the bridge are uniformly composed of either thyristors or diodes (uniform connection), the other where the arms are composed of both thyristors and diodes (non-uniform connection) (see Figure 1, page 22).

2.1.2 *Cascade connections*

A convertor is composed of two or more bridges connected in series.

Where thyristors are used, the bridges are controlled stage by stage sequentially (see Figure 2, page 22).

2.2 *Methods of phase control*

The control methods for uniform connection are classified as symmetrical control and asymmetrical control. Non-uniform connection may be considered as a special case of asymmetrical control (refer to Table II of IEC Publication 411-1).

2.3 *Modes of operation*

The characteristics of a rectifier circuit depend not only on the circuit connection and its phase control method but also on the operation mode.

Il existe divers modes de fonctionnement d'un circuit redresseur monophasé utilisant des thyristors. Parmi ces modes de fonctionnement, on ne considère, dans le présent rapport, que les domaines utilisés en pratique.

Les modes de fonctionnement dépendent généralement du montage, des constantes du circuit et de l'angle de commande, mais, dans quelques cas, ils dépendent aussi de la largeur de l'impulsion de commande et de l'état initial du courant. Le fonctionnement de base du circuit redresseur est celui d'un pont non commandé composé de diodes (voir la figure 3, page 23).

On distingue quatre modes de fonctionnement de base:

- a) Mode I: Ce mode comprend une période de redressement et une période de blocage, c'est-à-dire que le courant côté continu circule par intermittence.
- b) Mode II: Dans ce mode, le courant redressé passe d'une paire de bras dans l'autre directement, sans empiètement.
- c) Mode III: Ce mode comprend des périodes d'empiètement, de redressement et de blocage compris dans une demi-période et le courant côté continu circule par intermittence.
- d) Mode IV: Ce mode comprend une période d'empiètement et une période de redressement, et le courant côté continu s'écoule en permanence.

Les quatre modes ci-dessus sont déterminés à la fois par le rapport de la force électromotrice côté continu à la tension alternative de la source et par le rapport des réactances côté alternatif et côté continu. Les figures 4 à 8, pages 24 à 28, illustrent les domaines d'application de ces modes.

3. Caractéristiques d'un convertisseur homogène à simple étage et commande symétrique

L'influence de la résistance des éléments du circuit redresseur monophasé pour matériel roulant électrique est pratiquement négligeable. La figure 9, page 29, montre schématiquement le circuit de base du convertisseur homogène à simple étage, résistances négligées. Les caractéristiques principales de ce circuit sont données aux figures 10 à 55, pages 30 à 70.

Dans ces diagrammes, les tensions et les courants sont ramenés respectivement à l'unité de tension alternative à la source (E_p) et à l'unité de courant de court-circuit côté alternatif (E_p/X_p). Les chutes de tension directe des valves sont négligées.

Dans les figures 10 à 55, pages 30 à 70, pour des raisons pratiques, on a représenté en abscisse le courant réduit côté continu ($I_d \cdot X_p/E_p$), ou l'angle de commande (α) et choisi comme paramètres l'angle de commande, le rapport des impédances (X_p/X_d) ou le courant réduit côté continu.

On utilise les symboles ci-dessous:

$$\mu = \text{taux d'ondulation du courant} = \frac{I_{d \max} - I_{d \min}}{I_{d \max} + I_{d \min}}$$

$$\lambda = \text{facteur de puissance global} \\ (\text{la valeur négative correspond au fonctionnement en onduleur})$$

$$\cos \varphi = \text{facteur de déphasage} \\ (\text{la valeur négative correspond au fonctionnement en onduleur})$$

$$\sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \text{valeur de crête de l'harmonique de rang } n \text{ du courant côté alternatif}$$

$$J_p (100 \text{ A}) = \text{valeur du courant perturbateur équivalent } (J_p) \text{ pour un courant côté alternatif de } 100 \text{ A (valeur efficace)}$$

There are many operation modes in a single-phase rectifier circuit using thyristors. Among these operation modes, only applications of practical use are considered in this report.

The operation modes depend generally on the circuit connections, circuit constants and control angle, but in some cases they also depend on the control pulse width and the initial condition of the current. The basic operation mode for the rectifier circuit is that of a non-controlled bridge composed of diodes (see Figure 3, page 23).

There are four kinds of basic operation modes, as follows:

- a) Mode I: This mode consists of rectifying period and off-state period, i.e. the d.c. side current flows intermittently.
- b) Mode II: In this mode the rectifying current transfers from one pair of arms to the other directly without the overlapping period.
- c) Mode III: This mode contains overlapping, rectifying and off-state periods within one half-cycle period, and the d.c. side current flows intermittently.
- d) Mode IV: This mode consists of overlapping period and rectifying period, and the d.c. side current flows continuously.

The above four modes are determined both by the ratio of d.c. electromotive force to a.c. source voltage and by the ratio of a.c. side reactance to d.c. side reactance. The ranges for these modes are shown in Figures 4 to 8, pages 24 to 28.

3. Characteristics in symmetrical control of single stage uniform convertor

The influence of resistive components in the single-phase rectifier circuit for electric rolling stock is practically negligible. If resistive components are neglected, the basic single stage uniform convertor circuit is as shown schematically in Figure 9, page 29. Principal characteristics of this circuit are shown in Figures 10 to 55, pages 30 to 70.

In these characteristics charts, the voltages and the currents are related to the a.c. source voltage (E_p) and the a.c. side short-circuit current (E_p/X_p) respectively. The forward voltage drops of the valves are neglected.

In Figures 10 to 55, pages 30 to 70, from a practical point of view, the related d.c. current ($I_d \cdot X_p/E_p$) or control angle (α) is taken as abscissa, and control angle, impedance ratio (X_p/X_d) or related d.c. current are chosen as parameters.

Symbols are shown as follows:

$$\mu = \text{current ripple factor} \frac{I_{d \max} - I_{d \min}}{I_{d \max} + I_{d \min}}$$

$$\lambda = \text{total power factor} \\ (\text{negative value means inverter operation})$$

$$\cos \varphi = \text{displacement factor} \\ (\text{negative value means inverter operation})$$

$$\sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \text{crest value of } n\text{-th harmonic of a.c. side current}$$

$$J_p (100 \text{ A}) = J_p \text{ value per a.c. side current of } 100 \text{ A (r.m.s.)}$$

$$J_p = \frac{\sqrt{\sum (S_n \times I_n)^2}}{\sqrt{\sum I_n^2}} \times 100 \text{ A, avec } I_n = \text{courant du } n^{\text{e}} \text{ harmonique}$$

$S_n = \text{facteur d'interférence téléphonique du C.C.I.T.T. 1952}$

On suppose que l'impulsion de commande a une longueur convenable.

Les limites des modes de fonctionnement sont indiquées comme suit:

- ligne critique de la commande effective
- ligne critique du défaut de commutation
- limite entre mode continu et mode intermittent

Note. — Dans le cas de montage avec prise médiane, ces diagrammes restent applicables de la même façon si les réactances de commutation du transformateur sont supposées concentrées côté ligne.

4. Caractéristiques d'un convertisseur hétérogène à simple étage

Il existe plusieurs dispositions de montage des bras d'un convertisseur hétérogène (se reporter au tableau II de la Publication 411-1 de la CEI). Le montage symétrique côté alternatif est le plus employé (voir la figure 1, page 22). Toutefois, les caractéristiques présentées dans les diagrammes sont communément applicables aux autres montages.

Les principales caractéristiques de ce convertisseur hétérogène sont données aux figures 56 à 79, pages 71 à 90.

Dans ces diagrammes, la résistance des éléments a été négligée et l'impulsion de commande est supposée avoir une longueur convenable. Les symboles et les paramètres sont les mêmes que ceux des diagrammes relatifs aux convertisseurs homogènes.

Les limites sont représentées comme suit:

- ligne critique de la commande effective
(se reporter aux figures 60 à 62, pages 75 à 77 et 71 à 73, pages 82 à 84).
- limite entre mode continu et mode intermittent.

5. Montage en cascade

Le montage en cascade est efficace pour améliorer le facteur de puissance et pour réduire les composantes harmoniques de rang élevé du courant côté alternatif et les composantes d'ondulation du courant côté continu.

Pour obtenir les caractéristiques précises du montage en cascade, il est nécessaire de prendre en considération l'effet du couplage des enroulements du transformateur principal.

Cependant cette influence mutuelle ainsi que l'effet de la résistance des éléments sont suffisamment petits pour être négligés dans les applications pratiques.

Les caractéristiques du montage en cascade (variation de tension, courant côté alternatif, facteur de puissance global, facteur de déphasage, etc.) peuvent être évaluées approximativement en partant de celles du montage à simple étage.

L'annexe A donne quelques exemples des méthodes de calcul.

$$J_p = \frac{\sqrt{\sum (S_n \times I_n)^2}}{\sqrt{\sum I_n^2}} \times 100 \text{ A} \quad \begin{array}{l} I_n = n\text{-th harmonic current} \\ S_n = \text{telephone interference factor of C.C.I.T.T. 1952} \end{array}$$

It is assumed that the control pulse has a suitable length.

Mode boundaries are shown as follows:

- critical line of effective control
- . — . — critical line of commutation failure
- — — — boundary between continuous mode and intermittent mode

Note. — In the case of centre tap connection, these charts are still applicable in the same way, if the commutating reactances of the transformer are assumed to be concentrated in the line side.

4. Characteristics of single stage non-uniform convertor

There are several kinds of arm connections in a non-uniform convertor (refer to Table II of IEC Publication 411-1). Of these connections, a.c. side symmetrical connection is the most popular (see Figure 1, page 22). However, the characteristics expressed in these charts are commonly applicable to other connections.

Principal characteristics of this non-uniform convertor are shown in Figures 56 to 79, pages 71 to 90.

In these characteristics charts, the resistive components are neglected and the control pulse is assumed to have suitable length. Symbols and parameters are the same as those on charts of a uniform convertor.

Mode boundaries are shown as follows:

- critical line of effective control
(refer to Figures 60 to 62, pages 75 to 77 and 71 to 73, pages 82 to 84)
- — — — boundary between continuous mode and intermittent mode

5. Cascade connection

Cascade connection is effective in improving the power factor as well as in reducing higher harmonic components in a.c. side current and ripple components in d.c. side current.

It is necessary to take into consideration the effect of mutual coupling between windings of the main transformer to obtain accurate characteristics of cascade connection.

However, this mutual effect as well as the effect of resistive components is small enough to be neglected for practical purposes.

Characteristics of cascade connection (voltage regulation, a.c. current, total power factor, displacement factor, etc.) can be approximately estimated from those of the single stage connection.

Some examples of combining methods are shown in Appendix A.

ANNEXE A

ÉVALUATION APPROXIMATIVE DES CARACTÉRISTIQUES DU MONTAGE EN CASCADE

A1. Préambule

Dans les convertisseurs de puissance destinés à la traction, on utilise en général le montage en cascade de quelques ponts au lieu du montage à simple étage, dans le but d'améliorer le facteur de puissance et de réduire les harmoniques de rang élevé.

Il est beaucoup plus commode, si cela est possible, d'évaluer approximativement les caractéristiques d'un montage en cascade en partant du montage à simple étage que de préparer un grand nombre de diagrammes des caractéristiques du montage en cascade.

Lorsqu'on doit procéder à une estimation exacte des caractéristiques d'un montage en cascade, il convient de prendre en considération l'effet du couplage entre les enroulements du transformateur principal. Les caractéristiques approchées obtenues en partant de celles des montages à simple étage doivent être évaluées sans considérer l'effet du couplage entre les enroulements, puis l'on doit alors examiner si cet effet de couplage mutuel peut, en pratique, être ou non négligé.

On a effectué, en ce qui concerne la variation du coefficient de couplage, de nombreux calculs avec des ponts hétérogènes montés en cascade. Il a été prouvé que l'effet de couplage peut être pratiquement négligé.

Eu égard à l'importance des caractéristiques du mode à écoulement permanent du courant côté continu, aussi bien dans le cas de montage en cascade que dans celui à simple étage, on a comparé, pour de nombreuses caractéristiques de ce mode, le calcul exact et le calcul approché. Il s'est avéré que, dans ce cas, les caractéristiques peuvent s'obtenir de façon approximative avec, en pratique, une erreur de quelques pour-cent, en utilisant les méthodes de calcul données plus loin.

Pour cette raison, l'annexe donne, à titre d'exemple, une méthode d'évaluation approximative des caractéristiques de ponts hétérogènes montés en cascade en partant de celles du montage à simple étage (caractéristiques de l'article 4).

A2. Circuit type

Les caractéristiques du montage en cascade à deux étages ci-après (voir la figure A1, page 14), dans lequel le rapport des spires des deux enroulements secondaires du transformateur principal est variable, sont les mêmes que celles du montage général en cascade à étages multiples.

Les symboles utilisés sont les suivants:

- E_p = valeur efficace de la tension alternative côté ligne
 E_{p1}, E_{p2} = valeur efficace de la tension alternative côté cellule
 $E_{p1} + E_{p2} = E_p$
 $a_1 = E_{p1}/E_p, a_2 = E_{p2}/E_p (a_1 + a_2 = 1)$
 E_d = force électromotrice côté continu
 I_p = valeur efficace du courant alternatif côté ligne
 I_{p1}, I_{p2} = valeur efficace du courant alternatif côté cellule

APPENDIX A

APPROXIMATE ESTIMATE OF CHARACTERISTICS FOR CASCADE CONNECTION

A1. Foreword

Generally speaking, traction power convertors make use of several bridges in cascade rather than single stage connection, in order to improve power factor and reduce the higher harmonic components.

If at all possible, it is much more convenient to obtain an approximate estimate of cascade connection characteristics by combining those of single stage connection than by preparing a large number of diagrams of characteristics for cascade connection itself.

When an exact estimate of characteristics for cascade connection is required, the effect of mutual coupling between the main transformer windings should be taken into account. The approximate characteristics obtained by combining those of single stage connection must first be evaluated without regard to the effect of coupling between windings, following which consideration must be given as to whether the effect of mutual coupling may in practice be neglected or not.

Many precise calculations have been made with cascade connected non-uniform bridges in conjunction with variation of the mutual coupling factor, and it has been established that for practical purposes the effect of mutual coupling can be neglected.

As the characteristics in the mode where the d.c. side current flows continuously are important both for cascade and for single stage connection, many comparisons were made between the exact and approximate estimates for this mode, and it has been established that the mode characteristics can be estimated in practice, within several per cent error, by using the calculation methods given below.

Hence, by way of example, this appendix gives a method of obtaining an approximate estimate of the characteristics of cascade connected non-uniform bridges from those of the single stage connection (characteristics of Clause 4).

A2. Model circuit

The characteristics of the following two-stage cascade connection (see Figure A1, page 14) in which the turns ratio of the two secondary windings of the main transformer is variable are the same as those of the general multi-stage cascade connection.

The symbols used are as follows:

E_p = r.m.s. value of a.c. line side voltage

E_{p1}, E_{p2} = r.m.s. value of a.c. cell side voltage

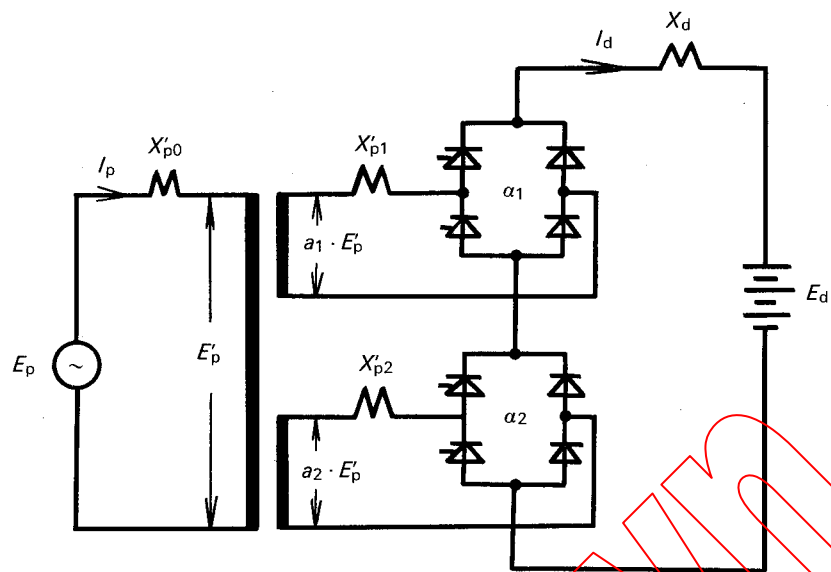
$$E_{p1} + E_{p2} = E_p$$

$$a_1 = E_{p1}/E_p, a_2 = E_{p2}/E_p (a_1 + a_2 = 1)$$

E_d = d.c. electromotive force

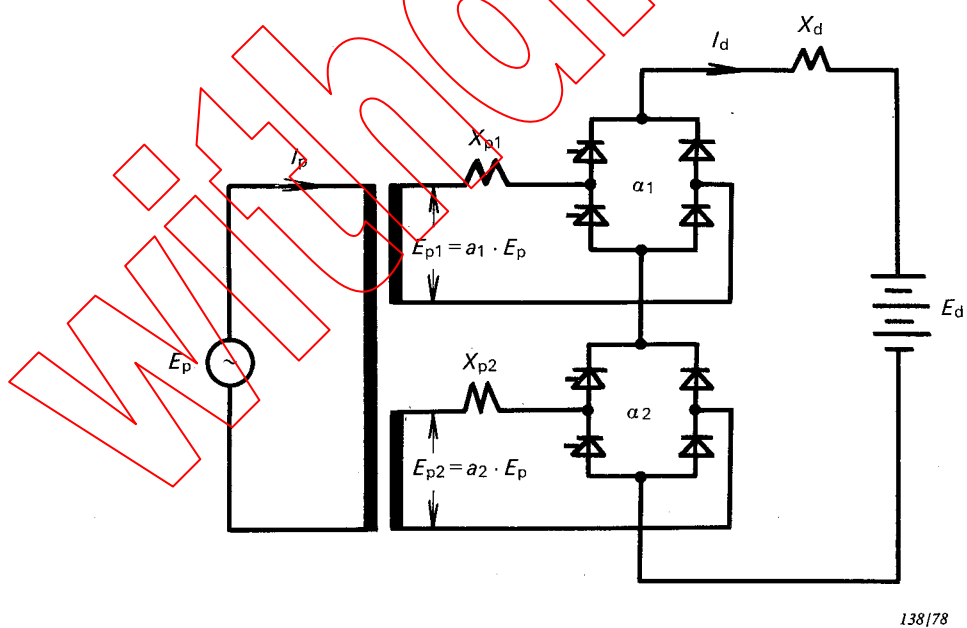
I_p = r.m.s. value of a.c. line side current

I_{p1}, I_{p2} = r.m.s. value of a.c. cell side current



$$(a_1 + a_2 = 1)$$

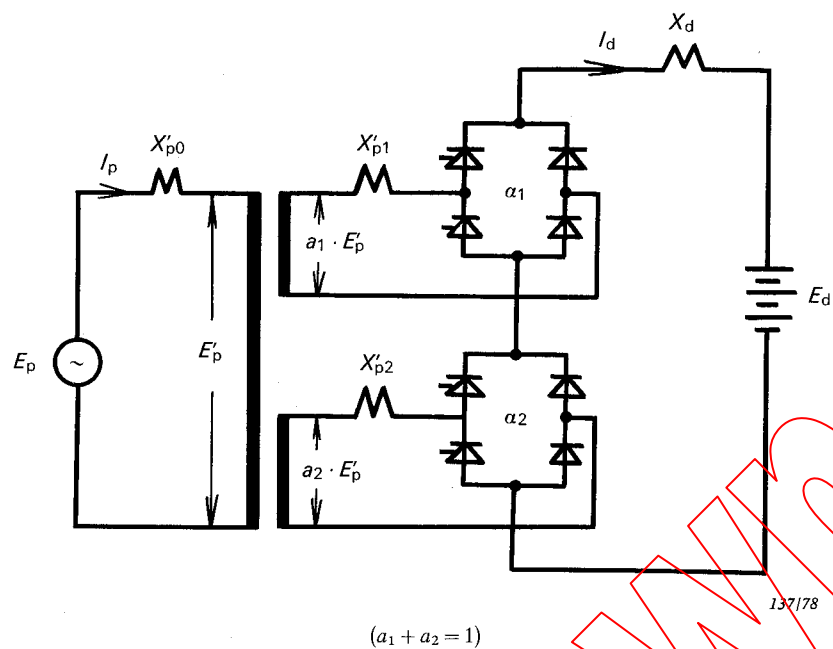
a) Circuit type.



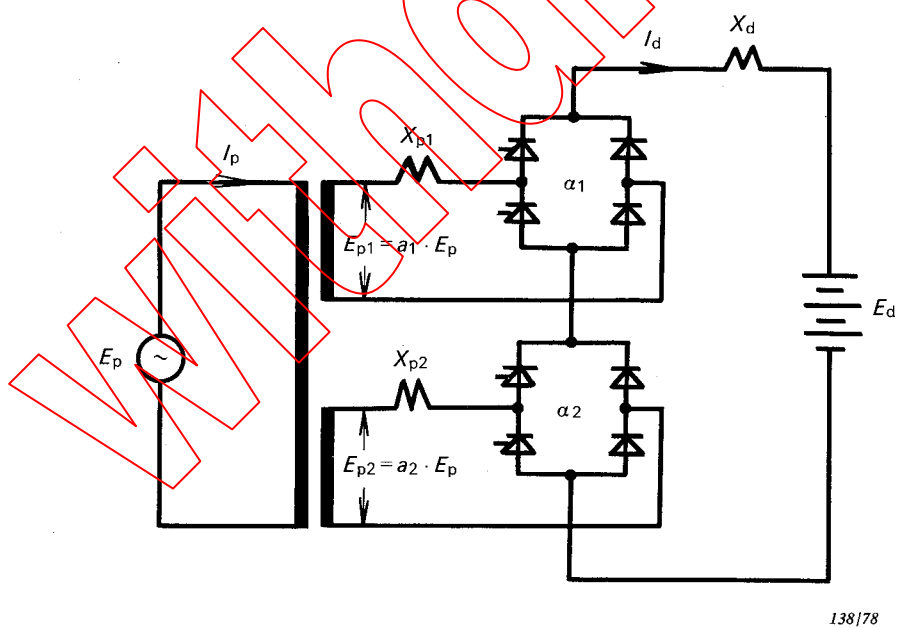
$$\begin{aligned} X_{p1} &= X'_{p1} + a_1 \cdot X'_{p0} \\ X_{p2} &= X'_{p2} + a_2 \cdot X'_{p0} \end{aligned}$$

b) Circuit pratiquement équivalent.

FIG. A1. — Schéma général du montage en cascade à étages multiples.



a) Model circuit.



$$\begin{aligned} X_{p1} &= X'_{p1} + a_1 \cdot X'_{p0} \\ X_{p2} &= X'_{p2} + a_2 \cdot X'_{p0} \end{aligned}$$

b) Practically equivalent circuit.

FIG. A1. — Model for general multi-stage cascade connection.

- I_d = valeur moyenne du courant côté continu
 X_{p1}, X_{p2} = réactance côté alternatif (réactance de commutation)
 X_p = réactance côté alternatif de l'ensemble de l'enroulement
 $X_{p1} + X_{p2} = X_p$
 $X_{p1} = a_1 X_p, X_{p2} = a_2 X_p$
 X_d = réactance côté continu correspondant à la fréquence de la ligne à courant alternatif
 α_1 = angle de commande du pont relié à l'enroulement de rapport a_1
 α_2 = angle de commande du pont relié à l'enroulement de rapport a_2 .

A3. Méthode de calcul

On trouve ci-dessous des exemples de la méthode de calcul approximatif des caractéristiques du montage en cascade.

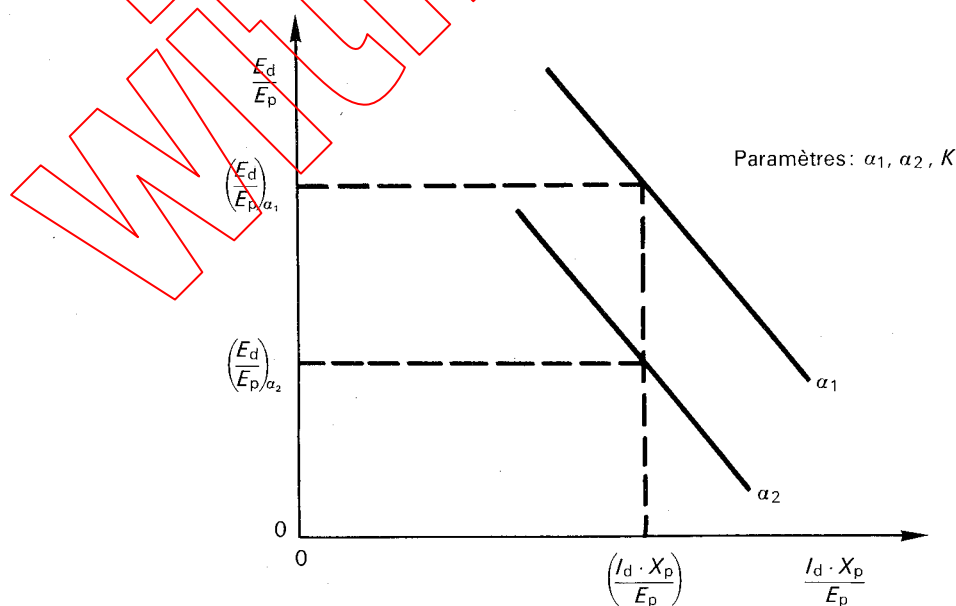
$()_{a_1}, ()_{a_2}$ et $()_{a_1 a_2}$ signifient, respectivement:

- $()_{a_1}$ = caractéristiques du montage à un étage pour l'angle de commande α_1 et le rapport de réactances K défini ci-après
 $()_{a_2}$ = caractéristiques du montage à un étage pour l'angle de commande α_2 et le rapport de réactances K défini ci-après
 $()_{a_1 a_2}$ = caractéristiques du montage en cascade dans lequel le pont correspondant à l'enroulement a_1 a l'angle de commande α_1 et le pont correspondant à l'enroulement a_2 a l'angle de commande α_2 .

K est égal à la valeur correspondant au montage en cascade ($K = X_p/X_d$).

A3.1 Variation de tension

$$\left(\frac{E_d}{E_p}\right)_{a_1 a_2} = a_1 \left(\frac{E_d}{E_p}\right)_{a_1} + a_2 \left(\frac{E_d}{E_p}\right)_{a_2}$$



139/78

FIG. A2. — Variation de tension côté continu (voir les figures 56 à 59, pages 71 à 74).

- I_d = mean value of d.c. side current
 X_{p1}, X_{p2} = a.c. side reactance (commutating reactance)
 X_p = a.c. side reactance of the total winding
 $X_{p1} + X_{p2} = X_p$
 $X_{p1} = a_1 X_p, X_{p2} = a_2 X_p$
 X_d = d.c. side reactance corresponding to a.c. line frequency
 α_1 = the control angle of the a_1 winding side bridge
 α_2 = the control angle of the a_2 winding side bridge.

A3. Calculation method

The following are examples of the approximate method of calculation of characteristics for cascade connection.

$()_{a_1}, ()_{a_2}$ and $()_{a_1 a_2}$ mean, respectively:

$()_{a_1}$ = characteristics of the single stage connection for the control angle α_1 with K

$()_{a_2}$ = characteristics of the single stage connection for the control angle α_2 with K

$()_{a_1 a_2}$ = characteristics of the cascade connection, in which one bridge corresponding to a_1 winding has control angle α_1 , and the other bridge corresponding to a_2 winding has control angle α_2 .

where K is equal to the value corresponding to the cascade connection ($K = X_p/X_d$).

A3.1 Voltage regulation

$$\left(\frac{E_d}{E_p} \right)_{a_1 a_2} = a_1 \left(\frac{E_d}{E_p} \right)_{a_1} + a_2 \left(\frac{E_d}{E_p} \right)_{a_2}$$

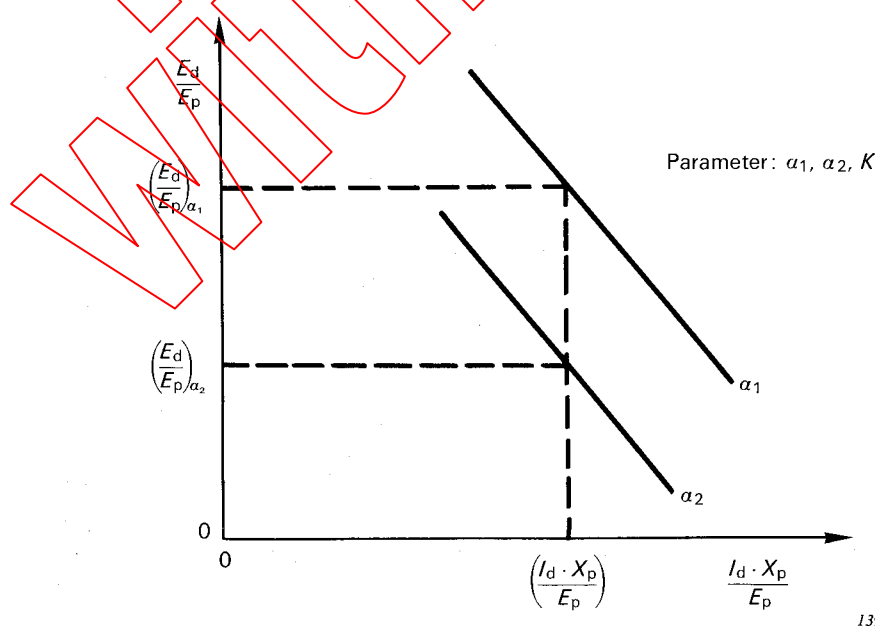


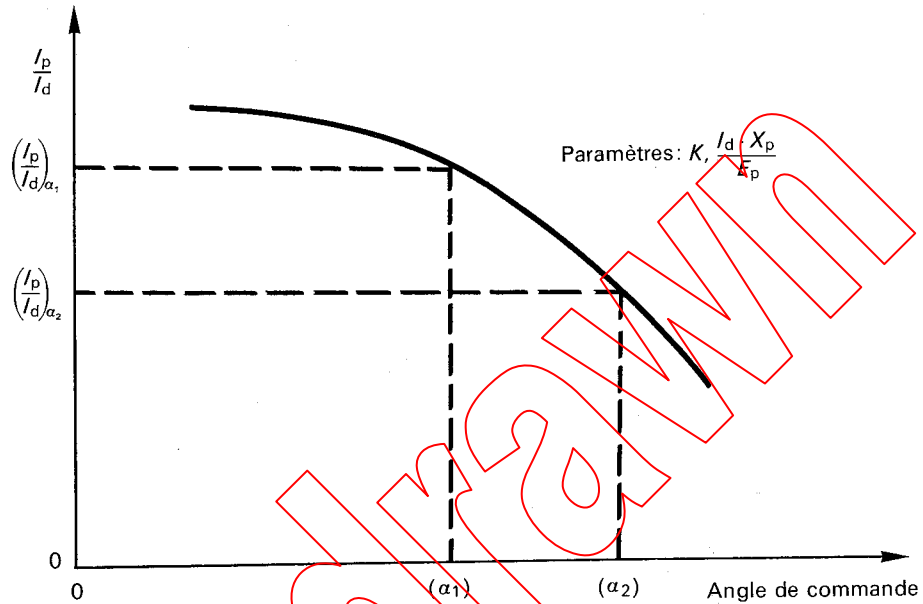
FIG. A2. — D.C. voltage regulation (see Figures 56 to 59, pages 71 to 74).

A3.2 Courant côté ligne

$$\left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_1 a_2} = \left| a_1 \left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_1} (\cos \varphi_{a_1} - j \sin \varphi_{a_1}) + a_2 \left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_2} (\cos \varphi_{a_2} - j \sin \varphi_{a_2}) \right|$$

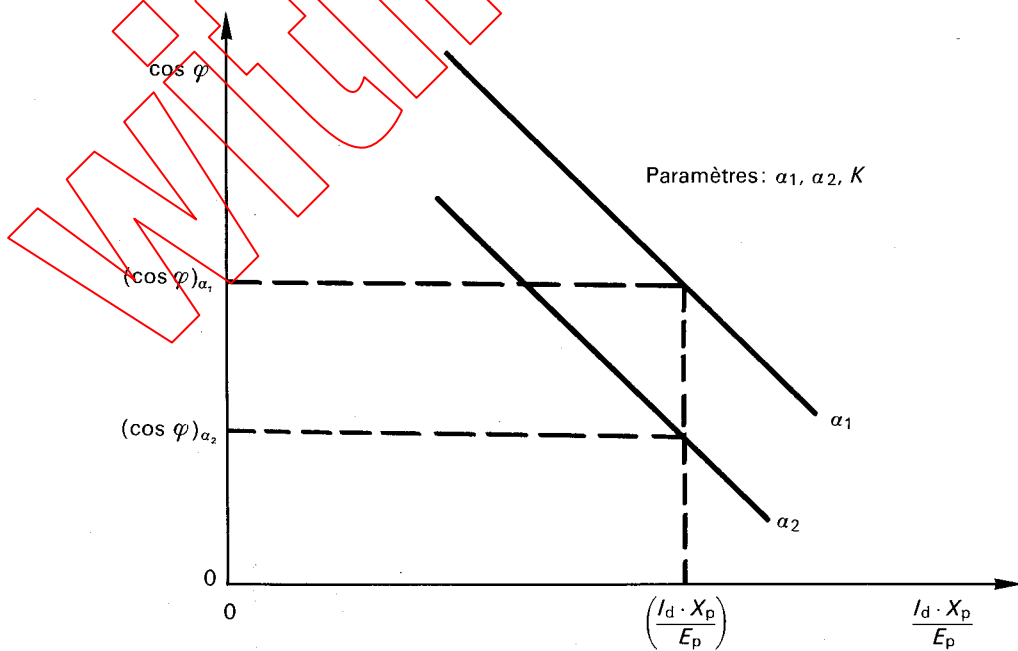
$$\varphi_{a_1} = \cos^{-1} (\cos \varphi)_{a_1} \quad (\text{voir la figure A4, ci-dessous})$$

$$\varphi_{a_2} = \cos^{-1} (\cos \varphi)_{a_2} \quad (\text{voir la figure A4}).$$



140/78

FIG. A3. — Courant côté ligne à courant alternatif (voir les figures 71 à 77, pages 82 à 88).



141/78

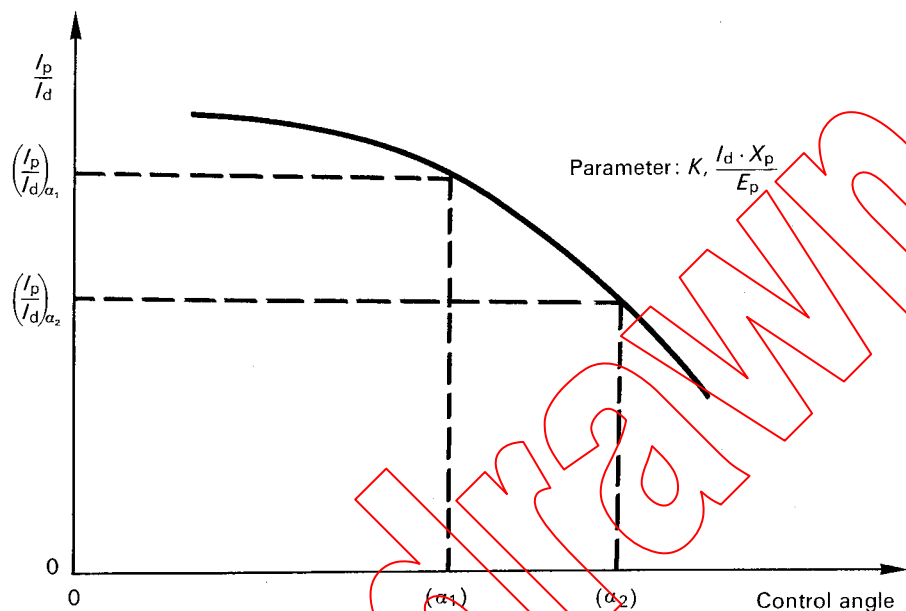
FIG. A4. — Facteur de déphasage (voir les figures 67 à 70, pages 80 et 81).

A3.2 A.C. line side current

$$\left(\frac{I_p}{I_d}\right)_{a_1 a_2} = \left| a_1 \left(\frac{I_p}{I_d}\right)_{a_1} (\cos \varphi_{a_1} - j \sin \varphi_{a_1}) + a_2 \left(\frac{I_p}{I_d}\right)_{a_2} (\cos \varphi_{a_2} - j \sin \varphi_{a_2}) \right|$$

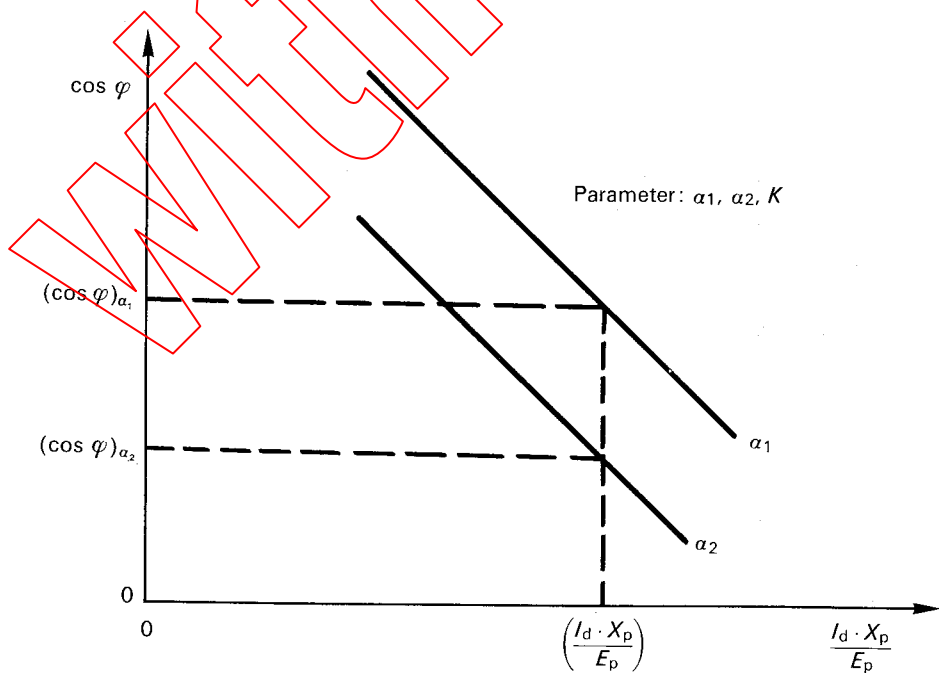
$$\varphi_{a_1} = \cos^{-1} (\cos \varphi)_{a_1} \quad (\text{see Figure A4})$$

$$\varphi_{a_2} = \cos^{-1} (\cos \varphi)_{a_2} \quad (\text{see Figure A4}).$$



140/78

FIG. A3. — A.C. line side current (see Figures 71 to 77, pages 82 to 88).



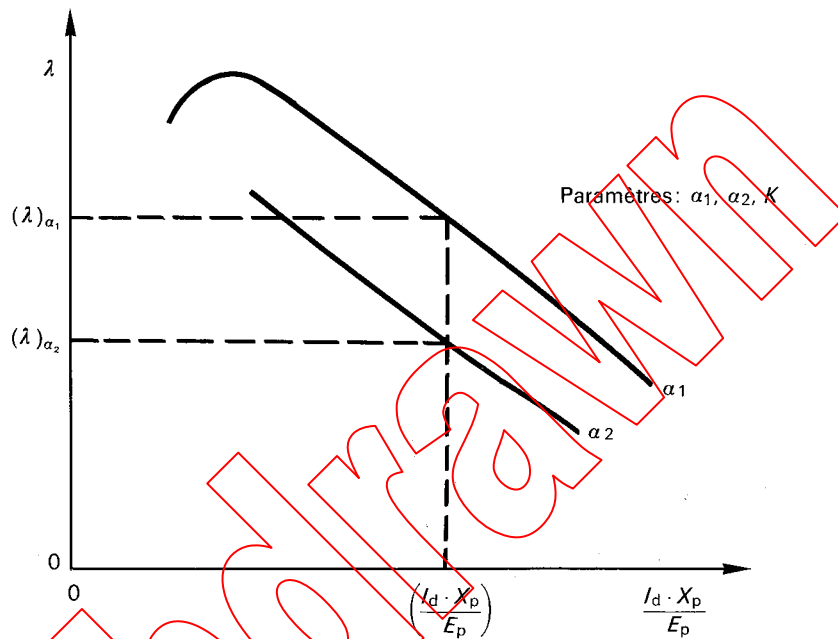
141/78

FIG. A4. — Displacement factor (see Figures 67 to 70, pages 80 and 81).

A3.3 Facteur de puissance global

$$(\lambda)_{a_1 a_2} = \left\{ a_1 \lambda_{a_1} \left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_1} + a_2 \lambda_{a_2} \left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_2} \right\} \frac{1}{\left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_1 a_2}}$$

$$\lambda_{a_1} = (\lambda)_{a_1}, \lambda_{a_2} = (\lambda)_{a_2}$$



142/78

FIG. A5. — Facteur de puissance globale (voir les figures 63 à 66, pages 78 et 79).

A3.4 Facteur de déphasage

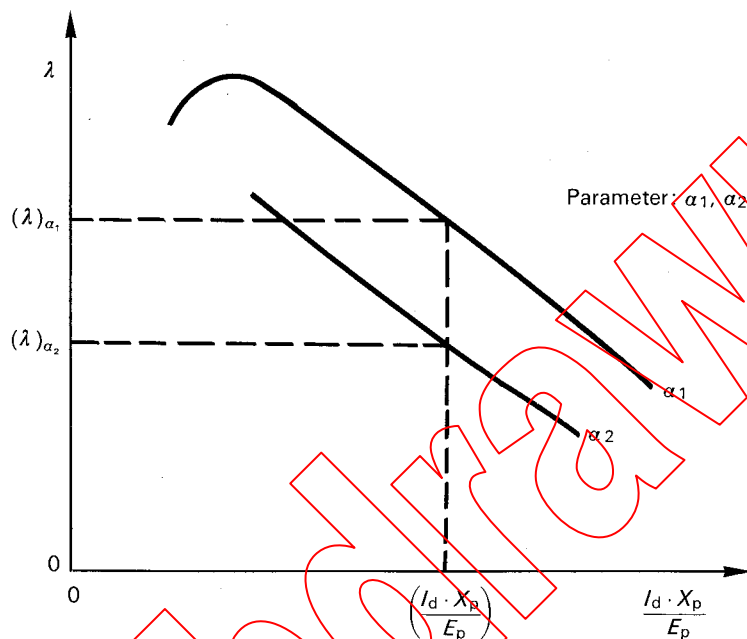
$$(\cos \varphi)_{a_1 a_2} = \cos \left\{ \tan^{-1} \frac{a_1 \left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_1} \sin \varphi_{a_1} + a_2 \left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_2} \sin \varphi_{a_2}}{a_1 \left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_1} \cos \varphi_{a_1} + a_2 \left(\frac{I_p}{I_d} \right)_{a_2} \cos \varphi_{a_2}} \right\}$$

Voir la figure A4, page 18.

A3.3 Total power factor

$$(\lambda)_{\alpha_1 \alpha_2} = \left\{ a_1 \lambda_{\alpha_1} \left(\frac{I_p}{I_{d/\alpha_1}} \right) + a_2 \lambda_{\alpha_2} \left(\frac{I_p}{I_{d/\alpha_2}} \right) \right\} \frac{1}{\left(\frac{I_p}{I_{d/\alpha_1 \alpha_2}} \right)}$$

$$\lambda_{\alpha_1} = (\lambda)_{\alpha_1}, \lambda_{\alpha_2} = (\lambda)_{\alpha_2}$$



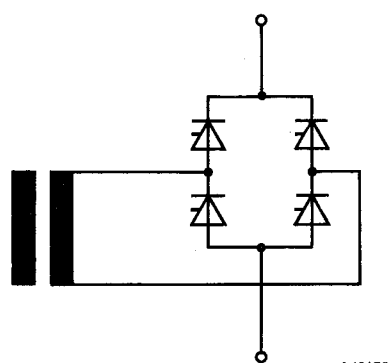
142/78

FIG. A5. — Total power factor (see Figures 63 to 66, pages 78 and 79).

A3.4 Displacement factor

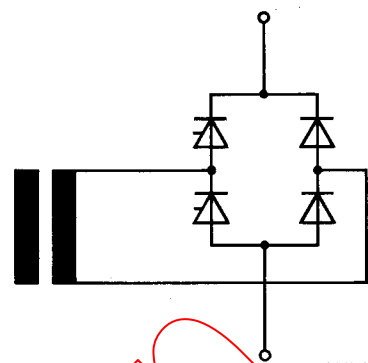
$$(\cos \varphi)_{\alpha_1 \alpha_2} = \cos \left\{ \tan^{-1} \frac{a_1 \left(\frac{I_p}{I_{d/\alpha_1}} \right) \sin \varphi_{\alpha_1} + a_2 \left(\frac{I_p}{I_{d/\alpha_2}} \right) \sin \varphi_{\alpha_2}}{a_1 \left(\frac{I_p}{I_{d/\alpha_1}} \right) \cos \varphi_{\alpha_1} + a_2 \left(\frac{I_p}{I_{d/\alpha_2}} \right) \cos \varphi_{\alpha_2}} \right\}$$

See Figure A4, page 19.



Montage homogène
Uniform connection

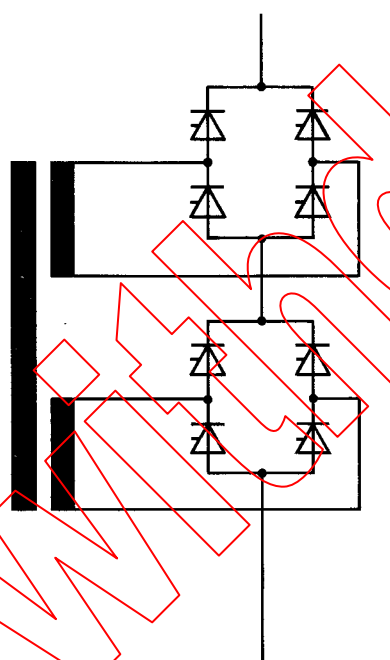
143/78



Montage hétérogène
Non-uniform connection

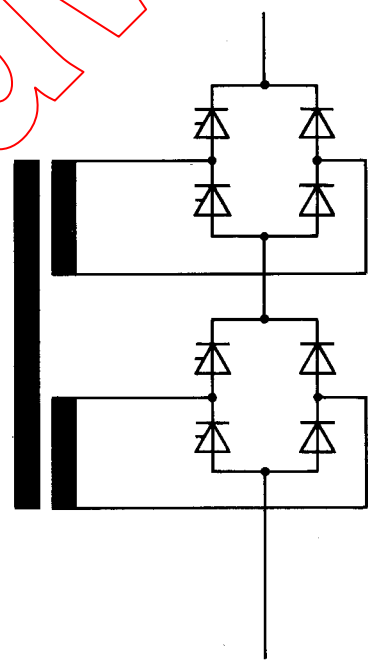
144/78

FIG. 1. — Montages de base.
Basic connections.



Montage homogène
Uniform connection

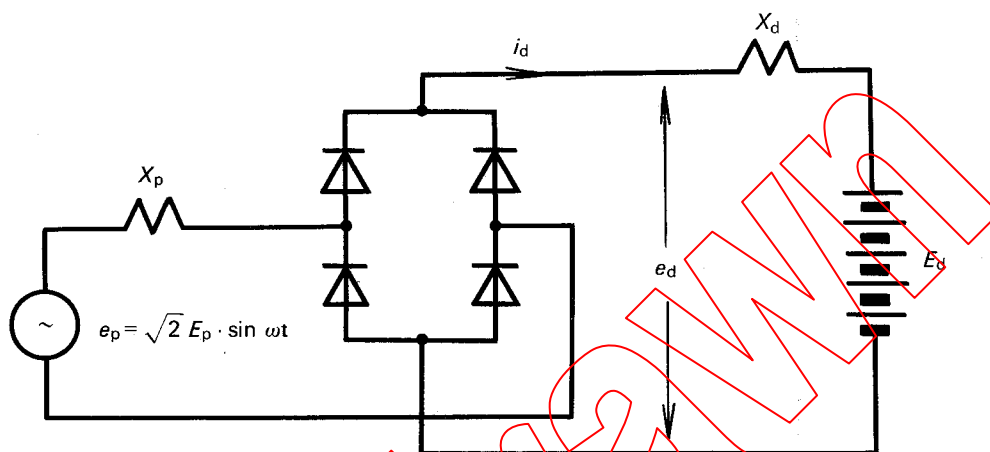
145/78



Montage hétérogène
Non-uniform connection

146/78

FIG. 2. — Montages en cascade.
Cascade connections.



147/78

e_p = valeur instantanée de la tension de la source alternative

E_p = valeur efficace de la tension de la source alternative

e_d = valeur instantanée de la tension entre bornes, côté continu

E_d = force électromotrice côté continu

i_d = valeur instantanée du courant côté continu

X_p = réactance côté alternatif (réactance de commutation)

X_d = réactance côté continu correspondant à la fréquence de la source alternative

e_p = instantaneous value of a.c. source voltage

E_p = r.m.s. value of a.c. source voltage

e_d = instantaneous d.c. terminal voltage value of the diode bridge

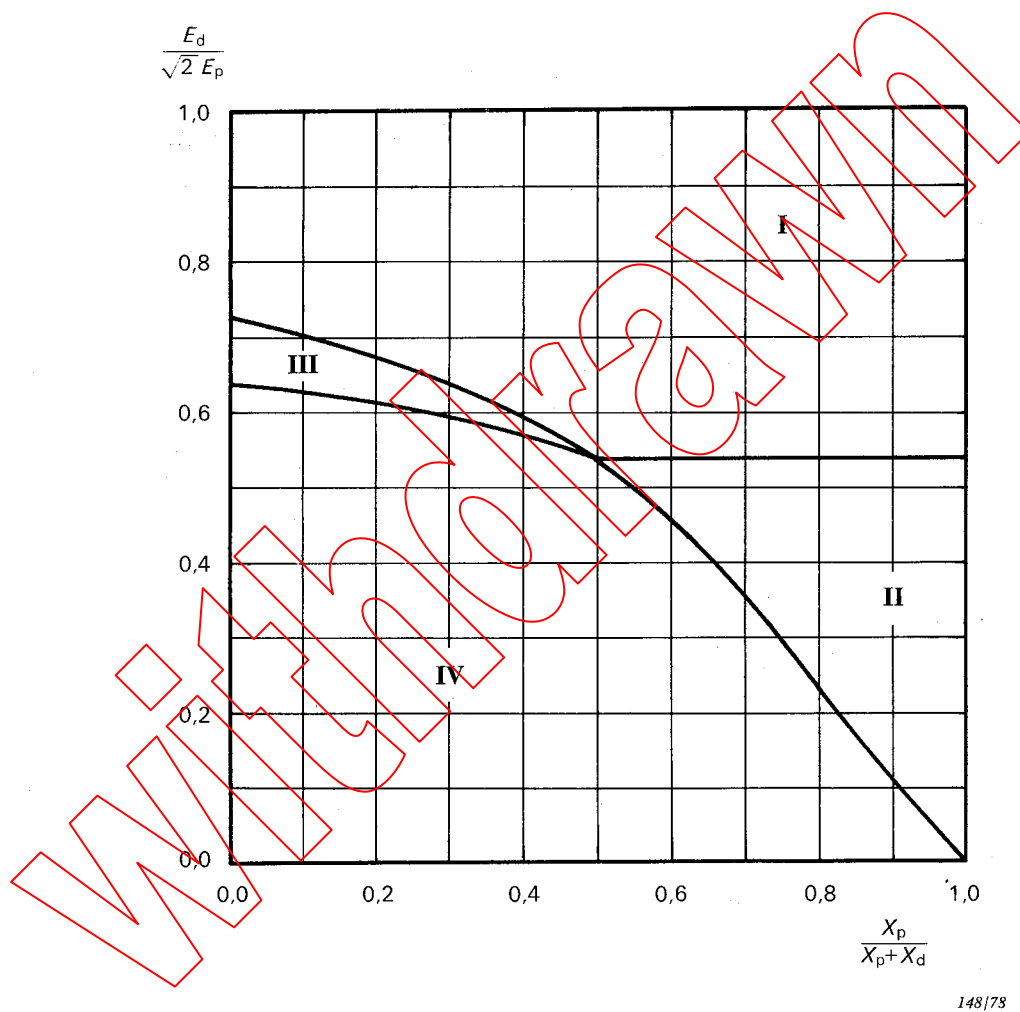
E_d = d.c. electromotive force

i_d = instantaneous value of d.c. side current

X_p = a.c. side reactance (commutating reactance)

X_d = d.c. side reactance corresponding to a.c. source frequency

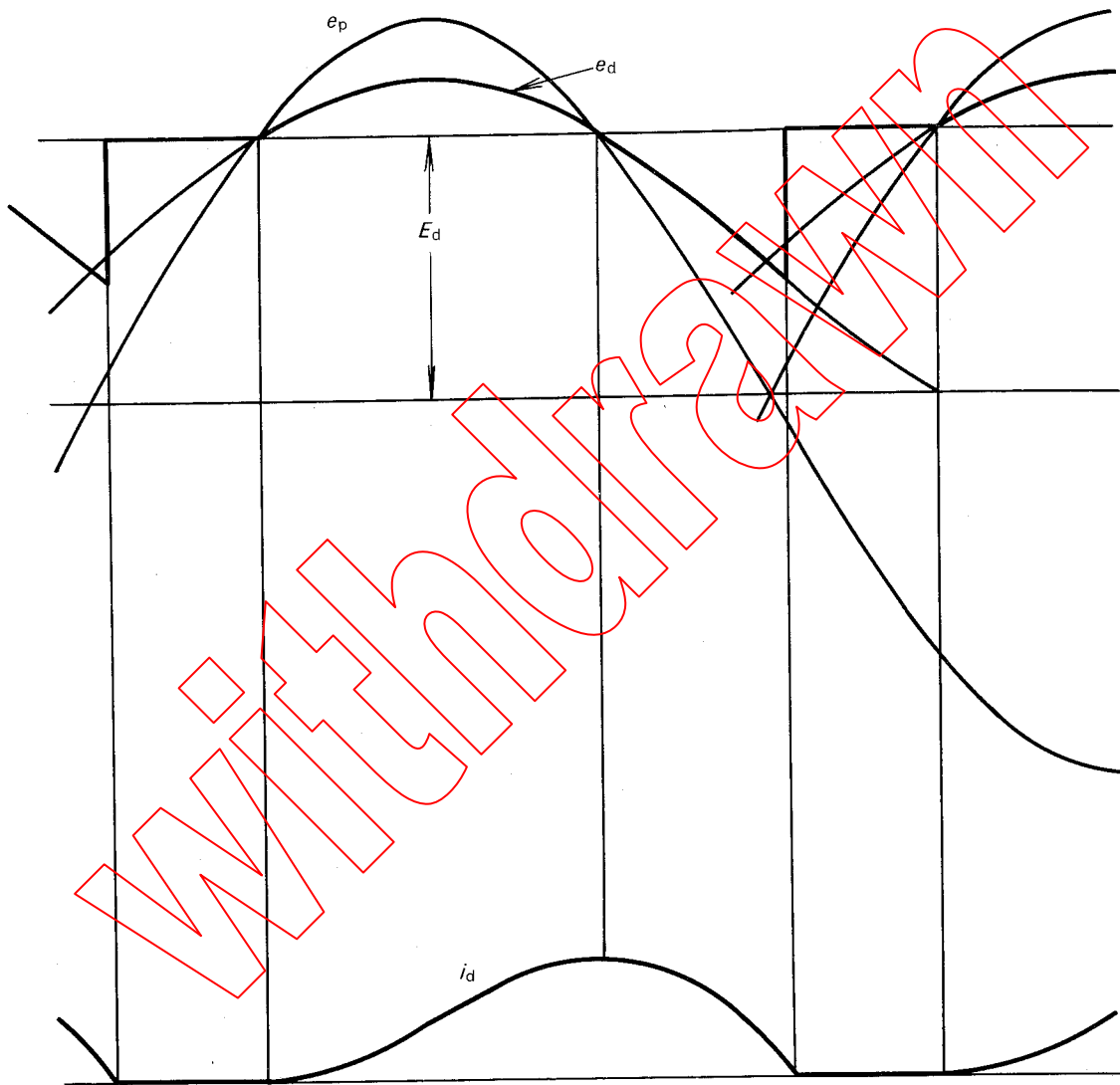
FIG. 3. — Schéma du circuit redresseur considéré.
Rectifier circuit to be considered.



148/73

FIG. 4. — Zones des modes de fonctionnement.
Ranges of operating modes.

$$\frac{X_p}{X_p + X_d} = 0,5 \quad \frac{E_d}{\sqrt{2} E_p} = 0,7$$



149/78

FIG. 5. — Forme des ondes de tension et de courant à la sortie du redresseur (exemple du mode I).
Waveforms of rectifier output voltage and current (an example of Mode I).

$$\frac{X_p}{X_p + X_d} = 0,8 \quad \frac{E_d}{\sqrt{2} E_p} = 0,4$$

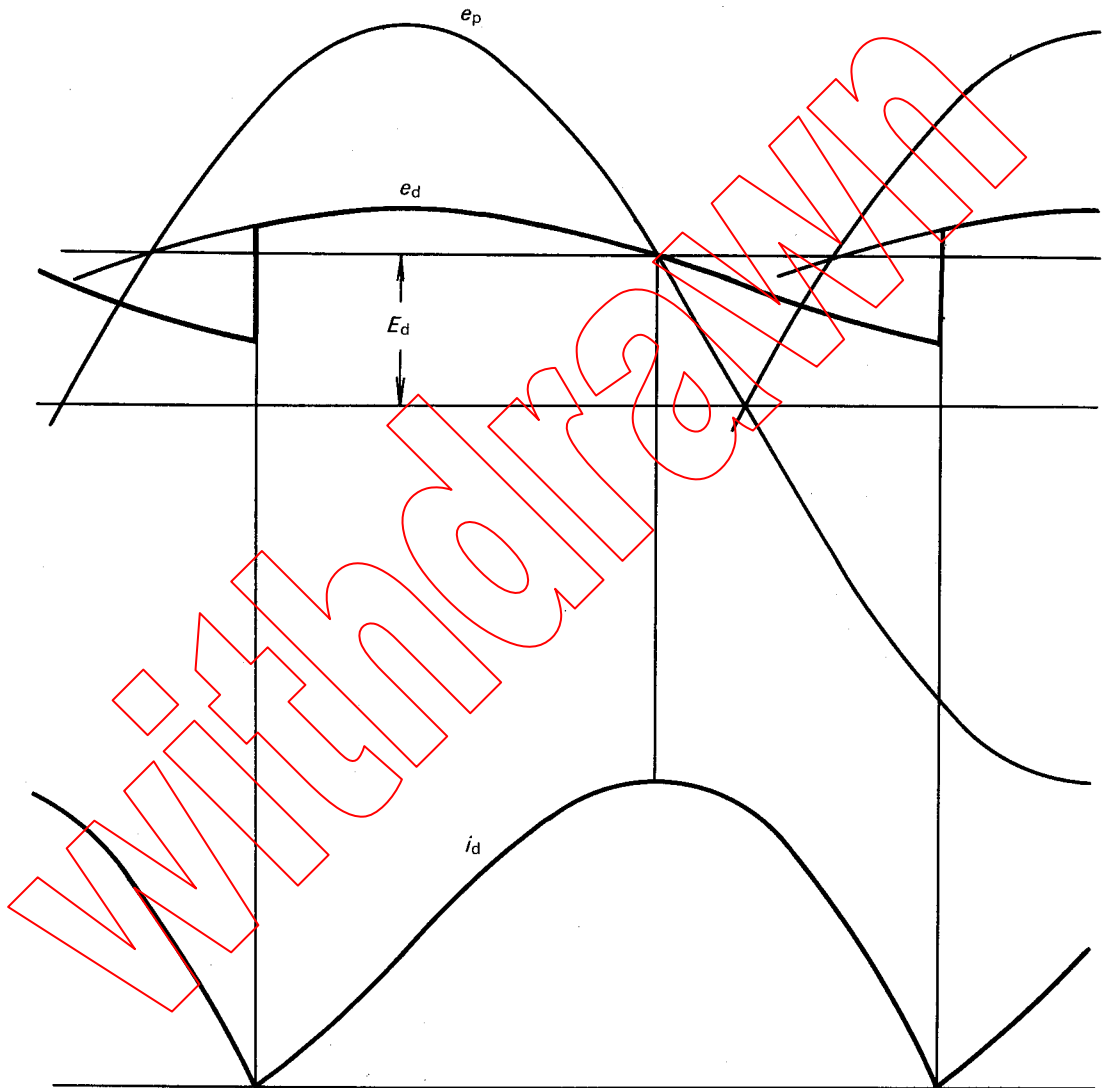
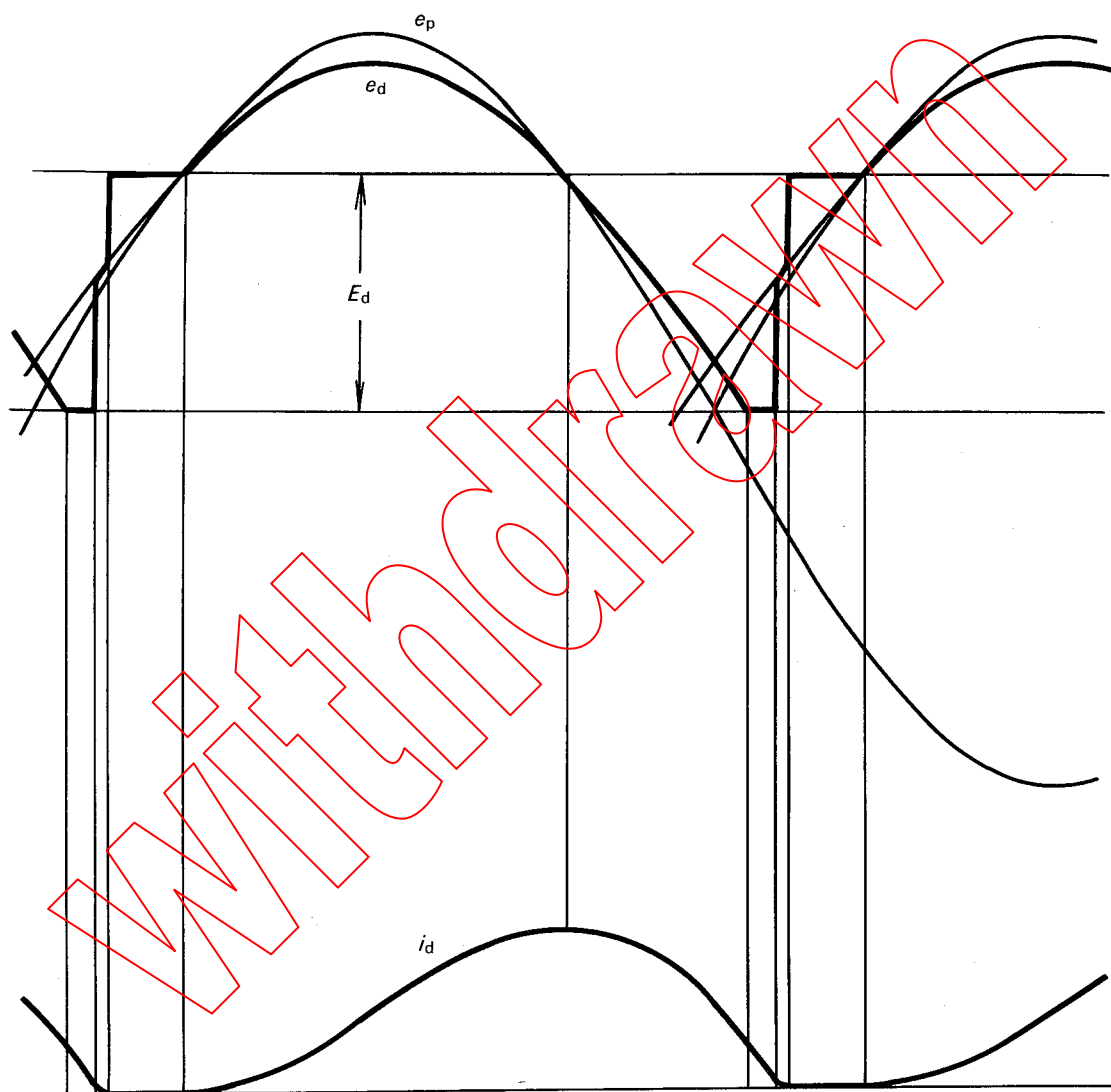


FIG. 6. — Forme des ondes de tension et de courant à la sortie du redresseur
(exemple du mode II).
Waveforms of rectifier output voltage and current
(an example of Mode II).

$$\frac{X_p}{X_p + X_d} = 0,2 \quad \frac{E_d}{\sqrt{2} E_p} = 0,63$$



151/78

FIG. 7. — Forme des ondes de tension et de courant à la sortie du redresseur (exemple du mode III).
Waveforms of rectifier output voltage and current (an example of Mode III).