

# RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

CEI  
IEC  
**1000-2-6**

Première édition  
First edition  
1995-09

## Compatibilité électromagnétique (CEM) –

### Partie 2:

Environnement –

Section 6: Evaluation des niveaux d'émission  
dans l'alimentation des centrales industrielles  
tenant compte des perturbations conduites  
à basse fréquence

## Electromagnetic compatibility (EMC) –

### Part 2:

Environment –

Section 6: Assessment of the emission levels  
in the power supply of industrial plants  
as regards low-frequency conducted disturbances



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 1000-2-6: 1995

## **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 reporterà 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 électrotechnique*;
- 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 – TYPE 3  
TECHNICAL  
REPORT – TYPE 3**

**CEI  
IEC  
1000-2-6**

Première édition  
First edition  
1995-09

**Compatibilité électromagnétique (CEM) –**

**Partie 2:**

Environnement –

Section 6: Evaluation des niveaux d'émission  
dans l'alimentation des centrales industrielles  
tenant compte des perturbations conduites  
à basse fréquence

**Electromagnetic compatibility (EMC) –**

**Part 2:**

Environment –

Section 6: Assessment of the emission levels  
in the power supply of industrial plants  
as regards low-frequency conducted disturbances

© CEI 1995 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 Varembé Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE XA

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

## SOMMAIRE

|   | Pages    |
|---|----------|
| <b>AVANT-PROPOS</b>   | <b>4</b> |
| <b>INTRODUCTION</b>   | <b>6</b> |
| Articles  |          |
| 1     Domaine d'application   | 8        |
| 2     Références normatives   | 8        |
| 3     Généralités   | 10       |
| 4     Coordination des limites d'émission avec les niveaux de compatibilité   | 12       |
| 5     Définitions   | 14       |
| 6     Étude de l'émission transmise par des appareils industriels   | 14       |
| 7     Les harmoniques   | 14       |
| 8     Interharmoniques  | 26       |
| 9     Déséquilibre triphasé   | 32       |
| 10    Variations de tension, papillotement et creux de tension  | 36       |
| <b>ANNEXES</b>  |          |
| A     Émission harmonique   | 60       |
| B     Impédance du réseau pour le calcul de la propagation harmonique et l'évaluation des composantes de tension harmonique | 90       |
| C     Courant de ligne interharmonique de convertisseurs indirects  | 106      |
| D     Déséquilibre triphasé   | 114      |
| E     Bibliographie   | 116      |

## CONTENTS

|   | Pages    |
|---|----------|
| <b>FOREWORD</b>   | <b>5</b> |
| <b>INTRODUCTION</b>   | <b>7</b> |
| Clause  |          |
| 1    Scope  | 9        |
| 2    Normative references   | 9        |
| 3    General  | 11       |
| 4    Co-ordination of the emission limits with the compatibility levels                                       | 13       |
| 5    Definitions  | 15       |
| 6    Survey of conducted emission of industrial equipment   | 15       |
| 7    Harmonics  | 15       |
| 8    Interharmonics   | 27       |
| 9    Three-phase unbalance  | 33       |
| 10   Voltage changes, flicker and voltage dips  | 37       |
| <b>ANNEXES</b>  |          |
| A    Harmonic emission  | 61       |
| B    Network impedances for calculation of harmonic propagation and evaluation of harmonic voltage components | 91       |
| C    Interharmonic line current of indirect convertors  | 107      |
| D    Three phase unbalance  | 115      |
| E    Bibliographic references   | 117      |

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) —

Partie 2: Environnement —

Section 6: Évaluation des niveaux d'émission dans l'alimentation des centrales industrielles tenant compte des perturbations conduites à basse fréquence

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 du 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 tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques de type 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

Le CEI 1000-2-6, rapport technique de type 3, a été établi par le sous-comité 77A: Phénomènes basse fréquence, du comité d'études 77 de la CEI: Compatibilité électromagnétique.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

| Projet de comité  | Compilation des commentaires | Rapport de vote |
|-------------------|------------------------------|-----------------|
| 77A(Secrétaire)94 | 77A(Secrétaire)103           | 77A/130         |

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

Les annexes A, B, C, D et E sont données uniquement à titre d'information.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) —****Part 2: Environment —****Section 6: Assessment of the emission levels in the power supply of industrial plants as regards low-frequency conducted disturbances****FOREWORD**

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a world-wide 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 Standardization Organization (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 subject 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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

IEC 1000-2-6, which is a technical report of type 3, has been prepared by subcommittee 77A: Low frequency phenomena, of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility.

The text of this technical report is based upon the following documents:

| Committee draft    | Survey of comments  | Report on voting |
|--------------------|---------------------|------------------|
| 77A(Secretariat)94 | 77A(Secretariat)103 | 77A/130          |

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

Annexes A, B, C, D and E are for information only.

## INTRODUCTION

La CEI 1000 est publiée sous forme de plusieurs parties conformément à la structure suivante:

### Partie 1: Généralités

Considérations générales (introduction, principes fondamentaux)  
Définitions, terminologie

### Partie 2: Environnement

Description de l'environnement  
Classification de l'environnement  
Niveaux de compatibilité

### Partie 3: Limites

Limites d'émission  
Limites d'immunité (dans la mesure où elles ne relèvent pas des comités de produit)

### Partie 4: Techniques d'essais et de mesure

Techniques de mesure  
Techniques d'essais

### Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation

Guides d'installation  
Méthodes et dispositifs d'atténuation

### Partie 9: Divers

Chaque partie est à son tour subdivisée en sections qui seront publiées soit comme Normes internationales, soit comme Rapports techniques.

Ces normes et rapports seront publiés chronologiquement et numérotés en conséquence.

Cette section est un rapport technique.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-2-6:1995

## INTRODUCTION

IEC 1000 is published in separate parts according to the following structure:

**Part 1: General**

General considerations (introduction, fundamental principles)  
Definitions, terminology

**Part 2: Environment**

Description of the environment  
Classification of the environment  
Compatibility levels

**Part 3: Limits**

Emission limits  
Immunity limits (in so far as they do not fall under responsibility of product committees)

**Part 4: Testing and measurement techniques**

Measurement techniques  
Testing techniques

**Part 5: Installation and mitigation guidelines**

Installation guidelines  
Mitigation methods and devices

**Part 9: Miscellaneous**

Each part is further subdivided into sections which are to be published either as International Standards, or as Technical Reports.

These standards and reports will be published in chronological order and numbered accordingly.

This section is a technical report.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-2-6:1995

## COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) —

### Partie 2: Environnement —

#### Section 6: Évaluation des niveaux d'émission dans l'alimentation des centrales industrielles tenant compte des perturbations conduites à basse fréquence

##### 1 Domaine d'application

Ce guide recommande les procédures destinées à évaluer les niveaux de perturbation produits par l'émission des appareils, des équipements et systèmes installés dans les réseaux non publics en environnement industriel en ce qui concerne les perturbations conduites à basse fréquence dans l'alimentation en énergie électrique; sur cette base on pourra déduire les limites d'émission adéquates. Il s'applique aux alimentations non publiques en courant alternatif de basse et moyenne tension à 50/60 Hz. Les réseaux de bateaux, d'avions, de plates-formes de forage et de chemins de fer ne sont pas du ressort de ce Rapport technique.

Ce guide couvre les perturbations conduites à basse fréquence émises par un équipement connecté à une alimentation en énergie électrique. Les perturbations prises en compte sont:

- les harmoniques et interharmoniques;
- les déséquilibres;
- les changements de tension;
- les creux de tension.

##### 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 le présent Rapport technique. 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 le présent Rapport technique 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.

VEI 50(161): 1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) - Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

CEI 146: *Convertisseurs à semi-conducteurs*

CEI 1000-3-3: 1994, *Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3: Limites - Section 3: Limitation des fluctuations de tension et du flicker dans les réseaux basse tension pour les équipements ayant un courant appelé  $\leq 16\text{ A}$*

CEI 1000-3-5: 1994, *Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 5: Limites - Section 3: Limitation des fluctuations de tension et du flicker dans les réseaux basse tension pour les équipements ayant un courant appelé supérieur à 16 A*

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) —****Part 2: Environment —****Section 6: Assessment of the emission levels in the power supply of industrial plants as regards low-frequency conducted disturbances****1 Scope**

This technical report recommends the procedures to assess the disturbance levels produced by the emission of the devices, equipment and systems installed in non-public networks in industrial environment as far as the low-frequency conducted disturbances in the power supply are concerned; on this basis, the relevant emission limits can be derived. It applies to low and medium voltage a.c. non-public supply at 50/60 Hz. Networks for ships, aircraft, off-shore platforms, and railways are out of the scope of this report.

This technical report deals with the low-frequency conducted disturbances emitted by equipment connected to the power supply. The disturbances considered are:

- harmonics and interharmonics;
- unbalances;
- voltage changes;
- voltage dips.

**2 Normative references**

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this technical report. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this technical report 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.

IEV 50 (161): 1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

IEC 146: *Semiconductor convertors*

IEC 1000-3-3: 1994, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 3: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current  $\leq 16\text{ A}$*

IEC 1000-3-5: 1994, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 5: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A*

### 3 Généralités

Pour assurer la Compatibilité Électromagnétique, le niveau de perturbation total aux différents points de raccordement est limité; ceci implique un contrôle de l'émission des charges perturbatrices connectées à la source.

En ce qui concerne les réseaux BT publics, le contrôle du niveau de perturbation est obtenu par une limitation stricte de l'émission des équipements absorbant jusqu'à 16 A et devant être installés sur ces réseaux. Ces limitations sont déterminées sur la base d'une considération statistique portant sur:

- la diffusion large de l'équipement dans le réseau;
- le type d'utilisation (effet de simultanéité);
- les caractéristiques du réseau.

Tout équipement absorbant jusqu'à 16 A peut être connecté à condition qu'il satisfasse aux limites d'émission prescrites.

Cette démarche reflète le fait suivant: dans le réseau public, une coordination stricte entre les différents utilisateurs et la société d'électricité n'est pas possible.

En ce qui concerne les usines et sites industriels et les réseaux non publics, la conformité des niveaux de compatibilité doit être atteinte en différents endroits:

- A. Au Point Commun de Couplage (PCC) au réseau public.** L'émission totale de l'usine vers les réseaux publics dépend de la limitation correspondante sur la base des exigences de la société d'électricité et des conditions du réseau d'alimentation de puissance.
- B. Au Point de Couplage Interne (PCI).** Le niveau de perturbation total produit par l'émission de l'équipement interne et le niveau de perturbation de l'alimentation en amont est à limiter au niveau de compatibilité choisi aux PCI concernés.

La conformité avec les exigences citées ci-dessus peut être obtenue en imposant des limitations d'émission individuelles pour les équipements et en prenant en considération:

- l'impédance réelle du réseau au point où l'appareil sera connecté;
- l'éventail des matériels électriques présents dans l'usine;
- l'utilisation réelle du matériel en relation avec l'organisation du processus de production;
- le contrôle et l'atténuation possible des perturbations obtenues par des dispositions telles que le filtrage ou l'emploi de dispositifs de compensation, la distribution des charges sur différentes alimentations , la séparation des charges perturbatrices.

Cette démarche montre qu'il est possible d'obtenir, dans les usines, la coordination des charges perturbatrices, aussi bien au niveau conception qu'au niveau opérationnel.

Afin de réaliser une économie globale, les faits suivants, concernant la limitation de l'émission de chaque constituant de l'équipement, sont importants:

- l'émission réelle de chaque appareil peut dépendre en grande partie des caractéristiques du réseau d'alimentation;
- l'appareillage de faible puissance, même incompatible avec les normes du réseau public en ce qui concerne les niveaux d'émissions, peut avoir un impact global négligeable dans les usines en présence d'appareils fortement perturbateurs;
- le mode de sommation des perturbations produites par les différentes sources dépend largement de la conception de l'appareillage ainsi que du processus industriel concerné;
- l'utilisateur peut, jusqu'à un certain point, choisir les niveaux de Compatibilité Électromagnétique applicables au PCI. En fait, ce choix est un compromis entre les coûts de limitation du niveau d'émission et les coûts de réduction du niveau de perturbation par atténuation ou par augmentation de l'immunité.

### 3 General

To achieve electromagnetic compatibility, the total disturbance level at the different points of coupling should be limited; this implies a control of the emission of the disturbing loads connected to the power supply.

As far as the LV public networks are concerned, the control of the disturbance level is obtained by means of a strict limitation of the emission of equipment absorbing up to 16 A to be installed in the networks. These limitations are fixed on the basis of statistical consideration on:

- wide diffusion of the equipment in the network;
- type of utilization (simultaneity effect);
- characteristics of the network.

Any equipment absorbing up to 16 A can be connected, provided it satisfies the emission limits given by the relevant standard.

This approach reflects the fact that in the public network, a strict co-ordination between different users and utility is not possible.

As regards the industrial plants and non-public networks, the compliance of compatibility levels must be achieved in different locations:

- A. **At the Point of Common Coupling (PCC) to the public network.** The total emission of the plant into the public networks is subject to relevant limitation on the basis of the utility's requirements, and on the network conditions of the power supply.
- B. **At the Internal Point(s) of Coupling (IPC).** The total disturbance level as produced by the emission of the implant equipment and the disturbance level of the incoming supply is to be limited to the selected compatibility levels at the concerned IPCs.

Compliance with the above stated requirements can be achieved by imposing limitations on the emission of single pieces of equipment, taking into consideration the following:

- the actual impedance of the network where the equipment is to be connected;
- the mix of equipment actually present in the plant;
- the actual utilization of the equipment in relation to the organization of the production process;
- the possible control and mitigation of the disturbances obtained by provisions such as filtering or compensating devices, distribution of the loads on different supplies, segregation of disturbing loads.

This approach reflects the fact that in the industrial plant, the co-ordination of the disturbing loads, both at the design and at the operation stage, is possible.

To achieve an overall economy, the following facts for the limitation of the emission of each piece of equipment are important:

- the actual emission of a piece of equipment can be largely dependent on the characteristics of the supply network;
- low power equipment, even if incompatible as far as the emission levels are concerned with the standards of public network, can have globally a negligible impact in industrial plants in the presence of heavily disturbing equipment;
- the pattern of summation of the disturbance caused by various sources depends widely both on the design of the equipment, and on the industrial process involved;
- the user can, to a certain extent, select the applicable electromagnetic compatibility levels at the IPC. In fact, this choice is a trade-off between the costs to limit the level of the emission, and the costs to reduce the level of the disturbance by mitigation, or to increase the immunity.

#### 4 Coordination des limites d'émission avec les niveaux de compatibilité

Le niveau d'émission admissible d'un appareil peut être fixé à travers une procédure en trois étapes:

a) Informations entre la société d'électricité et l'utilisateur, et entre l'utilisateur et le constructeur.

Il est demandé à la société d'électricité de fournir à l'utilisateur au moins les informations suivantes:

- la limite d'émission totale applicable à l'usine;
- le niveau de perturbation présent et futur anticipé au PCC, en négligeant la perturbation produite par l'usine en question;
- la plage de valeurs de l'impédance de la source au point de couplage nécessaire à l'évaluation de la perturbation; cette plage dépend aussi bien de la configuration du réseau que des caractéristiques de la fréquence.

Il est demandé à l'utilisateur de fournir au distributeur les informations sur:

- les caractéristiques de l'équipement à installer et son mode de fonctionnement;
- les caractéristiques des dispositifs de compensation de l'énergie réactive;
- les caractéristiques des filtres éventuels pour la compensation des courants harmoniques.

Il est demandé à l'utilisateur de fournir au moins les informations suivantes au constructeur:

- le schéma de l'installation et les caractéristiques des appareils connectés;
- les niveaux d'émission des autres appareils dans l'installation et les perturbations transmises par le réseau de distribution;
- les caractéristiques du processus.

Il est demandé au constructeur de fournir au moins les informations suivantes à l'utilisateur:

- les niveaux d'émission attendus de l'appareil ou du système concerné dans les conditions de fonctionnement spécifiées;
- la sensibilité des niveaux d'émission aux changements de valeurs de l'impédance de l'alimentation, de la tension de fonctionnement, etc.

b) Le choix de la règle correcte de sommation pour la prise en compte de la présence dans l'usine des différentes sources de perturbation.

c) L'évaluation du niveau d'émission total attendu de l'usine au PCC, et l'évaluation du niveau de perturbation total aux PCI.

Si, soit l'émission totale de l'installation, soit le niveau de perturbation attendu excèdent le niveau de compatibilité applicable, tout en tenant compte du développement futur du réseau et de l'augmentation possible du nombre de sources de perturbation dans l'usine, il faut envisager les dispositions suivantes:

- une modification de la configuration du réseau;
- un changement des caractéristiques de l'appareil perturbateur;
- l'application de filtres ou dispositifs de compensation;
- tolérer la perturbation résultante et augmenter les niveaux d'immunité des équipements concernés (cette disposition ne s'applique pas au PCC mais aux PCI uniquement).

La procédure se réitérant jusqu'à satisfaire à toutes les exigences.

#### 4 Co-ordination of the emission limits with the compatibility levels

The allowable emission limit of an equipment can be stated through a three steps procedure:

- Information between utility and user, and between user and manufacturer.

The utility is asked to provide the user with the minimum information following:

- the total emission limit applicable to the plant;
- the expected present and future disturbance level at the PCC, neglecting the disturbance produced by the plant under consideration;
- the range of values of the source impedance at the point of coupling as necessary for the disturbance evaluation; this range is related both to the network configuration and to the frequency characteristics.

The user is asked to provide the utility with information regarding:

- the characteristics of the equipment to be installed, and its mode of operation;
- the characteristics of power factor compensation devices;
- the characteristics of possible filters for harmonic current compensation.

The user is asked to provide the manufacturer with the minimum information following:

- the plan of the installation, and the characteristics of the connected equipment;
- emission levels of the other equipment in the installation, and the disturbance conducted by the supply network;
- characteristics of the process.

The manufacturer is asked to provide the user the minimum information following:

- expected emission levels of the concerned equipment or system in the specified operating conditions;
  - the sensitivity of the emission levels to changes such as the supply impedance, the operating voltage, and so on.
- Selection of the proper summation rule to account for the presence in the plant of various disturbance sources.
  - Evaluation of the expected total emission level of the plant at the PCC, and evaluation of the expected total disturbance level at the IPCs.

If either the total emission of the installation, or the expected disturbance level, exceed the relevant compatibility level, taking into account also the future network development, and the possible increase of the number of the disturbance sources in the plant, the following provisions should be considered:

- modification to the network configuration;
- changing the characteristics of the disturbing equipment;
- applying filters or compensating devices;
- tolerating the resulting disturbance and increasing the immunity levels of the involved equipment (this provision does not apply to PCC but to IPCs only).

The process is repeated until all the requirements are satisfied.

## 5 Définitions

Tous les termes employés sont conformes au VDE 161, à la CEI 146 et à la CEI 1000-3.

## 6 Étude de l'émission transmise par des appareils industriels

Le tableau 1 présente une étude sur les sources d'émission conduites à basse fréquence et leurs effets sur le réseau.

Tableau 1 — Sources de perturbations conduites à basse fréquence

| Classification                   | Exemples   | Perturbation émise   |
|----------------------------------|--|--|
| Caractéristiques non linéaires   | Dispositifs magnétiques saturables, lampes à décharge à gaz              | Harmoniques  |
|                                  | Four à arc, postes de soudage à l'arc à courant alternatif               | Harmoniques, interharmoniques, fluctuations de tension, déséquilibre |
|                                  | Mise sous tension de transformateur                                      | Harmoniques, creux de tension  |
| Charge commutée par électronique | Convertisseurs, gradateurs alternatifs                                   | Harmoniques,   |
|                                  | Dispositifs de commande à trains d'ondes                                 | Interharmoniques, fluctuations de tension déséquilibre               |
| Charge commutée                  | Mise sous tension de condensateurs, de filtres et de moteurs à induction | Interharmoniques, creux de tension                                   |

## 7 Les harmoniques

### 7.1 Description des phénomènes et des sources perturbatrices

Les composantes harmoniques du courant de ligne sont générées principalement de la manière décrite dans les paragraphes suivants; les caractéristiques de charge supplémentaires sont présentées en annexe A.

#### 7.1.1 Commutation du courant de ligne à la fréquence du réseau ou de ses multiples par des commutateurs électroniques tels que convertisseurs à semi-conducteurs

Cette fonction peut être commandée par exemple par des thyristors, ou non commandée dans le cas des diodes. Dans la plupart des cas, ceci est obtenu par la commutation périodique d'impédances et de sources de tension, en et hors service, ou d'une phase à une autre. En principe, on peut discerner trois caractéristiques de génération d'harmoniques dans les convertisseurs:

- a) La charge est connectée et déconnectée périodiquement, par exemple un gradateur à courant alternatif connecte sa charge à des angles de phase pré-déterminés et la déconnecte quand le courant tombe à zéro. La figure 1a présente le schéma de principe. L'amplitude et le déphasage du courant harmonique dépendent de l'angle auquel la tension de ligne est connectée à la charge, de la différence de potentiel entre la ligne et la charge et de l'impédance résultant de la mise en série de la ligne et de la charge.

## 5 Definitions

All terms are according to IEV 161, to IEC 146 and to IEC 1000-3.

## 6 Survey of conducted emission of industrial equipment

Table 1 presents a survey on the sources of low-frequency conducted emission and their effects on the mains.

**Table 1 — Sources of low-frequency conducted disturbances**

| Classification               | Examples   | Produced disturbance                                  |
|------------------------------|--|---|
| Non-linear characteristics   | Saturable magnetic devices, gas-discharge lamps        | Harmonics   |
|                              | Arc furnace, a.c. arc welders                          | Harmonics, interharmonics, voltage changes, unbalance |
|                              | Switching-on transformers                              | Harmonics, voltage dips                               |
| Electronically switched load | Convertors, a.c. controllers                           | Harmonics,  |
|                              | Multicycle control devices                             | Interharmonics, voltage changes, unbalance            |
| Switched load                | Switching-on capacitors, filters, and induction motors | Interharmonics, voltage dips                          |

## 7 Harmonics

### 7.1 Description of the disturbing phenomena and sources

The harmonic components in the line current are mainly generated in the ways described in the following subclauses; additional load characteristics are presented in annex A.

#### 7.1.1 Switching the line current with line frequency or its multiple by means of electronic switches such as in semiconductor convertors

This function may be either controlled, as by thyristors, or uncontrolled as by diodes. The function in most cases is obtained by switching a series connection of impedance and voltage sources periodically either on and off, or from phase to phase. In principle, three characteristics for harmonic generation in convertors may be found:

- a) The load is periodically switched on and off, for example an a.c. controller switches its load on at discrete phase angles, and switches off when the current drops to zero. Figure 1a shows the schematic arrangement. Amplitude and phase angle of the harmonic current depends on the angle at which the line voltage is connected to the load, the difference between line and load voltage, and the resulting series connection of load and line impedance.

Les applications types sont:

- le chauffage par conduction, soudure, fusion;
- les sources d'alimentation haute tension à courant continu pour la précipitation électrostatique ou valves de transmetteur;
- les sources d'alimentation à fort courant continu pour la galvanisation ou le décapage;
- les compensateurs statiques d'énergie réactive;
- les démarreurs de moteur alternatif.

b) Un courant appliqué est commuté périodiquement d'une phase à l'autre (inductance courant continu élevé).

La figure 1b présente le schéma de principe.

Les appareils types de cette catégorie sont:

- les convertisseurs pour l'alimentation d'une charge en courant continu (par exemple les variateurs à courant continu, alimentations en courant continu pour traction, pour processus électrochimiques et électrothermiques; les excitations en courant continu pour machines ou électroaimants; les convertisseurs pour soudure);
- les convertisseurs avec liaison courant continu (par exemple les entraînements en courant alternatif avec onduleurs source de courant (OSC) ou convertisseurs cascade hypo-synchrone; les alimentations courant continu pour convertisseurs moyenne fréquence alimentant un chauffage de métal ou un four à induction);
- les convertisseurs bidirectionnels, cycloconvertisseurs (par exemple les variateurs alternatifs, les alimentations basse fréquence pour fusion et affinage électrothermique) tels que ceux présentés à la figure A.7 de l'annexe A.

c) Une tension continue est périodiquement connectée et déconnectée dans la ligne par l'intermédiaire d'impédances. Un convertisseur connecté à une ligne triphasée commute la partie continue d'une phase à l'autre à des angles de phase discrets avec une faible inductance c.c. La figure 1b présente un schéma équivalent. La génération de courant harmonique correspond à celle d'un variateur alternatif. Ici, l'annulation du courant est soit générée au plus tard par la fermeture du commutateur de la phase suivante, soit intervient avant, dans le cas de courant faible ou d'inductance courant continu faible en raison de la polarité de la tension réduisant le courant.

Les appareils types de cette catégorie sont:

- les convertisseurs avec liaison tension directe (par exemple entraînement en courant alternatif avec onduleur source de courant (OSC); les alimentations sans interruption (ASI); alimentation en tension continue pour convertisseur résonnant appliquée au chauffage des métaux ou à la soudure);
- les convertisseurs autocommutés (convertisseurs pour entraînements et compensateurs n'ayant besoin ni de puissance apparente ni de compensation pour cette dernière).

#### 7.1.2 *Impédances non linéaires telles que résistances dépendantes du courant*

(voir figure 1c)

Les appareils types dans cette catégorie sont:

- les fours à arc (arc courant alternatif pour la fusion et l'affinage des métaux);
- les machines à soudure à courant alternatif (arc de soudure alimenté par un transformateur à haute réactance);
- les lampes fluorescentes, lampes à décharge pour les applications d'éclairage à grande diffusion.

Typical applications are:

- conductive heating, welding, melting;
- high-voltage d.c. supply for electrostatic precipitators or transmitter valves;
- high-current d.c. supply for galvanizing or metal pickling;
- static VAR compensator;
- a.c. motor starter.

- b) An impressed current is cyclically switched from phase to phase (high d.c. inductance).

Figure 1b shows the schematic arrangement.

Typical devices in this category are:

- convertor feeding d.c. load (such as d.c. drive; d.c. supply for traction, for electro-chemical and electro-thermal processes; d.c. excitation for machines or magnet coils; d.c. welding convertor);
- convertor with direct current link (such as a.c. drive with current source inverter (CSI) or sub-synchronous convertor cascade; d.c. supply for medium-frequency convertor feeding metal glowing or induction furnace);
- bi-directional convertor, cycloconvertor (such as a.c. drive, low frequency supply for electrothermal melting and refining) as shown in figure A.7 of annex A.

- c) A d.c. voltage is periodically switched on and off into the line via impedances. A convertor connected to a three-phase line switches the d.c. side at discrete phase angles from phase to phase with low d.c. inductance. Figure 1b shows an equivalent circuit. The harmonic current generation corresponds to that of the a.c. controller. Here the current drop to zero is either initiated at the latest by closing the switch of the following phase, or occurs previously in cases of low current or low d.c. inductance because of current dropping voltage polarity.

Typical devices in this category are:

- convertor with direct voltage link (such as a.c. drive with voltage source inverter (VSI); uninterruptable power supply (UPS); d.c. voltage supply for resonant convertor applied to metal heating or soldering);
- self-commutated convertor (convertor type for drives and compensators that do not require reactive power or compensation for it).

#### 7.1.2 Non-linear impedances such as current dependant resistances

(see figure 1c)

Typical devices in this category are:

- arc furnace (a.c. arc for melting and refining metal);
- a.c. welding machine (welding arc supplied via high-reactance transformer);
- fluorescent lamp, gas discharge lamp in mass applications for illumination.

### 7.1.3 Commutation d'inductance saturable (par exemple la mise en service d'un moteur asynchrone ou d'un transformateur)

La saturation magnétique peut entraîner des composantes de courant transitoires. La mise en service d'un circuit résonnant avec inductance et capacité oscillant de façon transitoire (par exemple à la mise en circuit d'un filtre ou de condensateurs, une oscillation transitoire est produite entre le condensateur du filtre et les inductances du filtre et de la ligne).

La figure 1c présente le circuit équivalent.

### 7.2 Données d'émission types

Une sélection de données d'émission types est présentée en annexe A pour les charges les plus répandues générant des courants de ligne harmoniques. Elle est donnée à titre d'information seulement. Les données fiables pour l'évaluation de la perturbation doivent être obtenues du constructeur sur la base des paramètres réels de conception et de son expérience sur des appareils semblables.

### 7.3 Influence des conditions de fonctionnement et d'installation sur l'émission

Concernant l'émission résultant de plusieurs charges (par exemple convertisseurs), il convient d'estimer l'importance et l'angle de phase du courant harmonique. Le branchement des convertisseurs et transformateurs (éventuels) ainsi que la condition de charge simultanée et homogène des convertisseurs ou leur fonctionnement aléatoire doivent avoir été pris en considération; ce problème est traité en 6.4.

On peut définir la perturbation dans le réseau d'alimentation comme la présence dans la tension de ligne de composantes harmoniques qui résultent des chutes de tension des courants harmoniques à travers l'impédance de ligne. Cette impédance de ligne est constituée par le branchement en série et en parallèle de toutes les impédances du réseau haute tension et de toutes les charges, dispositifs de compensation et de filtrage, en considérant les valeurs qui s'appliquent aux fréquences respectives (voir figure 2a). Par conséquent, les résonances éventuelles doivent être identifiées et prises en considération. Des informations complémentaires sont fournies en annexe B.

### 7.4 Sommation des harmoniques

Quand plusieurs appareils produisant des courants harmoniques se trouvent sur un même site, les courants harmoniques dans les lignes et la tension harmonique au point concerné (PCI ou PCC) dépendent de l'effet de superposition, provoqué par les différents amplitudes et déphasages des courants émis par les différentes sources.

Le calcul exact de la tension harmonique résultante (somme vectorielle) ne s'applique qu'à quelques cas spécifiques. Prendre la somme algébrique des contributions de chaque source d'harmoniques peut représenter le pire des cas, mais cette méthode conduit souvent à des valeurs élevées irréalistes, spécialement pour des rangs d'harmoniques élevés.

Dans la plupart des cas une évaluation approximative est suffisante.

Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation approximative des harmoniques résultantes; voir [4], [5] et [6] en annexe E pour la documentation correspondante.

#### 7.4.1 Tension harmonique au point concerné

La tension harmonique  $\underline{U}_h$  de rang h au point concerné (PCI ou PCC) est le résultat de l'équation (voir figure 2b):

$$\underline{U}_h = \underline{U}_{ho} + \sum \underline{U}_{hi} \quad (1)$$

où

$\underline{U}_{ho}$  est la tension harmonique de rang h du réseau d'alimentation sans tenir compte de l'effet des sources concernées (bruit de fond);

$\underline{U}_{hi}$  est la tension harmonique de rang h produite par l'injection de la source i.

### 7.1.3 Switching on saturable inductance (for example switching on induction motor or transformer)

The magnetic saturation may produce transient current components. Switching on a resonant circuit with inductance and capacitance oscillating transiently to the mains (for example when switching on filter or capacitor, a transient oscillations is produced between filter capacitance and inductances of filter and line).

Figure 1c shows the equivalent circuit.

### 7.2 Typical emission data

A range of typical emission data is presented in annex A for the most common loads generating harmonic line currents. They are given for guidance purpose only. Reliable data for the disturbance evaluation should be obtained by the manufacturer on the basis of the actual design parameters, and by his experience with similar equipment.

### 7.3 Influence of operating and installation conditions on emission

For the resulting emission of several loads (such as converters), the amount and the phase angle of the harmonic current is to be estimated. The connection of the converters and transformers (if any), as well as simultaneous and homogeneous load condition for the converters, or their operation at random, have to be taken into consideration; this problem is dealt with in 6.4.

The disturbance in the supply system may be defined by the presence of harmonic components in the line voltage, resulting from voltage drops of the harmonic currents across the line impedance. This line impedance is determined by the parallel and series connection of all impedances to the superimposed high voltage grid, and to all loads, compensating and filter components, considering the values which apply to the respective frequencies (see figure 2a). Therefore, possible resonances must be identified and taken into consideration. Further information is given in annex B.

### 7.4 Summation of harmonics

When several devices producing harmonic currents are present in the same plant, the harmonic currents in the lines, and the harmonic voltage at the point of concern (IPC or PCC) depends on the superposition effect caused by the different amplitudes and phase angles of the currents emitted from different sources.

An exact calculation of the resulting harmonic voltage (vectorial sum) is restricted to a few special cases. Taking the algebraic sum of the contributions by each harmonic source may represent the worst case, but this method often leads to unrealistically high values, especially at high harmonic orders.

An approximate evaluation is sufficient in most of the cases. Several methods exist for the approximate evaluation of the resulting harmonics; see [4],[5] and [6] in annex E for the relevant literature.

#### 7.4.1 Harmonic voltage at the point of concern

The harmonic voltage  $\underline{U}_h$  of order h at the point of concern (IPC or PCC) results from the equation (see figure 2b):

$$\underline{U}_h = \underline{U}_{ho} + \sum \underline{U}_{hi} \quad (1)$$

where

$\underline{U}_{ho}$  is the harmonic voltage of order h of the supply network not considering the effect of the sources of concern (background disturbance);

$\underline{U}_{hi}$  is the harmonic voltage of order h produced by the injection of the source i.

Supposons que toutes les impédances de transfert entre le point de raccordement des sources perturbatrices et le point concerné soient égales pour toutes les sources perturbatrices (voir figure 2b); on obtient  $\underline{U}_h$  par:

$$\underline{U}_h = \underline{U}_{ho} + \underline{Z}_h \sum \underline{I}_{hi} \quad (2)$$

où

$\underline{Z}_h$  est l'impédance harmonique équivalente vue du point concerné.

#### 7.4.2 Sommation des tensions harmoniques

##### 7.4.2.1 Principes de l'évaluation

Le problème de sommation se présente lors de l'étude du branchement d'une nouvelle charge industrielle produisant des harmoniques, parce que les niveaux d'émission admissibles résultent de l'image que ces harmoniques vont donner après sommation avec celles des charges existantes et futures. Le manque d'information et la variabilité inhérente concernant toutes les charges individuelles qui génèrent des harmoniques, entraînent la nécessité d'utiliser une démarche statistique pour l'évaluation des vecteurs harmoniques résultants. Dans une telle démarche, chaque source harmonique est représentée par un vecteur qui varie de façon aléatoire dans le temps. L'amplitude ainsi que l'angle de phase de ces vecteurs sont représentés à l'aide des lois de distribution.

Afin d'arriver à une règle simple pour les applications pratiques, on adopte le coefficient de foisonnement K:

$$K = \frac{\left| \sum \underline{U}_{hi} \right|}{\sum | \underline{U}_{hi} |} \quad (3)$$

K est défini comme le rapport entre la somme vectorielle (réelle ou prévisionnelle) et la somme arithmétique de la contribution individuelle de toutes les sources d'harmoniques. Cette contribution résulte de l'émission relative à la caractéristique opérationnelle de conception de l'appareil concerné.

A l'aide du coefficient de foisonnement K, la perturbation totale  $\underline{U}_h$  peut être évaluée comme suit:

$$| \underline{U}_h | \approx | \underline{U}_{ho} | + K \sum | \underline{U}_{hi} | \quad (4)$$

La valeur du coefficient de foisonnement est influencée, entre autres, par:

- le type de charge perturbatrice, par exemple dans le cas de convertisseurs
  - convertisseur commandé ou non commandé;
  - filtrage inductif ou capacitif;
  - le type de charge (résistive, inductive, moteur);
  - le nombre de convertisseurs fonctionnant simultanément;
- la nature du fonctionnement des différentes sources de perturbation (cycles de fonctionnement coordonnés ou indépendants);
- la variabilité de la charge;
- le rang harmonique considéré.

##### 7.4.2.2 Application pratique de l'évaluation

Il est proposé deux méthodes pour l'évaluation du coefficient de foisonnement K, suivant la connaissance de la contribution harmonique de tous les appareils dans le réseau industriel et la précision demandée pour la tension harmonique résultante au point concerné. En particulier, la méthode 1 fait référence à des groupes spéciaux d'appareils, tandis que la méthode 2 fait référence à des considérations statistiques globales.

Assuming that all the transfer impedances between the point of connection of the disturbing sources and the point of concern are equal for all the disturbing sources (see figure 2b);  $\underline{U}_h$  results from:

$$\underline{U}_h = \underline{U}_{ho} + Z_h \sum I_{hi} \quad (2)$$

where

$Z_h$  is the equivalent harmonic impedance as seen from the point of concern.

#### 7.4.2 Summation of harmonic voltages

##### 7.4.2.1 Principles of the evaluation

The summation problem arises when studying the connection of a new industrial load producing harmonics, because the emission levels which may be allowed are a consequence of the pattern, the harmonics will add up to the ones generated by other existing and future loads. The lack of information, and the inherent variability concerning all the individual loads which generate harmonics, leads to the necessity of using a statistical approach for the evaluation of the resulting harmonic vectors. In such an approach, each harmonic source is represented by a randomly time-varying vector. Both magnitude and phase angle of these vectors are modelled by means of distribution laws.

In order to obtain a simple rule for practical applications, the diversity factor K is adopted:

$$K = \frac{\left| \sum \underline{U}_{hi} \right|}{\sum | \underline{U}_{hi} |} \quad (3)$$

K is defined as the ratio between the vectorial sum (actual or expected) and the arithmetic sum of the individual contribution of all harmonic sources. This contribution is caused by the emission relevant to the design operational characteristic of the equipment concerned.

With the aid of the diversity factor K, the total disturbance  $\underline{U}_h$  can be evaluated as:

$$| \underline{U}_h | \approx | \underline{U}_{ho} | + K \sum | \underline{U}_{hi} | \quad (4)$$

The value of the diversity factor is influenced, among others, by:

- type of disturbing load, for example in the case of convertors
  - controlled or uncontrolled convertor;
  - inductive or capacitive smoothing;
  - type of load (ohmic, inductive, motor);
  - number of convertors operating simultaneously;
- the kind of operation of the various disturbance sources (co-ordinate duty cycles, or independently from each other);
- variability of the load;
- harmonic order under consideration.

##### 7.4.2.2 Practical application of the evaluation

Two methods for evaluating the diversity factor K are proposed, depending on the knowledge of the harmonic contribution of all devices in the industrial network, and the required accuracy of the resulting harmonic voltage at the point of concern. In particular, method 1 refers to special groups of equipment, while method 2 refers to overall statistical considerations.

### Méthode 1

Cette méthode donne des coefficients de foisonnement applicables. Elle se révèle satisfaisante pour une première approximation ou pour les tensions harmoniques résultantes au point concerné avec une marge de sécurité importante par rapport au niveau de compatibilité. Elle s'applique aux rangs d'harmoniques bas  $h \leq 7$ .

Le coefficient de foisonnement  $K$  s'obtient de la façon suivante:

$$K = \frac{\sum K_i |U_{hi}|}{\sum |U_{hi}|} \quad (5)$$

Plusieurs coefficients de foisonnement  $K_i$  différents peuvent être applicables dans une même usine.

Basés sur [13] de l'annexe E, les coefficients de foisonnement  $K_i$  pour les charges individuelles et pour les différents rangs d'harmonique sont donnés par le tableau 2.

**Tableau 2 — Coefficient de foisonnement  $K_i$  pour plusieurs valeurs  $x$  et rangs d'harmoniques,  $x$  étant le rapport entre la charge de l'appareil considéré et la charge perturbatrice totale de l'usine**

| $h$        | 3   | 5   | 7   | 11  | 13  | >15 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $x < 0,05$ | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| $x = 0,1$  | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| $x = 0,2$  | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 |
| $x > 0,5$  | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

NOTE - Si l'installation comporte plusieurs convertisseurs redresseurs non contrôlés,  $K_i = 0,9$ .  
De plus, si les redresseurs non contrôlés ont le même cycle de charge,  $K_i = 1,0$ .

La variation croissante de l'angle de phase  $\Delta\phi$  pour les harmoniques de rangs supérieurs est déjà prise en compte dans les coefficients de foisonnement donnés dans le tableau (voir les figures de la méthode 2).

### Méthode 2

Cette méthode est basée sur une démarche statistique considérant que le niveau de compatibilité devrait être atteint avec une probabilité de 95 % ou plus.

Une connaissance certaine des variations d'amplitude et d'angle de phase sur la contribution des harmoniques individuelles est nécessaire:

$$K = \frac{S(U_{hi}(p))}{\sum |U_{hi}|} \quad (6)$$

où

$S(U_{hi}(p))$  est la somme statistique vectorielle ayant une probabilité de 95 % de ne pas être dépassée.

**Method 1**

This method gives applicable diversity factors. It holds good for a first approximation, or for resulting harmonic voltages at the point of concern, with a considerable safety margin in relation to the compatibility level. It applies to low order harmonics  $h \leq 7$ .

The diversity factor  $K$  is obtained by the following:

$$K = \frac{\sum K_i |U_{hi}|}{\sum |U_{hi}|} \quad (5)$$

Several different  $K_i$  may be applicable in one plant.

Based on [13] of annex E, the diversity factors  $K_i$  for individual loads and for different harmonic orders are given in table 2.

**Table 2 — Diversity factor  $K_i$  for various values  $x$  and harmonic orders,  $x$  being the ratio between the load of the device being considered and the total disturbing load of the plant**

| $h$        | 3   | 5   | 7   | 11  | 13  | >15 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $x < 0,05$ | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| $x = 0,1$  | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| $x = 0,2$  | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 |
| $x > 0,5$  | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

NOTE - If the multi-unit installation is made up of several uncontrolled rectifier converters,  $K_i = 0,9$ .  
In addition, if the uncontrolled rectifiers have the same load cycle,  $K_i = 1,0$ .

The diversity factors in the table take into consideration the increasing variation of the phase angle  $\Delta\phi$  towards higher harmonics (see figures relevant to method 2).

**Method 2**

This method is based on a statistical approach, considering that the compatibility level has to be met with a probability of 95 % or better.

A certain knowledge concerning the variation of magnitude and phase angle of the individual harmonic contributions is required:

$$K = \frac{S(U_{hi}(p))}{\sum |U_{hi}|} \quad (6)$$

where

$S(U_{hi}(p))$  is the statistical sum vector having 95 % probability of not being exceeded.

Les coefficients de foisonnement K correspondant aux variations d'amplitude et d'angle de phase des tensions harmoniques et au nombre de sources N sont obtenus en suivant la démarche énoncée par [4] de l'annexe E:

$$K \sum |U_{hi}| = b \left( \sum |U_{hi}|^a \right)^{1/a} \quad (7)$$

Les valeurs typiques applicables pour a et b sont indiquées dans le tableau 3 ci-dessous. Elles s'appliquent aux valeurs dont la probabilité de ne pas être dépassées est de 95 %:

**Tableau 3 — Valeurs a et b applicables à une distribution statistique uniforme des amplitudes et des angles de phase. Les amplitudes maximales sont toutes égales.**

| Gamme de distribution de l'angle de phases | $\Delta U / U_{max}$ | N = 2 |     | N > 2 |     |
|--|----------------------|-------|-----|-------|-----|
|  |                      | b     | a   | b     | a   |
| 0 - 360                                    | 0 - 1                | 1,0   | 2,0 | 1,0   | 2,0 |
|  | 0,5 - 1              | 1,3   | 2,0 | 1,3   | 2,0 |
|  | 1                    | 1,0   | 1,0 | 1,7   | 2,0 |
| 0 - 270                                    | 0 - 1                | 0,9   | 1,6 | 0,9   | 1,6 |
|  | 0,5 - 1              | 1,0   | 1,4 | 1,0   | 1,4 |
|  | 1                    | 1,0   | 1,0 | 1,3   | 1,4 |
| 0 - 180                                    | 0 - 1                | 0,8   | 1,3 | 0,8   | 1,3 |
|  | 0,5 - 1              | 0,9   | 1,2 | 0,9   | 1,2 |
|  | 1                    | 1,0   | 1,0 | 1,2   | 1,2 |
| 0 - 90                                     | 0 - 1                | 0,9   | 1,2 | 0,9   | 1,2 |
|  | 0,5 - 1              | 0,9   | 1,1 | 0,9   | 1,1 |
|  | 1                    | 1,0   | 1,0 | 1,0   | 1,0 |

**NOTE —** L'équation donnée ci-dessus ne peut être utilisée qu'à condition qu'aucune source d'harmonique ne fournit plus de 50 % de la somme algébrique de la tension harmonique considérée. Dans le cas contraire, se reporter à la méthode 1.

En général, les données suivantes sont appliquées:

- rang d'harmonique 3, 5 et 7                          angle de phase jusqu'à 90°
- rang d'harmonique 11 et 13                          angle de phase jusqu'à 270°
- rang d'harmonique au-delà de 13                          angle de phase jusqu'à 360°

Pour les vecteurs ayant des amplitudes maximales différentes, les facteurs peuvent être utilisés avec une précision suffisante. Si le résultat dépasse la somme arithmétique, c'est alors la somme arithmétique qui sera utilisée. Dans des cas spécifiques, le résultat peut être inférieur aux composantes individuelles les plus importantes. On applique alors ces dernières.

Diversity factors K depending on the variation of magnitude and phase angle of the harmonic voltages and the number of sources N are obtained following the approach [4] of annex E:

$$K \sum |U_{hi}| = b \left( \sum |U_{hi}|^a \right)^{1/a} \quad (7)$$

Typical relevant values for a and b are shown in the following table 3; they are applicable to values having 95 % probability of not being exceeded:

**Table 3 — Values a and b applicable to uniform statistical distribution of amplitudes and phase angles. Maximum amplitudes are all equal.**

| Range of distribution of phase angle | Range of distribution of the amplitude | N = 2 |     | N > 2 |     |
|--------------------------------------|--|-------|-----|-------|-----|
|                                      |  | b     | a   | b     | a   |
| $\Delta\phi$                         | $\Delta U / U_{max}$                   |       |     |       |     |
|                                      | 0 - 1                                  | 1,0   | 2,0 | 1,0   | 2,0 |
|                                      | 0,5 - 1                                | 1,3   | 2,0 | 1,3   | 2,0 |
| 0 - 360                              | 1                                      | 1,0   | 1,0 | 1,7   | 2,0 |
|                                      | 0 - 1                                  | 0,9   | 1,6 | 0,9   | 1,6 |
|                                      | 0,5 - 1                                | 1,0   | 1,4 | 1,0   | 1,4 |
| 0 - 270                              | 1                                      | 1,0   | 1,0 | 1,3   | 1,4 |
|                                      | 0 - 1                                  | 0,8   | 1,3 | 0,8   | 1,3 |
|                                      | 0,5 - 1                                | 0,9   | 1,2 | 0,9   | 1,2 |
| 0 - 180                              | 1                                      | 1,0   | 1,0 | 1,2   | 1,2 |
|                                      | 0 - 1                                  | 0,9   | 1,2 | 0,9   | 1,2 |
|                                      | 0,5 - 1                                | 0,9   | 1,1 | 0,9   | 1,1 |
| 0 - 90                               | 1                                      | 1,0   | 1,0 | 1,0   | 1,0 |

NOTE — The equation given above can only be used when no harmonic source provides more than 50 % of the algebraic sum of the harmonic voltage being considered. Otherwise refer to method 1.

Generally, the following applies:

- harmonic orders 3, 5 and 7      phase angle up to 90°
- harmonic orders 11 and 13      phase angle up to 270°
- harmonic orders above 13      phase angle up to 360°

For vectors with different maximum magnitudes, the factors can be used with sufficient accuracy. If the result exceeds the arithmetic sum, then the arithmetic sum will be used instead. In special cases, when the result may be lower than the greatest individual components, then the latter applies.

Si, dans une installation, certains convertisseurs sont branchés par l'intermédiaire de transformateurs de déphasage (couplage Y/D) et d'autres par l'intermédiaire de transformateurs non déphasants (couplage Y/Y ou D/D), les courants harmoniques de rangs 5 et 7 générés ont tendance à se neutraliser à condition que les convertisseurs fonctionnent dans des conditions semblables.

## 8 Interharmoniques

### 8.1 Sources de tensions et de courants interharmoniques

La grande majorité des tensions et courants interharmoniques sur le réseau est générée par des convertisseurs de fréquence statiques. Des machines tournantes sans convertisseurs peuvent aussi générer des tensions interharmoniques, mais, par rapport aux perturbations générées par des convertisseurs, leur amplitude est peu importante, et pour cette raison elles sont négligées ici. L'injection intentionnelle de tensions interharmoniques dans le réseau, pour la télécommande par modulation par exemple, n'est pas soulevée ici, car l'émission est parfaitement connue.

Le mécanisme de la génération des fréquences interharmoniques dépend du type de convertisseur. Le tableau 4 présente une synthèse des applications courantes avec convertisseurs de fréquence statiques agissant comme sources d'interharmoniques.

**Tableau 4 — Résumé de la production de courant interharmonique par des convertisseurs**

| Configuration de convertisseur                               |                                | Applications types   |
|--|--------------------------------|--|
| Partie alimentation  | Partie charge                  |  |
| Convertisseur commuté par le réseau et ligne courant continu | Onduleur commuté par le réseau | Variateur de vitesse, échange de puissance entre réseaux, cascade hyposynchrone  |
|  | Onduleur autocommuté           | Variateur de vitesse, alimentation sans interruption (ASI)   |
|  | Onduleur résonnant             | Chauffage par induction  |
| Convertisseur auto commuté et liaison courant continu        |                                | Variateur de vitesse   |
|  |                                | Stockage d'énergie   |
| Convertisseurs directs (cycloconvertisseurs)                 |                                | Conversion de fréquence pour traction et pour processus électrothermique cascade hypersynchrone, variation de vitesse à faible vitesse de rotation |

Les fours à arc sont également des sources d'interharmoniques. De plus, tout convertisseur ou appareil non linéaire dans les conditions de fonctionnement transitoire peut générer des courants interharmoniques.

### 8.2 Courants de ligne interharmoniques des convertisseurs indirects

Les convertisseurs indirects comprennent un convertisseur commuté par le réseau, branché sur le réseau et connecté par l'intermédiaire d'une liaison courant continu à un deuxième convertisseur commuté soit par un moteur, soit par résonance ou autocommuté.

If in an installation some convertors are connected via phase-shifting transformers (Y/D group), and some others via non-phase-shifting transformers (Y/Y or D/D groups); the 5th and 7th harmonic currents generated tend to cancel, provided that the convertors are operated in similar conditions.

## 8 Interharmonics

### 8.1 Sources of interharmonic currents and voltages

The large majority of the interharmonic voltages and currents on the power supply are generated by static frequency convertors. Rotating machines without convertors may also generate interharmonic voltages; but, in relation to convertor borne interharmonics, their magnitude is very small, and for this reason they are neglected here. Intended injection of interharmonic voltages into the mains, for example for ripple control, is not discussed here, since the emission is known perfectly.

The mechanism of the generation of interharmonic frequencies is dependent on the type of the convertor. Table 4 gives an overview of common applications of static frequency convertors acting as sources of interharmonics.

**Table 4 — Overview of interharmonic current generation by convertors**

| Convertor arrangement                      |                          | Typical applications   |
|--|--------------------------|--|
| Supply side                                | Load side                |  |
| Line-commutated convertor<br>and d.c. link | Line commutated inverter | Variable speed drive, power exchange<br>between networks,<br>sub-synchronous cascade   |
|  | Self-commutated inverter | Variable speed drives, UPS   |
|  | Resonant inverter        | Induction heating  |
| Self-commutated convertor<br>and d.c. link |                          | Variable speed drive   |
|  |                          | Energy storage   |
| Direct convertors (cycloconvertors)        |                          | Frequency conversion for traction and for<br>electro-thermal processes,<br>over-synchronous cascade, variable speed<br>drive at low rotation speed |

AC arc furnaces also are sources of interharmonics. In addition, any convertor or nonlinear device in non-stationary operating conditions can generate interharmonic currents.

### 8.2 Interharmonic line currents of indirect convertors

The indirect convertors are composed of a line-commutated convertor at the a.c. supply connected via a d.c. link to a second convertor, either motor - or resonance -, or self-commutated.

On trouve les fréquences suivantes dans le courant ondulé au niveau de la liaison à courant continu:

$$\begin{aligned} f_{lh} &= n p_L f_L \\ \text{et} \\ f_{lh} &= k p_A f_A \end{aligned} \quad (8)$$

où

- $f_{lh}$  est la fréquence de la composante harmonique du courant de la liaison intermédiaire (Hz);
- $p_L$  est le nombre de pulsations du convertisseur branché sur l'alimentation alternative;
- $f_L$  est la fréquence de ligne (Hz);
- $n, k$  est le nombre entier 0, 1, 2, 3...;
- $p_A$  est le nombre de pulsations du convertisseur côté charge;
- $f_A$  est la fréquence de la charge (Hz), quand la charge est un moteur, cette fréquence étant liée à la vitesse réelle du moteur.

En régime normal, on retrouve les fréquences suivantes dans le courant de ligne:

$$f_{lh} = f_L (1 \pm n p_L) \pm k p_A f_A \quad (9)$$

où

- $f_{lh}$  sont les composants de fréquences du courant de ligne (Hz).

Quand  $k = 0$  (ce qui correspond à la composante continue dans le courant de la liaison courant continu) la formule donne l'harmonique caractéristique dans le courant de ligne. Avec  $k$  non égal à 0, la formule donne les fréquences interharmoniques.

Les fréquences interharmoniques ayant l'amplitude la plus grande sont:

$$f_{mh} = (f_L \pm p_A f_A) \quad (10)$$

Les figures 3a et 3b présentent une synthèse des composantes de fréquences. Le numéro en dessous des tracés de fréquence est le facteur G, c'est-à-dire le rapport entre le courant de ligne et le courant de liaison correspondant à chaque composante harmonique individuelle.

L'annexe C donne les formules à appliquer en première approximation pour le courant interharmonique et présente aussi un exemple d'application de la figure 3b.

Le constructeur peut donner des informations plus spécifiques.

### 8.3 Courant interharmonique généré par des convertisseurs directs

Les convertisseurs directs sont des changeurs de fréquence sans liaison intermédiaire et sans dispositif d'emmagasinage d'énergie. Ils convertissent la fréquence de ligne en une gamme qui va de zéro (courant continu) jusqu'à environ 40 % de la fréquence de ligne. Les convertisseurs triphasé-triphasé, appelés cycloconvertisseurs, contrôlent à la fois la fréquence et l'amplitude de tension. Leur application principale est la variation de vitesse de grosses machines tournantes triphasées, soit par la gestion du transfert total d'énergie, soit par la gestion du transfert de l'énergie de glissement du système. Dans le second cas, le convertisseur est connecté au moteur asynchrone par l'intermédiaire du collecteur à bagues, la variation de vitesse étant limitée à une plage étroite proche de la vitesse de synchronisme (cascade cycloconvertisseur).

La conversion directe de triphasé en monophasé est employée dans des applications types, comme les liaisons entre le réseau public et une alimentation monophasée de chemin de fer ou comme l'alimentation en courant alternatif de certains processus métallurgiques qui nécessitent de très basses fréquences. Le spectre du courant d'alimentation est dominé par les harmoniques caractéristiques:

$$f_{ch} = (1 \pm n p_L) f_L \quad (11)$$

Des fréquences latérales existent.

The following frequencies are present in the ripple current of the d.c. link:

$$\begin{aligned} f_{lh} &= n p_L f_L \\ \text{and} \\ f_{lh} &= k p_A f_A \end{aligned} \quad (8)$$

where

$f_{lh}$  is the frequency of the harmonic component in the current of the intermediate link (Hz)

$p_L$  is the pulse number of the convertor at the a.c. supply

$f_L$  is the line frequency (Hz)

$n, k$  is the integer 0,1,2,3,...

$p_A$  is the pulse-number of load side inverter

$f_A$  is the load frequency (Hz); when the load is a motor, this frequency is related to the actual motor speed

In steady state, the following frequencies in the line-current are found:

$$f_{hh} = f_L (1 \pm n p_L) \pm k p_A f_A \quad (9)$$

where

$f_{hh}$  is the line current frequency components (Hz)

When  $k = 0$  (corresponding to the d.c. component in the d.c. link current), the formula gives the characteristic harmonic in the line current. With  $k$  not equal to 0, the formula gives the interharmonic frequencies.

The interharmonic frequencies with highest amplitude are:

$$f_{mh} = (f_L \pm p_A f_A) \quad (10)$$

Figures 3a and 3b give an overview of the frequency components. The number beneath the frequency traces is the factor G, that is the ratio between the line current and the corresponding link-current for each individual harmonic component.

Annex C gives the formulae to be applied in first approximation for the interharmonic current, and also an example of the application of figure 3b.

The manufacturer can provide more specific information.

### 8.3 Interharmonic current generated by direct convertors

Direct convertors are frequency changers with no intermediate link and no energy storage device. They convert the line frequency into a range from zero (d.c.) and up to about 40 % of the line frequency.

Three-phase to three-phase convertors, called cycloconvertors, control both the frequency and the voltage amplitude. Their main application is the speed control of large three-phase rotating machines, either by handling the total energy transfer, or by handling the transfer of the slip energy of the drive. In the second case, the convertor is connected to the induction motor via slip rings, the speed control is limited to narrow range close to the synchronous speed (cycloconvertor cascade).

The direct conversion from three-phase to single-phase is used in typical applications such as links between a public power supply and a single-phase railway supply, or as a.c. supply of some metallurgical processes which need very low frequencies. The spectrum of the supply current is dominated by the characteristic harmonics:

$$f_{ch} = (1 \pm n p_L) f_L \quad (11)$$

Moreover side band frequencies exist.

Elles sont données par:

$$f_{hh} = f_{ch} \pm 2k f_A \quad \text{dans le cas d'une charge monophasée (voir figure 4);}$$

$$f_{hh} = f_{ch} \pm 6k f_A \quad \text{dans le cas d'une charge triphasée (cycloconvertisseurs, voir figure 4);}$$

$f_{ch}$  fréquences caractéristiques suivant le nombre de pulsations du convertisseur d'alimentation;

$f_A$  fréquence de sortie du cycloconvertisseur.

Les figures 4, 5 et 6 présentent l'influence des différents paramètres de la charge, tels que:

- la fréquence de charge basse et haute;
- le système six et douze pulsations.

L'amplitude d'un courant interharmonique dépend en grande partie:

- du courant de la charge;
- du facteur de puissance;
- de la tension du moteur (suivant la vitesse réelle);
- du principe de contrôle du convertisseur, par exemple contrôle sinusoïdal, contrôle trapézoïdal, etc.

#### 8.4 Cascade hypo-synchrone

Ce type de contrôle de glissement, par convertisseur indirect simple, est employé pour la variation de vitesse de moteurs asynchrones dans la gamme de puissances moyennes et à l'intérieur d'une plage de vitesse allant d'environ 60 % jusqu'aux abords de la pleine vitesse synchrone. Les enroulements rotoriques renvoient de l'énergie vers le réseau (par l'intermédiaire d'un redresseur, d'une liaison courant continu et d'un convertisseur). Les courants harmoniques générés par le redresseur et l'inverseur passent dans le réseau. De plus, les courants harmoniques générés par les redresseurs côté rotor sont modifiés en fréquence en raison de la rotation des enroulements.

La figure 7 présente les fréquences  $f_{hh}$  générées dans le courant de ligne en fonction de la vitesse.

Les équations suivantes sont respectées:

$$f_{hh} = (1 \pm k s p_r) f_L \quad \text{contribution du stator}$$

et

$$f_{hh} = (1 \pm n p_L \pm s p_r) f_L \quad \text{contribution du rotor}$$

$$S = \frac{u_s - u_A}{u_s} \quad (12)$$

où

$p_L$  est l'indice de pulsations du convertisseur connecté au réseau alternatif;

$p_r$  est l'indice de pulsations du redresseur côté rotor  $p_r = 6$ ;

$u_s$  est la vitesse synchrone;

$u_A$  est la vitesse réelle;

$s$  est le facteur de glissement.

La figure 8 présente l'exemple d'une cascade hyper et hyposynchrone où l'énergie de glissement est gérée par un cycloconvertisseur.

They are given by:

$$f_{hh} = f_{ch} \pm 2k f_A \quad \text{in the case of single phase load (see figure 4);}$$

$$f_{hh} = f_{ch} \pm 6k f_A \quad \text{in the case of three-phase load (cycloconvertors, see figure 4);}$$

$f_{ch}$  characteristic frequencies according to the number of pulses of the supply convertor;

$f_A$  output frequency of the cycloconvertor.

Figures 4, 5 and 6 show the influence of different load parameters such as:

- low and high load frequency;
- 6 and 12 pulse arrangement.

The amplitude of interharmonic current is largely dependent on:

- load current;
- load power factor;
- motor voltage (dependent on actual speed);
- convertor control philosophy, for example sine control, trapezoid control, etc.

#### 8.4 Subsynchronous cascade

This kind of slip control, by a simple indirect convertor, is used for speed adjustment of induction motors in the medium power range, and within a speed range approximately from 60 % up to nearly the full synchronous speed. The rotor windings transfer energy (via a rectifier, a d.c. link, and an inverter) back to the a.c. supply. The harmonic currents generated by the rectifier and by the inverter, flow into the supply network. In addition, the harmonic currents generated from the rectifiers on the rotor side are transformed in frequency, by reason of the rotation of the winding.

Figure 7 shows the generated frequencies  $f_{hh}$  in the line current as function of speed.

The following equations hold:

$$f_{hh} = (1 \pm k s p_r) f_L \quad \text{stator contribution}$$

and

$$f_{hh} = (1 \pm n p_L \pm s p_r) f_L \quad \text{rotor contribution}$$

$$S = \frac{u_s - u_A}{u_s} \quad (12)$$

where

$p_L$  is the pulse number of the convertor connected at the a.c. supply;

$p_r$  is the pulse number of rotor-side rectifier  $p_r = 6$ ;

$u_s$  is the synchronous speed;

$u_A$  is the actual speed;

$s$  is the slip-factor.

Figure 8 presents an example of a super- and subsynchronous cascade, where the slip energy is handled by a cycloconvertor.

### 8.5 Convertisseurs autocommutés côté réseau

Des tensions ou courants interharmoniques peuvent être générés si la fréquence de battement n'est pas un multiple entier de la fréquence de ligne.

### 8.6 Fours à arc

Les fours à courant alternatif génèrent des fréquences harmoniques et interharmoniques. Tandis que les convertisseurs produisent un spectre de fréquence discret, les fours à arc produisent un spectre continu. Dans ce cas, la densité du spectre de l'harmonique est à prendre en compte. La figure 9 en présente un exemple.

### 8.7 Sommation des composantes des fréquences interharmoniques

Uniquement dans les cas exceptionnels et pour une courte durée, les composantes interharmoniques ont la même fréquence. Une sommation des interharmoniques est donc possible seulement dans les cas exceptionnels.

## 9 Déséquilibre triphasé

### 9.1 Descriptif de la source perturbatrice

#### 9.1.1 Généralités

Une tension triphasée déséquilibrée apparaît quand une charge déséquilibrée est connectée au réseau. Une charge déséquilibrée absorbe un courant qui est différent sur les trois phases en amplitude ou en phase.

Des charges, telles que les moteurs triphasés en courant alternatif, les génératrices et les convertisseurs triphasés, ne contribuent pas, en principe, au déséquilibre en fonctionnement normal. Néanmoins, un petit déséquilibre peut se produire, dû à des défauts de conception, mais cela est normalement négligeable et impossible à calculer au moyen des règles générales.

Des tensions déséquilibrées peuvent aussi résulter de courants symétriques dans un système de puissance avec un déséquilibre des impedances de ligne, mais ceci n'est pas du domaine de ce rapport.

Dans le cas général, des harmoniques déséquilibrés peuvent apparaître, mais ceci n'est pas traité ici. Ce chapitre ne traite que du déséquilibre des tensions et courants fondamentaux.

#### 9.1.2 Exemples de charges déséquilibrées

Toutes les charges monophasées, branchées soit entre phase et neutre ou entre phases, sont déséquilibrées.

Les cas types sont:

- l'appareillage de chauffage;
- l'éclairage;
- les convertisseurs et redresseurs monophasés;
- les gradateurs alternatifs;
- l'appareillage de traction en courant alternatif;
- les machines à soudure.

Dans les limites du possible, ces charges doivent être réparties de façon équilibrée sur les trois phases, pour réduire le déséquilibre global. Les fours à arc, même s'ils sont triphasés, présentent des déséquilibres importants.

### 8.5 Self-commutated convertors on the line side

Interharmonic voltages or currents can be generated if the beat frequency is not an integer multiple of the line frequency.

### 8.6 Arc furnaces

AC furnaces generate harmonic and interharmonic frequencies. While convertors generate a discrete frequency spectrum, arc furnaces generate a continuous spectrum. In that case, the harmonic spectral density should be considered.

Figure 9 gives an example of it.

### 8.7 Summation of components of interharmonic frequencies

Only in exceptional cases, and for a short period, interharmonic components have the same frequency; therefore, a summation of interharmonics is only possible in these exceptional cases.

## 9 Three-phase unbalance

### 9.1 Description of the disturbing source

#### 9.1.1 General

Unbalanced three-phase voltage appears when an unbalanced load is connected to a power system. An unbalanced load takes a current that differs over the three phases in magnitude or phase.

Loads, such as three-phase a.c. motors, generators, and convertors, do not in principle contribute to the unbalance during normal operation. However, a small unbalance may occur, due to imperfect design, but this is normally quite negligible, and not possible to calculate by general rules.

Unbalanced voltages can also be caused by symmetrical currents in a power system with unbalanced line impedances, but this is outside the scope of this report.

In the general case, unbalanced harmonics can appear, but this is not treated here. This part only deals with the unbalance in the fundamental voltages and currents.

#### 9.1.2 Examples of unbalanced loads

All single-phase loads, either connected phase-to-neutral or phase-to-phase, are unbalanced.

Typical instances are:

- heating equipment;
- lighting;
- single-phase convertors and rectifiers;
- a.c. controllers;
- a.c. traction equipment;
- welding machines.

These loads should, as much as possible, be distributed equally over the three phases, to reduce the overall unbalance. Arc furnaces, even if they are three-phase equipment, present large unbalances.

## 9.2 Caractéristiques de l'émission

### 9.2.1 Composantes symétriques

Un système déséquilibré peut, par l'emploi de composantes symétriques, être divisé en trois composantes: directe, inverse, homopolaire.

NOTE — Les composantes homopolaires ne sont pas du domaine de ce Rapport. Elles n'ont pas d'incidence sur les charges branchées entre phases.

Les composantes homopolaires peuvent exister dans les tensions entre phase et terre de tout système. Elles peuvent exister dans les courants de ligne même si le système n'a pas de point neutre disponible; le courant peut passer vers la terre à travers la capacité entre ligne et terre.

### 9.2.2 Évaluation des courants inverses

Le calcul de la composante inverse du courant est identique pour toutes les charges monophasées citées ci-dessus, seules ou associées. Avec la tension à vide de la phase A comme direction de référence pour tous les angles de phase, les formules suivantes peuvent être employées pour déterminer le courant inverse résultant à condition de connaître l'amplitude et le déphasage des courants individuels dans les trois phases A, B, C:

#### a) Charges triphasées branchées entre phase et neutre

$$I_{\text{neg}} = \frac{1}{3} \left( |I_a| \angle \varphi_a + |I_b| \angle \varphi_b - \frac{2}{3} \pi + |I_c| \angle \varphi_c + \frac{2}{3} \pi \right) \quad (13)$$

#### b) Charges triphasées branchées entre phases

$$I_{\text{neg}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( |I_{ab}| \angle \varphi_{ab} + \frac{\pi}{6} + |I_{bc}| \angle \varphi_{bc} - \frac{\pi}{2} + |I_{ca}| \angle \varphi_{ca} + \frac{5}{6} \pi \right) \quad (14)$$

Dans le cas d'une charge monobranchée entre deux phases:

$$\left| I_{\text{neg}} \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{1\phi} \quad (15)$$

Pour plus d'informations, voir annexe D.

### 9.2.3 Évaluation de la tension inverse

La contribution à la tension inverse d'une charge peut être calculée comme suit:

$$U_{\text{neg}} = I_{\text{neg}} Z_{\text{neg}} \quad (16)$$

L'impédance inverse,  $Z_{\text{neg}}$ , peut être considérée comme égale à l'impédance de la composante directe du réseau; ceci faisant référence aux impédances subtransitoires des machines tournantes.

Cette formule peut être transformée comme suit:

$$U_{\text{neg}} = \frac{|I_{\text{neg}}|}{I_{\text{sc}}} \quad (17)$$

## 9.2 Characteristics of the emission

### 9.2.1 Symmetrical components

An unbalanced system can, with the use of symmetrical components, be divided into three components: positive sequence, negative sequence, and zero sequence.

NOTE — The zero sequence components are outside the scope of this Report. They do not affect loads connected between phases.

The zero sequence components can exist in the line-to-earth voltages of any system. They can exist in the line currents even if the system has no available neutral point; the current can flow to earth through the line-to-earth capacitance.

### 9.2.2 Assessment of negative sequence currents

The calculation of the negative sequence current component is equal for all single-phase loads listed above, individually or combined. With the no-load voltage of phase A, as reference direction for all phase angles, the following formulae can be used to determine the resulting negative sequence current, if the magnitude and phase displacement of the individual currents in the three phases, A, B and C, are known.

- a) Three-phase loads connected phase-to-neutral

$$I_{\text{neg}} = \frac{1}{3} \left( |I_a| \angle \varphi_a + |I_b| \angle \varphi_b - \frac{2}{3} \pi + |I_c| \angle \varphi_c + \frac{2}{3} \pi \right) \quad (13)$$

- b) Three-phase loads connected phase-to-phase

$$I_{\text{neg}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( |I_{ab}| \angle \varphi_{ab} + \frac{\pi}{6} + |I_{bc}| \angle \varphi_{bc} - \frac{\pi}{2} + |I_{ca}| \angle \varphi_{ca} + \frac{5}{6} \pi \right) \quad (14)$$

In the case of a single-phase load connected between two phases:

$$\left| I_{\text{neg}} \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\phi} \quad (15)$$

For more details, see annex D.

### 9.2.3 Assessment of negative sequence voltage

The contribution to the negative sequence voltage from a load can be calculated as:

$$U_{\text{neg}} = I_{\text{neg}} Z_{\text{neg}} \quad (16)$$

The negative sequence impedance,  $Z_{\text{neg}}$ , can be taken as equal to the positive sequence impedance of the network; this refers to the subtransient impedances of the rotating machines.

The formula can be transformed to:

$$U_{\text{neg}} = \frac{|I_{\text{neg}}|}{I_{\text{sc}}} \quad (17)$$

où

- $U_{\text{neg}}$  est la tension relative inverse  $U_{\text{neg}} / U_{\text{nom}}$ ;
- $I_{\text{neg}}$  est le courant inverse;
- $I_{\text{sc}}$  est le courant de court-circuit triphasé au PCI.

### 9.3 Sommation de plusieurs sources

Le courant inverse résultant d'un nombre de charges déséquilibrées en régime normal peut être calculé à l'aide des formules fournies en 6.4.

Si les charges varient, en grandeur ou en phase, on peut employer les mêmes règles de sommation statistique que celles données pour des harmoniques. En fait, la composante inverse peut être considérée comme une composante harmonique de rang 1. Donc, si la méthode 1 est employée, les valeurs approximatives pour K sont semblables à celles du rang 3 dans le tableau 2.

## 10 Variations de tension, papillotement et creux de tension

### 10.1 Variations de tension

#### 10.1.1 Généralités

Les variations de tension sont provoquées par des variations des courants actif et réactif absorbés par les charges connectées au réseau et provoquant de ce fait une variation de la chute de tension dans l'impédance du réseau (voir figure 10).

Dans certains cas, elles pourront aussi être causées par des variations dans la puissance de court-circuit du réseau dues aux variations de la production ou aux changements de la configuration du réseau. Ces variations entraînent des modifications de l'impédance du réseau. Elles sont négligées dans cette norme et l'impédance du réseau sera considérée comme constante et connue.

En général, la tension reste en régime établi en raison du grand nombre des charges existantes. Les variations ou émissions individuelles doivent être limitées de façon à ce que la tension d'emploi en régime établi  $U_c$  reste à l'intérieur de la marge de tension consentie (figure 11) pour que toutes les applications connectées au PCI ou au PCC fonctionnent de façon correcte.

Une variation dynamique relativement importante  $\Delta I$  provoquant  $\Delta U_c$ , due à la connexion ou la déconnexion d'une charge relativement importante ou à un changement important de l'impédance de la charge, par exemple sur un démarrage moteur ou sur le fonctionnement d'un four à arc, même à l'intérieur d'une marge de tension consentie, est considérée comme un phénomène perturbateur.

Cette variation relative de la tension est étudiée dans ce qui suit.

#### 10.1.2 Exemples de charges provoquant des variations de tension relativement importantes

Les exemples types sont:

- le fonctionnement des fours à arc;
- le fonctionnement des machines à souder;
- le démarrage des moteurs;
- la commutation de condensateurs.

La figure 11 montre comment le démarrage d'un moteur peut changer la tension de service. Le démarrage de quelques moteurs peut également être illustré par cette même figure par la somme vectorielle des courants de démarrage individuels.

where

- $u_{\text{neg}}$  is the relative negative sequence voltage  $U_{\text{neg}} / U_{\text{nom}}$ ;
- $I_{\text{neg}}$  is the negative sequence current;
- $I_{\text{sc}}$  is the three-phase short-circuit current at the IPC.

### 9.3 Summation of several sources

The negative sequence current resulting from a number of unbalanced loads under steady state operation can be calculated using the formulae given in 6.4.

If the loads vary, in magnitude or phase, the same rules of statistical summations as were given for harmonics can be used. In fact, the negative sequence component can be regarded as a harmonic component with order number 1. Therefore, if method 1 is used, the approximate values for K are similar to those of order 3 in table 2.

## 10 Voltage changes, flicker and voltage dips

### 10.1 Voltage changes

#### 10.1.1 General

Voltage changes are caused by changes in reactive and active current taken by the loads connected to the network, and thus causing a change of voltage drop in the network impedance (see figure 10).

In certain cases, they may also be caused by changes in the short-circuit power of the network, due to changes in generation, or due to changes in the network configuration. These changes lead to changes in network impedance. They will be neglected in this report and the network impedance will be taken as constant and known.

In general, the voltage remains in a steady state with the mass of existing loads.

The individual changes or emissions are to be limited in such a way that the steady-state operational voltage  $U_c$  remains within the agreed-upon voltage band (figure 11) for proper performance of all the applications connected to the IPC or PCC.

A relatively large dynamic change  $\Delta I$  causing  $\Delta U_c$ , due to the connection or disconnection of a relatively large load, or a large change of load impedance, such as with motor starting or arc furnace operation, even within an agreed voltage band, is considered as a disturbing phenomenon.

This relative voltage change is considered in the following.

#### 10.1.2 Examples of loads causing relatively large voltage changes

Typical examples are:

- operation of arc furnaces;
- operation of welding machines;
- starting of motors;
- switching of capacitors.

Figure 11 shows how the starting of a motor could change the operational voltage. The starting of several motors may also be represented by the same figure by vectorial sum of the individual starting currents.

### 10.1.3 Évaluation de la variation de tension dynamique ou relative due à une seule charge au point de raccordement

On peut faire une évaluation simple de la variation relative de la tension de la façon suivante (voir figure 11):

$$\begin{aligned}\Delta I &= \Delta I_p - j \Delta I_q && \text{variation de courant} \\ Z_L &= R_L + j X_L && \text{impédance du réseau}\end{aligned}\quad (18)$$

Pour les charges monophasées et triphasées symétriques:

$$\Delta U_{\text{dyn}} \approx \Delta I_p R_L + \Delta I_q X_L \quad (19)$$

La limite d'émission au PCI de classe 2 nécessite une limitation de  $U_{\text{dyn}}/U_{\text{nom}}$  suivant la procédure d'évaluation de flicker.

La limite d'émission au PCI de classe 3 devra prendre en considération la tension réelle:

$$U_0 - \Delta U_C \pm \Delta U_{\text{dyn}} \quad (20)$$

### 10.1.4 Sommation des fluctuations de tension

Les règles suivantes s'appliquent aux PCI de classe 3 pour prendre en compte la présence de diverses sources perturbatrices:

- les courants actifs et apparents moyens des charges fluctuantes sont additionnés algébriquement, ceci donne l'équivalent  $\Delta U_C$ ;
- la variation dynamique la plus importante donne la valeur de  $\Delta U_{\text{dyn}}$ ; il convient de ne prendre en compte la coïncidence de la perturbation que dans certains cas spécifiques.

$$\begin{aligned}\Delta U_C &\approx \sum_i [I_q X_L] + \sum_i [I_p R_L] \\ \Delta U_{\text{dyn}} &\approx \max_i (|\Delta I_q X_L + \Delta I_p R_L|)\end{aligned}\quad (21)$$

## 10.2 Flicker

### 10.2.1 Généralités

Le flicker est une impression subjective de luminance fluctuante due au changement rapide de charges telles que:

- fours à arc;
- machines de soudage;
- démarrage et arrêt de moteurs (si la fréquence de variation relative de la tension se trouve entre 0,1 et 3 000 variations par minute).

Une description détaillée du phénomène figure dans le guide UIE [15] à l'annexe E.

### 10.1.3 Assessment of dynamic or relative voltage change due to a single load at the point of coupling

A simple assessment of the relative voltage change may be made as follows (see figure 11):

$$\begin{aligned}\underline{\Delta I} &= \Delta I_p - j \Delta I_q && \text{current change} \\ \underline{Z_L} &= R_L + j X_L && \text{network Impedance}\end{aligned}\quad (18)$$

For single-phase and symmetrical three-phase loads:

$$\Delta U_{\text{dyn}} \approx \Delta I_p R_L + \Delta I_q X_L \quad (19)$$

The emission limit at IPC of class 2 requires a limitation of  $U_{\text{dyn}}/U_{\text{nom}}$  according to the flicker assessment procedure.

The emission limit at IPC of class 3 shall consider the actual voltage:

$$U_0 - \Delta U_c \pm \Delta U_{\text{dyn}} \quad (20)$$

### 10.1.4 Summation of the voltage fluctuations

The following rules are applied to class 3 IPCs to consider the presence of various disturbing sources:

- the average active and reactive currents of the fluctuating loads are added algebraically, this provides the equivalent  $\Delta U_c$ ;
- the largest dynamic change provides the value  $\Delta U_{\text{dyn}}$ , in some special case only the coincidence of disturbance is to be considered.

$$\begin{aligned}\Delta U_c &\approx \sum_i [I_q X_L]_i + \sum_i [I_p R_L]_i \\ \Delta U_{\text{dyn}} &\approx \max_i (|\Delta I_q X_L + \Delta I_p R_L|)\end{aligned}\quad (21)$$

## 10.2 Flicker

### 10.2.1 General

Flicker is the subjective impression of fluctuating luminance, and is caused by rapidly changing loads from:

- arc furnaces;
- welding machines;
- starting and stopping of motors (if the frequency of relative change of voltage lies between 0,1 and 3 000 changes per minute).

Detailed description of the phenomenon is given in UIE guide [15] cited in annex E.

### 10.2.2 *Évaluation de l'émission de flicker*

La CEI 1000-3-3 fournit des méthodes d'évaluation au moyen d'outils analytiques, de simulation et de mesure directe.

Les limites de la CEI 1000-3-3 et de la CEI 1000-3-5 sont valables pour les PCI classe 2 et PCC.

Les PCI classe 3 n'ayant pas, en général, de charge d'éclairage, une évaluation de flicker n'est pas nécessaire. Dans le cas contraire, l'évaluation de flicker est à effectuer suivant les règles des PCI de classe 2.

## 10.3 *Creux de tension*

### 10.3.1 *Généralités*

Un creux de tension consiste en une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, suivie d'un rétablissement dans un court laps de temps, d'une alternance à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des défauts dans le réseau et les installations ou à un changement brutal important de la charge.

### 10.3.2 *Évaluation de la perturbation*

Des statistiques classifiées selon la profondeur, la durée et la fréquence de l'événement sur une année, pour les réseaux publics MT, sont disponibles pour l'Europe. Des statistiques sur des réseaux industriels ne sont pas encore disponibles.

Sur la base de ces statistiques, il sera possible d'évaluer la grandeur de la perturbation dans les réseaux industriels.

Des variations brutales importantes peuvent être évaluées pour n'importe quel point de couplage comme présenté en 9.2.

### 10.2.2 Assessment of flicker emission

IEC 1000-3-3 gives methods of assessment by analytical tools, simulation, and direct measurement.

Limits of IEC 1000-3-3 and IEC 1000-3-5 are valid for IPC class 2 and PCC.

As IPC class 3 has generally no lighting load, no flicker assessment is required. When the contrary applies, the flicker assessment is to be made according to the rule of IPC class 2.

## 10.3 Voltage dips

### 10.3.1 General

Voltage dip is a sudden reduction of the voltage at a point in the power supply system, followed by a recovery after a short period of time, from half a cycle to a few seconds.

Voltage dips are caused by faults in the network and installations, or by a sudden large change of load.

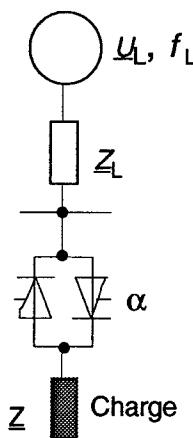
### 10.3.2 Assessment of the disturbance

Statistics classified with regard to depth, duration and frequency of occurrence per year for MV public power supply networks are available for Europe. Statistics from industrial systems are not yet available.

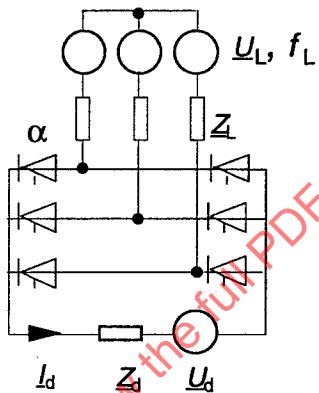
On the basis of the above statistics, it will be possible to assess the magnitude of the disturbance in industrial systems.

Sudden large changes may be evaluated for any point of coupling as shown in 9.2.

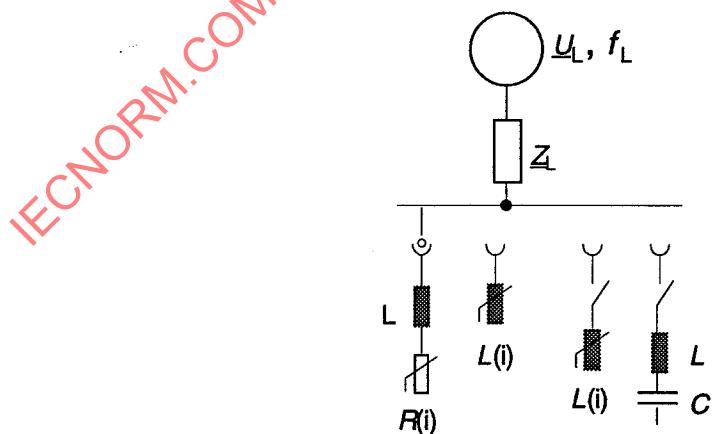
IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-2-6:1995



a) Gradateur courant alternatif, charge mise en et hors service périodiquement

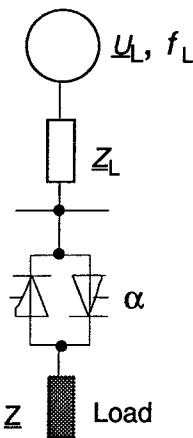


b) Convertisseur connecté en un point triphasé (B6), tension continue  $U_d$  et courant continu  $I_d$  avec impédance  $Z_d$  commutée périodiquement de phase à phase

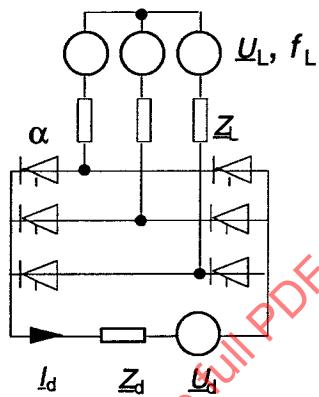
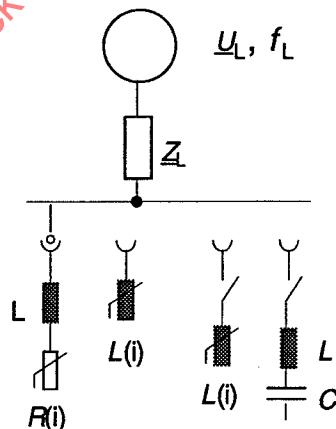


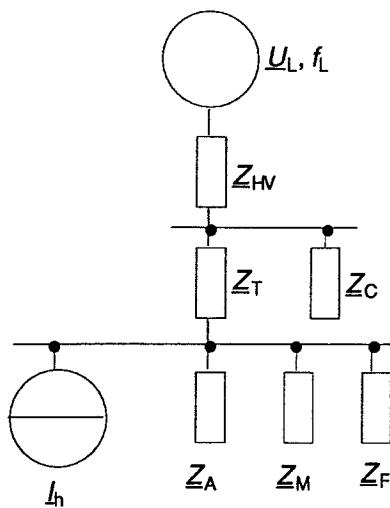
c) Résistance dépendante du courant  $R(i)$  (caractéristique de l'arc), inductance dépendante du courant  $L(i)$  (saturation magnétique), mise sous tension d'inductance saturable  $L(i)$

**Figure 1 — Exemples de convertisseurs ou charges produisant des courants alternatifs harmoniques ou interharmoniques**



a) a.c. controller, load periodically switched on and off

b) Convertor in three-phase bridge connection (B6), d.c. voltage  $U_d$  and d.c. current  $I_d$ , with impedance  $Z_d$  cyclically switched from phase-to-phasec) Current dependent resistance  $R(i)$  (arc characteristic), current dependent inductance  $L(i)$  (magnetic saturation), switching on saturable inductance  $L(i)$ **Figure 1 — Examples of convertors or loads producing harmonic or interharmonic a.c. currents**



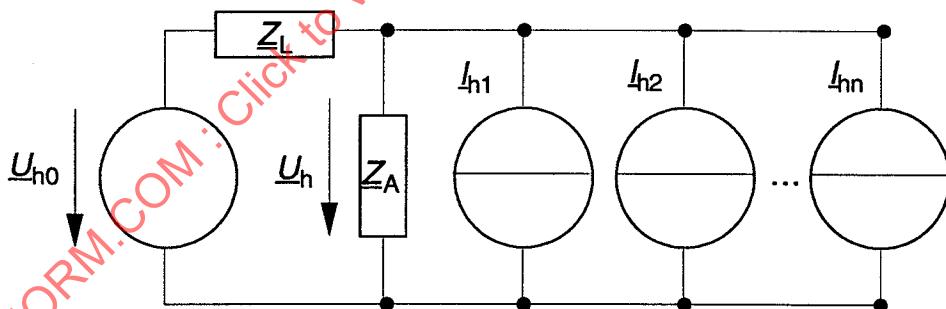
Exemples d'impédances  $Z$ :

|  |   |
|--|---|
| $Z_A = R_A + j\omega X_A$                    | charge passive                              |
| $Z_M = R_M + j\omega X_M$                    | impédance de fuite d'une machine asynchrone |
| $Z_F = j\omega X_{LF} - j\omega^{-1} X_{CF}$ | réactance d'un filtre                       |
| $Z_T = R_T + j\omega X_T$                    | impédance de fuite d'un transformateur      |
| $Z_C = -j\omega^{-1} X_C$                    | capacité du câble                           |
| $Z_{HV} = j\omega X_{HV}$                    | réactance du réseau haute tension           |

Figure 2a — Évaluation de l'impédance résultante côté alimentation,  $\underline{Z}_L$  effective pour une source d'harmonique  $I_h$

$$\underline{Z}_L = \underline{Z}_A // \underline{Z}_M // \underline{Z}_F // (\underline{Z}_T + (\underline{Z}_C // \underline{Z}_{HV}))$$

Avec // pour branchement en parallèle; toutes les impédances sont rapportées à un niveau de tension et dépendent du rang d'harmonique  $h$ .



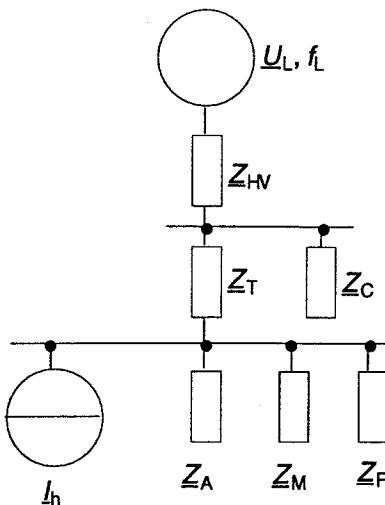
$$U_h = \frac{\underline{Z}_A}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_L} U_L + \frac{\underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_L}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_L} \sum_{i=1}^n (I_{hi})$$

$$= \frac{U_{h0}}{\underline{Z}_h} + \underline{Z}_h \sum_{i=1}^n (I_{hi})$$

$$\approx U_{h0} + \underline{Z}_h I_h$$

$$\text{si } |\underline{Z}_A| \gg |\underline{Z}_L| \text{ et } \angle(\underline{Z}_A, \underline{Z}_L) < 120^\circ$$

Figure 2b — Évaluation de la tension harmonique résultante  $U_h$  au point de couplage interne PCI concernant plusieurs sources de courant harmonique  $I_{h1} \dots I_{hn}$ , en fonction du niveau d'harmonique du réseau  $U_{h0}$  et des impédances harmoniques  $\underline{Z}_A$  côté charge et  $\underline{Z}_L$  côté alimentation



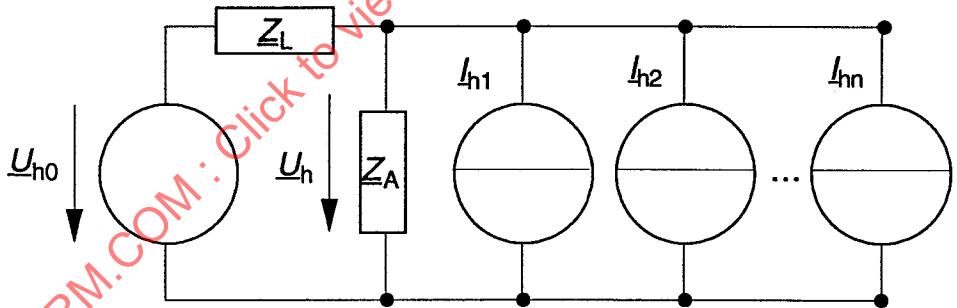
Examples of impedances  $Z$ :

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| $Z_A = R_A + jh X_A$               | passive load                              |
| $Z_M = R_M + jh X_M$               | leakage impedance of an induction machine |
| $Z_F = jh X_{LF} - jh^{-1} X_{CF}$ | reactance of filter                       |
| $Z_T = R_T + jh X_T$               | leakage impedance transformer             |
| $Z_C = -jh^{-1} X_C$               | cable capacitance                         |
| $Z_{HV} = jh X_{HV}$               | reactance of the high voltage grid        |

**Figure 2a — Assessment of the resulting supply side impedance  $Z_L$  effective for an harmonic source  $I_h$**

$$Z_L = Z_A // Z_M // Z_F // (Z_T + (Z_C // Z_{HV}))$$

With // for parallel connection; all impedances are referred to one voltage level and depend on the harmonic order  $h$ .



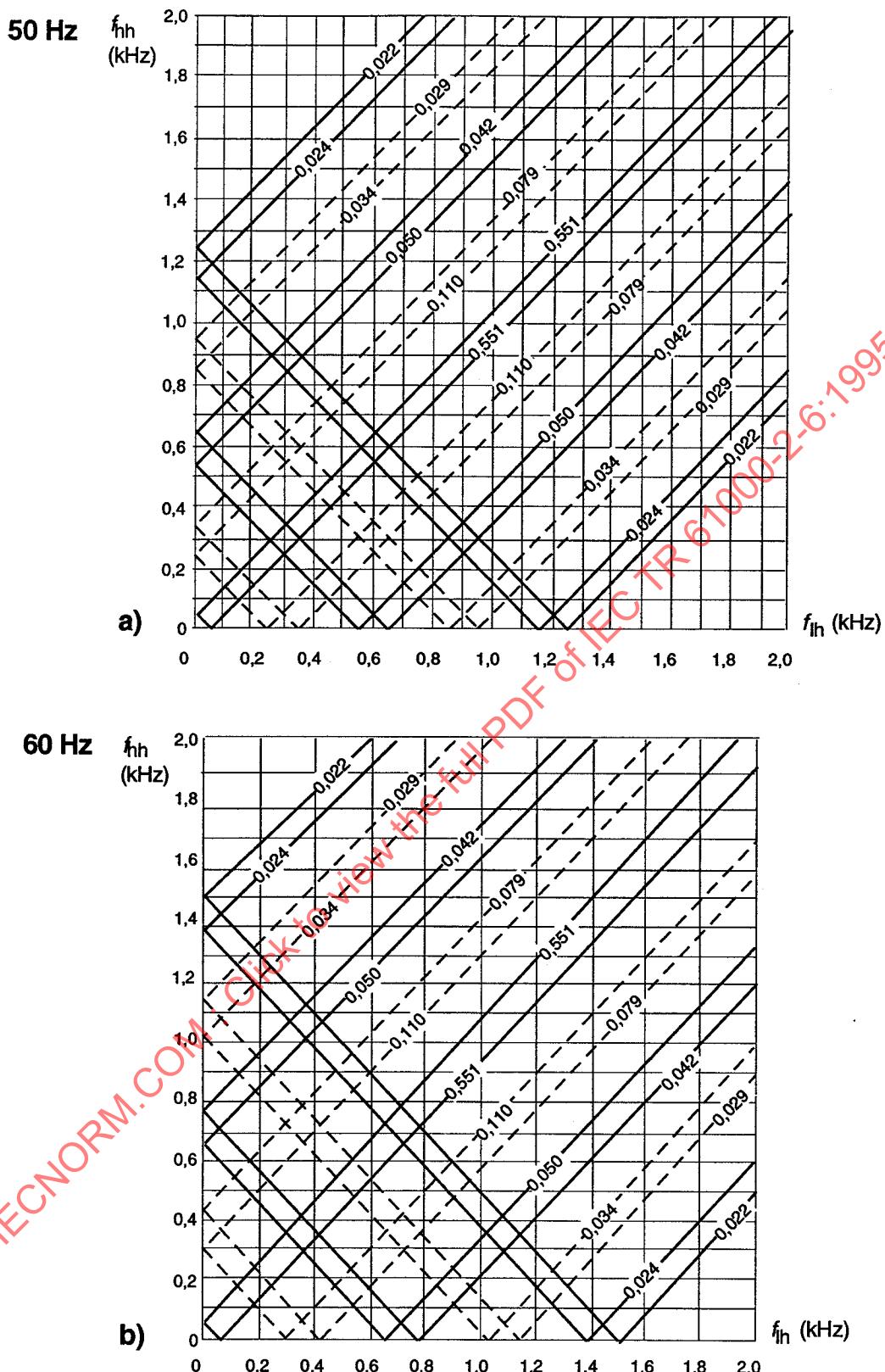
$$U_h = \frac{Z_A}{Z_A + Z_L} U_{h0} + \frac{Z_A \cdot Z_L}{Z_A + Z_L} \sum_{i=1}^n (I_{hi})$$

$$= U_{h0} + Z_L I_h$$

$$\approx U_{h0} + Z_L I_h$$

$$\text{if } |Z_A| \gg |Z_L| \text{ and } \angle (Z_A, Z_L) < 120^\circ$$

**Figure 2b — Assessment of the resulting harmonic voltage  $U_h$  at the implant point of coupling IPC regarding several harmonic current sources  $I_{h1} \dots I_{hn}$ , the harmonic level  $U_{h0}$  of the supply, the harmonic impedances  $Z_A$  of the load side, and  $Z_L$  of the supply side**



Le diagramme a) s'applique à une alimentation 50 Hz

Le diagramme b) s'applique à une alimentation 60 Hz

Les lignes pleines s'appliquent aux convertisseurs à 6 impulsions

Les lignes pointillées s'appliquent aux convertisseurs à 6 et 12 impulsions

Figure 3 — Diagramme des fréquences interharmoniques dans le courant de ligne  $I_{hh}$  de l'alimentation alternative produit par le courant harmonique  $I_{lh}$  dans la liaison continue. Le paramètre  $G$  est le rapport entre  $I_{hh}$  et  $I_{lh}$ .

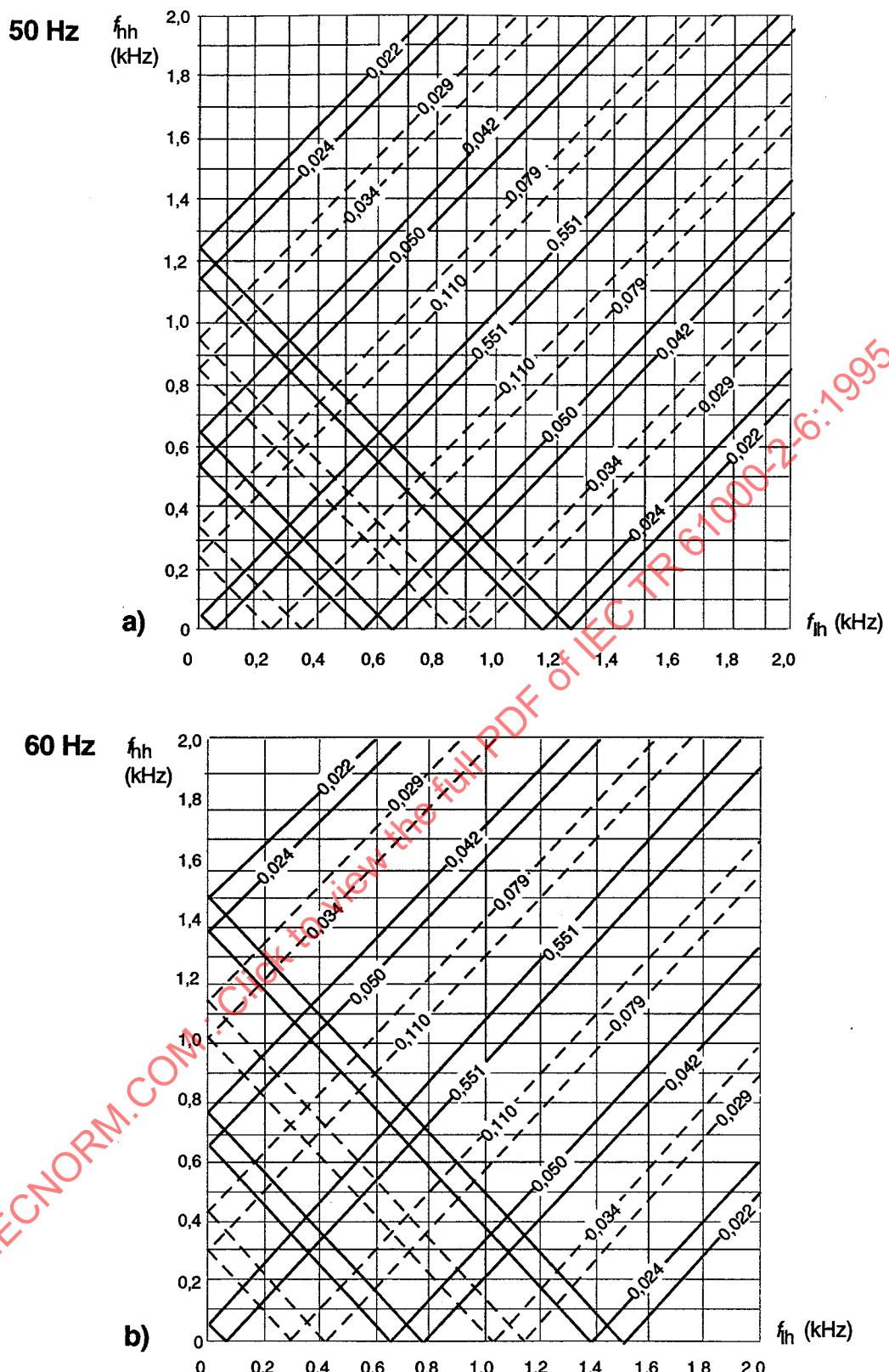


Diagram a) applies to 50 Hz supply

Diagram b) applies to 60 Hz supply

Solid lines apply to 6 pulse converters

Broken lines apply to 6 and 12 pulse converters

**Figure 3 — Diagrams of the interharmonic frequencies in the line current  $I_{hh}$  of the a.c. supply produced by harmonic current  $I_{ih}$  in the d.c. link. The parameter G is the ratio between  $I_{hh}$  and  $I_{ih}$ .**

| A   | B | C | A   | B | C | A   | B | C | A   | B | C | A   | B | C | A   | B | C |
|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|
| ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   |
| 30  | * | - | 230 | * | - | 330 | * | - | 530 | * | - | 630 | * | - |     |   |   |
| 35  | * | * | 235 | * | * | 335 | * | * | 535 | * | * | 635 | * | * |     |   |   |
| 40  | * | - | 240 | * | - | 340 | * | - | 540 | * | - | 640 | * |   |     |   |   |
| 45  | * | - | 245 | * | - | 345 | * | - | 545 | * | - | 645 | * | - |     |   |   |
| 50  | * | * | 250 | * | * | 350 | * | * | 550 | * | * | 650 | * | * |     |   |   |
| 55  | * | - | 255 | * | - | 355 | * | - | 555 | * | - | 655 | * | - |     |   |   |
| 60  | * | - | 260 | * | - | 360 | * | - | 560 | * | - | 660 | * | - |     |   |   |
| 65  | * | * | 265 | * | * | 365 | * | * | 565 | * | * | 665 | * | * |     |   |   |
| 70  | * | - | 270 | * | - | 370 | * | - | 570 | * | - | 670 | * | - |     |   |   |
| ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   |     |   |   |

A Fréquence en Hertz

B Charge monophasée  $p_A = 2$

C Charge triphasée  $p_A = 6$

Figure 4 — Fréquences interharmoniques générées par un convertisseur direct

$$f_L = 50 \text{ Hz}, f_A = 2,5 \text{ Hz}, p_L = 6$$

| A   | B | C | A   | B | C | A   | B | C | A   | B | C | A   | B | C |
|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|
| ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   |
| 30  | * | - | 230 | * | - | 330 | * | - | 530 | * | - | 630 | * | - |
| 35  | * | * | 235 | * | * | 335 | * | * | 535 | * | * | 635 | * | * |
| 40  | * | - | 240 | * | - | 340 | * | - | 540 | * | - | 640 | * |   |
| 45  | * | - | 245 | * | - | 345 | * | - | 545 | * | - | 645 | * | - |
| 50  | * | * | 250 | * | * | 350 | * | * | 550 | * | * | 650 | * | * |
| 55  | * | - | 255 | * | - | 355 | * | - | 555 | * | - | 655 | * | - |
| 60  | * | - | 260 | * | - | 360 | * | - | 560 | * | - | 660 | * | - |
| 65  | * | * | 265 | * | * | 365 | * | * | 565 | * | * | 665 | * | * |
| 70  | * | - | 270 | * | - | 370 | * | - | 570 | * | - | 670 | * | - |
| ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   | ... |   |   |

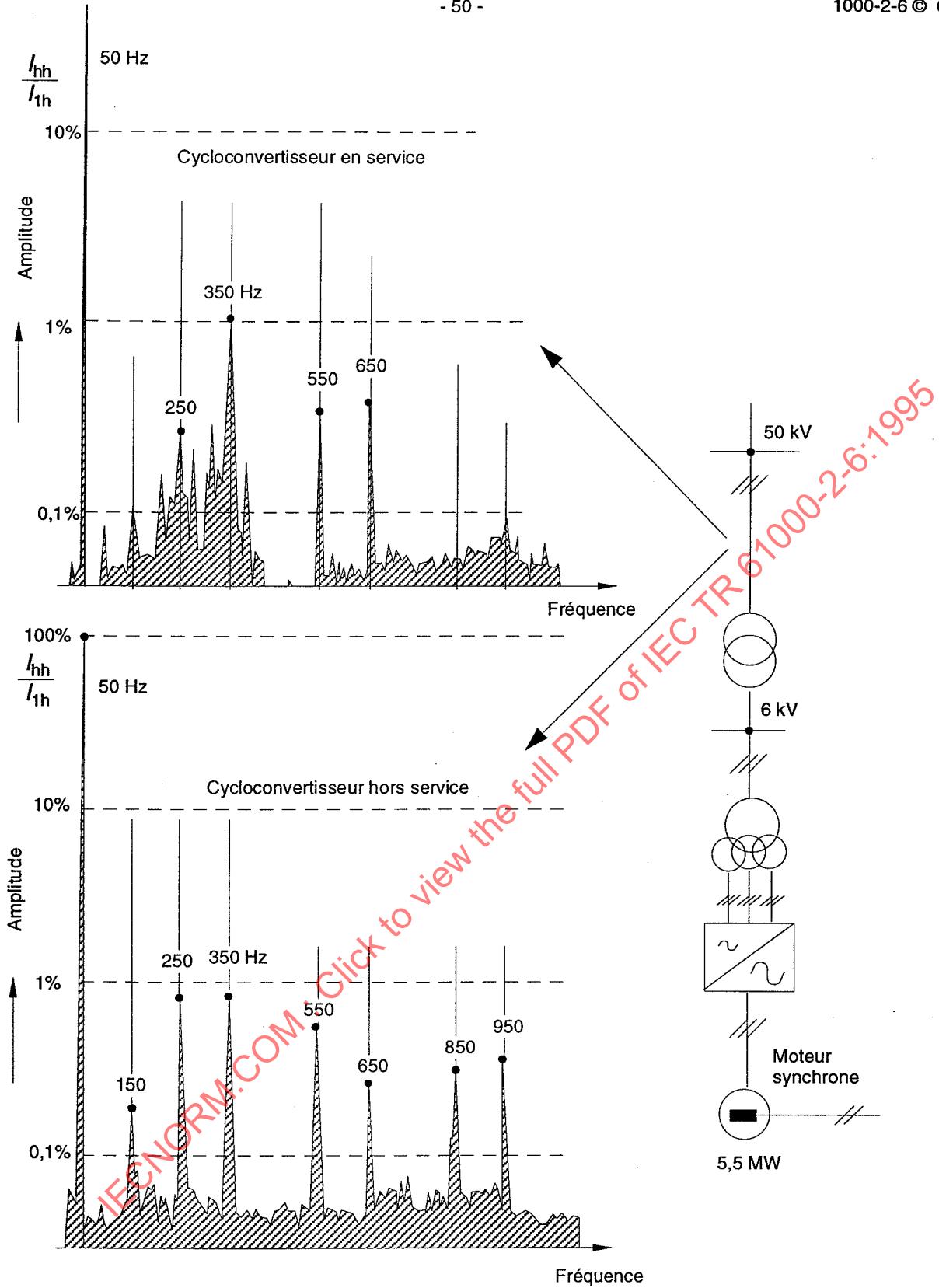
A frequency in Hertz

B single-phase load  $p_A = 2$ C three-phase load  $p_A = 6$ 

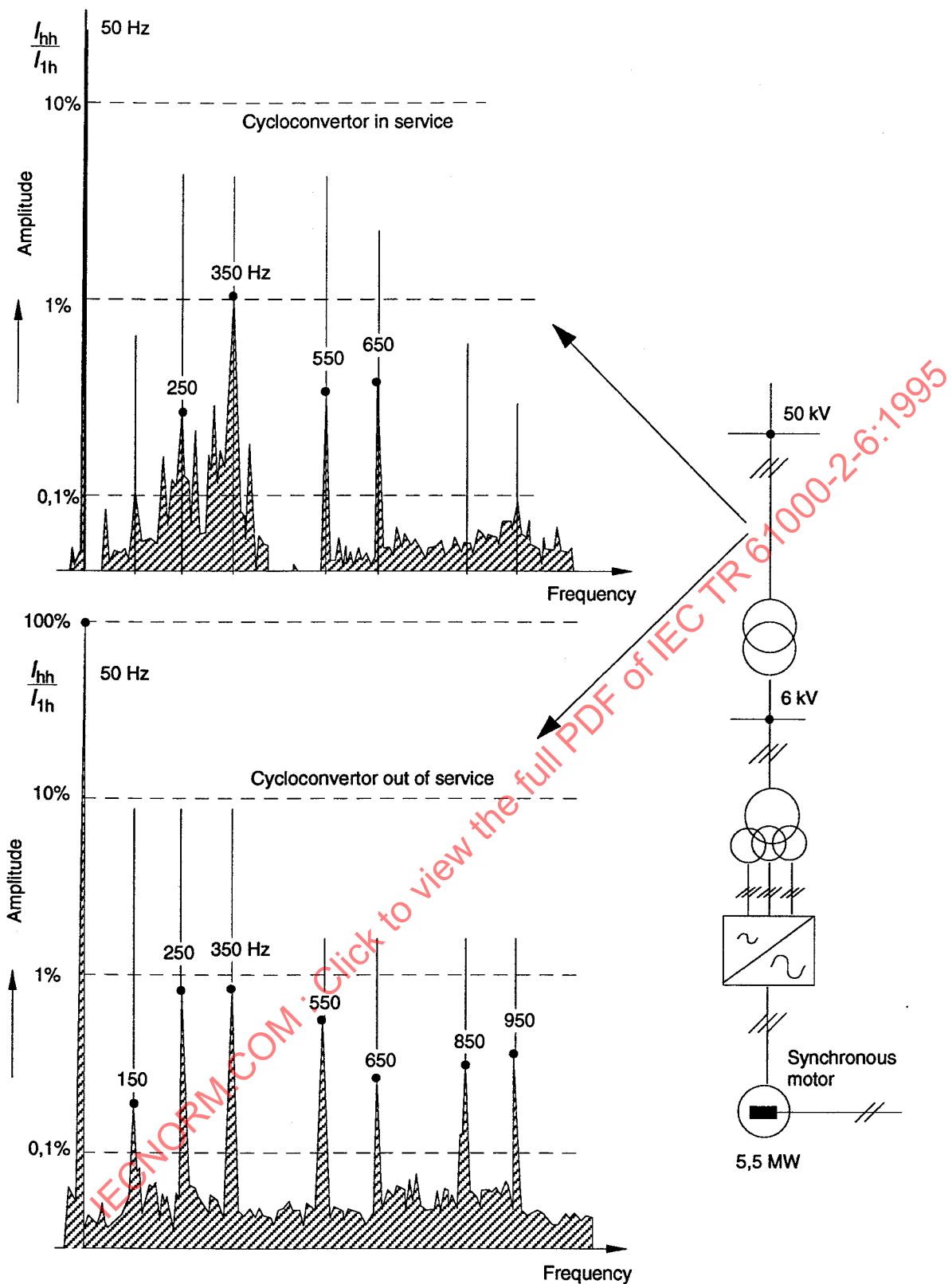
Figure 4 — Interharmonic frequencies generated by a direct convertor

 $f_L = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_A = 2,5 \text{ Hz}$ ,  $p_L = 6$ 

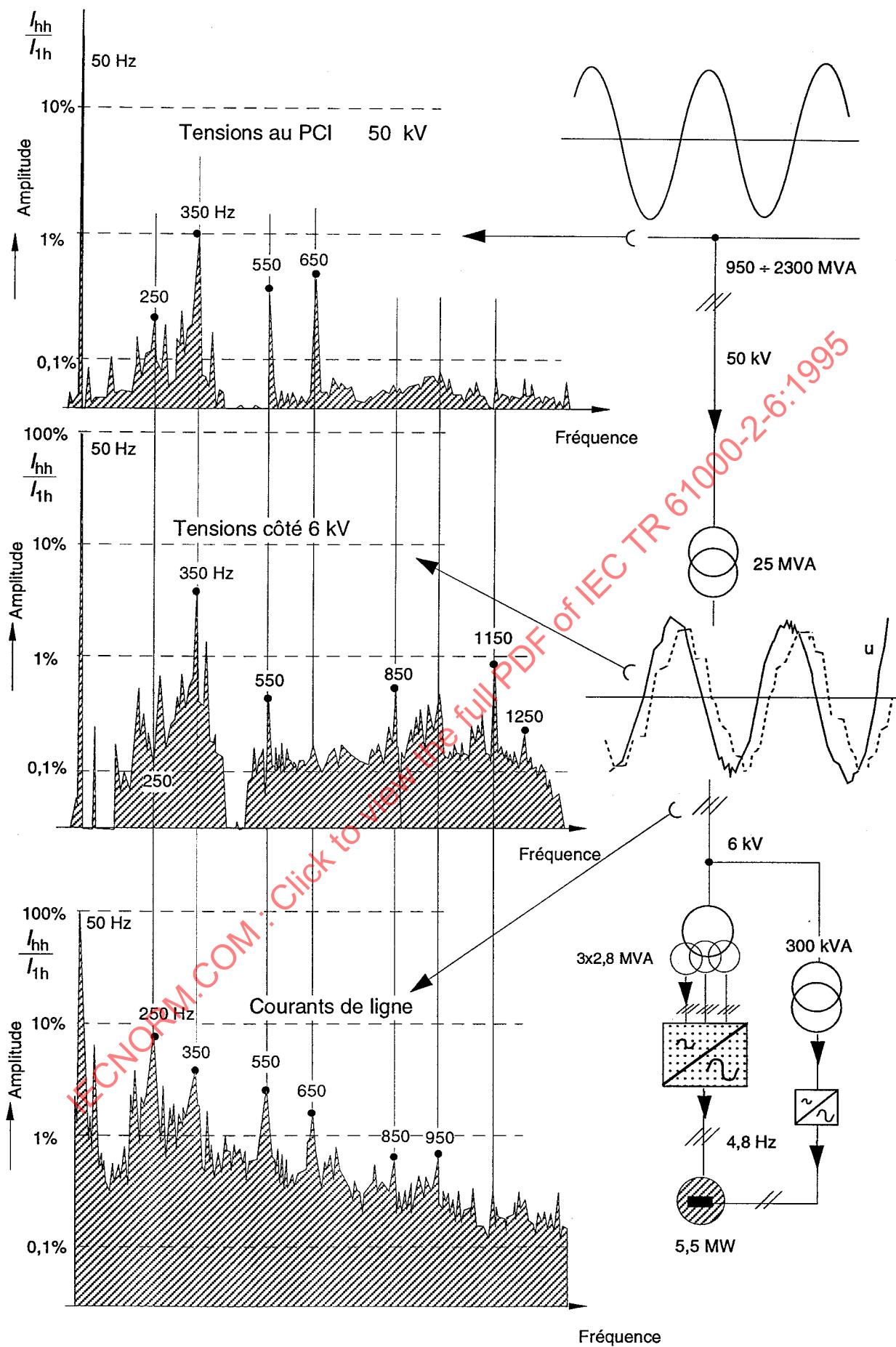
IEC/Norm Committee Click to view the full PDF of IEC TR 6000-2-6:1995



**Figure 5 — Mesure des tensions harmoniques et interharmoniques au point commun de raccordement d'un cycloconvertisseur de 5,5 MW**



**Fig. 5 - Measurement of harmonic and interharmonic voltages at the point of common coupling of a 5,5 MW cycloconverter drive**



**Figure 6 — Mesure des tensions harmoniques et interharmoniques au point commun de raccordement et aux bornes 6 kV d'un transformateur. Même système qu'à la figure 5**

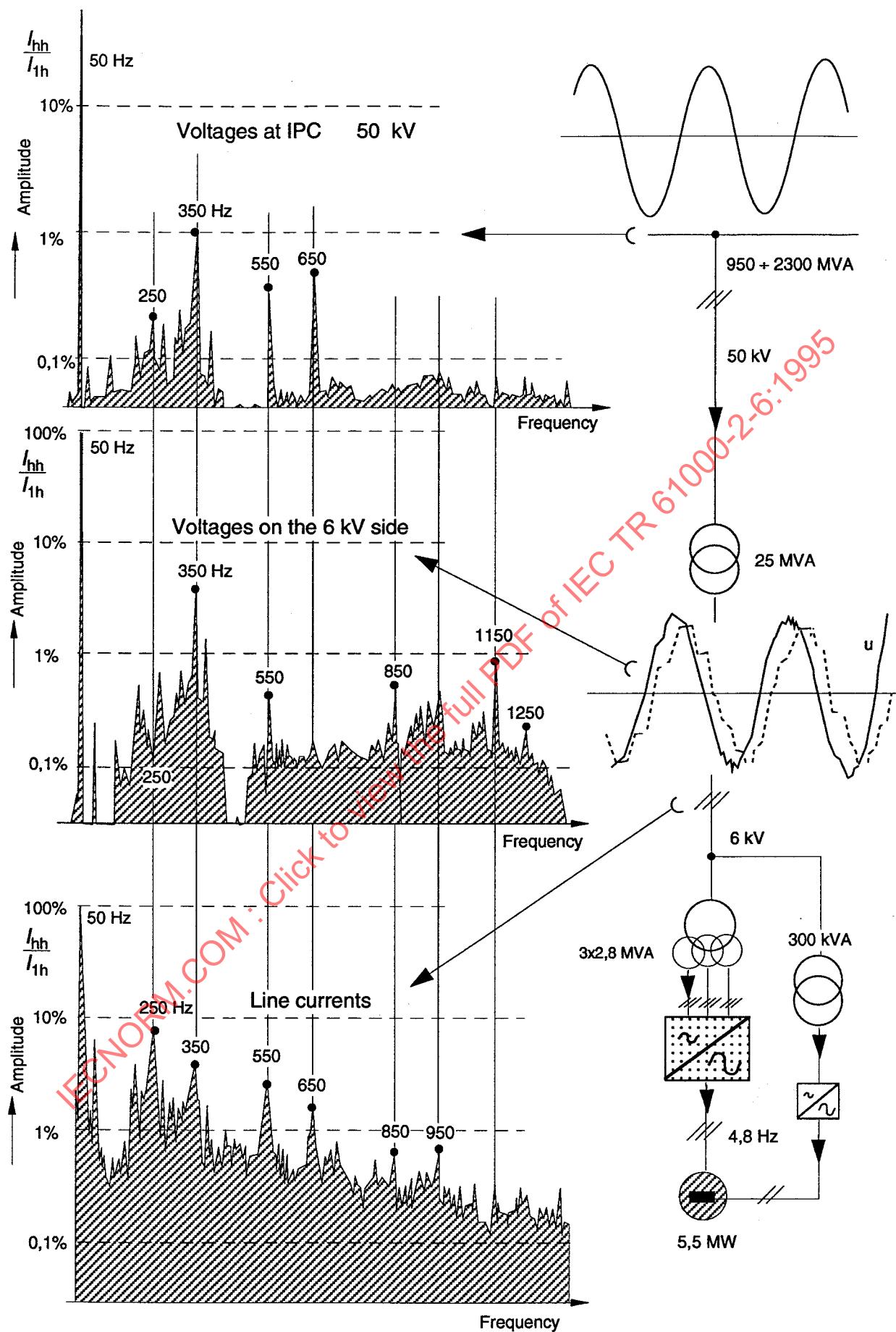
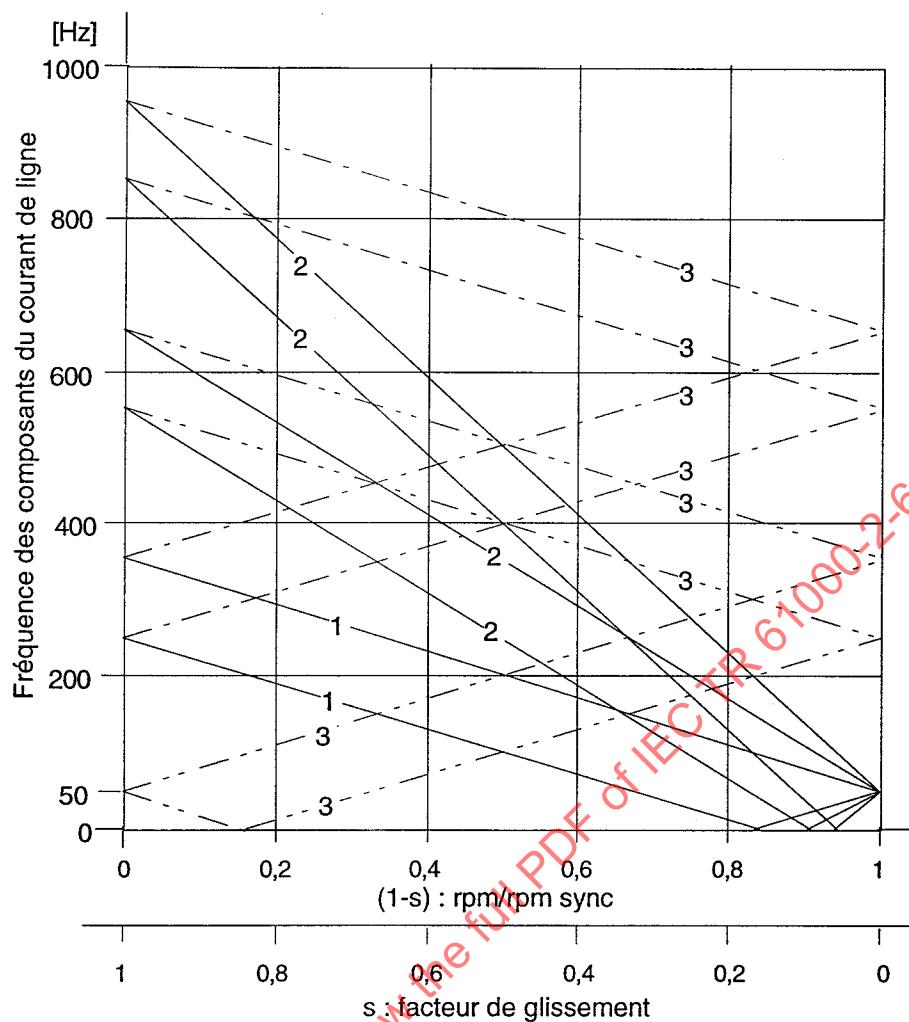
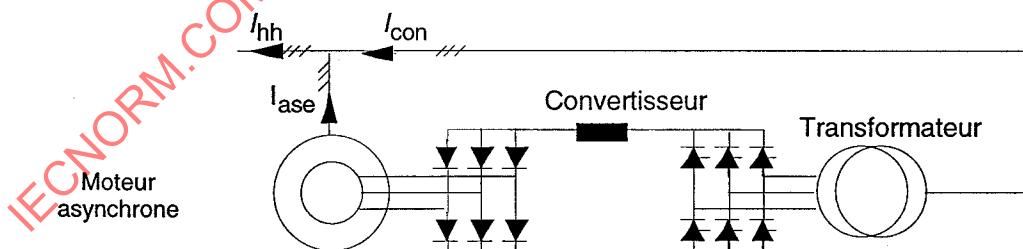


Fig. 6 - Measurement of harmonic and interharmonic voltages and currents at the point of common coupling and the 6 kV terminals of the transformer. Same system as in Fig. 5

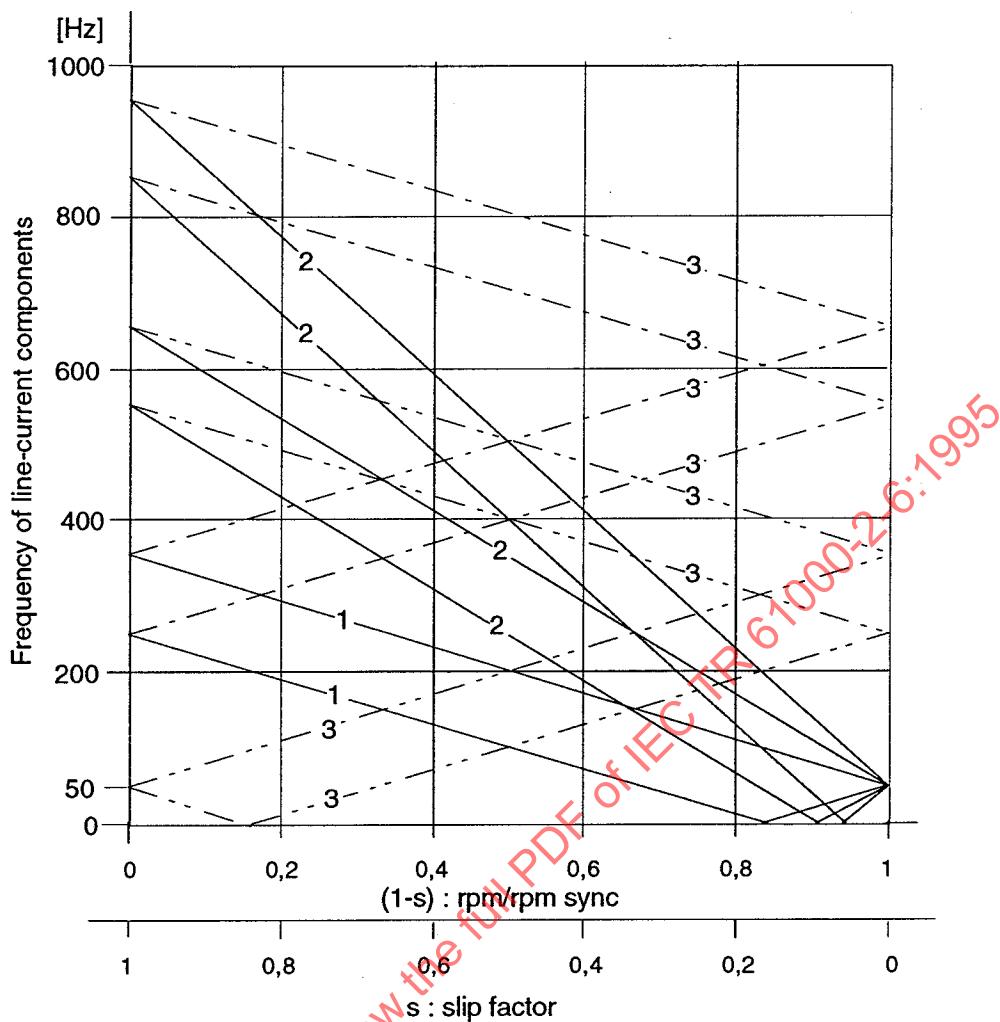


- a) Composants spectraux dans le courant de ligne en fonction du facteur de glissement  $s$ , ou le rapport de vitesse  $(1-s)$
- 1) Composantes de fréquence commune à  $I_{\text{ase}}$  et  $I_{\text{con}}$
  - 2) Composantes de fréquence de  $I_{\text{ase}}$  seulement
  - 3) Composantes de fréquence de  $I_{\text{con}}$  seulement

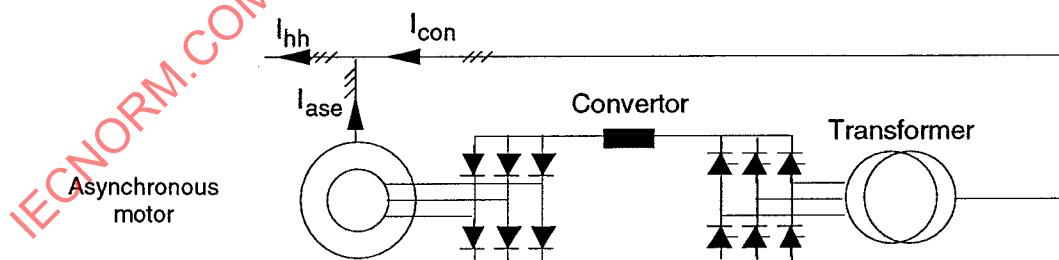


- b) Schéma de principe

Figure 7 — Cascade hyposynchrone



- a) Spectral components in the line current as a function of the slip factor  $s$ , or of the speed ratio  $(1-s)$
- 1) Frequency components common to  $I_{ase}$  and  $I_{con}$
  - 2) Frequency components of  $I_{ase}$  only
  - 3) Frequency components of  $I_{con}$  only



b) Schematic diagram

Figure 7 — Subsynchronous cascade

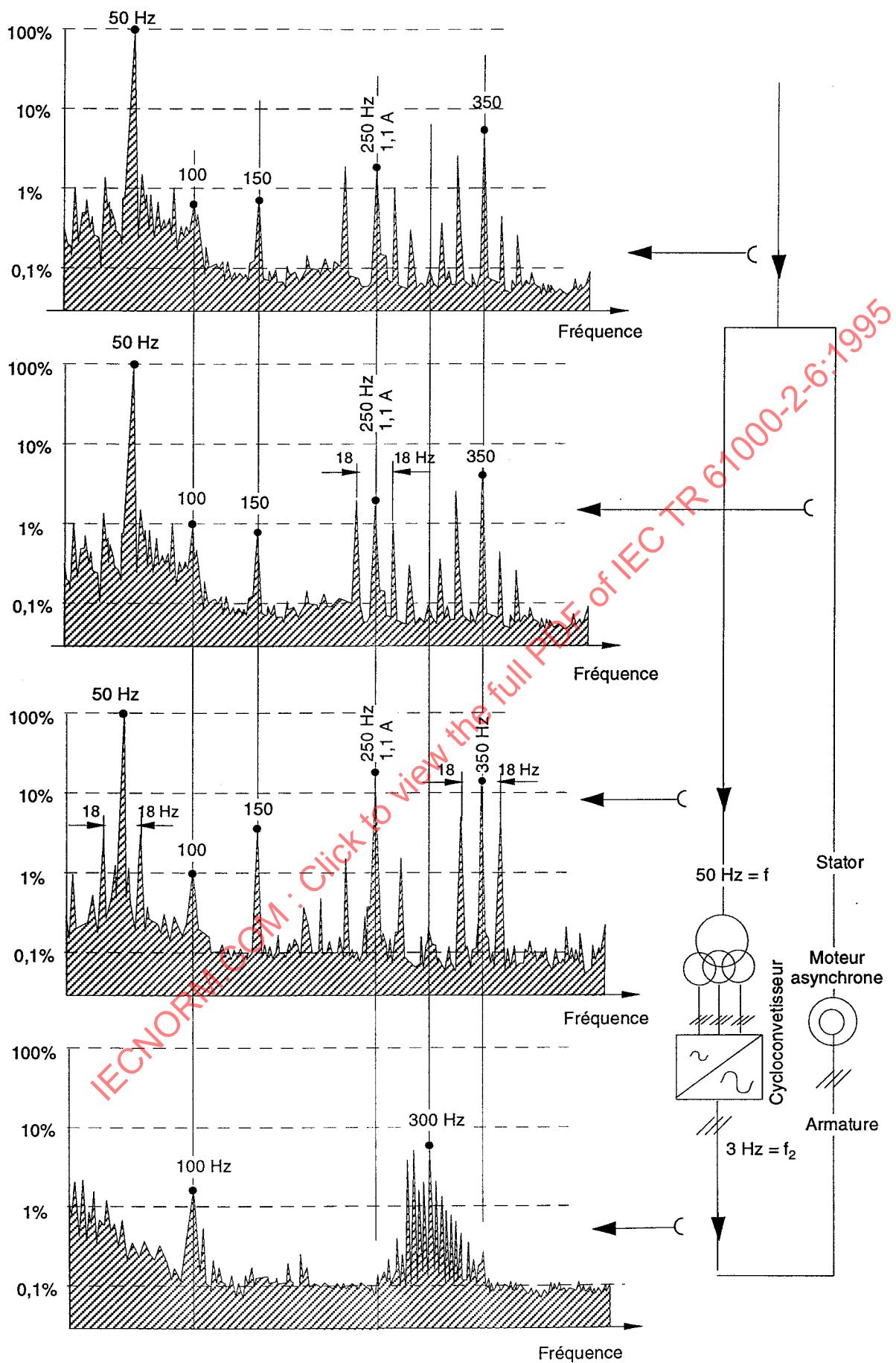


Figure 8 — Courants harmoniques et interharmoniques mesurés sur un entraînement cascade hyper / hyposynchrone

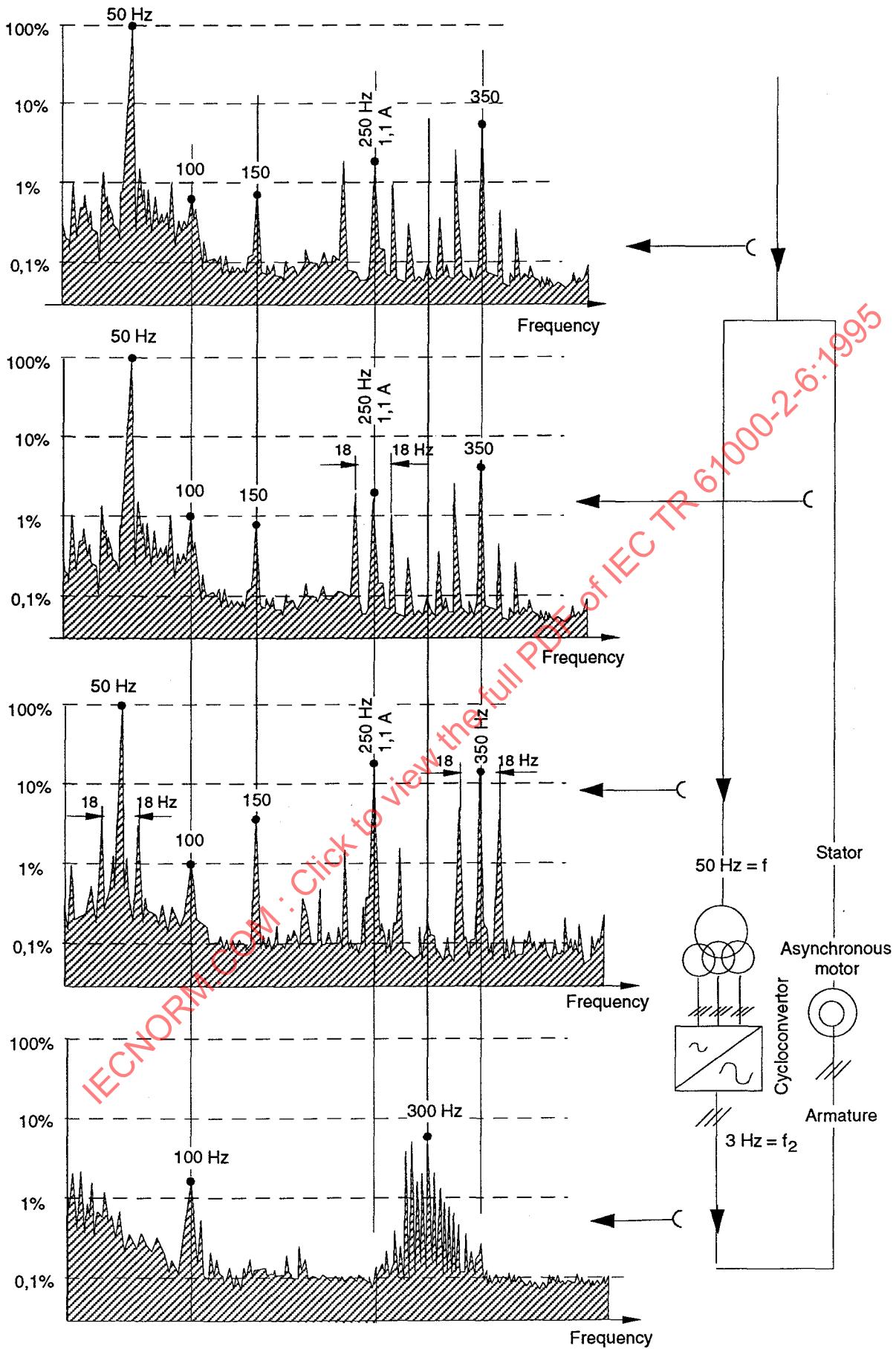
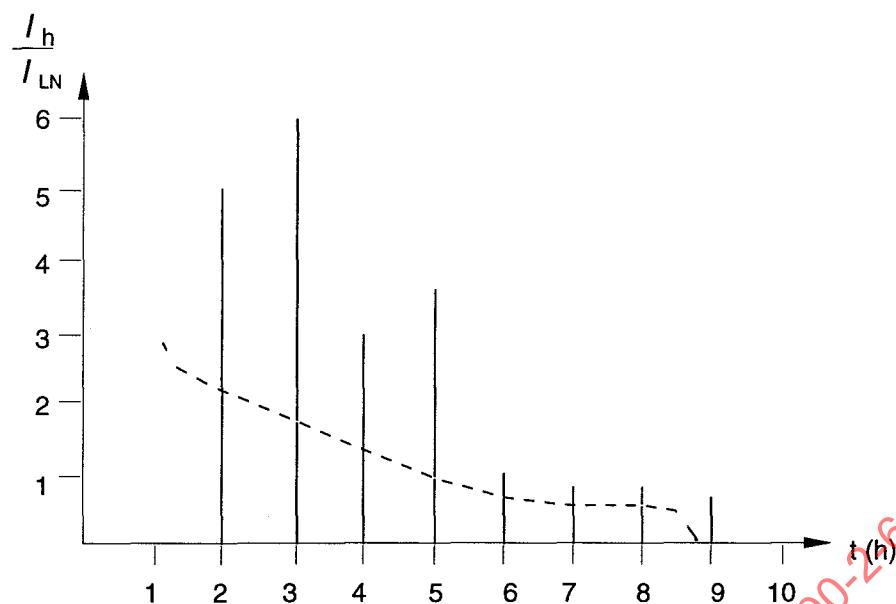
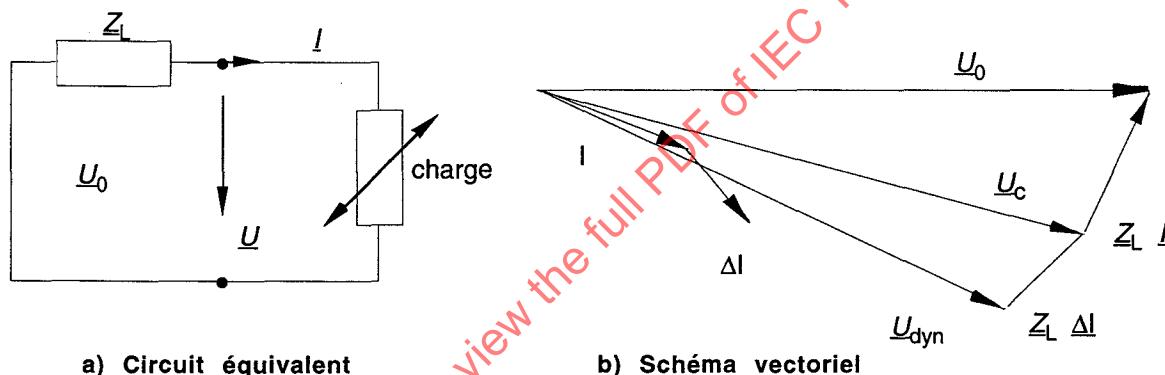


Figure 8 — Harmonic and interharmonic currents measured on a super/sub-synchronous cascade drive



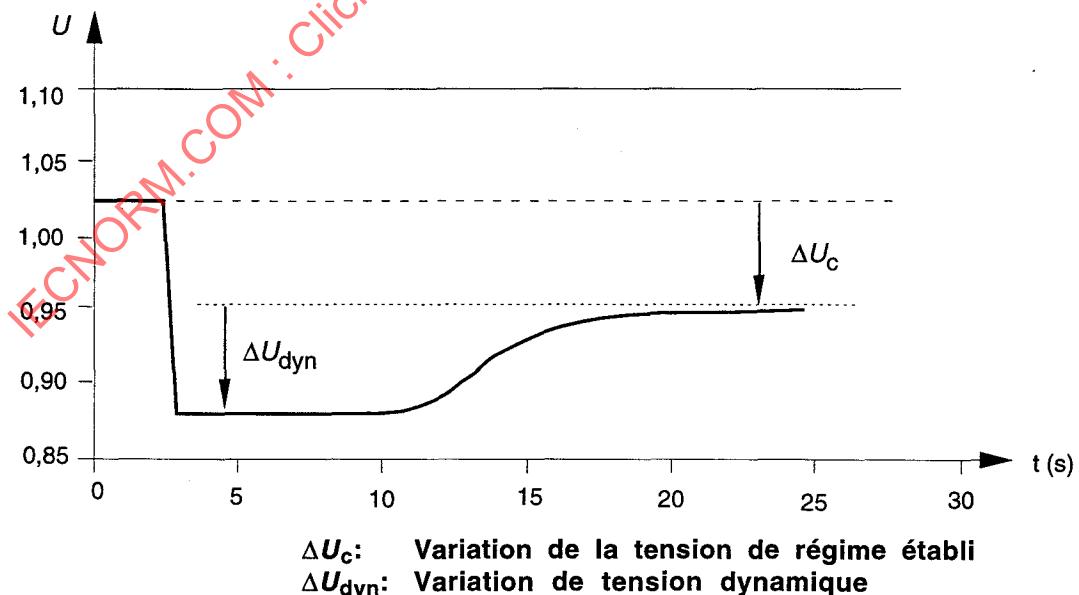
**Figure 9 — Exemple de spectre continu et de raies pour un four à arc (amplitude  $I_h/I_{LN}$  par rapport au courant assigné du four et en fonction des rangs harmoniques de 50 Hz, largeur de bande 1 Hz)**



a) Circuit équivalent

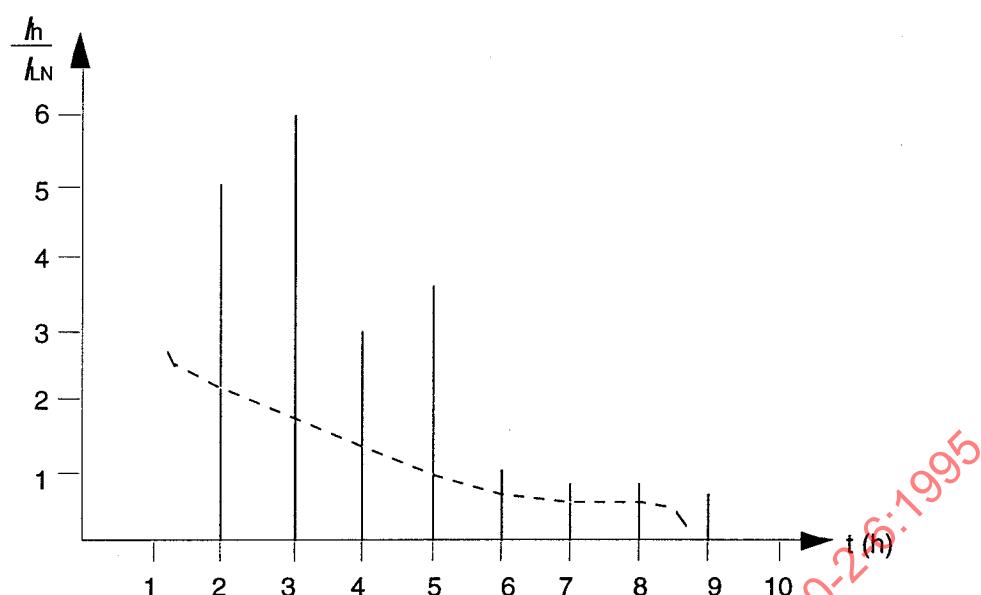
b) Schéma vectoriel

**Figure 10 — Régime établi et variations de tension dynamiques**

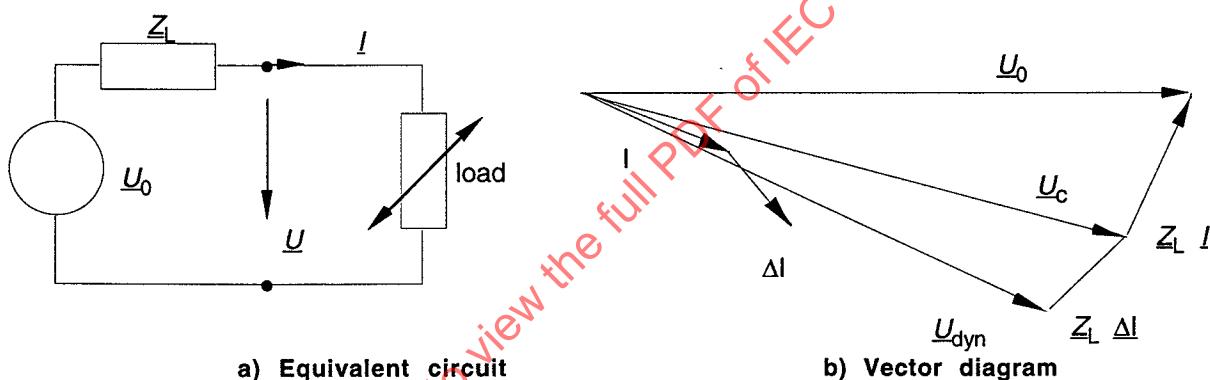


$\Delta U_c$ : Variation de la tension de régime établi  
 $\Delta U_{dyn}$ : Variation de tension dynamique

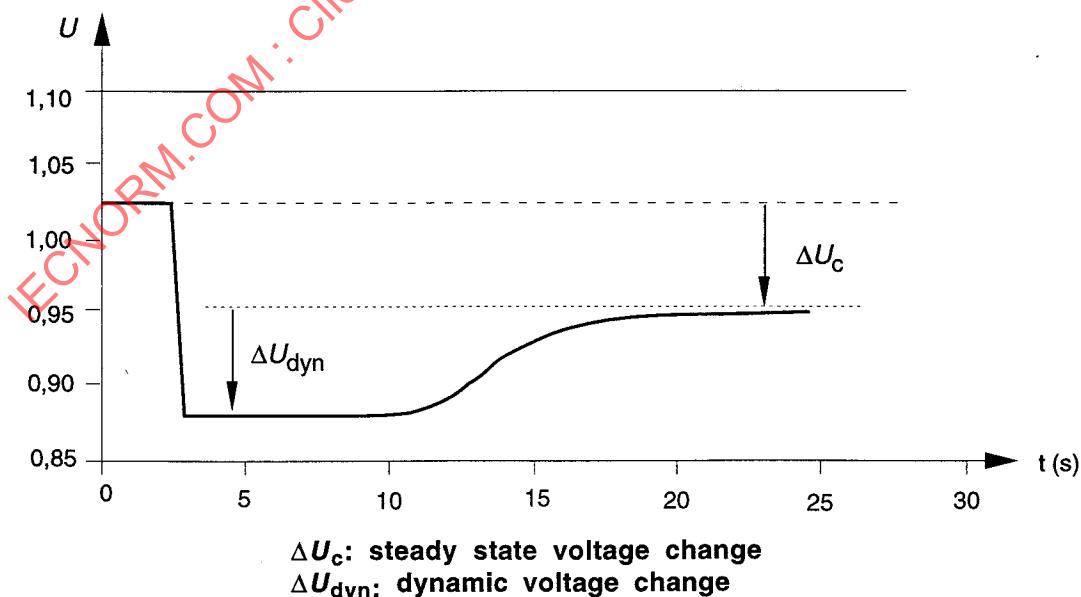
**Figure 11 — Régime établi et variations de tension dynamiques**



**Figure 9 — Example of line and continuous spectra for arc furnace  
(amplitude  $I_h/I_{LN}$  with respect to the nominal furnace current as a function  
of harmonic of 50 Hz, bandwidth 1 Hz)**



**Figure 10 — Steady state and dynamic voltage changes**



**Figure 11 — Steady state and dynamic voltage changes**

**Annexe A  
(informative)  
Émission harmonique**

**A.1 Caractéristique de la charge et émission harmonique**

La variation dépendant typiquement du temps de différents types de charge et les perturbations principalement émises sont les suivantes:

- Les variateurs et alimentations de traction, les convertisseurs destinés aux fours à arc à courant alternatif et les convertisseurs de machines à souder en courant continu, représentent une charge qui varie entre un régime établi et un régime changeant fréquemment autant que rapidement. La pointe de courant peut atteindre jusqu'à trois fois le courant assigné. En plus des courants harmoniques, des fluctuations de tensions et des interharmoniques transitoires peuvent être introduits.
- Certaines de ces applications produisent un courant élevé répétitif de courte durée, c'est le cas de la soudure par points, ou subissent des courts-circuits plus ou moins fréquents côté charge, dans les dépoussiéreurs électrostatiques par exemple, ce qui provoque des fluctuations de tension.
- Les charges qui varient lentement se retrouvent dans les processus d'électrothermie pour l'affinage, le chauffage et l'excitation de machines ou d'enroulements d'électroaimants émettant des courants harmoniques lorsque l'on utilise des convertisseurs. Dans ces cas-là, le courant assigné n'est en général pas dépassé.
- Les charges quasi constantes sont produites par les processus électrochimiques, tels que l'électrolyse, la galvanisation et le décapage des métaux, par les alimentations haute tension, par les valves de transmission, par les alimentations sans interruption et par les dispositifs d'éclairage émettant des courants harmoniques de façon permanente.
- Les processus électrothermiques employant des arcs tels que les fours à arc en alternatif, pour la soudure ou la fusion, constituent des charges avec de très fortes variations. Ils produisent un spectre de courants harmoniques et interharmoniques, une fluctuation de tension et un déséquilibre, tout cela variant de façon aléatoire. En cas de court-circuit d'arc, le courant peut atteindre 1,5 à 2 fois sa valeur assignée.
- Les gradateurs courant alternatif, employés comme compensateurs statiques sont généralement associés à des fours à arc pour compenser leur déséquilibre et la fluctuation de puissance réactive. De plus, des courants harmoniques et interharmoniques variant très fortement se produisent. Des gradateurs à courant alternatif employés comme démarreurs moteurs peuvent produire des harmoniques importants de façon transitoire.
- La mise sous tension de machines asynchrones ou de transformateurs produit des harmoniques transitoires, des creux de tension et un déséquilibre. La mise sous tension de condensateurs ou filtres produit des courants interharmoniques transitoires et des creux de tension. Dans les deux cas, la pointe de courant peut être bien supérieure à la valeur crête assignée.

**Annex A**  
**(informative)**  
**Harmonic emission**

#### A.1 Load characteristic and harmonic emission

Typical time dependent variation of different types of load and the disturbances mainly emitted are as follows.

- Drives and traction supplies, convertors as for a.c. arc furnace and for d.c. welding convertors, form a load which varies between steady state, and frequent as well as rapid changes. The peak current may rise up to three times the rated current. Besides harmonic currents, voltage fluctuation and transient interharmonics may be introduced.
- Some of these applications produce a repetitive high short time current, for example in spot welding, or suffer from more or less frequent short-circuits on the load side, as in precipitators, thus causing voltage fluctuation.
- Slowly changing loads are electro-thermal processes for refining, heating and the excitation of machines or magnet coils emitting harmonic currents where convertors are applied. In these cases, the rated current is normally not exceeded.
- Rather constant load is given by electro-chemical processes, such as for electrolysis, galvanization and metal pickling, by high voltage supplies for transmitter valves, by UPS, and by illumination devices emitting continuously harmonic currents.
- Electro-thermal processes using arcs such as in d.c. arc furnaces, for welding, or melting are strongly changing loads. They produce a band of harmonic and interharmonic currents, voltage fluctuation, and unbalance, all randomly altering. In the case of a shorted arc, the current may increase to between 1,5 and 2 times its rated value.
- AC controllers as static compensators are normally associated with arc furnaces to compensate for their unbalance and reactive power fluctuation. In addition, heavily fluctuating harmonic and interharmonic currents are produced. AC controllers as motor-starters may produce high harmonics transiently.
- Switching on induction machines or transformers produces transient harmonics, voltage dips and unbalance, switching on capacitors or filters produces transient interharmonic currents and voltage dips. In all cases, the peak current can be far beyond the peak of the rated value.

## A.2 Données types d'émission des convertisseurs

Les données de base se trouvent dans la CEI 146-1 et la CEI 146-2.

Comme première approche, les considérations suivantes peuvent s'appliquer.

- A.2.1** Ponts convertisseurs triphasés pour l'alimentation des charges en courant continu dans lesquels le courant continu est filtré par inductance comme présenté sur les figures A.1a et A.2a.

En général, les convertisseurs commandés, montage en pont triphasé (B6) sont utilisés et fonctionnent avec du courant continu ininterrompu; on donne donc une plage de valeurs pour le montage (B6). Ces valeurs dépendent de l'angle de retard de commande  $\alpha$  ou de la tension continue  $U_d/U_{di}$ , de la puissance relative de court-circuit  $r$  et de l'ondulation du courant continu. Le niveau de filtrage du courant continu est représenté par le rapport:

$$\left( X_d + 2 X_L \right) \frac{I_d}{U_{di}} \quad (\text{A.1})$$

où

$X_d$  est la réactance côté courant continu à la fréquence de ligne, y compris la réactance de charge;

$X_L$  est la réactance côté courant alternatif dans chaque phase à la fréquence de ligne, y compris la réactance de la ligne et celle du transformateur ou de l'inductance de commutation (voir figures A.1.1 et A.1.3);

$I_d$  est le courant continu (valeur moyenne);

$U_{di}$  est la tension continue idéale à vide à  $\alpha = 0$ .

$$U_{di} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_L \quad (\text{A.2})$$

où

$U_L$  est la tension réelle entre phases (valeur efficace);

$U_d$  est la tension continue réelle (valeur moyenne).

$$\frac{U_d}{U_{di}} \approx \cos \alpha - d_x \quad (\text{A.3})$$

où

$\alpha$  est l'angle de retard de commande;

$d_x$  est la variation inductive de tension.

$$d_x = \frac{3}{\pi} \frac{I_d X_L}{U_{di}} \quad (\text{A.4})$$

$R_{sc}$  est le rapport de court-circuit; rapport entre la puissance de court-circuit côté alternatif et la puissance en courant continu du convertisseur au point de fonctionnement idéal ( $\alpha = 0$ ).

## A.2 Typical emission data of convertors

The basic data are found in IEC 146-1 and IEC 146-2.

As a first approach, the following considerations may apply.

### A.2.1 Three-phase bridge convertors feeding a d.c. load where the d.c. current is smoothed inductively, as shown in figures A.1a and A.2a.

Mostly controlled convertors in three-phase bridge connection (B6) are used and operating with non-intermittent d.c. current, therefore a range of their values for B6 arrangement is given. They depend on the trigger delay angle  $\alpha$  or relative d.c. voltage  $U_d/U_{di}$ , on the short-circuit ratio  $r$ , and on the ripple of the d.c. current. The degree of the d.c. current smoothing is represented by the ratio:

$$\left( X_d + 2 X_L \right) \frac{I_d}{U_{di}} \quad (\text{A.1})$$

where

$X_d$  is the d.c. side reactance at line frequency, including load side reactance;

$X_L$  is the a.c. side reactance in each phase at line frequency, including the reactance of the line and of a transformer or a commutating reactor (see figures A.1.1 and A.1.3);

$I_d$  is the d.c. current (mean value);

$U_{di}$  is the ideal no load d.c. voltage at  $\alpha = 0$ .

$$U_{di} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_L \quad (\text{A.2})$$

where

$U_L$  is the actual line-to-line voltage (r.m.s value);

$U_d$  is the actual d.c. voltage (mean value).

$$\frac{U_d}{U_{di}} \approx \cos \alpha - d_x \quad (\text{A.3})$$

where

$\alpha$  is the trigger delay angle;

$d_x$  is the inductive direct voltage regulation.

$$d_x = \frac{3}{\pi} \frac{I_d X_L}{U_{di}} \quad (\text{A.4})$$

$R_{sc}$  is the short-circuit ratio, ratio of the short-circuit power at the valve side, and the d.c. power of the convertor at the ideal operating point ( $\alpha = 0$ ).

$$R_{sc} = \frac{U_L^2}{X_L} \cdot \frac{1}{U_{d6} I_d} = \frac{\pi}{6} \frac{1}{d_x} \quad (A.5)$$

où

- $I_{d6}$  est la composante harmonique de rang 6 (en valeur efficace) du courant continu;
- $I_1$  est le composant fondamental du courant (en valeur efficace) de l'alimentation alternative.

$$I_1 \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{6} I_d \quad (A.6)$$

où

- $I_h$  est la composante harmonique du courant (en valeur efficace) de l'alimentation alternative;
- $h$  est le rang harmonique,  $h = 6 n \pm 1 = 1, 5, 7, 11, 13, \dots$ ;
- $n$  est l'entier naturel,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

En négligeant toute ondulation du courant continu ( $I_{d6} = 0$ ) et phénomène de commutation, les courants harmoniques relatifs se montent à :

$$\frac{I_h}{I_1} = \frac{1}{h} \quad (A.7)$$

Les facteurs négligés influencent le résultat de cette formule comme suit:

- La composante harmonique relative côté réseau est présentée par les figures A.4a et A.4b pour des rangs d'harmoniques  $h = 5$  et  $7$  suivant l'angle de retard de réglage  $\alpha$ . Les paramètres sont le niveau de filtrage = 2, 0,4 et 0,1 pour le rapport de la puissance de court-circuit  $R_{sc} = 20$  et 10. Les valeurs pour les harmoniques supérieures sont données aux tableaux A.1, A.2 et A.3.

Pour les valeurs précises avec niveau de filtrage > 2, voir la CEI 146-1-2, figure 7.

- Un rapport de puissance de court-circuit inférieur génère un peu moins de composantes harmoniques  $I_h/I_1$  ceci grâce à un angle de recouvrement augmenté.
- Avec une plus grande ondulation du courant continu, c'est-à-dire un niveau de filtrage inférieur, la composante harmonique relative de rang 5 augmente notablement au-dessus de la valeur théorique  $I_5/I_1 = 1/5$ . Ceci s'applique particulièrement en fonctionnement avec du courant continu intermittent. De la même manière, la composante relative de rang 11 du courant de ligne devient supérieure à  $1/11$  dans le cas d'un convertisseur à 12 pulsations avec deux montages B6 en série, mais elle est presque constante dans le cas de deux montages B6 en parallèle.
- Des harmoniques non caractéristiques de rang entier mais tel que:

$$h \neq 6 n \pm 1 \quad (A.8)$$

peuvent apparaître à cause d'un déséquilibre dans les tensions ou les impédances de ligne ou dans les angles de retard de commande.

$$R_{sc} = \frac{U_L^2}{X_L} \cdot \frac{1}{U_{di} I_d} = \frac{\pi}{6} \frac{1}{d_x} \quad (A.5)$$

where

$I_{d6}$  is the harmonic component of order 6 (r.m.s value) of current ripple;

$I_1$  is the fundamental component of the current (r.m.s value) of the a.c. supply.

$$I_1 \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{6} I_d \quad (A.6)$$

where

$I_h$  is the harmonic component of current (r.m.s value) of the a.c. supply;

$h$  is the harmonic order,  $h = 6n \pm 1 = 1, 5, 7, 11, 13, \dots$ ;

$n$  is the natural number,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Neglecting any d.c. current ripple ( $I_{d6} = 0$ ) and commutation phenomena the relative harmonic currents amount to:

$$\frac{I_h}{I_1} = \frac{1}{h} \quad (A.7)$$

The neglected factors influence the results in deviations from the formula as follows.

- The line side relative harmonic component is shown in the figures A.4a and A.4b for the harmonic orders  $h = 5$  and  $7$  depending on the trigger delay angle  $\alpha$ . Parameters are the smoothing degree = 2, 0.4, and 0.1 for relative short-circuit power  $R_{sc} = 20$  and 10. Values for higher harmonics are given tables A.1, A.2 and A.3.

For exact values with smoothing degree > 2, see IEC146-1-2, figure 7.

- A lower relative short-circuit causes somewhat less harmonic components  $I_h/I_1$ , due to an increased overlap angle.
- With increasing d.c. current ripple, that is a lower smoothing degree, the relative 5th harmonic content notably increases above the theoretical value of  $I_5/I_1 = 1/5$ . This applies especially to operation with pulsating d.c. current. Correspondingly, the relative content of the 11th order of the line current is increased above  $1/11$  in the case of a 12 pulse convertor with two B6 connections in series, but it is nearly constant in case of two B6 connections in parallel.
- Non-characteristic harmonics of integer order, but:

$$h \neq 6n \pm 1 \quad (A.8)$$

may appear because of unbalance in the line voltages, or impedances or in the trigger delay angles.

- Fonctionnement en 12 pulsations.

Dans le cas d'une connexion en série ou en parallèle de deux ponts B6 alimentés avec déphasage de  $30^\circ$  et à charge équilibrée, les harmoniques du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> rang sont partiellement neutralisés. Des composantes harmoniques de rangs 4 et 5 pouvant atteindre 4% sont à prévoir en raison de la répartition inégale de la tension ou du courant continu entre les ponts.

En ce qui concerne l'angle de phase des courants harmoniques côté réseau, les courants harmoniques  $I_h$  du même rang  $h$  doivent être additionnés vectoriellement pour le calcul de la perturbation résultant du fonctionnement simultané de plusieurs convertisseurs.

L'angle de phase  $\phi_h$  représente la différence entre les passages à zéro par valeurs décroissantes des fondamentaux de la tension simple et du courant harmonique de fréquence  $h\omega_N$ .

Un  $\phi_h$  positif indique un retard de phase du courant harmonique  $I_h$ .

Dans un premier temps, on applique  $\phi_h \approx \pm h \alpha$  pour  $h = 5$  et  $7$ ; ainsi les angles de phase des rangs supérieurs sont bien répartis. De ce fait, le signe positif est valable pour un convertisseur avec transformateur en couplage Y/D ou D/Y, le signe négatif s'applique dans le cas de convertisseurs branchés directement ou avec transformateurs à couplage Y/Y ou  $\Delta/\Delta$ .

- a) Courant harmonique relatif  $I_h/I_1$  dans l'alimentation alternative

Il figure dans les tableaux A.1, A.2 et A.3 pour trois valeurs de tension continues relatives  $U_d/U_{di}$  ainsi que les angles de retard de réglage correspondants  $\alpha$  et pour l'ondulation résultante du courant continu  $I_{d6}/I_d$  pour l'harmonique de rang 6 avec un rapport de court-circuit  $R_{sc} = 20$ .

La plage de fonctionnement habituelle est:

$U_d/U_{di} \approx 0$        $\alpha \approx 90^\circ$  : tension continue bas niveau, commandée

$U_d/U_{di} \approx 0,84$        $\alpha \approx 30^\circ$  : tension continue moyenne, commandée

$U_d/U_{di} \approx 0,975$        $\alpha \approx 0^\circ$  : tension continue haute, non commandée

- a<sub>1</sub>) Dans le cas d'un filtrage important du courant continu

$$(X_d + 2 X_L) \frac{I_d}{U_{di}} = 2$$

Tableau A.1 — Courant harmonique relatif à un bas niveau d'ondulation en courant continu.  $R_{sc} = 20$

| $\frac{U_d}{U_{di}}$ | $\alpha$   | $\frac{I_{d6}}{I_d}$ | $h$               | 5    | 7    | 11   | 13   | 17   | 19   | 23   | 25   |
|----------------------|------------|----------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0                    | $90^\circ$ | 0,021                |                   | 0,21 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| 0,84                 | $30^\circ$ | 0,012                | $\frac{I_h}{I_d}$ | 0,21 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,03 |
| 0,975                | $0^\circ$  | 0,005                |                   | 0,19 | 0,12 | 0,08 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

- 12 pulse operation.

In the cases of parallel or series arrangement of two B6 connections fed with 30° phase-shift and equally loaded, 5th and 7th harmonics are partially cancelled; a residual harmonic content of 5th and 7th order of up to 4 % is to be expected, because of uneven d.c. voltage or current share between the bridges.

As regards the phase angle of harmonic currents on the line side, the harmonic currents  $I_h$  of the same order  $h$  are to be added vectorially for the calculation of the perturbation resulting from simultaneous operation of several converters.

The phase angle  $\phi_h$  is the difference between the positive-going zero crossings of the fundamental phase-to-neutral voltage, and the harmonic current referred to the harmonic frequency  $h\omega_N$ .

Positive  $\phi_h$  means phase lag of the harmonic current  $I_h$ .

As a first approach applies  $\phi_h \approx \pm h\alpha$  for  $h = 5$  and 7; therefore the phase angles of higher harmonic orders are well spread. Thereby, the positive sign is valid for converter transformer in Y/D or D/Y, negative sign applies for direct connection of converters and for converter transformers in Y/Y or Δ/Δ connection, respectively.

a) Relative harmonic current  $I_h/I_1$  in the a.c. supply

Shown in tables A.1, A.2 and A.3 are three values of relative d.c. voltage  $U_d/U_{di}$ , corresponding trigger delay angles, and resulting d.c. current ripple  $I_{d6}/I_d$  for the 6th harmonic component of the direct current with a short-circuit ratio  $R_{sc} = 20$ .

The usual range of operation is:

$U_d/U_{di} \approx 0$        $\alpha \approx 90^\circ$  : controlled low d.c. voltage

$U_d/U_{di} \approx 0,84$        $\alpha \approx 30^\circ$  : controlled usual d.c. voltage

$U_d/U_{di} \approx 0,975$        $\alpha \approx 0^\circ$  : uncontrolled d.c. voltage

a<sub>1</sub>) In the case of a high smoothing of the d.c. current

$$(X_d + 2 X_L) \frac{I_d}{U_{di}} = 2$$

Table A.1 — Relative harmonic current at low d.c. ripple.  $R_{sc} = 20$

| $\frac{U_d}{U_{di}}$ | $\alpha$ | $\frac{I_{d6}}{I_d}$ | $h$               | 5    | 7    | 11   | 13   | 17   | 19   | 23   | 25   |
|----------------------|----------|----------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0                    | 90°      | 0,021                | $\frac{I_h}{I_1}$ | 0,21 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| 0,84                 | 30°      | 0,012                |                   | 0,21 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,03 |
| 0,975                | 0°       | 0,005                |                   | 0,19 | 0,12 | 0,08 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

a2) Dans le cas d'un filtrage moyen du courant continu

$$(X_d + 2 X_L) \frac{I_d}{U_{di}} = 0,4$$

**Tableau A.2 — Courant harmonique relatif à niveau moyen d'ondulation en courant continu.  $R_{sc} = 20$**

| $\frac{U_d}{U_{di}}$ | $\alpha$ | $\frac{I_{d6}}{I_d}$ | $h$             | 5    | 7    | 11   | 13   | 17   | 19   | 23   | 25   |
|----------------------|----------|----------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0                    | 90°      | 0,11                 | $\frac{h}{l_1}$ | 0,27 | 0,06 | 0,09 | 0,04 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,03 |
| 0,84                 | 30°      | 0,06                 |                 | 0,24 | 0,10 | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| 0,975                | 0°       | 0,03                 |                 | 0,20 | 0,11 | 0,06 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

a3) Dans le cas de filtrage faible du courant continu

$$(X_d + 2 X_N) \frac{I_d}{U_{di}} = 0,1$$

**Tableau A.3 — Courant harmonique relatif à un fort niveau d'ondulation courant continu.  $R_{sc} = 20$**

| $\frac{U_d}{U_{di}}$ | $\alpha$ | $\frac{I_{d6}}{I_d}$ | $h$             | 5    | 7    | 11   | 13   | 17   | 19   | 23   | 25   |
|----------------------|----------|----------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0                    | 90°      | 0,43                 | $\frac{h}{l_1}$ | 0,48 | 0,17 | 0,09 | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |
| 0,85                 | 30°      | 0,23                 |                 | 0,35 | 0,04 | 0,09 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,01 |
| 0,98                 | 0°       | 0,11                 |                 | 0,25 | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

Valeurs intermédiaires pour courant harmonique d'alimentation alternatif pour:

$$0,1 \leq (X_d + 2 X_L) \frac{I_d}{U_{di}} \leq 2$$

Pour une évaluation plus précise voir [7] et [8] en annexe E.

a2) In the case of medium smoothing of the d.c. current

$$\left( X_d + 2 X_L \right) \frac{I_d}{U_{di}} = 0,4$$

**Table A.2 — Relative harmonic current at medium d.c. ripple.  $R_{SC} = 20$**

| $\frac{U_d}{U_{di}}$ | $\alpha$ | $\frac{I_{d6}}{I_d}$ | $h$             | 5    | 7    | 11   | 13   | 17   | 19   | 23   | 25   |
|----------------------|----------|----------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0                    | 90°      | 0,11                 | $\frac{h}{l_1}$ | 0,27 | 0,06 | 0,09 | 0,04 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,03 |
| 0,84                 | 30°      | 0,06                 |                 | 0,24 | 0,10 | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| 0,975                | 0°       | 0,03                 |                 | 0,20 | 0,11 | 0,06 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

a3) In the case of low smoothing of the d.c. current

$$\left( X_d + 2 X_N \right) \frac{I_d}{U_{di}} = 0,1$$

**Table A.3 — Relative harmonic component at high d.c. ripple.  $R_{SC} = 20$**

| $\frac{U_d}{U_{di}}$ | $\alpha$ | $\frac{I_{d6}}{I_d}$ | $h$             | 5    | 7    | 11   | 13   | 17   | 19   | 23   | 25   |
|----------------------|----------|----------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0                    | 90°      | 0,43                 | $\frac{h}{l_1}$ | 0,48 | 0,17 | 0,09 | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |
| 0,85                 | 30°      | 0,23                 |                 | 0,35 | 0,04 | 0,09 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,01 |
| 0,98                 | 0°       | 0,11                 |                 | 0,25 | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

Intermediate values for a.c. supply harmonic current for:

$$0,1 \leq \left( X_d + 2 X_L \right) \frac{I_d}{U_{di}} \leq 2$$

For more detailed evaluations, see [7] and [8] in annex E.

b) Angle de phase des courants harmoniques côté réseau

Dans le cas de courant continu bien filtré et avec:

$$u_{L-N} = U_{L-N} \sqrt{2} \sin(\omega_L t) \quad (\text{A.9})$$

$$i_{Lh} = I_h \sqrt{2} \sin(h\omega_L t - \phi_h) \quad (\text{A.10})$$

$$\alpha + \frac{u}{2} \approx \arccos\left(\frac{U_d}{U_{di}}\right) \quad (\text{A.11})$$

où

$u$  est l'angle de recouvrement;

$U_{L-N}$  est la tension entre phase et neutre de l'alimentation alternative;

$I_h$  est la phase de l'alimentation alternative;

$\omega_L$  est la pulsation de l'alimentation alternative.

L'angle de phase  $\phi_h$  peut être calculé de façon approximative suivant le couplage des enroulements du transformateur avec les formules.

- b<sub>1</sub>) Convertisseur branché directement au réseau ou par l'intermédiaire d'un transformateur en couplage étoile-étoile ou triangle-triangle.

(voir la figure A.5a pour la forme des ondes du courant et de la tension)

$$\phi_h \approx (180^\circ + \alpha + u/2) h \quad \text{pour } h = 5, 7, (17, 19)$$

$$\phi_h \approx (\alpha + u/2) h \quad \text{pour } h = 11, 13, (23, 25) \quad (\text{A.12})$$

- b<sub>2</sub>) Convertisseur branché au réseau par l'intermédiaire un transformateur en couplage étoile-triangle ou triangle-étoile (voir figure A.5b pour la forme des ondes du courant et de la tension).

$$\phi_h \approx (\alpha + u/2) h \quad \text{pour } h = 5, 7, 11, 13, \dots \quad (\text{A.13})$$

NOTE — Ces formules s'appliquent aux courants harmoniques de rangs 5 et 11 même en présence d'ondulations sur le courant continu. En ce qui concerne l'effet de l'ondulation de courant côté d.c. sur le courant harmoniques de rang 7 côté a.c., voir [8] en annexe E.

b) Phase angle of harmonic currents on the line side

In the case of well smoothed d.c. current and with:

$$U_{L-N} = U_{L-N} \sqrt{2} \sin (\omega_L t) \quad (A.9)$$

$$i_{Lh} = I_H \sqrt{2} \sin (h\omega_L t - \phi_h) \quad (A.10)$$

$$\alpha + \frac{u}{2} \approx \arccos \left( \frac{U_d}{U_{di}} \right) \quad (A.11)$$

where

$u$  is the overlap angle;

$U_{L-N}$  is the phase-neutral voltage of the a.c. supply;

$i_{Lh}$  is the phase current in the a.c. supply;

$\omega_L$  is the a.c. supply angular frequency.

The phase angle  $\phi_h$  may be calculated approximately, depending on the winding connection of a convertor transformer with the following relations.

b<sub>1</sub>) Convertor linked to the mains directly or via a transformer in Y/Y or D/D connection

(see figure A.5a for the waveforms of the current and of the voltage)

$$\phi_h \approx (180^\circ + \alpha + u/2) h \quad \text{for } h = 5, 7, (17, 19)$$

$$\phi_h \approx (\alpha + u/2) h \quad \text{for } h = 11, 13, (23, 25) \quad (A.12)$$

b<sub>2</sub>) Convertor linked to the mains via a transformer in Y/D or D/Y connection

(see figure A.5b for wave forms of current and voltage)

$$\phi_h \approx (\alpha + u/2) h \quad \text{for } h = 5, 7, 11, 13, \dots \quad (A.13)$$

NOTE — These formulae apply for harmonic current of orders 5 and 11, even in presence of d.c. ripple. As regards the effect of the current ripple at the d.c. side on harmonic current of order 7 at the a.c. side, see [8] in annex E.

**A.2.2 Ponts redresseurs triphasés pour l'alimentation des charges en courant continu à travers un filtre L-C**

Quand un convertisseur direct de tension est alimenté par un convertisseur commandé à travers un filtre avec une réactance de filtrage suffisamment importante, comme présenté à la figure A.1c, ce sont alors les informations relatives aux convertisseurs indirects qui s'appliquent. Un filtrage suffisant est réalisé lorsque:

$$2\omega_L > \omega_r$$

$$\text{avec } \omega_r = \sqrt{\frac{\omega_L}{C_d(X_d + 2X_L)}} \quad (\text{A.14})$$

où

$\omega_L$  est la fréquence angulaire de l'alimentation;

$\omega_r$  est la fréquence angulaire de résonance du filtre.

**A.2.3 Ponts convertisseurs triphasés pour l'alimentation des charges en courant continu avec filtrage par condensateur**

Quand le condensateur de filtrage est alimenté directement par un redresseur à diodes en branchement B6 comme représenté sur la figure A.2c, des courants harmoniques importants se produisent dans le cas de faibles réactances de ligne.

Les composantes harmoniques relatives dépendant de la puissance de court-circuit relative  $R_{SC}$  sont données dans le tableau A.4.

**Tableau A.4 — Courant harmonique relatif d'un redresseur à diodes (B6) alimentant un condensateur de forte valeur**

| $\frac{U_d}{U_{di}}$ | $R_{SC}$ | $h$               | 5    | 7    | 11   | 13   | 17    | 19   | 23   | 25   |
|----------------------|----------|-------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 1,02                 | 500      | $\frac{I_h}{I_1}$ | 0,86 | 0,70 | 0,35 | 0,22 | 0,09  | 0,09 | 0,07 | 0,05 |
| 1,00                 | 100      |                   | 0,64 | 0,40 | 0,09 | 0,09 | 0,05  | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| 0,97                 | 20       |                   | 0,30 | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,02  | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| 0,94                 | 10       |                   | 0,24 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,014 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

La figure A.6 présente les valeurs intermédiaires des harmoniques de rangs 5 et 7 sur le réseau a.c. Des résultats plus détaillés concernant le comportement de l'amplitude et de la phase sont donnés en [8] de l'annexe E.

Pour des valeurs précises, prenant également en compte l'ondulation de la tension continue, voir [9] et [10] en annexe E.

En négligeant l'ondulation de la tension, les plages des angles de phase des courants harmoniques de rang bas sont approximativement  $\phi_5 = 70^\circ \dots 135^\circ$  et  $\phi_7 = 90^\circ \dots 290^\circ$ , en supposant  $R_{SC} = 10 \dots 500$ .

### A.2.2 Three-phase bridge convertor feeding a d.c. load through a L-C filter

When a convertor with direct voltage link is fed by a controlled convertor via a filter with a sufficiently high smoothing reactor, as shown in figure A.1c, then the information relevant to indirect convertors apply. Sufficiently high smoothing is achieved when:

$$2 \omega_L > \omega_r$$

$$\text{with } \omega_r = \sqrt{\frac{\omega_L}{C_d (X_d + 2X_L)}} \quad (\text{A.14})$$

where

$\omega_L$  is the a.c. supply angular frequency;

$\omega_r$  is the resonance angular frequency of the filter.

### A.2.3 Three-phase bridge convertor feeding a d.c. load with a capacitor smoothing

When a high smoothing capacitance is directly fed by a diode rectifier in B6 connection, as shown in figure A.2c, high harmonic currents occur in the case of low a.c. supply reactance.

The relative harmonic components in dependance on the relative short-circuit power  $R_{sc}$  are shown in the table A.4.

**Table A.4 — Relative harmonic current of a diode rectifier (B6) feeding a high capacitance**

| $\frac{U_d}{U_{di}}$ | $R_{sc}$ | $h$               | 5    | 7    | 11   | 13   | 17    | 19   | 23   | 25   |
|----------------------|----------|-------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 1,02                 | 500      | $\frac{I_h}{I_1}$ | 0,86 | 0,70 | 0,35 | 0,22 | 0,09  | 0,09 | 0,07 | 0,05 |
| 1,00                 | 100      |                   | 0,64 | 0,40 | 0,09 | 0,09 | 0,05  | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| 0,97                 | 20       |                   | 0,30 | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,02  | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| 0,94                 | 10       |                   | 0,24 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,014 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

Intermediate values for a.c. supply harmonics of order 5 and 7 are shown in figure A.6. More detailed results concerning the behaviour of amplitude and phase are given in [8] of annex E.

For more detailed evaluations regarding also d.c. voltage ripple, see [9] and [10] in annex E.

Neglecting d.c. voltage ripple, the range of the phase angles of the lower order harmonic currents is approximately given for  $\phi_5 = 70^\circ \dots 135^\circ$  and for  $\phi_7 = 90^\circ \dots 290^\circ$ , where  $R_{sc} = 10 \dots 500$  is assumed.

Le niveau des harmoniques dépend beaucoup du filtrage du côté alternatif et continu et il convient de le demander au fabricant.

Les harmoniques de rangs bas (en particulier 3 et 5) possèdent des angles de phase très similaires et donc s'additionnent presque arithmétiquement lorsque nombre de ces appareils fonctionnent simultanément sur un réseau.

Des détails supplémentaires sur ce branchement et son émission harmonique sont présentés en [11] de l'annexe E.

#### A.2.4 *Les convertisseurs directs se composent d'une ou plusieurs paires de convertisseurs en montage antiparallèle:*

- une charge monophasée est alimentée par une paire comme représenté en figure A.7a,
- une charge triphasée est alimentée par trois paires comme représenté en figure A.7b, appelée cycloconvertisseur.

Pour les courants résultants harmoniques de ligne de rangs caractéristiques  $h = 5, 7, 11, 13$ , on applique des valeurs semblables à celles employées pour les convertisseurs indirects. Normalement, ces valeurs sont inférieures, mais les interharmoniques des bandes latérales de fréquences sont plus importants.

Pour une évaluation plus précise, voir [1] de l'annexe E.

#### A.2.5 *Gradateurs pour courant alternatif*

Les gradateurs pour courant alternatif régulent la tension et le courant alternatif de la charge au moyen de thyristors en montage antiparallèle sur la ligne. Il existe des gradateurs monophasés et triphasés.

Les figures A.8a, b et c montrent les montages les plus courants. La composante harmonique relative des courants de ligne dépend du rapport  $R/Z$  du circuit et de l'angle de retard  $\alpha$ .

Le tableau A.5 donne les valeurs maximales de courant harmonique dans la plage de réglage:

$$\text{arc cos} \left( \frac{R}{Z} \right) \leq \alpha \leq 180^\circ \quad (\text{A.15})$$

$I_{\text{hmax}}$  se rapporte au maximum du courant de charge fondamental.

On donne  $I_{\text{hmax}}/I_{\text{1max}}$  pour plusieurs rapports  $R/Z$  en montage monophasé suivant la figure A.8a.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \approx \sqrt{R_A^2 + (X_A + X_L)^2} \quad (\text{A.16})$$

$$I_{\text{1max}} = \frac{U_L}{Z} \quad (\text{A.17})$$

The level of the harmonics depends strongly on the filtering on the a.c. and d.c. side, and should be requested from the manufacturer.

The low order harmonics (in particular 3 and 5) have very similar phase angles, and therefore sum up almost arithmetically, when many of these devices are operating simultaneously in a network.

More details on this connection and its harmonic emission are given in [11] of annex E.

#### A.2.4 Direct convertors consist of one or several pairs of convertors connected in antiparallel

- a single-phase a.c. load is fed by one pair, as shown in figure A.7a;
- a three-phase a.c. load is fed by three pairs, as shown in figure A.7b, called cycloconverter.

For the resulting harmonic currents of the characteristic orders  $h = 5, 7, 11, 13$  in the a.c. supply, similar values to those of indirect convertors apply. Normally, these values are lower, but interharmonics of side band frequencies are increased.

For a more exact evaluation, see [1] in annex E.

#### A.2.5 AC Controllers

AC controllers regulate the a.c. voltage and current at the load by means of thyristors connected in antiparallel in the a.c. lines. There are single-phase and three-phase controllers.

Figures A.8a, b, and c show the connections usually used. The relative harmonic component of the line currents depend on the ratio  $R/Z$  in the circuit and the delay angle  $\alpha$ .

Table A.5 shows the maximum values of the harmonic current within the control range.

$$\text{arc cos}\left(\frac{R}{Z}\right) \leq \alpha \leq 180^\circ \quad (\text{A.15})$$

$I_{h\max}$  is referred to the maximum of the fundamental load current.

$I_{h\max}/I_{1\max}$  for several ratios  $R/Z$  is given for single-phase connection, according to figure A.8a.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \approx \sqrt{R_A^2 + (X_A + X_L)^2} \quad (\text{A.16})$$

$$I_{1\max} = \frac{U_L}{Z} \quad (\text{A.17})$$

**Tableau A.5 — Valeurs de  $I_{h\max}/I_{1\max}$  des gradateurs monophasés pour plusieurs rangs d'harmoniques suivant le rapport R/Z de la charge**

| $\frac{I_{h\max}}{I_{1\max}}$ | R/Z                               |                    |                    |                       |                    |                     |                   |     |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----|
|                               | $\alpha_w/\phi_h$                 | 1                  | 0,9                | 0,8                   | 0,7                | 0,6                 | 0,5               | 0,0 |
| Rang de h                     |                                   |                    |                    |                       |                    |                     |                   |     |
| 3                             | 0,318<br>90°/- 90°                | 0,227<br>95°/- 23° | 0,193<br>100°/8°   | 0,174<br>103°/21°     | 0,161<br>106°/35°  | 0,153<br>109°/47°   | 0,138<br>120°/90° |     |
| 5                             | 0,138<br>60°/- 60°<br>120°/- 120° | 0,078<br>67°/40°   | 0,067<br>75°/94°   | 0,061<br>80°/138°     | 0,058<br>87°/153°  | 0,056<br>90°/175°   | 0,050<br>105°/90° |     |
| 7                             | 0,106<br>90°/- 90°                | 0,041<br>102°/62°  | 0,032<br>110°/135° | 0,030<br>- 20°/- 150° | 0,029<br>78°/- 94° | 0,028<br>100°/- 60° | 0,026<br>105°/90° |     |
| 9                             | 0,076                             | 0,026              | 0,020              | 0,018                 | 0,017              | 0,016               | 0,016             |     |
| 11                            | 0,064                             | 0,016              | 0,014              | 0,012                 | 0,011              | 0,011               | 0,011             |     |
| 13                            | 0,052                             | 0,012              | 0,010              | 0,009                 | 0,008              | 0,008               | 0,008             |     |
| 15                            | 0,046                             | 0,009              | 0,007              | 0,006                 | 0,006              | 0,006               | 0,006             |     |

$\alpha_w = \alpha$  dans le pire des cas

On applique les mêmes valeurs que pour le circuit reporté en figure A.8b. Il est à noter que le conducteur de neutre est traversé trois fois par les harmoniques de rangs  $n$  multiples de trois. L'angle de phase  $\phi_h$  du courant harmonique dépend du rapport R/Z et de l'angle de retard de commande  $\alpha$ .

Le tableau A.5 présente des informations supplémentaires. Il contient les courants harmoniques relatifs maximaux du gradateur monophasé et l'angle de phase correspondant  $\alpha_w$  pour les harmoniques de rangs faibles.

Ces valeurs, en ce qui concerne l'amplitude, donnent aussi une bonne approximation pour les trois gradateurs monophasés de la figure A.8c avec des angles de retard à l'amorçage égaux, mais les harmoniques de rang 3, 9 et 15 sont annulés. Le courant fondamental maximum  $I_{1\max}$  et le rapport R/Z ont pour valeur:

$$I_{1\max} = \frac{U_L}{\sqrt{R_A^2 + (3X_L + X_A)^2}}$$

$$\frac{R}{Z} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3X_L + X_A}{R_A}\right)^2}} \quad (\text{A.18})$$

L'article [12] de l'annexe E présente des détails complémentaires sur les courants harmoniques des gradateurs suivant les montages des figures A.8a, b et c.

**Table A.5 — Values  $I_{h\max}/I_{1\max}$  of a single-phase a.c. controller for several harmonic orders depending on the load ratio R/Z**

| $\frac{I_{h\max}}{I_{1\max}}$ | $\alpha_w/\phi_h$               | R/Z               |                    |                      |                   |                    |                   |     |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----|
|                               |                                 | h values          | 1                  | 0,9                  | 0,8               | 0,7                | 0,6               | 0,5 |
| 3                             | 0,318<br>90°- 90°               | 0,227<br>95°- 23° | 0,193<br>100°/8°   | 0,174<br>103°/21°    | 0,161<br>106°/35° | 0,153<br>109°/47°  | 0,138<br>120°/90° |     |
| 5                             | 0,138<br>60°- 60°<br>120°- 120° | 0,078<br>67°/40°  | 0,067<br>75°/94°   | 0,061<br>80°/138°    | 0,058<br>87°/153° | 0,056<br>90°/175°  | 0,050<br>105°/90° |     |
| 7                             | 0,106<br>90°- 90°               | 0,041<br>102°/62° | 0,032<br>110°/135° | 0,030<br>- 20°- 150° | 0,029<br>78°- 94° | 0,028<br>100°- 60° | 0,026<br>105°/90° |     |
| 9                             | 0,076                           | 0,026             | 0,020              | 0,018                | 0,017             | 0,016              | 0,016             |     |
| 11                            | 0,064                           | 0,016             | 0,014              | 0,012                | 0,011             | 0,011              | 0,011             |     |
| 13                            | 0,052                           | 0,012             | 0,010              | 0,009                | 0,008             | 0,008              | 0,008             |     |
| 15                            | 0,046                           | 0,009             | 0,007              | 0,006                | 0,006             | 0,006              | 0,006             |     |

$\alpha_w = \alpha$  in the worst case

The same values apply for the circuit shown in figure A.8b. Note that the neutral line is loaded with three times the triple n harmonics. The phase angle  $\phi_h$  of the harmonic current depends on the ratio R/Z and the trigger delay angle  $\alpha$ .

Further information is given in table A.5; it contains the maximum relative harmonic currents of the single phase a.c. controller, and the relevant phase angle  $\alpha_{worst}$  for the lower harmonic orders.

These values, as regards the amplitude, apply with good approximation also for three single-phase controllers of figure A.8c with equal firing delay angles, but the harmonic orders 3, 9, and 15 are cancelled. The maximum fundamental current  $I_{1\max}$  and the ratio R/Z are:

$$I_{1\max} = \frac{U_L}{\sqrt{R_A^2 + (3X_L + X_A)^2}}$$

$$\frac{R}{Z} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3X_L + X_A}{R_A}\right)^2}} \quad (\text{A.18})$$

For further details concerning the harmonic currents of a.c. controllers according to the connections in figures A.8a, b and c, see [12] of annex E.

Des gradateurs triphasés sont souvent utilisés pour la commande de la tension côté primaire d'un transformateur alimentant une charge à haute tension ou forte intensité par l'intermédiaire d'un redresseur à diodes côté secondaire. Habituellement, une inductance filtre le courant continu. Les courants harmoniques dépendent du branchement du gradateur alternatif et du transformateur, de l'angle de retard de commande et du degré de filtrage. Il convient de demander les valeurs du courant harmonique à prévoir au fabricant.

#### A.2.6 Convertisseurs autocommutés

Les convertisseurs autocommutés branchés côté réseau ont le pouvoir d'annuler la puissance réactive ou de la compenser et de diminuer les courants harmoniques. Les applications de cette nouvelle technique étant encore rares, le sujet n'est pas encore traité.

### A.3 Fours à arc

Le niveau des courants harmoniques produits par des fours à arc alternatifs et leur fluctuation dépend de bon nombre de facteurs, tels que le mode de fonctionnement, le type de ferraille, la température et l'état des électrodes. Les valeurs mesurées dépendent du réglage de l'analyseur d'harmoniques car les harmoniques varient de façon aléatoire.

L'article [2] de l'annexe E fait état d'un exemple de spectre mesuré pour un four à arc donné (voir figure 10), mais les spectres d'autres fours peuvent être très différents.

Les angles de phase des harmoniques varient de façon aléatoire sur une large gamme.

### A.4 Machines à souder à courant alternatif

Les machines à souder à courant alternatif pour la soudure par points par l'intermédiaire d'un transformateur de grande réactance ne créent pas d'harmoniques appréciables. Elles produisent du courant harmonique quand un arc de soudure est produit ou quand le courant de soudure est commandé par un gradateur. Dans les deux cas, les courants harmoniques sont relativement peu importants en raison de la réactance élevée du circuit de charge.

Les valeurs du tableau A.5 avec  $R/Z = 0,5$  sont appropriées aux machines à souder. Néanmoins, la perturbation principale produite par des machines à souder est la fluctuation de tension.

### A.5 Lampes fluorescentes

En général, les lampes fluorescentes sont connectées au réseau par l'intermédiaire d'une inductance en série. Elles produisent des courants harmoniques d'importance stable et d'angle de phase fixe en raison de l'impédance non linéaire de l'arc de décharge. Les lampes fluorescentes modernes destinées à remplacer les lampes à incandescence sont alimentées par un générateur haute fréquence. Aujourd'hui, de façon générale, le réseau est chargé par un pont à diodes monophasé avec des condensateurs de filtrage branchés côté continu. Le volume croissant de lampes fluorescentes en association à des ordinateurs, des postes de télévision, etc., branchés au même réseau, produit une émission harmonique importante dans pratiquement l'ensemble des réseaux, surtout en ce qui concerne l'harmonique de rang 5. En outre, une circulation importante d'harmonique de rang 3 est à prévoir dans le conducteur de neutre.

### A.6 Commande des inductances saturables

La pointe de courant des transformateurs et des machines à courant alternatif dépend de l'angle de phase à l'instant de la mise sous tension et de la magnétisation rémanente des pièces actives en acier. Cette pointe contient tous les harmoniques de rang entier bas y compris de rang zéro pour la composante continue. Les composantes harmoniques décroissent avec une constante de temps allant de plusieurs secondes à quelques minutes (transformateurs de grande puissance).

### A.7 Commutation de batteries de condensateurs

La mise en circuit de condensateurs excite une oscillation dont la fréquence est déterminée par la capacité et toutes les inductances qui l'alimentent. Dans le cas de filtres, la fréquence de résonance qui en résulte est un peu inférieure à la fréquence à laquelle le filtre est accordé. Cette oscillation résonnante décroît en 10 à 20 de ses périodes, c'est-à-dire en moins d'une seconde.

NOTE — Dans la conception d'une compensation de puissance réactive il convient d'éviter les condensateurs sans réactance d'accord, car une résonance parallèle peut être provoquée par un des harmoniques. Il convient également d'empêcher la surcompensation pour ne pas augmenter la tension de ligne.

Three-phase a.c. controllers are often applied to control the primary voltage of a transformer feeding a high voltage or high current d.c. load via a diode rectifier on the secondary side. The d.c. current usually is smoothed by a reactor. The harmonic currents depend on the connections of the a.c. controller and of the transformer, on the delay angle, and on the degree of smoothing. The values for the harmonic currents to be expected should be requested from the manufacturer.

#### A.2.6 Self-commutated converters

Self-commutated converters, connected on the line side, are able to avoid reactive power or to compensate for it, and to decrease harmonic currents. As the application of this new technique is still rare, it is not yet dealt with.

### A.3 Arc furnaces

The amount of harmonic currents produced by a.c. arc furnaces and their fluctuation depends on several factors, such as the operating mode, kind of scrap, temperature, and condition of the electrodes. The values measured depend on the settings of the harmonic analyzer, as the harmonics vary at random.

Reference [2] in annex E gives an example of a measured spectrum for an arc furnace (see figure 10), but the spectra of other furnaces may deviate considerably.

The phase angles of the harmonics vary randomly over a broad range.

### A.4 AC welding machines

AC welding machines for spot welding via high-reactance transformer do not create appreciable harmonics. Harmonic currents are produced when a welding arc is fed, or the welding current is controlled, by an a.c. controller. In both cases the harmonic currents are relatively low, because of the high reactance in the load circuit.

The values of table A.5, with  $R/Z = 0.5$ , are appropriate to welding machines. However, the main disturbance produced by welding machines is voltage fluctuations.

### A.5 Fluorescent lamps

Fluorescent lamps are mostly connected via a ballast inductance to the mains. They generate harmonic currents of constant amount and phase angle, because of the non-linear impedance of the discharge arc.

Modern fluorescent lamps intended to replace incandescent lamps are fed by a high frequency generator. Today, the a.c. supply is normally loaded by a single-phase diode bridge with smoothing capacitors connected on the d.c. side.

The increasing mass of fluorescent lamps in combination with computers, television sets, etc., having the same power supply, causes a high harmonic disturbance level in almost all networks, especially concerning the fifth harmonic. Additionally, a high third harmonic flowing in the neutral line can be expected.

### A.6 Switching of saturable inductances

The inrush current of transformers and a.c. machines depends on the phase angle of the switching instant, and the remanent magnetization of the active iron parts. The inrush current contains all integer low order harmonics, including zero order for d.c. components. The harmonic components decay with a time constant between several seconds and a few minutes (high power transformers).

### A.7 Switching of capacitor banks

Switching on capacitors excites an oscillation, the frequency of which is determined by the capacitance and all inductances feeding into it. In the case of filters, the resulting resonance frequency is somewhat lower than the frequency the filter is tuned to. This resonance oscillation decays within 10 to 20 of its periods, that is, in less than one second.

**NOTE** - The design of a reactive power compensation should avoid capacitances without tuning reactors, as parallel resonance may be caused by one of the harmonics. Also overcompensation should be prevented in order not to increase the line voltage.

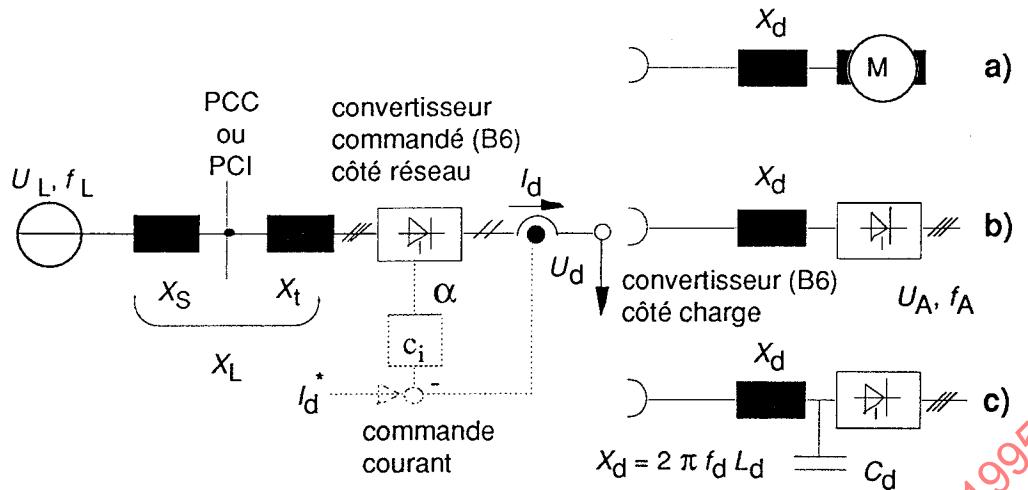
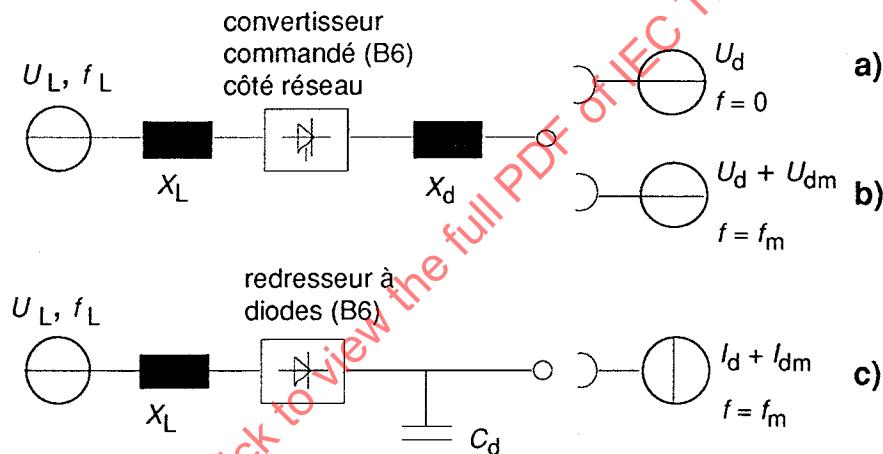


Figure A.1 — Convertisseur à thyristors côté réseau avec filtrage inductif et  
 a) variateur à courant continu et compensation statique  
 b) convertisseur source de courant  
 c) filtrage capacitif supplémentaire et convertisseur source de tension



- a) tension continue entre 0 (compensateur statique) et  $0,9 U_d$  (machine à courant continu)  
 b) tension continue  $U_d$  et tensions alternatives superposées  $U_{dm}$  de fréquence  $f_m$   
 c) courant continu  $I_d$  et courants alternatifs superposés  $I_{dm}$  de fréquence  $f_m$

Figure A.2 — Circuit équivalent pour les convertisseurs générant des courants harmoniques et interharmoniques côté réseau

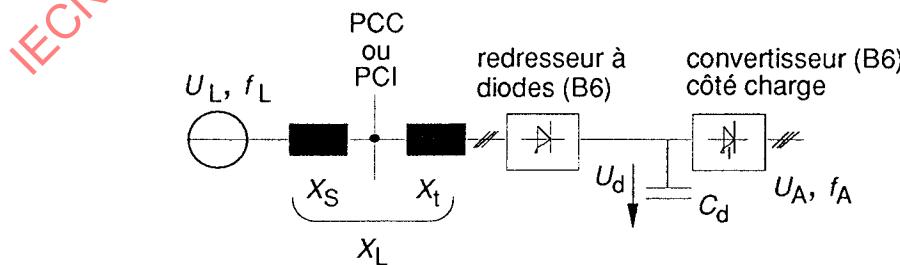
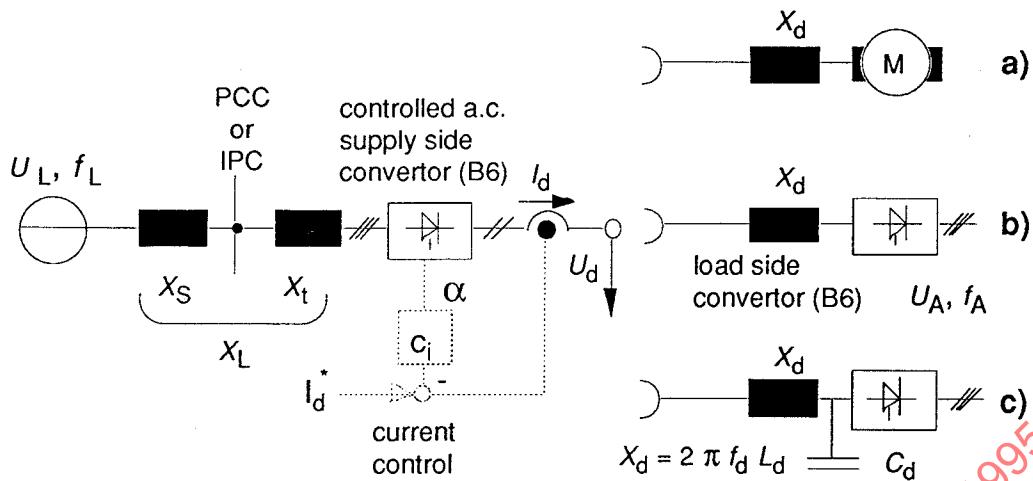
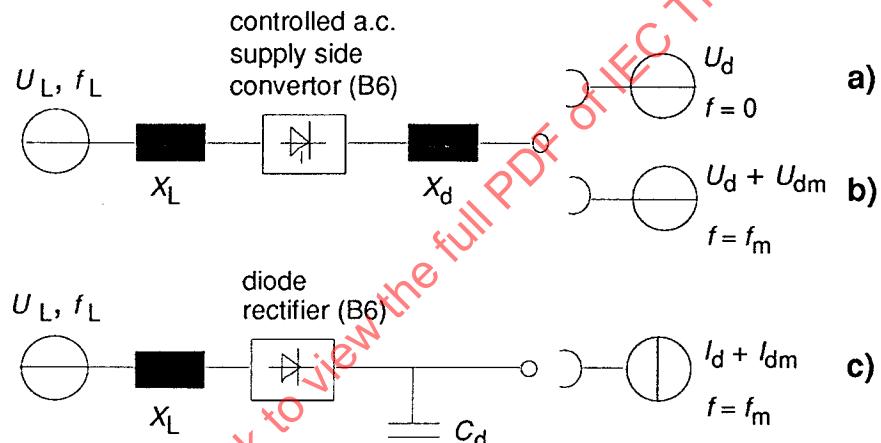


Figure A.3 — Redresseur à diodes côté réseau avec filtrage capacitif et convertisseur source de tension



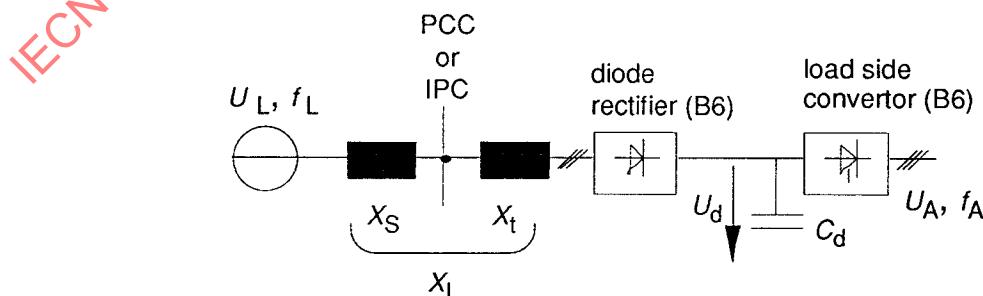
**Figure A.1 — AC supply side thyristor convertor with inductive smoothing and**

- a) d.c. drive and static compensation
- b) current source inverter
- c) additional capacitive smoothing and voltage source inverter



- a) d.c. voltage between 0 (static compensator) and  $0,9 U_d$  (d.c. machine)
- b) d.c. voltage  $U_d$  and superimposed a.c. voltages  $U_{dm}$  with frequencies  $f_m$
- c) d.c. current  $I_d$  and superimposed a.c. currents  $I_{dm}$  with frequencies  $f_m$

**Figure A.2 — Equivalent circuit for convertors producing harmonic and interharmonics current in the a.c. supply side**



**Figure A.3 — AC supply side diode rectifier with capacitive smoothing and voltage source inverter**

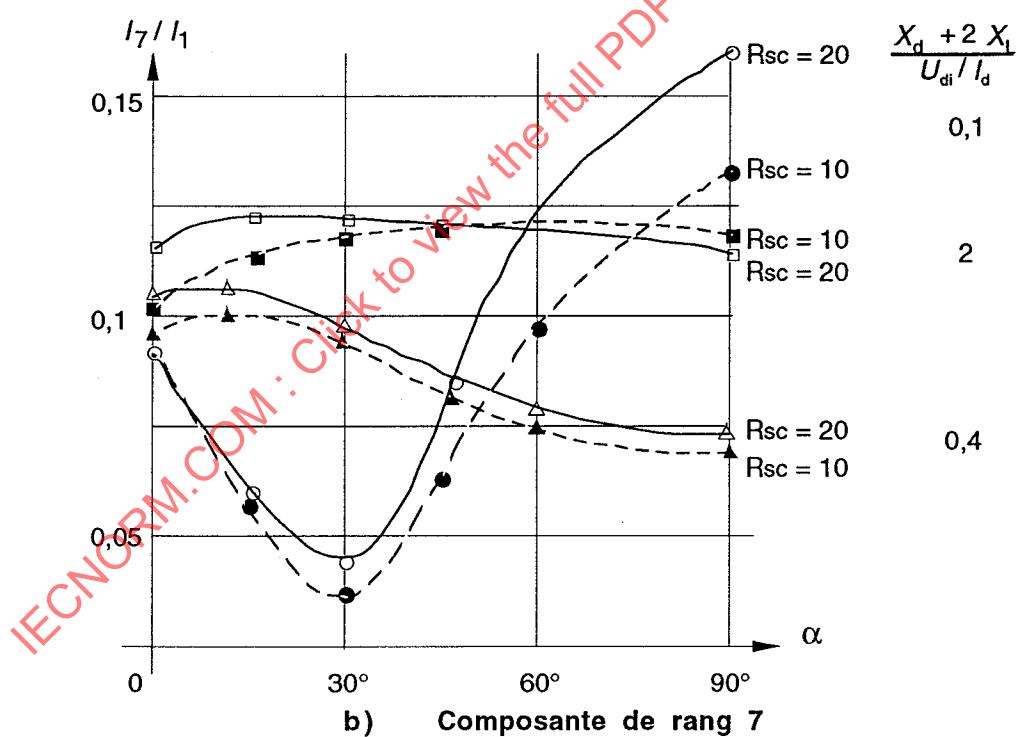
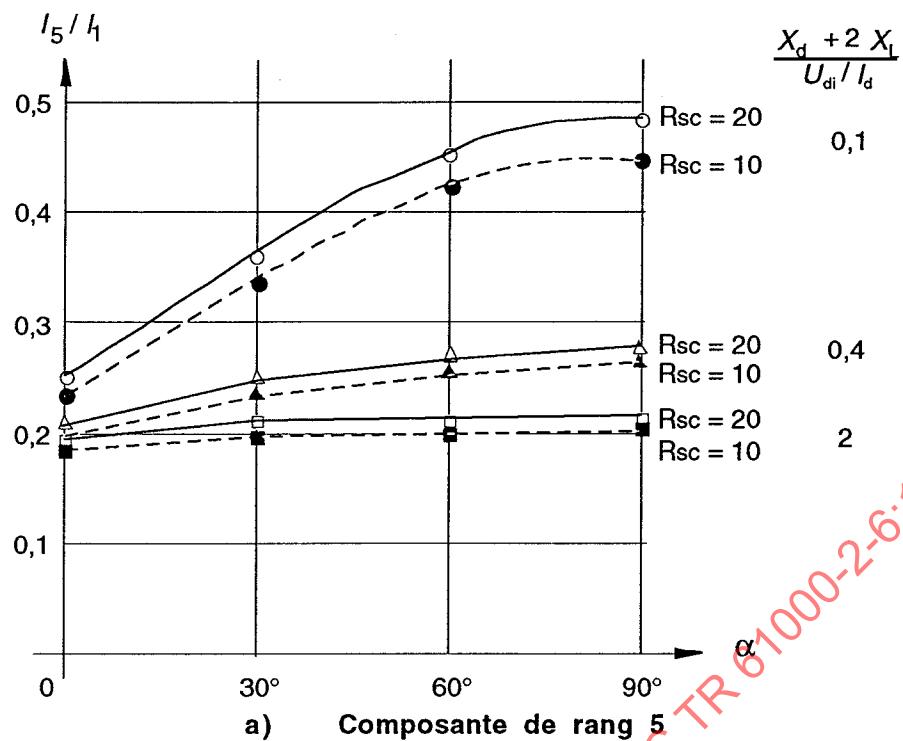
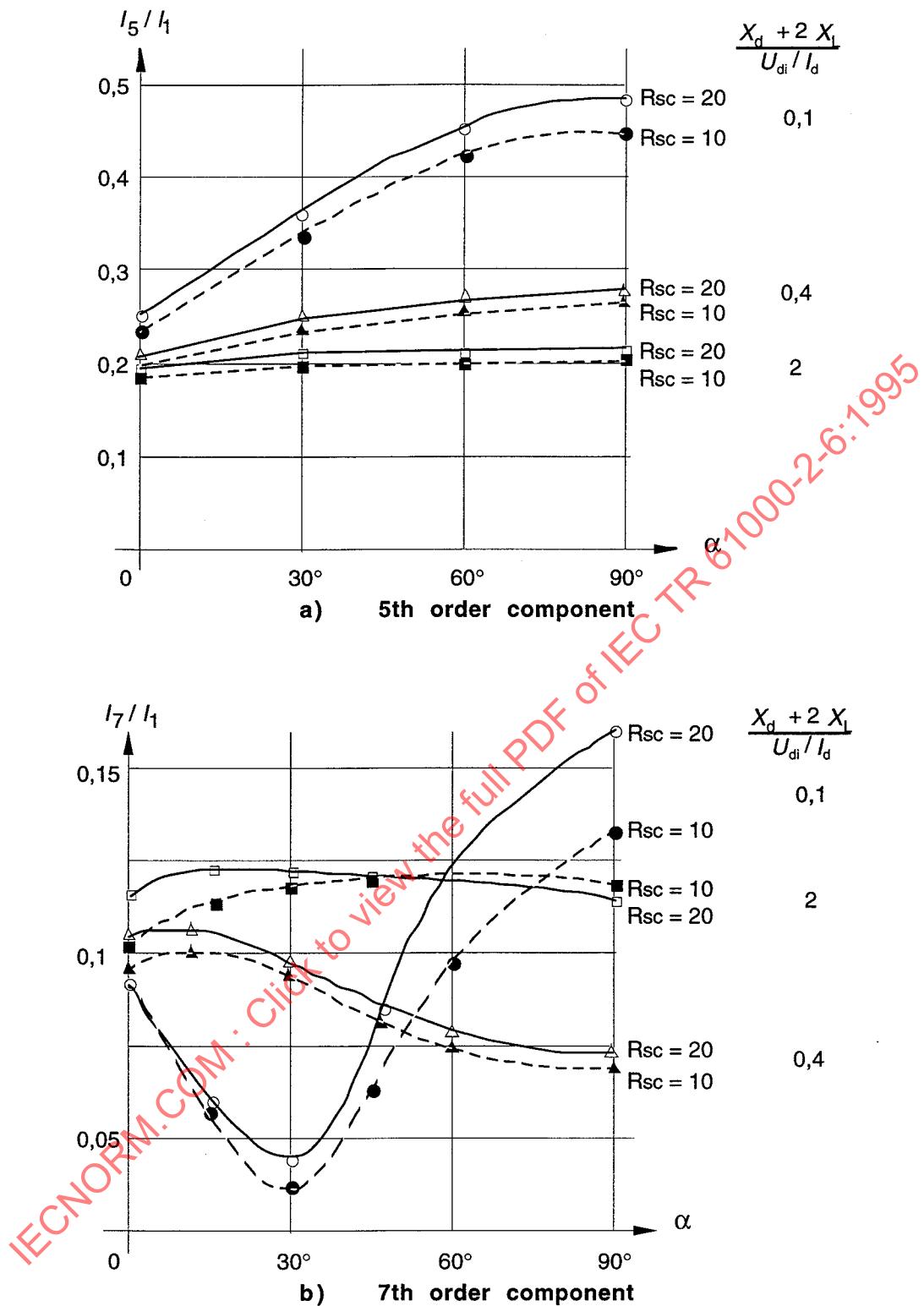
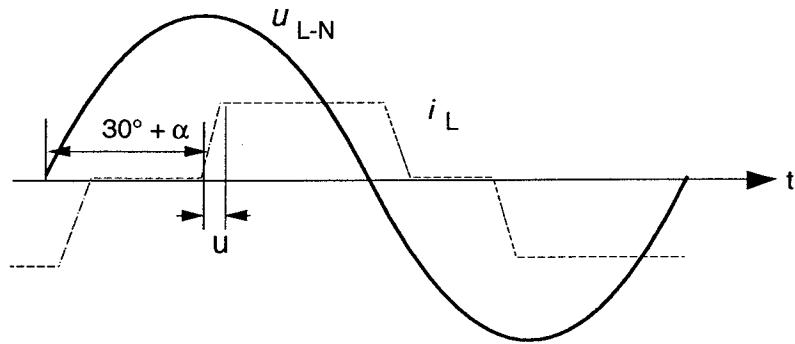


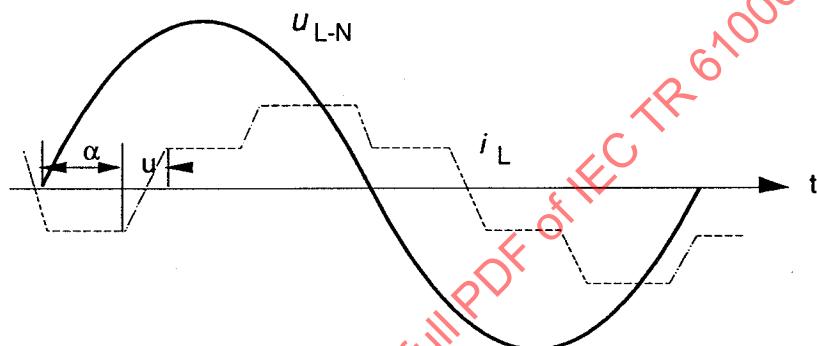
Figure A.4 — Courant harmonique de ligne relatif de rang  $h = 5$  et 7 fonction de l'angle de retard de commande  $\alpha$   
 Paramètres:  $R_{sc} = 20$  et 10  
 Degré de filtrage  $\frac{X_d + 2X_L}{U_{di}/I_d} = 0,1, 0,4$  et 2



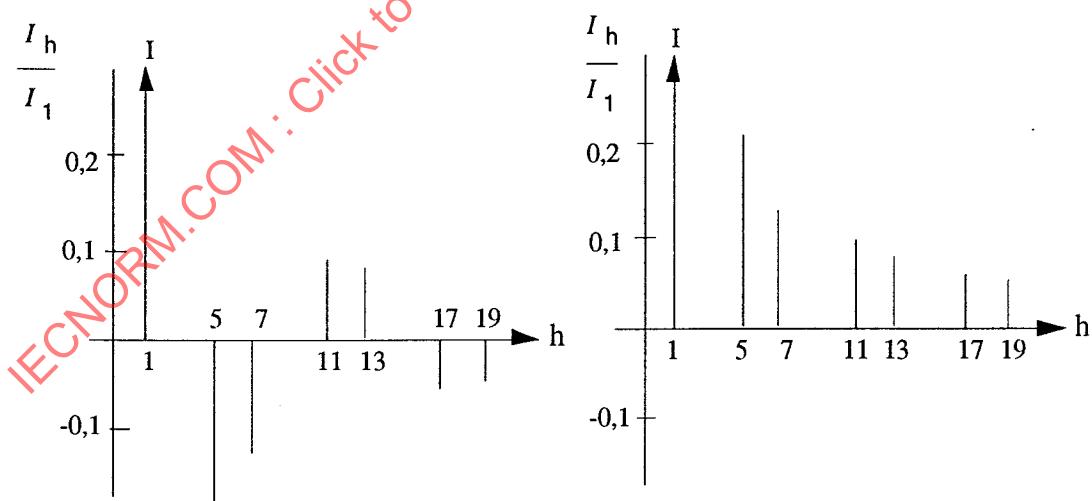
**Figure A.4 — Relative harmonic line current of order  $h = 5$  and 7 depending on the trigger delay angle  $\alpha$**   
**Parameters:**  $R_{sc} = 20$  and  $10$   
**Smoothing degree**  $\frac{X_d + 2 X_L}{U_{di} / I_d} = 0.1, 0.4$  and  $2$



a) forme d'onde de la tension et du courant dans le cas d'un couplage étoile-étoile ou triangle-triangle du transformateur.

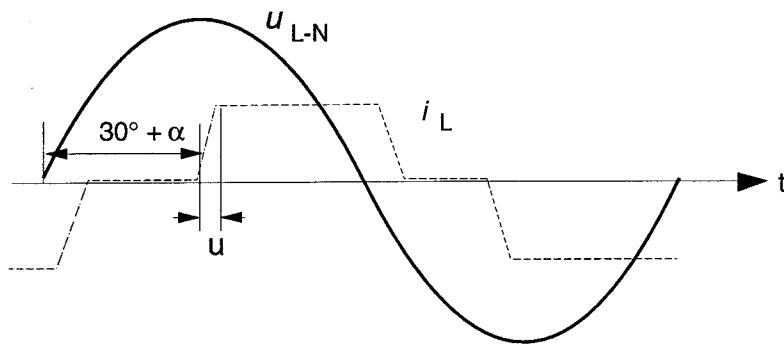


b) forme d'onde de la tension et du courant dans le cas d'un couplage étoile-triangle ou triangle-étoile du transformateur.

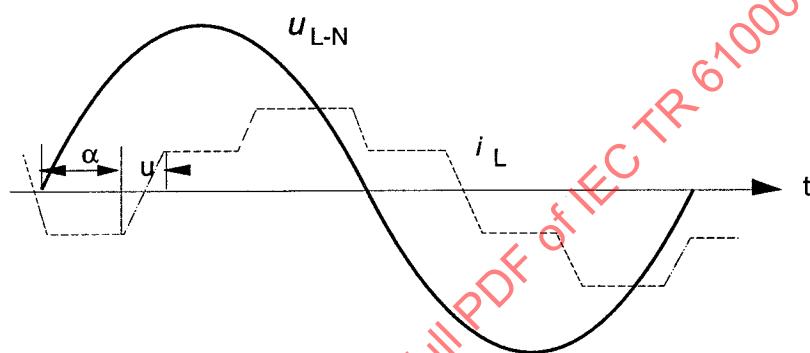


c) spectre du courant harmonique dans le courant d'alimentation (par rapport au passage à zéro par valeur croissante du courant fondamental); le diagramme de gauche correspond au cas a), celui de droite au cas b).

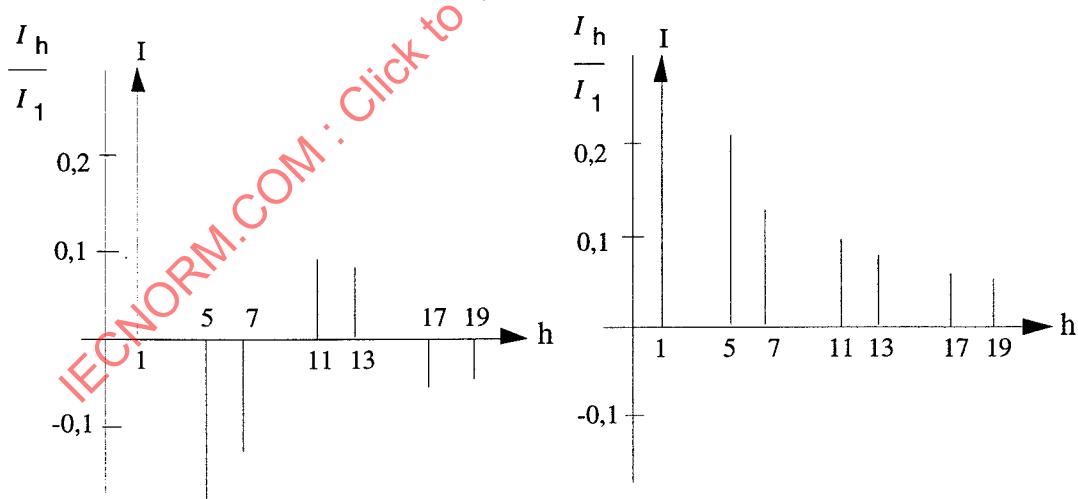
Figure A.5 — Tension et courant côté primaire pour un convertisseur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur



a) waveform of the voltage and current in case of a Y/Y or D/D connection of the transformer.



b) waveform of the voltage and current in case of a Y/D or D/Y connection of the transformer.



c) spectra of harmonic current in the supply current (referred to the zero crossing of the fundamental current); the left diagrams is relevant to the case a), the right one is relevant to the case b).

**Figure A.5 — Primary voltage and current for a convertor linked to the mains via a transformer**

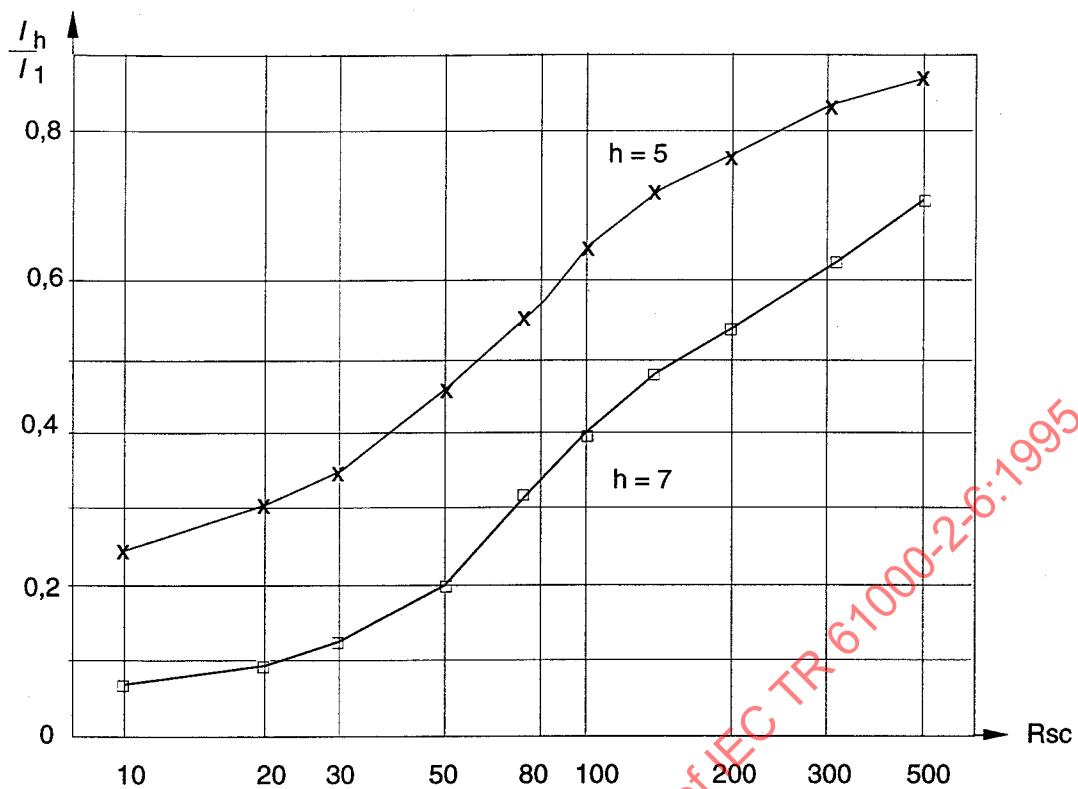


Figure A.6 — Courant harmonique relatif de ligne d'un redresseur à diodes en couplage B6 fournissant une tension continue sans ondulation

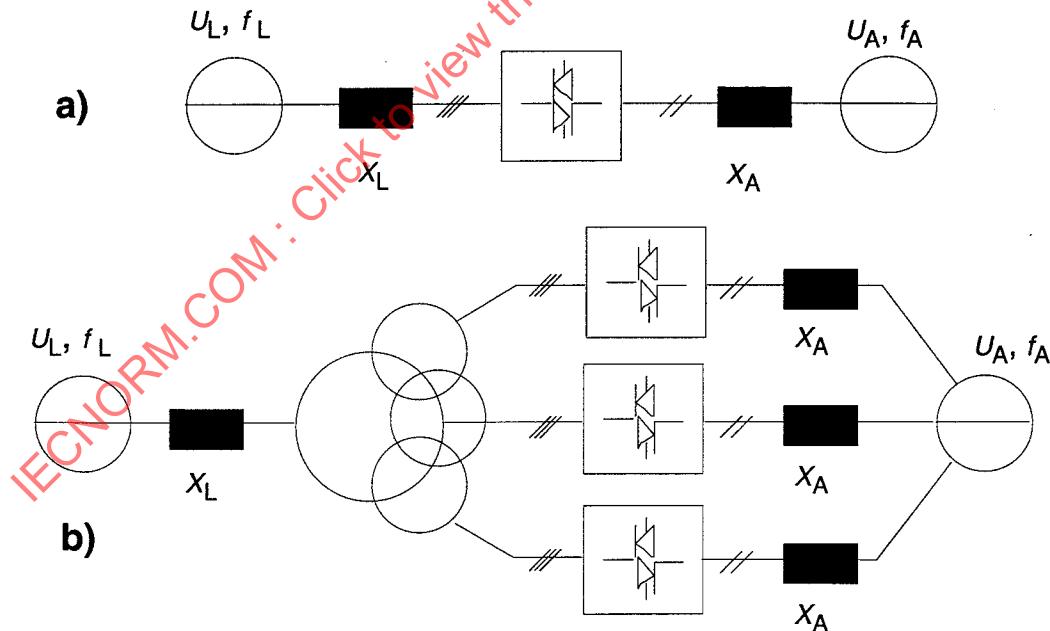
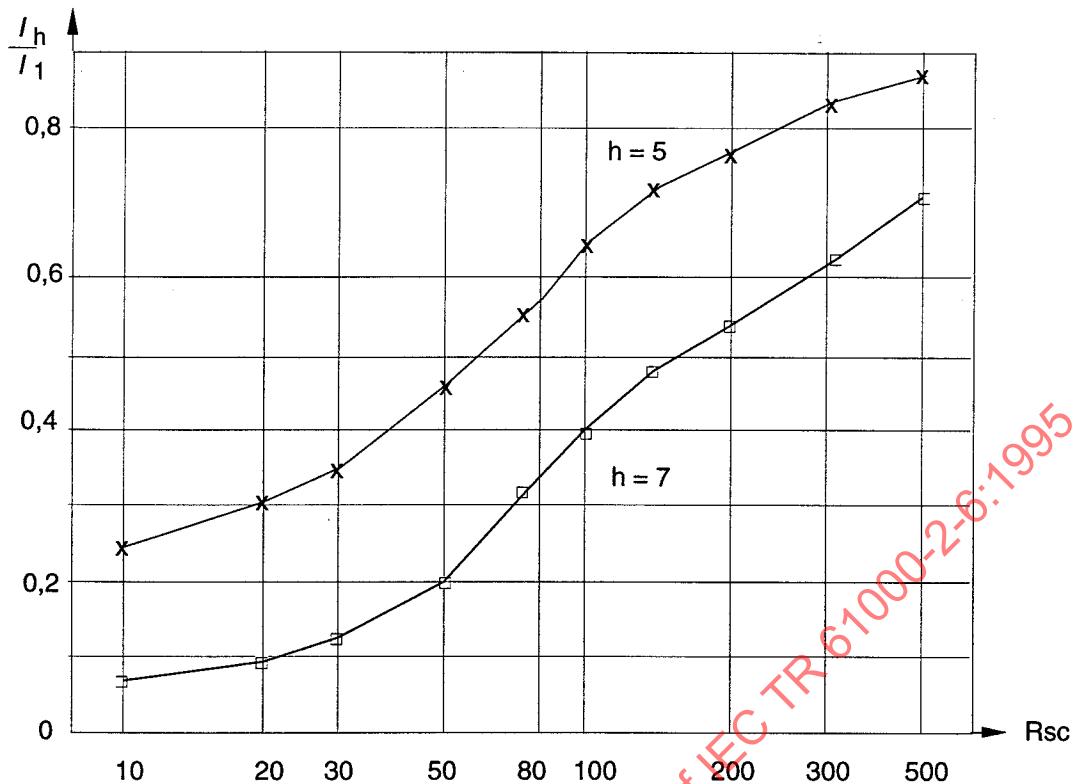
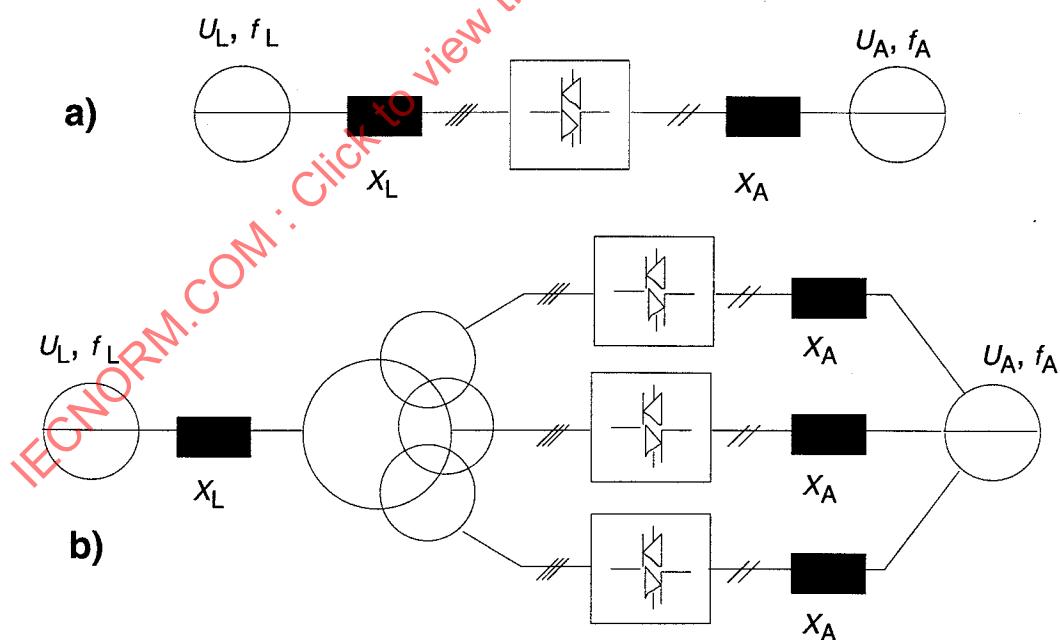


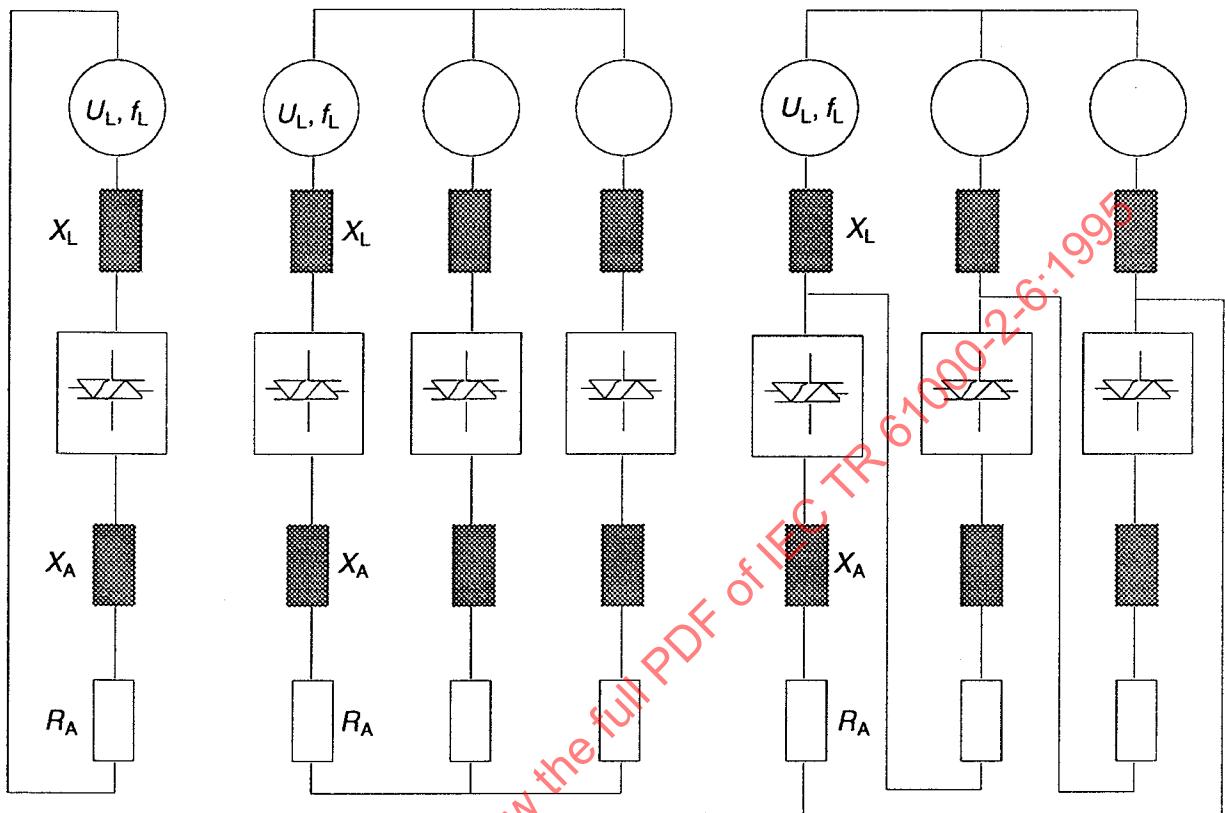
Figure A.7 — Convertisseur direct avec:  
a) sortie monophasée  
b) sortie triphasée (cycloconvertisseur)



**Figure A.6 — Relative harmonic a.c. supply side current of a diode rectifier in B6-connection feeding a ripple-free d.c. voltage**



**Figure A.7 — Direct convertor with:**  
**a) single-phase output**  
**b) three-phase output (cycloconverter)**

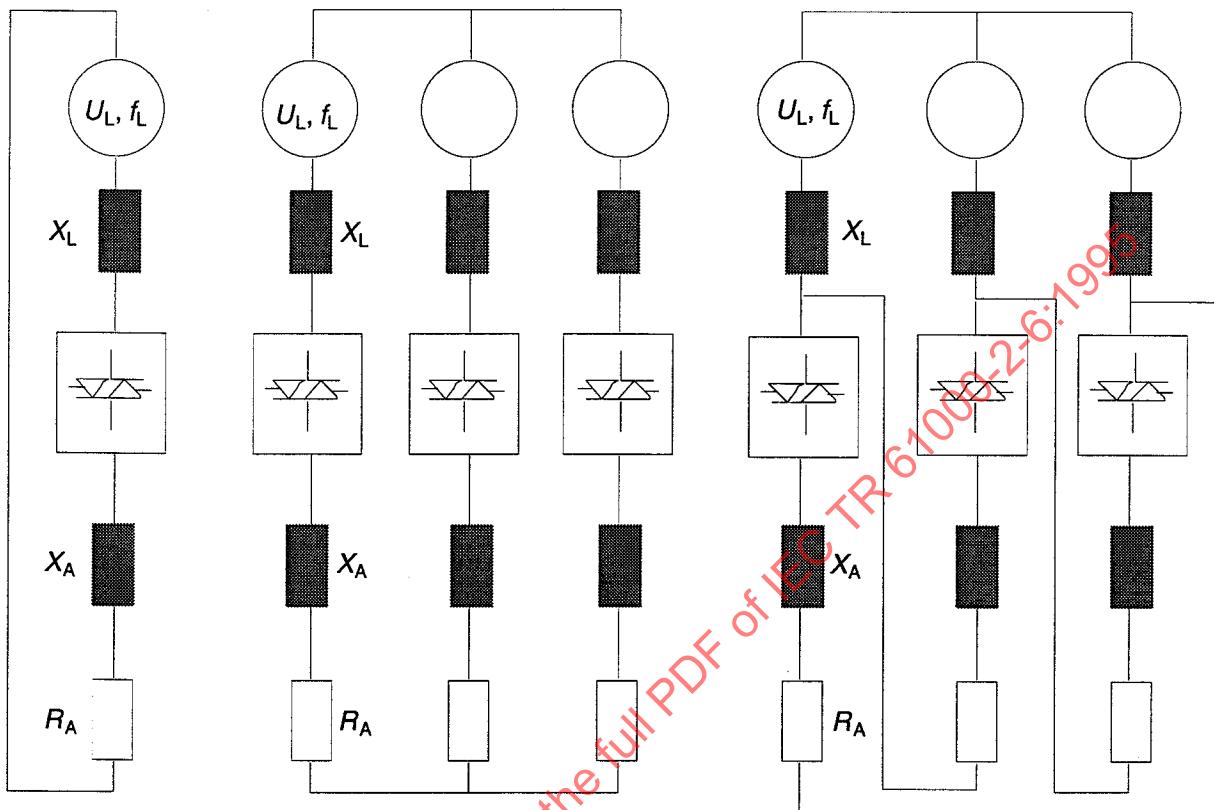


a) gradateur monophasé

b) gradateur triphasé en couplage étoile avec la charge connectée au point étoile

c) gradateur triphasé en couplage triangle

Figure A.8 — Branchement du gradateur



a) single-phase controller

b) three-phase controller, star connected, load connected to star point

c) three-phase controller connection in delta

Figure A.8 — AC controller connections

**Annexe B  
(Informatif)**

**Impédances du réseau pour le calcul de la propagation harmonique  
et l'évaluation des composantes de tension harmonique.**

**B.1 Domaine d'application**

Cette annexe traite de l'évaluation des impédances nécessaires pour le calcul de la distribution du courant harmonique et des composantes de tension harmonique dans les systèmes de puissance électrique. On présente ici une approche simple, limitée aux fréquences allant jusqu'au rang 40 et applicable à l'installation industrielle. La précision de calcul décroît avec l'augmentation de fréquence.

Par conséquent des mesures complémentaires peuvent se révéler utiles pour les cas critiques.

L'objectif est de fournir au concepteur du système un guide sur l'évaluation des impédances du réseau aux fréquences harmoniques.

**B.2 Introduction**

Une charge connectée à un réseau de distribution électrique peut produire des courants harmoniques qui circulent dans les différentes branches du réseau. Ces courants harmoniques produisent des chutes de tension à travers les impédances des différentes composantes du système.

Ainsi, la charge en question produit des tensions harmoniques à son point de connexion et dans tout le système. L'amplitude de ces tensions harmoniques, ainsi que la distribution des courants harmoniques dans le réseau est déterminée par l'impédance, à la fréquence harmonique, des différentes branches du réseau, ainsi que par la taille et l'emplacement des sources harmoniques.

**B.3 Méthodes de calcul**

Le calcul de la distribution du courant harmonique et des tensions harmoniques devra prendre en compte l'impédance interne du système de distribution jusqu'à la f.e.m. idéale du réseau, et l'impédance de tous les appareils connectés en parallèle au même réseau. Cela peut inclure les impédances:

- du réseau de distribution haute tension auquel le système à étudier est connecté;
- des transformateurs et des inductances de limitation de courant;
- des machines tournantes à courant alternatif;
- des câbles et lignes aériennes;
- des condensateurs installés pour le relèvement du facteur de puissance;
- des filtres harmoniques;
- des charges importantes.

Les charges à forte impédance interne, par exemple, les convertisseurs commutés par le réseau avec courant continu filtré par inductance, peuvent normalement être considérées comme des sources de courant idéales.

Les asymétries du réseau sont, en général, négligées du point de vue de la distribution des courants harmoniques dans le réseau. Dans cette hypothèse, l'étude de la distribution des harmoniques peut être réalisée sur un réseau monophasé équivalent. En revanche, on doit prendre en compte les asymétries pour l'évaluation de l'importance des courants harmoniques injectés par les charges perturbatrices.

**NOTE —** Seule les tensions entre phases sont considérées. Par conséquent, les composantes homopolaires ne sont pas traitées.

**Annex B  
(Informative)**

**Network impedances for calculation of harmonic propagation  
and evaluation of harmonic voltage components.**

### B.1 Scope

This annex relates to the evaluation of the impedances necessary for the computation of the harmonic current distribution and the harmonic voltage components in electric power systems. A simple approach is also presented here; it is restricted to frequencies up to the 40th harmonic, and is applicable to industrial installations. The accuracy of the calculation diminishes with increasing frequency. Therefore, complementary measurements may be useful for critical cases.

The aim is to give guidance to the system designer on the evaluation of the network impedances at harmonic frequencies.

### B.2 Introduction

A load connected to an electrical power supply network may produce harmonic currents, which flow through the different branches of the network. The harmonic currents cause voltage drops across the impedances of the various components of the system. Thus, the load under consideration produces harmonic voltages at the point where it is connected, and all through the system. The magnitude of these harmonic voltages, as well as the distribution of the harmonic currents in the network, is determined by the impedances, at harmonic frequency, of the different branches in the network, as well as the size and location of the harmonic sources.

### B.3 Calculation methods

Calculation of the harmonic current distribution and the harmonic voltages should take into consideration the internal impedance of the power supply system all the way up to the infinite EMF of the network, and the impedances of all pieces of equipment connected to the same system in parallel. This may include the impedances of:

- the high voltage power supply network, to which the system to be studied is connected;
- transformers and current limiting reactors;
- a.c. rotation machines;
- cables and overhead lines;
- capacitors installed to correct the power factor;
- harmonic filters;
- large loads.

Loads with high internal impedance, such as line commutated convertors with inductively smoothed d.c. current, are normally considered as ideal harmonic current sources.

The network asymmetries are, in general, neglected when considering the distribution of harmonic currents in the network. Under this assumption, the study of harmonic distribution can be performed in a single-phase equivalent network. On the other hand, asymmetries are to be considered when evaluating the amount of harmonic currents injected by the disturbing loads.

NOTE — Line-line voltages are considered only, therefore, zero sequence networks are not dealt with here.

Dans les cas simples où le système à étudier est relativement peu complexe, il est possible d'effectuer les calculs manuellement, mais en règle générale, sur des configurations de réseau plus complexes, un calcul manuel sera lourd, en particulier si les composantes harmoniques de tension sont évaluées en plusieurs points de raccordement et pour un nombre important de fréquences. Dans ces cas-là, il est conseillé d'utiliser un programme informatique pour l'analyse du réseau. De nombreux programmes de ce type sont disponibles sur le marché.

#### B.4 Évaluation des tensions harmoniques

En première approximation, les composantes de tension harmoniques dans un système peuvent généralement être évaluées en prenant l'hypothèse selon laquelle les courants/tensions harmoniques injectés par la charge ne dépendent pas beaucoup des caractéristiques spécifiques du réseau à la fréquence harmonique. Le courant injecté dépend principalement du filtrage, des conditions de fonctionnement de l'appareil considéré et, dans une certaine mesure, de la puissance de court-circuit au point de connexion de l'équipement perturbateur.

NOTE — Les convertisseurs commutés par le réseau comportant des charges inductives relativement importantes opèrent comme des sources de courants harmoniques sur les fréquences jusqu'au 40<sup>ème</sup> rang. D'autres types d'appareils perturbateurs peuvent agir, en tant que sources d'harmoniques, soit de tension, soit de courant.

La tension harmonique générée par une charge simple peut, dans un tel cas, être calculée comme le courant harmonique injecté multiplié par l'impédance interne du réseau au point de raccordement. L'impédance interne dans ce cas est l'impédance équivalente  $Z_{eq}$ , vue des bornes de la charge vers le réseau et va être évaluée pour chaque fréquence harmonique individuelle. L'évaluation prend en compte l'impédance de la ligne d'alimentation ainsi que l'impédance de tous les appareils connectés en parallèle, y compris les éventuels filtres harmoniques.

Un exemple de calcul de  $Z_{eq}$  pour deux points différents dans un système est illustré à la figure B.1. A noter que  $Z_{eq}$  peut varier considérablement en fonction des différentes conditions du réseau et/ou de la charge. Il est par conséquent important pour le concepteur de l'installation de posséder toutes les informations sur la plage de variation de  $Z_{eq}$ .

#### B.5 Variation de l'impédance réseau avec la fréquence

En règle générale,  $Z_{eq}$  est une fonction de la fréquence compliquée. Néanmoins dans certains cas, une approche plus simple peut être entreprise, qui rend possible le calcul manuel. Cette approche peut être utilisée lorsque la capacité du réseau est négligeable ou lorsqu'un seul condensateur joue un rôle prédominant dans la gamme de fréquence considérée.

NOTES :

- 1) Souvent les impédances peuvent être assimilées à leur partie réactive seulement. Dans ce cas, une impédance capacitive aura un signe négatif. Dans ce qui suit, la notation de quantité complexe a été omise.
- 2) Dans le cas de résonance particulière, les harmoniques de rang > 25 doivent être pris en considération.

In simple cases where the system to be studied is of relatively low complexity, it is possible to carry out the calculations manually, but in general, with more complicated network configurations, a manual calculation will be cumbersome, in particular if the harmonic voltage components are to be evaluated in various points of coupling, and for a large number of frequencies. In such cases, it is recommended to use a computer program for power system analysis. A number of such programs are available on the market.

#### B.4 Determination of harmonic voltages

As a first approximation, the harmonic voltage components in a system can generally be evaluated under the assumption that the harmonic currents / voltages injected by a load are not largely dependent on the particular characteristics of the network at harmonic frequency. The injected current depends mainly on the smoothing, on the operating conditions of the considered device, and to some extent, on the short-circuit power at the point of connection of the disturbing equipment.

NOTE — Line commutated convertors with relatively large inductive loads act as harmonic current sources for frequencies up to the 40th harmonic. Other types of disturbing equipment may act either as harmonic voltage or current sources.

The harmonic voltage generated by a single load can in such a case be calculated as the injected harmonic current, multiplied by the network internal impedance at the point of connection. The internal impedance in this case is the equivalent impedance,  $Z_{eq}$ , as seen from the load terminals into the network, and is to be evaluated for each individual harmonic frequency. The evaluation takes into consideration the impedance of the feeding line, as well as the impedance of all pieces of equipment connected in parallel, including harmonic filters, if any.

An example of calculation of  $Z_{eq}$  for two different points in a system is shown in figure B.1.

It should be noted that  $Z_{eq}$  may vary considerably under different network and/or load conditions. Thus, it is important for the designer of the plant to have all information about the whole range of variation of  $Z_{eq}$ .

#### B.5 Variation of the network impedance with frequency

In general,  $Z_{eq}$  is a complicated function of frequency. However, in some cases a simpler approach can be used, which makes manual calculation possible. This approach can be applied where the capacitance of the network is negligible, or a single capacitance plays a dominant role in the considered range of frequency.

NOTES:

- 1) Often the impedances can be approximated by their reactive part only, when a capacitive impedance will have negative sign. In the following, the notation of complex quantity is omitted.
- 2) In the case of particular resonance, harmonics with an order higher than 25 have to be considered.

### B.5.1 $Z_{eq}$ directement proportionnelle à la fréquence

Dans les installations simples, sans importants condensateurs de relèvement du facteur de puissance et sans important réseau de câbles, les conditions de résonance ne risquent pas d'apparaître pour des fréquences allant jusqu'au 13<sup>ème</sup> rang. Dans ce cas,  $Z_{eq}$  peut-être considérée comme étant principalement inductive, et définie approximativement comme suit:

$$|Z_{eq}| \approx |X_{eq}(h)| \approx h |X_{eq}(1)| \quad (\text{B.1})$$

avec

$X_{eq}(h)$  est la réactance du réseau au rang harmonique  $h$ ;

$X_{eq}(1)$  est la réactance du réseau à la fréquence fondamentale.

Cette approche peut être utilisée avec une précision raisonnable (normalement supérieure à  $\pm 20\%$ ) si:

- a) Le bus est alimenté par l'intermédiaire d'un transformateur, dont l'impédance,  $X_T$ , à la fréquence fondamentale, est élevée par rapport à l'impédance de l'alimentation haute tension,  $X_{HV}$ .

$X_T/X_{HV} > 10$       si la résonance dans l'alimentation haute tension est possible dans la gamme de fréquence considérée;

$X_T/X_{HV} > 4$       si la résonance dans l'alimentation haute tension est peu probable dans la gamme de fréquence considérée.

- b) La capacité totale connectée au système secondaire est si faible que la fréquence de résonance est au moins égale à 2,5 fois la fréquence harmonique étudiée la plus élevée.

La fréquence de résonance  $f_r$  est calculée comme suit :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (\text{B.2})$$

Soit  $L$  l'inductance par phase correspondant à  $Z_{eq}$  si la capacité est négligée, et  $C$  la capacité par phase connectée au point où  $Z_{eq}$  est à évaluer, en tenant compte à la fois des condensateurs pour le relèvement du facteur de puissance ainsi que de la capacité des câbles, la capacité d'un câble triphasé est typiquement 0,2  $\mu\text{F}/\text{km}$  à 0,6  $\mu\text{F}/\text{km}$  et par phase.

On peut également obtenir  $f_r$  par:

$$f_r = f_N \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}} \quad (\text{B.3})$$

où

$f_N$  est la fréquence fondamentale;

$S_{sc}$  est la puissance de court-circuit de l'alimentation;

$Q$  est la puissance réactive totale produite par les condensateurs et les câbles dans le système.

Les règles énoncées ci-dessus sont justifiées par l'étude suivante relative aux configurations de réseau simples.