

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
34-2

1972

AMENDEMENT 2
AMENDMENT 2

1996-11

Amendement 2

Machines électriques tournantes –

Partie 2:

**Méthodes pour la détermination des pertes
et du rendement des machines électriques
tournantes à partir d'essais (à l'exclusion
des machines pour véhicules de traction)**

Amendment 2

Rotating electrical machines –

Part 2:

**Methods for determining losses and efficiency
of rotating electrical machinery from tests
(excluding machines for traction vehicles)**

© CEI 1996 Droits de reproduction réservés — Copyright – all rights reserved

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

L

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

AVANT-PROPOS

Le présent amendement a été établi par le sous-comité 2G: Méthodes et procédures d'essai, comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

Le texte de cet amendement est issu des documents suivants:

FDIS	Rapports de vote
2G/73/FDIS 2/939/FDIS	2G/81/RVD 2/951/RVD

Les rapports de vote indiqués dans le tableau ci-dessus donnent toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cet amendement.

Page 2

SOMMAIRE

Ajouter le titre de l'annexe A comme suit:

Annexe A – Méthodes provisoires de détermination des pertes et du rendement des moteurs alimentés par convertisseurs

Page 12

5 Température de référence

Le texte existant doit être remplacé comme suit:

Sauf mention contraire, toutes les pertes RI^2 doivent être corrigées aux températures ci-dessus:

Classe thermique du système d'isolement	Température de référence °C
A, E	75
B	95
F	115
H	130

Si l'échauffement assigné ou la température assignée est spécifié(e) à une valeur correspondant à une classe thermique inférieure à la classe du système utilisé dans la construction, alors la température de référence doit être celle de la classe thermique la plus basse.

FOREWORD

This amendment has been prepared by sub-committee 2G: Test methods and procedures, of IEC technical committee 2: Rotating machinery.

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

FDIS	Reports on voting
2G/73/FDIS 2/939/FDIS	2G/81/RVD 2/951/RVD

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

Page 3

CONTENTS

Add the title of annex A as follows:

Annex A – Provisional methods for determining losses and efficiency of converter-fed cage induction machines

Page 13

5 Reference temperature

Replace the existing text by the following:

Unless otherwise specified, all I^2R losses shall be corrected to the temperatures given below:

Thermal class of the insulation system	Reference temperature °C
A, E	75
B	95
F	115
H	130

If the rated temperature rise or the rated temperature is specified as that of a lower thermal class than that used in the construction, the reference temperature shall be that of the lower thermal class.

Ajouter l'annexe A comme suit:

Annexe A (informative)

Méthodes provisoires de détermination des pertes et du rendement des moteurs alimentés par convertisseurs

INTRODUCTION

La présente annexe s'applique aux moteurs à induction triphasés à cage, de fréquence assignée inférieure ou égale à 120 Hz, alimentés par des convertisseurs comportant un pont milieu et appartenant aux types suivants: convertisseurs de courant et convertisseurs de tension, typiquement à modulation de la largeur d'impulsions (MLI).

Les méthodes de détermination des pertes et du rendement, données dans la section 3, sont désormais en partie inapplicables et la présente annexe indique les modifications d'essais à effectuer.

NOTE - Le convertisseur à indice de pulsation six est un cas particulier du convertisseur à impulsions.

En général, lorsqu'il est alimenté par un convertisseur, le moteur présente des pertes plus élevées que lorsqu'il est alimenté par une source sinusoïdale. Ces pertes supplémentaires dépendent du spectre d'harmoniques de la grandeur d'alimentation imposée (soit un courant, soit une tension). L'importance de ces pertes dépend du circuit et du mode de commande du convertisseur. En conséquence, un simple facteur correctif de ces pertes supplémentaires ne peut exister.

La détermination des pertes et du rendement du moteur devra alors, de préférence, utiliser des procédures dans lesquelles le moteur est alimenté par le même convertisseur que celui avec lequel il sera mis en service. Il est également entendu que des méthodes acceptables ne doivent pas nécessiter la connaissance de données technologiques du moteur, comme la géométrie des barres du rotor.

A.1 Détermination des pertes et du rendement des moteurs alimentés par convertisseurs

A.1.1 Composantes des pertes supplémentaires

Dans les moteurs à induction à cage, des pertes supplémentaires¹⁾ sont provoquées par les harmoniques soit de courant, soit de tension; elles sont composées des pertes suivantes:

- a) les pertes Joule supplémentaires dans les enroulements primaires;
- b) les pertes Joule supplémentaires dans les enroulements secondaires;
- c) les pertes supplémentaires dans les tôles.

NOTE - Les phénomènes physiques à l'origine des pertes supplémentaires sont traités au chapitre 5 de la CEI 34-17, 1992: «Guide d'application des moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs».

¹⁾ Ces pertes supplémentaires sont dues aux harmoniques de l'alimentation et n'incluent pas les pertes supplémentaires décrites en 8.1a) et 8.3 qui se réfèrent à une alimentation sinusoïdale seulement.

Add annex A as follows:

Annex A (informative)

Provisional methods for determining losses and efficiency of converter-fed cage induction machines

INTRODUCTION

This annex applies to cage induction machines with rated frequencies up to 120 Hz supplied by converters which have an intermediate circuit and are of the following types: I-converters and U-converters, typically Pulse Width Modulated (PWM).

The methods to determine losses and efficiency given in section 3 are partly no longer applicable and this annex indicates the test modifications that are necessary.

NOTE – The six-step converter is a special case of the pulsed converter.

In general, when fed from a converter, the motor losses are higher than during operation on a sinusoidal system. These additional losses depend on the harmonic spectrum of the impressed supply quantity (either current or voltage). Their magnitude is influenced by circuitry and control method of the converter. Consequently a simple factor to cover these additional losses cannot be found.

The determination of losses and efficiency will therefore preferably use procedures where the motor is operated together with the same converter with which it is going into service. It is also understood that suitable methods shall not require the knowledge of design data of the motor, such as the rotor bar geometry.

A.1 Determination of losses and efficiency of converter-fed motors

A.1.1 Components of the additional losses

In cage induction motors additional losses¹⁾ are produced due to the harmonics in either current or voltage, they are made up of the following components:

- a) additional I^2R losses in primary windings;
- b) additional I^2R losses in secondary windings;
- c) additional losses in active iron.

NOTE – The physical effects giving rise to the additional losses are treated in chapter 5 of IEC 34-17, 1992: "Guide for the application of cage induction motors when fed from converters".

¹⁾ These additional losses are due to harmonics of the supply and do not contain the additional losses described in 8.1a) and 8.3 which refer to sinusoidal supply of fundamental frequency only.

A.1.2 Détermination du rendement par la méthode globale des pertes

La méthode du mesure globale des pertes telle qu'elle est indiquée dans l'article 12 est une méthode recommandée, car toutes les pertes supplémentaires sont incluses dans le résultat (voir article A.3); toutefois, le matériel de mesure doit avoir une précision suffisante pour mesurer la puissance, le couple et la vitesse, ainsi qu'une gamme de fréquence appropriée. Des exigences complémentaires doivent donc être spécifiées en ce qui concerne les appareils de mesure et leurs accessoires (voir article A.2 s'ajoutant au contenu de l'article 3).

Pour garantir une tolérance relative acceptable de la mesure du rendement du moteur, l'erreur relative maximale $(\Delta P/P_a)_{\max}$ de la mesure de puissance doit être diminuée quand le rendement s'accroît, comme indiqué à la figure A.1.

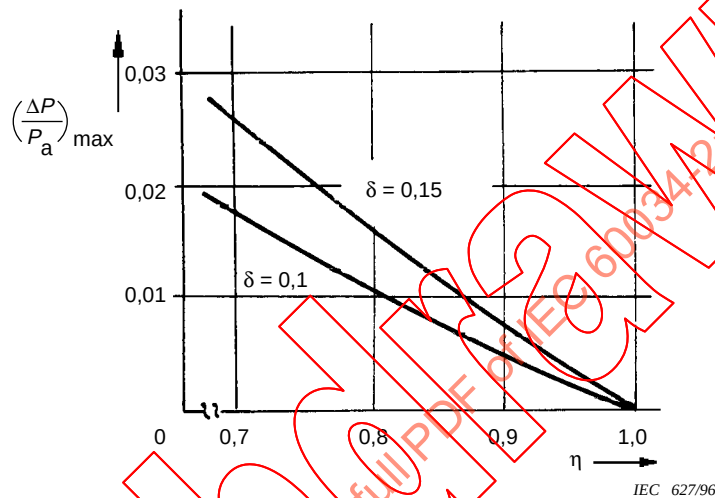


Figure A.1 – Erreur relative maximale admissible $(\Delta P/P_a)_{\max}$ pour la mesure globale des pertes²⁾

Il est également possible de déterminer le rendement global du système complet constitué par le convertisseur et le moteur par la méthode globale sur accord entre le constructeur et l'acheteur. Dans ce cas, le rendement du moteur ne peut pas être déterminé séparément.

A.1.3 Détermination du rendement par la méthode de totalisation des pertes

Un certain nombre d'hypothèses faites en 9.1 ne sont plus valables pour les moteurs alimentés par convertisseurs. Dans l'essai à vide, les pertes Joule dans l'enroulement secondaire (9.1.1.1) ne peuvent pas être négligées. Les pertes fer ne peuvent donc pas être séparées. L'essai à vide à tension variable (c'est-à-dire à flux variable) conformément à 9.1.1.3 est impossible à réaliser avec un grand nombre de convertisseurs du commerce, en raison de la plage limitée de réglage; en conséquence, il ne sera pas possible de séparer les pertes par friction et par ventilation (8.1b) et c)) des autres pertes à l'aide d'un essai à vide.

²⁾ δ = tolérance, décrite dans la CEI 34-1, tableau VIII, points 1 et 2. Les courbes sont basées sur une considération d'erreur simplifiée, supposant une erreur absolue ΔP du même ordre de grandeur sur $P_{\text{absorbée}}$ et P_{utile} . La figure A.1 est le graphe de l'équation $(\Delta P/P_a)_{\max} = \delta \cdot (1-\eta) / (1+\eta)$.

A.1.2 Efficiency determination by input-output measurement

The motor input-output measurement as indicated in clause 12 is a preferred method since all additional losses are incorporated in the result (see clause A.3); however, the measuring equipment must have sufficient accuracy for measuring power, torque and speed as well as an appropriate frequency range. Therefore, additional requirements for measuring instruments and accessories beyond the contents of clause 3 have to be specified (see clause A.2).

To keep within a required relative tolerance of the resulting motor efficiency, the maximum relative error $(\Delta P/P_{in})_{\max}$ of the power measurement has to be decreased with increasing efficiency, as shown in figure A.1.

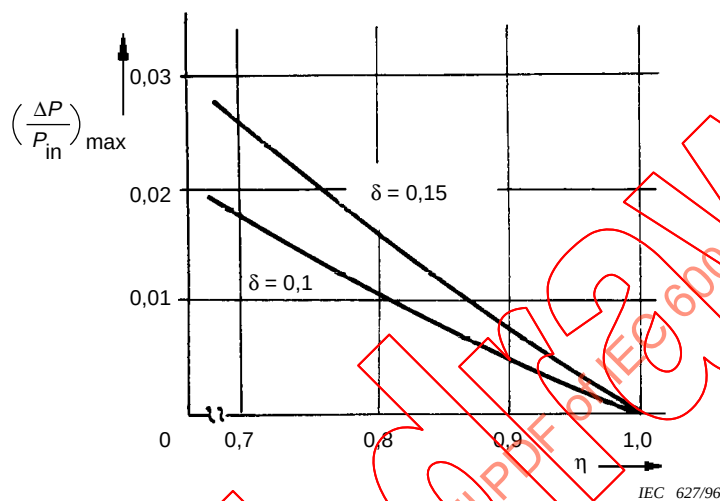


Figure A.1 – Maximum permissible relative error $(\Delta P/P_{in})_{\max}$ of input as well as output measurement

There is also the possibility to determine the overall efficiency of the complete system consisting of converter and motor by input-output measurement, applicable on agreement between manufacturer and purchaser. In this case the motor efficiency cannot be determined separately.

A.1.3 Efficiency determination by summation of losses

A number of presumptions made in 9.1 are no longer valid for motors fed from converters. In the no-load test, the I^2R losses in the secondary winding (9.1.1.1) may not be neglected. Therefore the iron losses cannot be separated. The no-load test at variable voltage (i.e. at variable flux) according to 9.1.1.3 cannot be carried through with many commercial converters, due to the limited range of adjustment; consequently there will be no possibility to separate the friction and windage losses (8.1b) and c)) from the other losses by a no-load test.

2) δ = tolerance as described in IEC 34-1, table VIII, items 1 and 2. The curves are based on a simplified error consideration, assuming errors ΔP of equal magnitude in P_{in} and P_{out} . Figure A.1 is a graph of the equation $(\Delta P/P_{in})_{\max} = \delta \cdot (1-\eta) / (1+\eta)$.

En ce qui concerne l'essai en charge, l'assertion de 9.1.2.1 selon laquelle «les pertes dans l'enroulement secondaire sont égales au produit du glissement par la puissance totale transmise à l'enroulement secondaire» est seulement valable pour une machine fonctionnant avec un courant sinusoïdal. De plus, le calcul des pertes Joule de l'enroulement primaire à partir de la résistance mesurée en utilisant la méthode d'injection de courant continu (9.1.2.1) provoquera une erreur due aux courants induits.

Donc, pour utiliser la méthode de totalisation des pertes, certaines hypothèses doivent être faites (voir article A.4).

A.1.4 Détermination du rendement par la méthode calorimétrique

L'application de la méthode calorimétrique est particulièrement utile dans le cas des moteurs alimentés par des convertisseurs car les pertes sont mesurées indépendamment de la forme d'onde de tension et de courant.

La méthode calorimétrique décrite à l'article 3 de la CEI 34-2A a été jugée intéressante car elle ne nécessite pas de perte de charge; dès lors, il n'est pas nécessaire de connaître la densité du fluide de refroidissement, cette densité étant fonction du taux d'humidité et de la température. De plus, la variation de la chaleur massique peut généralement être ignorée.

Dans un montage tel que celui décrit figure A.2, la puissance absorbée dans la résistance de dissipation peut être aisément, aussi les pertes du moteur peuvent-elles être calculées à partir de la formule:

$$P_v = P_d (T_2 - T_1) / (T_3 - T_2)$$

où

P_v représente les pertes du moteur;

P_d représente les pertes dissipées dans la résistance;

T_1 , T_2 , T_3 représente les températures mesurées aux points indiqués à la figure A.2.

La précision de la mesure dépend essentiellement des élévations de températures ($T_2 - T_1$) et ($T_3 - T_2$). La mesure doit être effectuée conformément à l'article 13 de la CEI 34-2A, afin de garantir une précision de mesure correspondant à l'article 15 et au tableau II.

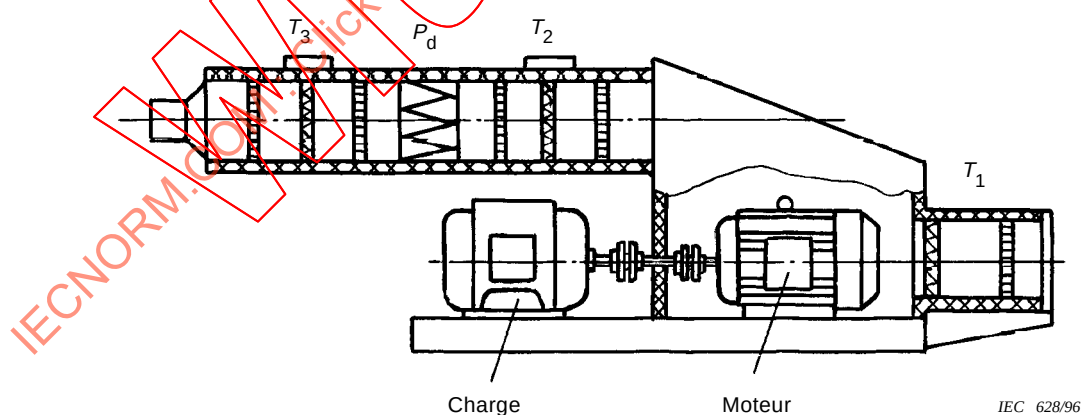


Figure A.2 – Schéma de montage d'essai pour la méthode d'étalonnage calorimétrique

Concerning the load test, the statement in 9.1.2.1 that "the secondary winding losses are taken to be equal to the product of the slip and the total power transmitted to the secondary winding" is only valid for a machine operated with a sinusoidal current of fundamental frequency. Moreover, to calculate the I^2R losses of the primary winding by means of the resistance measured using direct current (9.1.2.1) will produce an error due to eddy currents.

Hence when using the method of summation of losses certain assumptions have to be made (see clause A.4).

A.1.4 Efficiency determination by the calorimetric method

The calorimetric method is especially useful for application to converter-fed motors since the losses are measured independently of the waveforms of voltages and currents.

The calorimetric calibration method according to clause 3 of IEC 34-2A has been found of advantage since it does not require measurement of the mass rate of flow; hence the density of the cooling medium, being functions of humidity and temperature, need not be known. Moreover, the variation of specific heat capacity can usually be disregarded.

In a set-up according to figure A.2 the power absorbed in the dissipation resistor can be measured without difficulty, so that the motor losses may be calculated from the proportion:

$$P_v = P_d (T_2 - T_1) / (T_3 - T_2)$$

where

P_v represents the motor losses;

P_d represents the power absorbed in the dissipation resistor;

T_1 , T_2 , T_3 represents the measured temperatures at the points indicated in figure A.2.

The measuring accuracy depends mainly on the magnitude of temperature rise values ($T_2 - T_1$) and ($T_3 - T_2$). The measurement has to be made in accordance with clause 13 of IEC 34-2A, to enable an accuracy of measurement as indicated in clause 15 and table II.

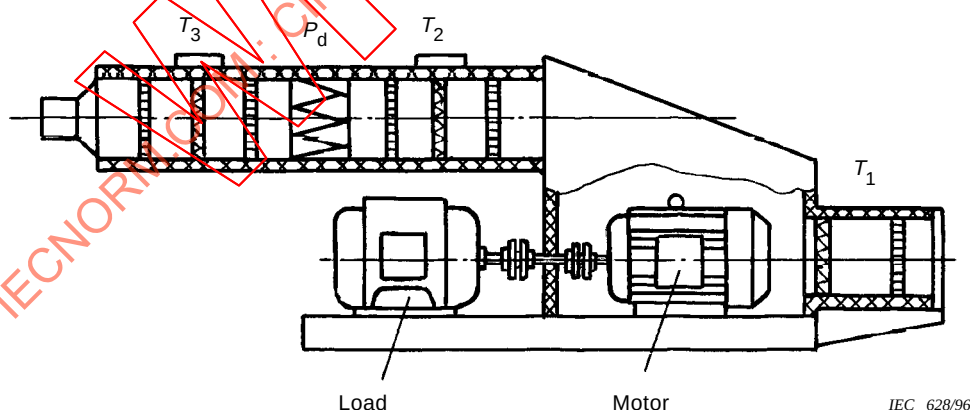


Figure A.2 – Schematic diagram of a test set-up for the calorimetric calibration method

A.1.5 Détermination du rendement par la totalisation des pertes à partir d'essais sur un système sinusoïdal, avec des coefficients forfaitaires pour la prise en compte des pertes supplémentaires

Les moteurs et les convertisseurs de construction conventionnelle sont souvent uniquement associés sur le site pour lequel ils sont destinés. Dans ce cas, une méthode de détermination du rendement, en ajoutant un terme forfaitaire aux pertes connues avec une source sinusoïdale, serait particulièrement bienvenue. Malheureusement, comme indiqué précédemment, il n'y a aucune possibilité de définir des valeurs convenables de ce terme forfaitaire pouvant couvrir la grande diversité des circuits de convertisseurs et des modes de commande. Actuellement, des données expérimentales, rassemblées pour une certaine gamme de puissances utiles et de type de circuit, autorisent seulement un niveau limité de coefficients forfaitaires (voir article A.5).

A.1.6 Méthodes recommandées

Selon les caractéristiques assignées des moteurs, l'application des méthodes suivantes est recommandée pour les moteurs de fréquence assignée égale à 50 Hz ou 60 Hz:

- a) La méthode globale (article A.3) en cas d'alimentation par un convertisseur de courant ou un convertisseur de tension, pour les moteurs de puissance ≤ 50 kW. La méthode globale peut aussi être appliquée à des moteurs de puissance > 50 kW, sur accord de l'acheteur et du constructeur³⁾.
- b) La méthode de totalisation des pertes en cas d'alimentation par un convertisseur de courant (A.4.1) ou un convertisseur de tension (A.4.2) pour les moteurs de puissance > 50 kW.
- c) La méthode de totalisation des pertes avec une source sinusoïdale (9.1) et un essai à vide en cas d'alimentation par un convertisseur de tension (A.4.3) pour des moteurs essayés sur banc d'essais (quelle que soit la puissance des moteurs).
- d) La méthode calorimétrique (A.1.4) applicable à toutes les puissances, avec des convertisseurs de courant et des convertisseurs de tension.

A.2 Recommandations pour les appareils de mesure

Des appareils de mesure de valeurs efficaces de courant et de tension, et de mesure de puissance active sont nécessaires. Dans la méthode globale, la mesure de la puissance active définit, en même temps que les matériels de mesure du couple et de la vitesse, la précision des résultats.

En considérant la contribution des harmoniques aux pertes, il faut prendre soin de choisir un appareillage de mesure apte à fonctionner dans la gamme de fréquences concernées avec une précision suffisante. Les valeurs suivantes sont recommandées pour la bande passante f^4 du matériel de mesure, y compris les transformateurs de mesure, les transducteurs et les résistances de shuntage:

$f_r = 10 f_1$ pour des convertisseurs à indice de pulsation six;

$f_r = 6 f_p$ pour des convertisseurs MLI, avec un maximum de 100 kHz:

³⁾ Si, par accord, la méthode est appliquée à des moteurs de plus forte puissance, il faut accepter que l'erreur commise sur la détermination du rendement puisse dépasser les limites de tolérance données dans le tableau VIII de la CEI 34-1.

⁴⁾ Pour des appareils conventionnels de mesure (voir CEI 51), la précision est spécifiée pour la fréquence nominale (par exemple 0,2 % pour 40...60 Hz), et une erreur supplémentaire de la classe de précision est tolérée pour une fréquence spécifiée supérieure (par exemple 0,4 % à 1000 Hz). Pour les appareils de mesure électroniques, une bande de fréquences, correspondant à la plus grande fréquence spécifiée, est habituellement indiquée. La précision est donnée à la fois pour 50 Hz ou 60 Hz et pour la plus grande fréquence spécifiée. Par la suite, cette fréquence sera appelée bande passante de l'appareil.

A.1.5 *Efficiency determination by summation of losses from tests on a sinusoidal system with lumped increments to take care of the additional losses*

Often standard design motors and converters are coupled together only on the site of service. Especially in these cases a method to determine efficiency by adding a lumped increment to the known losses on sinusoidal supply would be welcome, but, as mentioned before, there is no chance to define suitable values covering the wide variety of converter circuits and control methods. At the present state, experimental data collected for a certain range of output and circuitry allow only a limited statement on lumped increments (see clause A.5).

A.1.6 *Recommended methods*

Depending on the rating of the motors, application of the following methods is recommended for machines of rated frequency 50 Hz or 60 Hz:

- a) Input-output measurement (clause A.3) when fed from I- or U-converter for motors ≤ 50 kW.

The method may also be applied to motors of higher rated output by agreement between the purchaser and the manufacturer³⁾.

- b) Summation of losses when fed from I-converter (clause A.4.1) or U-converter (A.4.2) for motors > 50 kW.

- c) Summation of losses with sinusoidal supply (9.1) and no-load test when fed from U-converter (A.4.3) for motors tested in a test-shop (irrespective of rating).

- d) The calorimetric method (A.1.4) applicable to all ratings with I- and U-converter.

A.2 **Requirements for the measuring instruments**

Instruments for r.m.s. current and voltage and for active power are necessary. In the input-output measurement method, the latter determines, together with the equipment to measure torque and speed, the accuracy of the results.

Regarding the contribution of the harmonics to the losses, care has to be taken to select measuring equipment capable of operating in the range of relevant frequencies with sufficient accuracy. The following is required of the frequency range⁴⁾ f_r of the measuring equipment with inclusion of instrument transformers, transducers and shunt resistors:

$$f_r = 10 f_1 \text{ for six-step converters;}$$

$$f_r = 6 f_p \text{ for PWM converters, with a maximum of 100 kHz;}$$

³⁾ If by agreement the method is applied to motors of higher rating, it has to be accepted that the error of the determined efficiency can exceed the tolerance values given in IEC 34-1, table VIII.

⁴⁾ For conventional indicating measuring instruments (see IEC 51) the accuracy is specified for the nominal frequency (e.g. 0,2 % for 40...60 Hz), while an additional error of the class accuracy is tolerated at an upper specified frequency (e.g. 0,4% at 1000 Hz). For electronic measuring instruments, usually a frequency range is indicated which means the upper specified frequency. The accuracy is given both for 50 Hz or 60 Hz and for the upper specified frequency. In the following this will be called the frequency range of an instrument.

où

f_1 est la fréquence maximale assignée;

f_p est la fréquence maximale d'impulsion (fréquence de la porteuse).

Pour les convertisseurs à indice de pulsation six, ces exigences peuvent être remplies par des appareils électrodynamiques conventionnels. Pour les convertisseurs MLI, il est nécessaire d'utiliser des appareils de bande passante plus large. Ce seront de préférence des appareils électroniques comportant des convertisseurs analogiques numériques (CAN) et des processeurs de signaux.

NOTES

- 1 Avec des valeurs élevées de fréquence d'impulsion, il convient de ne pas utiliser la méthode des deux wattmètres car la somme des courants peut ne pas être nulle, en raison des courants capacitifs. Un appareil de mesure de puissance par phase sera utilisé.
- 2 On considère que les précisions suivantes sont atteintes avec des appareils de mesure appropriés: la puissance à 0,5 %, le couple à 0,4 % et la vitesse à 0,1 %.
- 3 Les harmoniques en sortie du convertisseur et leurs rangs supérieurs dépendent de la méthode de modulation. Des considérations de base sont données à l'article A.6.

A.3 Méthode globale

Pour déterminer le rendement des moteurs alimentés par convertisseurs, l'essai au frein ((9.3.1) voir amendement 1) ou l'essai avec machine auxiliaire tarée ((9.3.2) voir amendement 1) peuvent être appliqués. Ces méthodes sont aussi applicables à des conditions de fonctionnement différentes de la fréquence assignée, y compris le défluxage.

Cette méthode directe est restreinte aux moteurs dont la puissance n'excède pas la limite de puissance assignée donnée en A.1.6.

A.4 Totalisation des pertes

La totalisation des pertes peut être appliquée au moyen d'un essai à vide modifié (9.1.1.1) et d'un essai en charge modifié (9.1.2.1). Ces deux essais sont effectués à la fréquence assignée, la tension étant réglée suivant les possibilités du convertisseur, c'est-à-dire au moyen d'une courbe caractéristique ou d'un contrôle vectoriel.

Des modifications différentes doivent être apportées pour les convertisseurs de courant et les convertisseurs de tension.

A.4.1 Moteur alimenté par un convertisseur de courant pleine onde⁵⁾

On admet que la forme de l'onde de courant ne change pas entre l'essai à vide et l'essai en charge, de telle sorte que le taux d'harmoniques relatif est indépendant de la charge. On admet également que les pertes fer supplémentaires sont en majeure partie dues à l'inversion du flux de fuite. Avec ces hypothèses, les pertes supplémentaires dues aux harmoniques dépendent essentiellement du courant et varient comme le carré de la valeur efficace du courant de l'enroulement primaire.

⁵⁾ Des spécifications pour l'alimentation à partir de convertisseurs de courant à modulation de largeur d'impulsion ne sont pas incluses dans ce document.

where

f_1 is the maximum rated frequency;

f_p is the maximum pulse frequency (carrier frequency).

For six-step converters, these requirements can be met by conventional electrodynamic instruments. For PWM converters it is necessary to employ equipment with a broader frequency range. These will preferably be electronic instruments with AD-converters and digital data processing.

NOTES

- 1 With high values of pulse frequency the two-wattmeter (Aron) method should not be used since, due to capacitive currents, the sum of input currents may differ from zero. Hence, one power measuring instrument per phase shall be applied.
- 2 It is considered that the following accuracies are within reach with appropriate measuring equipment: power with 0,5 %, torque with 0,4 % and speed with 0,1 %.
- 3 The converter output harmonics and their dominant order numbers depend on the modulation method. Basic considerations are given in clause A.6.

A.3 Total loss measurement

To determine the efficiency of motors when fed from converters, the braking test ((9.3.1) see amendment 1) or the calibrated machine test ((9.3.2) see amendment 1) may be applied. These methods are also applicable to operating conditions with other than rated frequency, including field-weakening.

This direct method is restricted to machines not exceeding the limit of rated power referred to in A.1.6.

A.4 Summation of losses

The summation of losses can be applied by means of a modified no-load test (9.1.1.1) and a modified load test (9.1.2.1). Both are carried through at rated frequency and voltage, the voltage being adjusted according to the features of the converter, e.g. by means of an inherent characteristic curve or by field-oriented control.

Different modifications have to be observed for I-converters and U-converters.

A.4.1 Motor supplied by I-converter with block-wave output⁵⁾

It is assumed that the waveform of the current does not change between no-load and full load, so that the relative harmonic content is independent of the load. It is also assumed that the additional iron losses are predominantly losses due to magnetic reversal of leakage fluxes. Under these assumptions the additional losses due to harmonics depend mainly on the current and vary with the square of the primary r.m.s. current.

⁵⁾ Specifications for supply by I-converters with pulse-width-modulation are not contained in this document.

Théoriquement, ceci permet la détermination des pertes supplémentaires en charge à partir de la différence entre les «pertes constantes» mesurées lors des essais à vide, en alimentation sinusoïdale et en alimentation par convertisseur. En pratique, cependant, des erreurs grossières pourraient être induites avec une telle méthode.

A.4.1.1 Essai à vide, moteur alimenté par convertisseur

La différence entre la puissance absorbée et les pertes dans l'enroulement primaire calculées à partir de la mesure en continu de la résistance inclut les pertes constantes (selon 8.1, prenant uniquement en compte le fondamental) et les composantes de pertes suivantes:

- les pertes supplémentaires de l'enroulement primaire dues à l'augmentation de la résistance par suite des courants induits;
- les pertes fer supplémentaires;
- les pertes dans l'enroulement secondaire dues aux harmoniques.

Toutes ces composantes de pertes apparaissent dans la somme des pertes constantes quand on applique l'essai à vide (9.1.1.1).

A.4.1.2 Essai en charge, moteur alimenté par convertisseur

En appliquant la méthode décrite en 9.1.2.1 avec les lectures obtenues lors de l'essai en charge avec convertisseur, les pertes calculées de l'enroulement secondaire seront trop faibles. Afin de compenser la différence, en charge et à vide, entre les pertes dans l'enroulement secondaire dues aux harmoniques et les pertes dans l'enroulement primaire dues aux courants induits, il convient d'ajouter 0,5 % de la puissance absorbée aux pertes en pleine charge (c'est-à-dire en complément aux pertes supplémentaires forfaitaires de 0,5 % préconisées par 9.1.3), sauf accord contraire, et en admettant que les pertes varient comme le carré du courant primaire.

A.4.2 Moteur alimenté par convertisseur de tension

NOTE – Ce qui suit s'applique à la fois aux convertisseurs à indice de pulsation six et aux convertisseurs MLI.

On peut admettre que les valeurs absolues des courants harmoniques sont indépendantes de la charge. Le rendement sera obtenu en effectuant un essai à vide et un essai en charge, avec le convertisseur dans les deux cas.

Les pertes supplémentaires sont incluses dans la «somme des pertes constantes» déterminée lors de l'essai à vide conformément à 9.1.1.1. En conséquence, les pertes Joule dans l'enroulement secondaire à prendre en compte sont celles dues à la fréquence fondamentale de glissement des courants uniquement. Elles sont déterminées à partir de l'essai en charge selon une méthode différente de celle indiquée dans 9.1.2.1; elles sont considérées comme égales au produit du glissement et de la puissance fondamentale transmise au rotor, c'est-à-dire la puissance absorbée diminuée des pertes Joule dans l'enroulement primaire et la «somme des pertes constantes», excepté les pertes par frottement et ventilation. Ces dernières peuvent être déterminées à partir d'un essai de ralentissement. La valeur forfaitaire des pertes supplémentaires en charge dues au fondamental, en conformité avec 9.1.3, doit être appliquée.

In theory this allows determination of the additional losses under load from the difference of "constant losses" measured in no-load tests on both sinusoidal and converter supply. In practice, however, considerable errors would have to be expected from such a method.

A.4.1.1 *No-load test when fed by converter*

The difference between the measured input and the primary winding losses as calculated from the d.c. resistance contains the constant losses (according to 8.1, taking only the fundamental into account) and the following components:

- additional primary winding losses due to increased resistance because of eddy currents,
- additional iron losses,
- secondary winding losses due to harmonics.

All these components will appear within the sum of the constant losses when applying the no-load tests (9.1.1.1).

A.4.1.2 *Load test when fed by converter*

When applying the method of 9.1.2.1 with readings from the load test with converter, the calculated secondary winding losses will be too small. In order to compensate for the difference of harmonic secondary winding losses under load and no-load, and for eddy current losses of the harmonics in the primary winding, 0,5 % of the input power shall be added to the losses at full load (i.e. additionally to the lumped additional losses of 0,5 % prescribed by 9.1.3), unless otherwise agreed, and assuming that the losses vary as the square of the primary current.

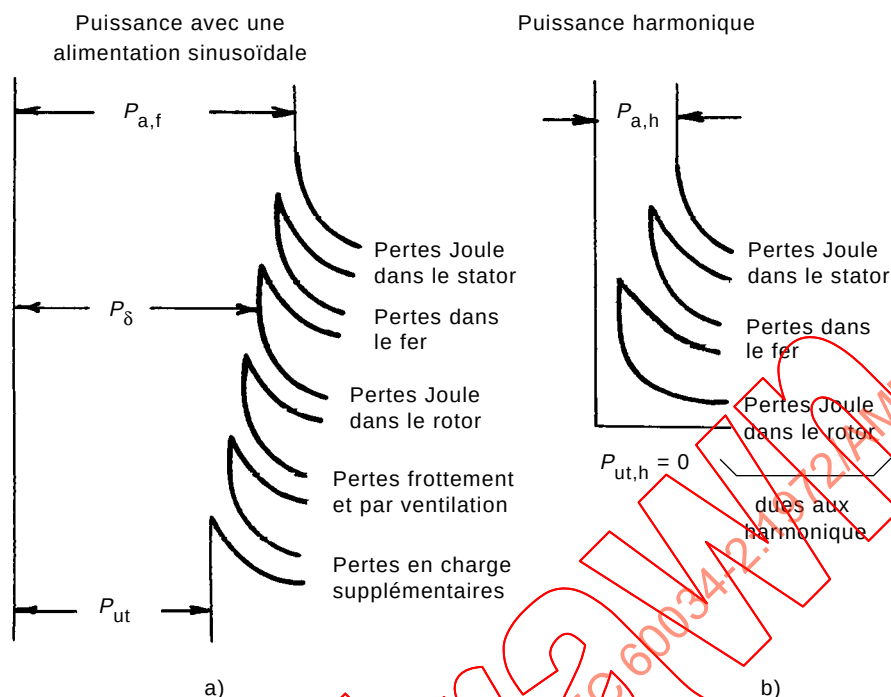
A.4.2 *Motor supplied by U-converter*

NOTE - The following applies both to six-step and PWM converters.

It may be assumed that the absolute values of the harmonic currents are independent of the load. The efficiency will be obtained by applying a no-load test and a load test both with converter.

The additional losses are contained in the "sum of the constant losses" as determined from the no-load test according to 9.1.1.1. Consequently the I^2R losses in the secondary winding to be taken into account in the summation of losses are those due to the fundamental slip frequency currents only. They are determined from the load test in a way different from 9.1.2.1; they are taken to be equal to the product of the slip and the fundamental power transmitted to the rotor, i.e. the power absorbed, decreased by the I^2R losses in the primary winding and the "sum of the constant losses" except the friction and windage losses. The latter can be determined from a retardation test. The lumped value of the additional load losses due to the fundamental according to 9.1.3 has to be applied.

La figure A.3 donne un diagramme de la puissance harmonique et des pertes supplémentaires correspondantes. La séparation des pertes supplémentaires est seulement possible dans le cas où les pertes en alimentation sinusoïdale sont connues.



IEC 629/96

Figure A.3 – Diagramme de puissance et de pertes⁶⁾ : a) avec une alimentation sinusoïdale, et b) puissance harmonique et pertes supplémentaires correspondantes dues à une alimentation non sinusoïdale

A.4.3 Totalisation des pertes par un essai en charge avec une alimentation sinusoïdale et un essai à vide avec une alimentation par convertisseur de tension

Lorsqu'une alimentation sinusoïdale est disponible, les pertes en charge devront être déterminées à partir de l'essai en charge spécifié en 9.1.2.1. L'essai à vide est réalisé conformément à 4.9.

Les pertes supplémentaires en charge doivent être déterminées conformément à 9.1.3.

A.5 Méthode utilisant des coefficients forfaitaires appliqués aux pertes déterminées en alimentation sinusoïdale

Des essais sur des moteurs triphasés à induction à cage alimentés successivement avec une onde sinusoïdale et un convertisseur ont été effectués en vue de déterminer les pertes supplémentaires exprimées en pourcentage de la puissance absorbée, la puissance utile étant restée la même dans les deux types d'alimentation.

⁶⁾ Symboles de la figure A.3:

- $P_{a, f}$ = puissance avec une alimentation sinusoïdale;
- P_{δ} = puissance transmise à l'enroulement secondaire;
- P_{ut} = puissance utile;
- $P_{a, h}$ = puissance absorbée harmonique;
- $P_{ut, h}$ = puissance utile harmonique.

Figure A.3 gives a diagram of the harmonic power and corresponding additional losses. Separation of the additional losses is only possible when the constant losses with sinusoidal supply are known.

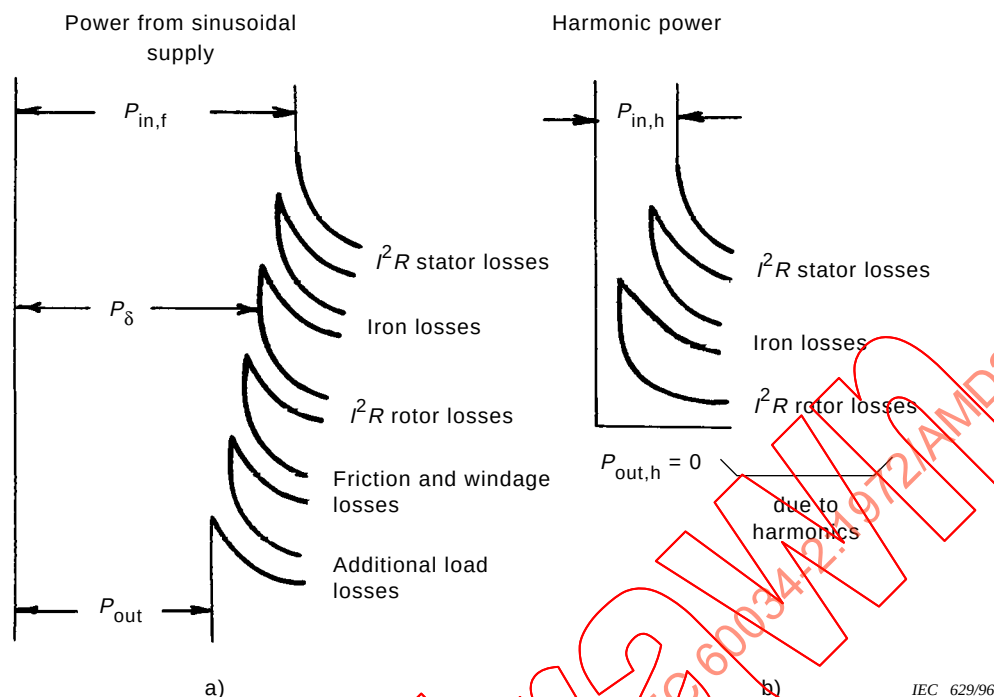


Figure A.3 – Power and losses diagram⁶⁾: a) with a sinusoidal supply, and b) harmonic power and corresponding additional losses due to non-sinusoidal supply

A.4.3 Summation of losses by a load test with sinusoidal supply and a no-load test with converter supply

When a sinusoidal supply is available, the load losses shall be determined from the load test as specified in 9.1.2.1. The no-load test is performed according to 4.9.

The additional load losses as specified in 9.1.3 have to be applied.

A.5 Method with assumed increments to the losses determined on sinusoidal supply

Experience available from three-phase cage induction motors tested both with sinusoidal waveform and with converter supply has been evaluated to obtain the additional losses, expressed as percentage of the input, whilst the output was the same in both cases.

⁶⁾ Symbols in figure A.3:

$P_{in, f}$ = fundamental input power;

P_{δ} = power transmitted to the secondary winding;

P_{out} = output;

$P_{in, h}$ = harmonic input power;

$P_{out, h}$ = harmonic output power.

– Pour les moteurs de puissance assignée comprise entre 30 kW et 1015 kW, fonctionnant avec des convertisseurs de courant à indice de pulsation six et à la fréquence assignée de 50 Hz ou 60 Hz, les pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur se situent entre 0,6 % et 1,25 % de la puissance absorbée. On peut admettre un coefficient raisonnable de 1 % pour les moteurs de puissance assignée supérieure à 30 kW.

– Pour les moteurs alimentés par des convertisseurs de tension, les résultats dépendent de la fréquence de pulsation, du mode de génération des impulsions et de l'indice de modulation. Les résultats expérimentaux issus de convertisseurs MLI avec une onde de référence sinusoïdale ont montré des valeurs de pertes supplémentaires pouvant être pratiquement négligeables comme pouvant atteindre 3 % de la puissance absorbée. Avec des convertisseurs de tension à indice de pulsation six, on peut admettre un coefficient de 1,5 %.

A.6 Considération de base concernant les convertisseurs

A.6.1 Formes d'ondes typiques des convertisseurs

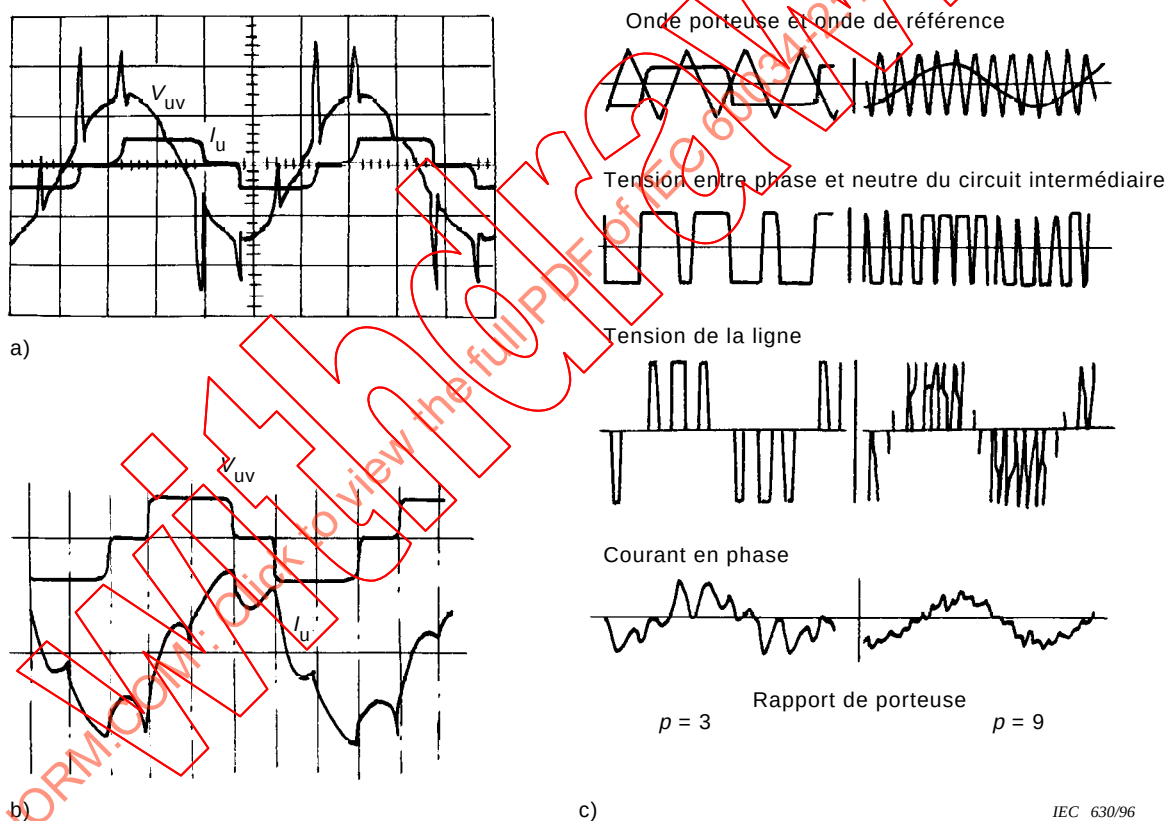


Figure A.4 – Formes d'ondes de courant et de tension typiques:
a) convertisseur de courant à indice de pulsation six;
b) convertisseur de tension à indice de pulsation six;
c) convertisseur de tension MLI

– For machines between 30 kW and 1015 kW rated output, operated with six-step I-converter and 50 Hz or 60 Hz rated frequency, the additional losses due to converter supply are between 0,6 % and 1,25 % of the input. A suitable assumed increment for motors above 30 kW rated output is 1 %.

– For machines with U-converters the results depend on pulse-frequency, pulse-generating scheme and modulation index. The experimental results from PWM converters with sinusoidal reference wave showed additional losses from almost negligible values up to 3 % of the input. With six-step U-converters a suitable assumed increment is 1,5 %.

A.6 Basic considerations concerning converters

A.6.1 Typical converter output waveforms

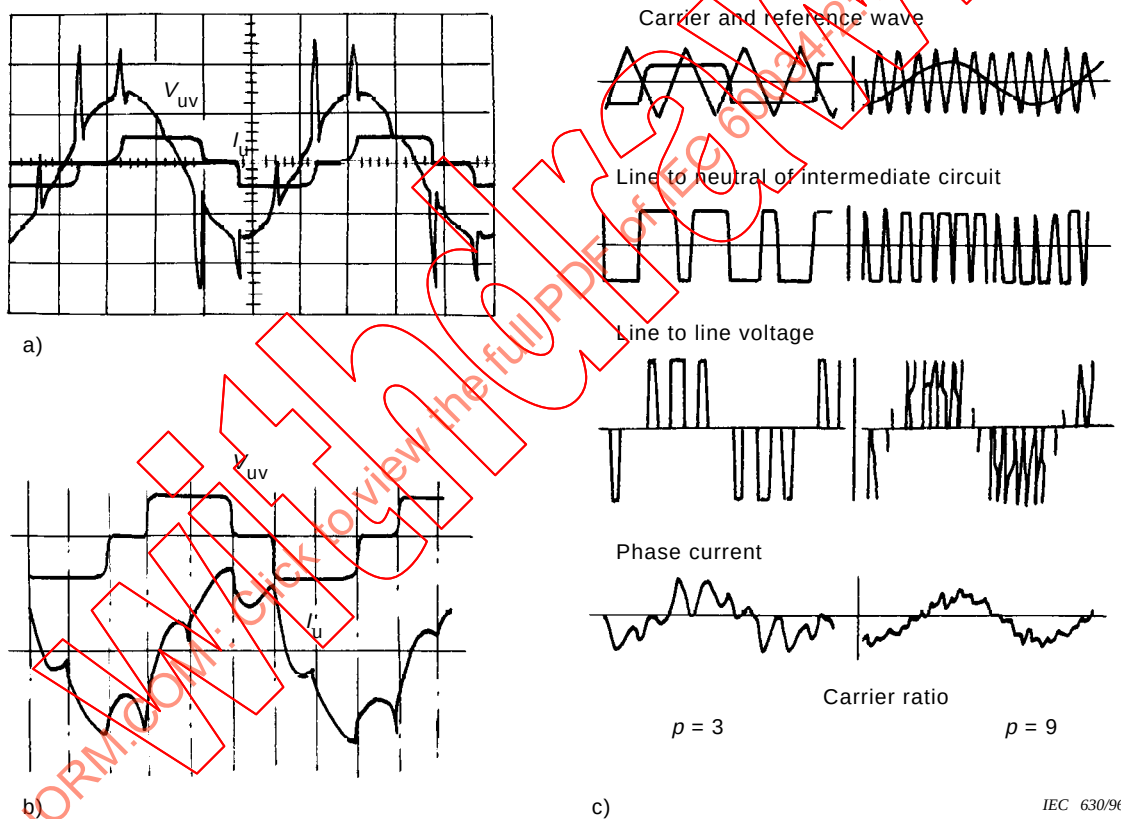


Figure A.4 – Typical voltage and current waveform:

- a) six-step I-converter drive;**
- b) six-step U-converter drive;**
- c) PWM U-converter drive**

A.6.2 Harmoniques des convertisseurs MLI

Le spectre d'harmoniques des courants et tensions délivrés par les convertisseurs dépend de la méthode de modulation.

Des expressions analytiques peuvent être trouvées pour la génération d'impulsions synchrones à partir de l'interaction d'une onde porteuse et d'une onde de référence, les fréquences de ces ondes ayant un rapport constant. Les convertisseurs de tension avec une modulation de la largeur d'impulsions en sont des exemples. Le spectre des harmoniques de tension peut être décrit en termes de fréquence fondamentale f_1 , de fréquence d'impulsions f_p et de l'indice de modulation M .

Soit f_1 la fréquence fondamentale du convertisseur, les fréquences des harmoniques seront alors:

$f_n = n \cdot f_1$, n étant un nombre entier pour les méthodes de modulation synchrone. Avec les convertisseurs triphasés à indice de pulsation six, les harmoniques sont de rang $n = 5, 7, 11, 13, \dots$, le taux d'harmoniques décroissant quand n augmente.

La fréquence d'impulsions f_p est égale au nombre de commutations par seconde des valves appartenant à un même bras du convertisseur; pour la modulation MLI, cette fréquence est identique à la fréquence d'échantillonnage. La quantité $p = f_p/f_1$ appelée rapport de porteuse, est choisie comme étant un multiple de 3 pour assurer des tensions triphasées équilibrées en sortie du convertisseur. La modulation sinus et la modulation trapèze produisent un spectre d'harmoniques en sortie du convertisseur comprenant des harmoniques de rang $n = p \pm m_g$ ($m_g = 2, 4, \dots$) et $n = 2p \pm m_u$ ($m_u = 1, 3, \dots$).

L'indice de modulation M est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde de référence et de l'onde porteuse. Sur une large gamme de valeur de M , un harmonique proche de $2 f_p$ est prédominant dans le spectre de la tension aux bornes du moteur. Les harmoniques de tension d'entrée du moteur étant connues, les harmoniques de courant dépendent de l'impédance du moteur.

Les modes de génération d'impulsions asynchrones peuvent provoquer des harmoniques de rangs fractionnaires.

Les harmoniques de courant du moteur pourront être diminuées par l'insertion de filtres entre la sortie du convertisseur et l'entrée du moteur. Dans le cas de convertisseurs de courant fonctionnant en modulation de largeur d'impulsions, un filtre convenable (avec des condensateurs) est nécessaire.