

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
34-16-3**

Première édition
First edition
1996-01

Machines électriques tournantes –

Partie 16:

Systèmes d'excitation pour machines synchrones –
Section 3: Performances dynamiques

Rotating electrical machines –

Part 16:

Excitation systems for synchronous machines –
Section 3: Dynamic performance



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 34-16-3: 1996

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

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

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

Terminologie

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

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

Symboles graphiques et littéraux

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

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

et pour les appareils électromédicaux,

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

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

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

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

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

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

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

Terminology

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

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

Graphical and letter symbols

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

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

and for medical electrical equipment,

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

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

**RAPPORT
TECHNIQUE – TYPE 2
TECHNICAL
REPORT – TYPE 2**

**CEI
IEC
34-16-3**

Première édition
First edition
1996-01

Machines électriques tournantes –

Partie 16:

**Systèmes d'excitation pour machines synchrones –
Section 3: Performances dynamiques**

Rotating electrical machines –

Part 16:

**Excitation systems for synchronous machines –
Section 3: Dynamic performance**

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

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

Q

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application	10
2 Performances en petits mouvements	10
2.1 Méthodes de description des performances en petits mouvements.....	10
2.2 Effets du contrôle d'excitation sur la stabilité du réseau	12
2.3 Utilisation de stabilisateurs de puissance.....	14
3 Performances en grands mouvements.....	16
3.1 Généralités	16
3.2 Critères de performances en grands mouvements	16
Tableau 1 – Valeurs habituelles de systèmes de contrôle d'excitation.....	12
Figures	
1 Système d'excitation et machine synchrone simplifiés	20
2 Réponse temporelle d'un système de contrôle d'excitation simplifié à un échelon	22
3 Réponse harmonique en boucle ouverte d'un système de contrôle d'excitation simplifié avec la machine synchrone à vide	24
4 Réponse harmonique en boucle fermée d'un système de contrôle d'excitation simplifié avec la machine synchrone à vide	26
5 Lieu des pôles en boucle ouverte d'un système de contrôle d'excitation simplifié avec la machine synchrone à vide.....	28
6 Lieu des pôles en boucle fermée d'un système de contrôle d'excitation simplifié avec la machine synchrone à vide en fonction de la variation du gain de boucle K	30
7 Fonction de transfert d'un stabilisateur de puissance.....	32
8 Variante de fonction de transfert d'un stabilisateur de puissance	32

CONTENTS

	Page
FOREWORD.....	5
Clause	
1 Scope	11
2 Small signal performance	11
2.1 Methods of describing small signal performance	11
2.2 Effects of excitation control on system stability	13
2.3 Application of power system stabilizers.....	15
3 Large signal performance	17
3.1 General.....	17
3.2 Large signal performance criteria.....	17
Table 1 – Typical range of excited control system.....	13
Figures	
1 Simplified excitation system and synchronous machine.....	21
2 Time response of a simplified excitation control system to a step change.....	23
3 Open-loop frequency response of a simplified excitation control system with the synchronous machine open-circuited	25
4 Closed-loop frequency response of a simplified excitation control system with the synchronous machine open-circuited	27
5 Pole/zero plot, open-loop, of a simplified excitation control system with the synchronous machine open-circuited	29
6 Root locus plot, closed-loop of a simplified excitation control system with the synchronous machine open-circuited as loop gain, K , is varied	31
7 Power system stabilizer transfer function.....	33
8 Alternative power system stabilizer transfer function.....	33

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 16: Systèmes d'excitation pour machines synchrones – Section 3: Performances dynamiques

AVANT-PROPOS

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

La 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.

La CEI 34-16-3, rapport technique de type 2, a été établie par le comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

**Part 16: Excitation systems for synchronous machines –
Section 3: Dynamic performance**

FOREWORD

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

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 the 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 34-16-3, which is a technical report of type 2, has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

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

Projet de comité	Rapport de vote
2/911/CDV	2/929/RVC

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.

Le présent document est publié dans la série des rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.3.2.2 de la partie 1 des Directives ISO/CEI) comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine des performances dynamiques des systèmes d'excitation pour machines synchrones car il est urgent d'avoir des indications sur la meilleure façon d'utiliser les normes dans ce domaine afin de répondre à un besoin déterminé.

Ce document ne doit pas être considéré comme une «Norme internationale». Il est proposé pour une mise en oeuvre provisoire, dans le but de recueillir des informations et d'acquérir de l'expérience quant à son application dans la pratique. Il est de règle d'envoyer les observations éventuelles relatives au contenu de ce document au Bureau Central de la CEI.

Il sera procédé à un nouvel examen de ce rapport technique de type 2 trois ans au plus tard après sa publication, avec la faculté d'en prolonger la validité pendant trois autres années, de le transformer en Norme internationale ou de l'annuler.

Le présent rapport constitue la section 3 de la seizième partie d'une série de publications traitant de machines électriques tournantes dont les autres parties sont:

- Première partie: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement publiée comme CEI 34-1.
- Deuxième partie: 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), publiée comme CEI 34-2.
- Troisième partie: Règles spécifiques pour les turbomachines synchrones, publiée comme CEI 34-3.
- Quatrième partie: Méthodes pour la détermination à partir d'essais des grandeurs des machines synchrones, publiée comme CEI 34-4.
- Cinquième partie: Classification des degrés de protection procurés par les enveloppes des machines électriques tournantes (code IP), publiée comme CEI 34-5.
- Sixième partie: Modes de refroidissement (code IC), publiée comme CEI 34-6.
- Septième partie: Classification des formes de construction et des dispositions de montage (code IM), publiée comme CEI 34-7.
- Huitième partie: Marques d'extrémités et sens de rotation des machines tournantes, publiée comme CEI 34-8.
- Neuvième partie: Limites du bruit, publiée comme CEI 34-9.
- Dixième partie: Conventions relatives à la description des machines synchrones, publiée comme CEI 34-10.
- Onzième partie: Protection thermique incorporée – Chapitre 1: Règles concernant la protection des machines électrique tournantes, publiée comme CEI 34-11.

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

Committee draft	Report on voting
2/911/CDV	2/929/RVC

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

This document is issued in the type 2 technical report series of publications (according to G.3.2.2 of part 1 of the ISO/IEC Directives) as a 'prospective standard for provisional application' in the field of dynamic performance of excitation systems for synchronous machines because there is an urgent requirement for guidance on how standards in this field should be used to meet an identified need.

This document is not to be regarded as an 'International Standard'. It is proposed for provisional application so that information and experience of its use in practice may be gathered. Comments on the content of this document should be sent to the IEC Central Office.

A review of type 2 technical reports will be carried out not later than three years after their publication with the options of: extension for another three years; conversion into an International Standard; or withdrawal.

This report forms section 3 of Part 16 of a series of publications dealing with rotating machinery, the other parts being:

- Part 1: Rating and performance, issued as IEC 34-1
- Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles), issued as IEC 34-2.
- Part 3: Specific requirements for turbine-type synchronous machines, issued as IEC 34-3.
- Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests, issued as IEC 34-4.
- Part 5: Classification of degrees of protection provided by enclosures of rotating machines (IP code), issued as IEC 34-5
- Part 6: Methods of cooling (IC code), issued as IEC 34-6.
- Part 7: Classification of types of constructions and mounting arrangements (IM code), issued as IEC 34-7
- Part 8: Terminal markings and direction of rotation of rotating machines, issued as IEC 34-8.
- Part 9: Noise limits, issued as IEC 34-9.
- Part 10: Conventions for description of synchronous machines, issued as IEC 34-10.
- Part 11: Built-in thermal protection – Chapter 1: Rules for protection of rotating electrical machines, issued as IEC 34-11.

- Partie 11-2 Protection thermique incorporée – Chapitre 2: Détecteurs thermiques et auxiliaires de commande utilisés dans les dispositifs de protection thermique, publiée comme CEI 34-11-2.
- Partie 11-3 Protection thermique incorporée – Chapitre 3: Règles générales concernant les protecteurs thermiques utilisés dans les dispositifs de protection thermique, publiée comme CEI 34-11-3.
- Douzième partie: Caractéristiques de démarrage des moteurs triphasés à induction à cage à une seule vitesse pour des tensions d'alimentation inférieures ou égales à 660 V, publiée comme CEI 34-12.
- Treizième partie: Spécification pour les moteurs auxiliaires pour laminoirs, publiée comme CEI 34-13.
- Quatorzième partie: Vibrations mécaniques de certaines machines de hauteur d'axe supérieure ou égale à 56 mm – Mesurage, évaluation et limites de l'intensité vibratoire, publiée comme CEI 34-14.
- Quinzième partie: Niveaux de tension de tenue au choc des machines tournantes à courant alternatif à bobines stator préformées, publiée comme CEI 34-15.
- Partie 16-1: Systèmes d'excitation pour machines synchrones – Chapitre 1: Définitions, publiée comme CEI 34-16-1.
- Partie 16-2: Systèmes d'excitation pour machines synchrones – Chapitre 2: Modèles pour les études de réseaux, publiée comme CEI 34-16-2.

- Part 11-2: Built-in thermal protection – Chapter 2: Thermal detectors and control units used in thermal protection systems, issued as IEC 34-11-2.
- Part 11-3: Built-in thermal protection – Chapter 3: General rules for thermal protectors used in thermal protection systems, issued as IEC 34-11-3.
- Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors for voltages up to and including 660 V, issued as IEC 34-12.
- Part 13: Specification for mill auxiliary motors, issued as IEC 34-13.
- Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of the vibration severity, issued as IEC 34-14.
- Part 15: Impulse voltage withstand levels of rotating a.c. machines with form-wound stator coils, issued as IEC 34-15.
- Part 16-1: Excitation systems for synchronous machines – Chapter 1: Definitions, issued as IEC 34-16-1.
- Part 16-2: Excitation systems for synchronous machines – Chapter 2: Models for power system studies, issued as IEC 34-16-2.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-16-3:1996

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 16: Systèmes d'excitation pour machines synchrones – Section 3: Performances dynamiques

1 Domaine d'application

Le présent rapport technique passe brièvement en revue les méthodes existantes pour l'étude des caractéristiques de réponse de la machine synchrone avec son contrôle d'excitation en boucle fermée.

Le bloc diagramme fonctionnel général des systèmes d'excitation (voir figure 1 de la CEI 34-16-2) montre les divers composants des systèmes d'excitation à considérer dans les études de stabilité des réseaux de puissance.

Ce rapport donne des descriptions de réponses typiques, caractéristiques et indices de performances ainsi que des critères de performances.

2 Performances en petits mouvements

2.1 Méthodes de description des performances en petits mouvements

2.1.1 Généralités

Les performances en petits mouvements décrivent les réponses du réglage de l'excitation et de la machine synchrone à des signaux suffisamment petits pour que les non-linéarités puissent être négligées et que le comportement du système puisse être représenté par un modèle linéaire. Les performances en petits mouvements de composants et de systèmes peuvent être décrites plus en détail sous les formes suivantes.

2.1.2 Réponse temporelle

La figure 1 montre un système d'excitation simplifié et une machine synchrone à vide. La figure 2 illustre la réponse temporelle à un échelon en boucle fermée. Les indices de performance intéressants sont le temps de montée, le dépassement et le temps d'établissement comme indiqué.

2.1.3 Réponse harmonique

Dans un système linéaire, la réponse harmonique est la relation dépendant de la fréquence entre les différences d'amplitude et de phase de signaux d'entrée sinusoïdaux permanents et les signaux de sortie sinusoïdaux résultants en régime établi.

La figure 3 représente les caractéristiques de réponse en harmonique du système d'excitation simplifié en boucle ouverte avec la machine synchrone à vide de la figure 1. Les indices intéressants sont le gain en basse fréquence G , la pulsation de coupure ω_c , la marge de phase Φ_m et la marge de gain G_m . La figure 4 représente la réponse harmonique correspondante en boucle fermée. Ici, les indices intéressants sont la bande passante ω_b , la valeur crête M_p de la caractéristique de gain et la pulsation ω_m à laquelle apparaît la valeur crête M_p . Ces indices de performance procurent des mesures de la stabilité relative et l'indication des caractéristiques de réponse temporelle.

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 16: Excitation systems for synchronous machines – Section 3: Dynamic performance

1 Scope

This section briefly reviews the methods available for investigating the response characteristics of the synchronous machine with its closed-loop excitation control.

The general functional block diagram of excitation systems (see figure 1 of IEC 34-16-2) indicates the various excitation system components which have to be considered in power system stability studies.

Description of typical response, performance characteristics and indices as well as performance criteria are given.

2 Small signal performance

2.1 *Methods of describing small signal performance*

2.1.1 *General*

Small signal performance describes the response of the excitation control and the synchronous machine to signals which are sufficiently small that non-linearities can be disregarded and the behaviour of the system can be represented by a linear model. Small signal performance of components and systems can best be described as follows.

2.1.2 *Time response*

A simplified excitation system and open-circuited synchronous machine are shown in figure 1. The time response to a step change with the feedback loop closed is illustrated in figure 2. The performance indices of interest are the rise time, overshoot and settling time as indicated.

2.1.3 *Frequency response*

In a linear system, the frequency response is the frequency-dependent relationship expressed by the magnitude and the phase difference between steady-state sinusoidal inputs and the resultant steady-state sinusoidal outputs.

The open-loop frequency response characteristics of figure 1 are shown in figure 3 for the simplified excitation system with the synchronous machine open-circuited. The indices of interest are the low frequency gain G , angular crossover frequency ω_c , phase margin Φ_m and gain margin G_m . The corresponding closed-loop frequency response is shown in figure 4. Here the indices of interest are the bandwidth ω_b , the peak value M_p of the gain characteristic, and the angular frequency ω_m at which the peak value M_p occurs. These performance indices provide measures of the relative stability and indication of the time response characteristics.

2.1.4 Plan des pulsations complexes

Les caractéristiques dynamiques d'un système de contrôle peuvent être évaluées en plaçant dans le plan complexe les valeurs propres de sa fonction de transfert de Laplace (racines caractéristiques) dans le plan des pulsations complexes. La figure 5 représente les emplacements typiques d'un système d'excitation, la contre-réaction de la boucle de tension stator étant ouverte et la machine synchrone à vide.

Habituellement, un lieu des pôles trace les déplacements des pôles en boucle fermée lorsque le gain de la boucle varie de zéro à l'infini. La figure 6 montre le lieu des pôles du système d'excitation de la figure 5 avec la contre-réaction de la tension stator fermée. Les pôles du système en boucle fermée sont tracés en fonction des variations de la valeur du gain K . On note que les figures 5 et 6 correspondent à une fonction de transfert plus complexe et représentative que celle, simplifiée, de la figure 1.

2.1.5 Indices de performances en petits mouvements

Le tableau 1 donne les valeurs habituelles d'indices de performance en petits mouvements pour un système d'excitation et une machine synchrone. Ces valeurs ont été déterminées analytiquement en fonction des valeurs extrêmes attendues (des plus grandes aux plus petites) des constantes de temps de champs de machines synchrones et de systèmes d'excitation.

Ces indices sont des mesures de réponse et stabilité relatives de l'action du contrôle. Dans la plupart des systèmes à contre-réaction, ils sont principalement déterminés par les caractéristiques dynamiques de l'élément du système dont la sortie est la variable finalement contrôlée. Dans le cas d'un système de contrôle d'excitation, les caractéristiques dynamiques de la machine synchrone (constante de temps de champs, etc.) sont les facteurs déterminants.

Tableau 1 – Valeurs habituelles de systèmes de contrôle d'excitation

Indices de performances dynamiques en petits mouvements		
Indices de performance	Symboles	Gammes de valeurs attendues
Gain du système d'excitation	K	30 à 800 relatif
Marge de gain	G_m	2 dB à 20 dB
Marge de phase	Φ_m	20° à 80°
Valeur crête de la réponse en amplitude	M_p	1,0 à 4,0 (0 dB à 12 dB)
Bande passante	ω_b	2 à 75 rad s ⁻¹
Dépassement	d	0 % à 80 %
Temps de montée	t_r	0,05 s à 2,5 s
Temps d'établissement	t_s	0,2 s à 10,0 s
Coefficient d'amortissement	ξ	0 à 1

2.2 Effets du contrôle d'excitation sur la stabilité du réseau

Le contrôle d'excitation, en tant que partie du système d'excitation, est lié au réseau de puissance par les grandeurs de la machine synchrone: tension stator, puissance active et réactive, courant de champs et fréquence ou vitesse lorsqu'il y a lieu. Le comportement de ce système à contre-réaction complexe, multiboucle, multivariable, dépend considérablement de ses paramètres.

2.1.4 Complex frequency domain

The dynamic characteristics of a control system can be evaluated by mapping the eigenvalues (characteristics roots) of its Laplace transfer function in the complex frequency domain. Typical root locations of an excitation system with the terminal voltage feedback loop open and the synchronous machine open-circuited are shown in figure 5.

A root locus plot typically maps the locations of the closed-loop poles as the loop gain is varied from zero to infinity. Figure 6 shows the root locus of the excitation system of figure 5 with the terminal voltage feedback loop closed. The poles of the closed-loop system are mapped as the value of gain K is varied. Note that figures 5 and 6 correspond to a more complex, representative, transfer function than the simplified one of figure 1.

2.1.5 Small signal performance indices

Typical ranges of values of small signal performance indices for an excitation system and synchronous machine are given in table 1. These data have been derived analytically using the anticipated extreme ranges (longest to shortest) of synchronous machine field time constants and excitation system time constants likely to be encountered.

These indices are measures of relative response and stability of control action. In most feedback control systems they are determined primarily by the dynamic characteristic of the system element whose output is the ultimately controlled variable. In the case of an excitation control system, the dynamic characteristics of the synchronous machine (field time constant, etc.) are the determining factors.

Table 1 – Typical range of excited control system

Small signal dynamic performance indices		
Performance index	Symbol	Range of expected values
Excitation system gain	K	30 to 800 per unit
Gain margin	G_m	2 dB to 20 dB
Phase margin	Φ_m	20° to 80°
Peak value of amplitude response	M_p	1,0 to 4,0 (0 dB to 12 dB)
Bandwidth	ω_b	2 to 75 rad.s ⁻¹
Overshoot	d	0 % to 80 %
Rise time	t_r	0,05 s to 2,5 s
Settling time	t_s	0,2 s to 10,0 s
Damping ratio	ξ	0 to 1

2.2 Effects of excitation control on system stability

The excitation control as part of the excitation system is linked with the power system via the synchronous machine quantities which are terminal voltage, reactive and active current, field current and frequency or speed, as far as applicable. The behaviour of this complex multi-loop, multi-variable, feedback control system varies considerably with its parameters.

Une démarche d'évaluation des performances de ce système complexe est de le modéliser par des techniques de variables d'état et de calculer les valeurs propres (racines de l'équation caractéristique) dans la gamme de valeurs des paramètres significatifs du système d'excitation, de la machine synchrone et du réseau d'excitation. Le modèle d'état peut être déduit des paramètres d'une centrale et d'un réseau connus, de conditions d'exploitation et de données expérimentales de réponse harmonique si ces dernières existent. Le calcul des valeurs propres donne une indication directe de la stabilité du système linéarisé et constitue une étape initiale efficace avant d'essayer les paramètres choisis dans une étude en grands mouvements. D'autres indices qui utilisent le modèle d'état peuvent servir de mesure de la capacité d'un système de contrôle multiboucle pour répondre à des critères de spécification.

La machine synchrone à vide a une fonction de transfert qui correspond à la constante de temps du circuit de champs. Quand elle est connectée à un réseau de puissance, il apparaît des couplages supplémentaires avec l'inertie, le couple et l'angle rotorique. L'augmentation de l'angle rotorique (c'est-à-dire de la charge) provoque l'apparition de pics de résonance dans la fonction de transfert entre la tension de champs et la tension stator. Ces pics correspondent à des pôles complexes mal amortis dans le plan des pulsations complexes. Le fonctionnement avec des angles rotoriques importants et en contrôle avec le régulateur en boucle fermée peut facilement produire des oscillations mal amorties ou la perte de stabilité.

Un gain élevé et une réponse rapide du système d'excitation tendent à accroître le couple synchronisant lors des perturbations du réseau. Ces mêmes caractéristiques sont source d'amortissement négatif lors du fonctionnement de la machine synchrone avec des angles rotoriques importants. Il est souvent nécessaire d'utiliser un contrôle additionnel, par exemple un stabilisateur de puissance, pour étendre les limites de stabilité.

Suivant les modes et les fréquences communément observés dans les réseaux de puissance, les oscillations peuvent être classées en trois grandes catégories.

2.2.1 *Oscillations locales entre machines*

Ces oscillations impliquent typiquement deux machines synchrones ou plus dans une même centrale ou dans des centrales voisines. Les machines oscillent les unes par rapport aux autres habituellement à une fréquence de 1,5 Hz à 3 Hz.

2.2.2 *Oscillations locales des machines par rapport au réseau*

Ces oscillations impliquent généralement une ou plusieurs machines synchrones dans une centrale oscillant ensemble par rapport à un réseau d'une puissance comparativement importante, ou par rapport à un centre de consommation, à une fréquence d'environ 0,7 Hz à 3,0 Hz. Ces oscillations sont particulièrement gênantes lorsque la centrale fonctionne à puissance élevée avec une grande réactance de liaison au réseau.

2.2.3 *Oscillations entre réseaux*

Ces oscillations impliquent habituellement des combinaisons de nombreuses machines synchrones dans une partie d'un réseau oscillant par rapport aux machines d'une autre partie du réseau. Ces oscillations interzones sont normalement à faible fréquence ($\leq 1,0$ Hz).

2.3 *Utilisation de stabilisateurs de puissance*

Un stabilisateur de puissance utilise des signaux d'entrée additionnels pour produire un amortissement positif supplémentaire dans le système complexe composé de la machine synchrone, du système d'excitation et du réseau. Le stabilisateur de puissance améliore l'amortissement des oscillations du rotor provenant des perturbations du réseau en compensant les caractéristiques défavorables dues aux gains et réponses élevés du contrôle d'excitation et à l'alternateur fonctionnant avec un angle rotorique important.

One approach to assessing the performance of this complex system is to model the system using state-space techniques and calculate the eigenvalues (characteristic equation roots) for the range of excitation system, synchronous machine, and power system parameters of interest. The state-space model can be derived from known power plant and power system parameters, operating conditions, and experimental frequency response data, if the latter is available. The calculation of eigenvalues gives a direct indication of system stability for the linearized system and serves as an efficient initial step before testing the selected parameters in a large signal study. Other indices that utilize the state-space model can serve as measures of the ability of a multi-loop control system to meet specified criteria.

The open-circuited synchronous machine has a transfer characteristic corresponding to the time constant of the field circuit. When connected to a power system, additional coupling occurs with the inertia, torque, and rotor angle. Increasing rotor angle (i.e. load) causes resonant peaks to occur in the field voltage to terminal voltage transfer function. These correspond to poorly damped complex poles in the complex frequency domain. When operating at high rotor angles such machine characteristics can readily lead to poorly damped oscillations or loss of stability when operating in a closed-loop feedback control system with the voltage regulator.

High gain and rapid response of the excitation system serves to provide increased synchronizing torque during power system disturbances. These same characteristics are a source of negative damping when the synchronous machine is operated at large rotor angles. It is frequently necessary to utilize additional control, for example a power system stabilizer, to extend the limits of stability.

The oscillations can be classified into three general categories, according to the modes and frequencies commonly observed on power systems.

2.2.1 *Local inter-machine oscillations*

These oscillations typically involve two or more synchronous machines at a powerplant or nearby powerplants in which machines swing against each other, usually at a frequency of 1,5 Hz to 3 Hz.

2.2.2 *Local machine(s) to system oscillations*

These oscillations generally involve one or more synchronous machines at a power station swinging together against a comparatively large power system or load centre at a frequency in the range of 0,7 Hz to 3,0 Hz. These oscillations become particularly troublesome when the plant is at high load with a high reactance transmission system.

2.2.3 *Inter-system oscillations*

These oscillations usually involve combinations of many synchronous machines on one part of a power system swinging against machines on another part of the system. Interarea oscillations are normally of low frequency ($\leq 1,0$ Hz).

2.3 *Application of power system stabilizers*

A power system stabilizer utilizes additional input signals to introduce further positive damping into the complex system comprising the synchronous machine, the excitation system and the power system. The power system stabilizer improves the damping of rotor oscillations arising from power system disturbance, by compensating the unfavourable characteristics of the high gain and response excitation control, and generator operating at high rotor angles.

Des filtres peuvent être nécessaires dans la boucle de stabilisation de puissance pour éviter la stimulation des fréquences de torsion et les oscillations de torsion qui en résulteraient, entraînant une fatigue de la ligne d'arbre et des dégâts mécaniques importants.

Les figures 7 et 8 montrent deux exemples de fonctions de transfert de stabilisateurs de puissance.

3 Performances en grands mouvements

3.1 Généralités

Les performances en grands mouvements sont la réponse à des signaux suffisamment grands pour faire intervenir les non-linéarités de façon significative.

Le but des critères de performances en grands mouvements est de procurer des moyens d'évaluer les performances de systèmes d'excitation pour des transitoires sévères incluant les grandes variations de tension stator, courant stator et courant de champ induits dans les machines synchrones. Pour évaluer la capacité du système d'excitation d'améliorer les performances de la machine synchrone, il est essentiel que les critères reflètent les effets du fonctionnement pour des perturbations réalistes du réseau de puissance.

Les critères qui évaluent les performances en grands mouvements sont la réponse transitoire, le courant et la tension de plafond et la réponse nominale déduite de la réponse temporelle. Ces paramètres ont été définis dans la CEI 34-16-1; leur utilité va être décrite plus en détail.

3.2 Critères de performances en grands mouvements

3.2.1 Généralités

Les critères de performances en grands mouvements suivants s'appliquent aux systèmes d'excitation et parfois à leurs composants. Pour permettre un maximum de souplesse en conception, fabrication et utilisation des équipements d'excitation, certains critères de performances sont définis «dans des conditions spécifiées». Les conditions applicables peuvent être définies par le fabricant ou, plus souvent, par l'acheteur de l'équipement.

La nature générale de plusieurs des considérations suivantes, par exemple les valeurs de plafond de courant de champs et de tension de champ, permet de les utiliser pour atteindre différents objectifs dans des applications différentes. Il en résulte que des confusions peuvent apparaître lorsqu'elles sont utilisées de manière incohérente. Il faut vérifier avec soin que les clauses «dans des conditions spécifiées» sont interprétées d'une façon cohérente avec l'application.

3.2.2 Courant de plafond

Lorsque des surcharges ou des perturbations prolongées sont à considérer, le plafond de courant peut être basé sur la contrainte thermique du système d'excitation qui définit le courant de sortie maximal débité et la durée requise. Pour certaines applications, le courant de plafond sera déterminé par la condition de faire débiter par la machine synchrone une valeur spécifique de courant de court-circuit triphasé établi pendant un temps spécifié.

Lorsqu'une forte valeur de tension de plafond est requise pour des actions de forçage, les circuits de limitation de courant d'excitation peuvent déterminer la valeur réelle du courant de plafond.

Filters may be required in the power system stabilizer loop, to avoid stimulation of torsional frequencies, and consequent torsional oscillations, which can cause fatigue of the shaft and serious mechanical damage.

Two examples of power system stabilizer transfer functions are shown in figures 7 and 8.

3 Large signal performance

3.1 General

Large signal performance is the response to signals which are great enough for non-linearities to be significant.

The purpose of large signal performance criteria is to provide a means of evaluating excitation system performance for severe transients which may include large variations in synchronous machine stator voltages, synchronous machine stator current, and induced synchronous machine field current. To assess the ability of the excitation system to improve synchronous machine performance, it is essential that the criteria reflect the effects of operation under realistic power system disturbances.

The criteria which assess the large signal performance are transient responses, ceiling current and voltage, and nominal response derived from the time response. These parameters have been defined in IEC 34-16-1; their usefulness will be further described.

3.2 Large signal performance criteria

3.2.1 General

The following large signal performance criteria relate to excitation systems and, where applicable, to their components. To permit maximum flexibility in the design, manufacture, and application of excitation equipment, some of the performance criteria are defined 'under specified conditions'. The applicable conditions may be specified by the manufacturer or, more usually, by the equipment purchaser.

The general nature of several of the following considerations for example ceiling values of field current and field voltage, permit them to be used to achieve different objectives in different applications. As a result, confusion can also result when they are applied inconsistently. Care has to be exercised that the 'under specified conditions' clauses are interpreted in a manner consistent with the application.

3.2.2 Ceiling current

When sustained overloads or prolonged disturbances are of concern, the ceiling current may be based upon the excitation system thermal duty which identifies the maximum output current and the required time duration. For some applications, the ceiling current will be determined by the requirement that the synchronous machine produces a specific value of steady-state three-phase short-circuit current for a specified time.

When a high value of ceiling voltage is required for forcing action, exciter current limiter control circuits may determine the actual ceiling current.

3.2.3 Tension de plafond

La tension de plafond peut être utilisée pour évaluer les capacités de forçage du système d'excitation d'amener le courant de champs à la valeur du courant de plafond. La tension de plafond donne une indication sur la tension disponible pour forcer le courant de champ de sa valeur nominale à sa valeur de plafond. Plus la différence entre la tension de plafond et la tension de champ en charge est grande, plus la capacité de forçage est grande. De grandes tensions de plafond tendent à améliorer la stabilité transitoire.

Pour des systèmes d'excitation en soutirage shunt ou compound dont l'alimentation dépend de la tension et du courant de la machine synchrone, la nature des perturbations du réseau de puissance et la conception spécifique du contrôle du système d'excitation influencent la sortie du système d'excitation. Pour de tels systèmes, la tension de plafond est définie en fonction d'une tension d'alimentation spécifiée et (lorsque c'est le cas) de courant.

Certains systèmes d'excitation auront une valeur positive et une valeur négative de tension de plafond. Il peut aussi arriver que dans certaines applications spéciales le système d'excitation ait à fournir à la machine synchrone un courant de champ positif et négatif.

3.2.4 Réponse nominale d'un système d'excitation

La réponse nominale (voir 2.18 de la CEI 34-16-1) est utilisée comme un facteur de mérite lié à la capacité d'un système d'excitation de répondre à des perturbations transitoires et pour permettre la comparaison de systèmes d'excitation. La durée d'une demi-seconde a été choisie pour associer la réponse nominale avec la contribution du système d'excitation à la stabilité transitoire pendant la première oscillation.

L'instant de départ pour la détermination de la réponse nominale est l'instant où la perturbation commence; cela veut dire qu'il convient que la réponse nominale d'un système d'excitation inclue tout retard temporel présent dans le système.

La réponse nominale est déterminée à partir du fonctionnement du système d'excitation à la tension de champ nominale de la machine synchrone, puis en appliquant brusquement le signal d'entrée de tension stator nécessaire pour amener la tension du système d'excitation à sa valeur de plafond. Si la réponse nominale est utilisée comme valeur de mérite pour comparer différents types de systèmes d'excitation, des résultats trompeurs peuvent être obtenus si des limitations différentes ou des inductances différentes de machine synchrone sont utilisées.

3.2.5 Réponses transitoires

Beaucoup de critères de performances en grands mouvements ne donnent qu'une simple valeur numérique. La tension de plafond du système d'excitation et la réponse nominale en sont deux exemples. Ces critères sont utiles pour comparer les performances de différents systèmes et ils sont précieux en tant que critères de conception qui peuvent être utilisés pour vérifier que le fabricant observe les exigences des spécifications. Cependant, ces critères définis par une simple valeur numérique ne fournissent pas des informations suffisantes dans tous les cas pour le choix des paramètres de modélisation ou les vérifications. Une réponse déterminée peut être réalisée dans des modèles comportant différentes combinaisons de paramètres de modélisation. Bien que la réponse transitoire soit souvent associée à l'analyse en petits mouvements, c'est un critère utile pour l'évaluation des performances en grands mouvements, en particulier pour des applications destinées à améliorer ou valider des modèles numériques.

Une réponse transitoire en grands mouvements est une réponse temporelle où les variables d'entrée et de sortie des composants sont évaluées en fonction du temps. Bien que la réponse transitoire soit généralement associée à une variation en échelon de la variable d'entrée, il est seulement nécessaire que la variation de la variable d'entrée soit suffisamment grande et suffisamment rapide pour que la réponse en sortie soit classée comme réponse en grands mouvements afin que la réponse qui en résulte soit utilisable.

3.2.3 *Ceiling voltage*

Ceiling voltage can be used to evaluate the forcing capability of the excitation system to drive the field current towards the ceiling current value. The ceiling voltage provides an indication of the voltage available to force the field current from rated load field current towards ceiling current. The greater the difference between the ceiling voltage and the rated load field voltage, the greater the forcing capability. Higher ceiling voltages tend to improve transient stability.

For potential source and compound source excitation systems whose supply depends on the synchronous machine voltage and current, the nature of power system disturbances and specific design parameters of the excitation control system influence the excitation system output. For such systems, the ceiling voltage is defined based upon a specified supply voltage and (if applicable) current.

Some excitation systems will have both positive and negative values of ceiling voltage. Also, in some special applications, the excitation system may be required to supply both positive and negative field current to the synchronous machine.

3.2.4 *Excitation system nominal response*

Nominal response (see 2.18 of IEC 34-16-1) is used as a figure of merit related to the ability of an excitation system to respond to transient disturbances and to permit comparisons of excitation systems. The one-half second interval was selected to associate the nominal response with the excitation system contribution to first swing, transient stability.

The starting point for determining the nominal response is the time when the disturbance is initiated; that is, the excitation system nominal response should include any delay time that may be present.

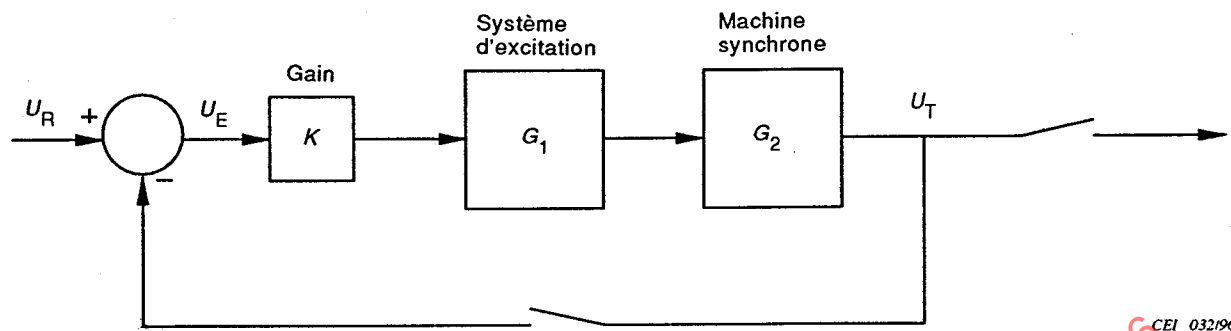
Nominal response is determined by initially operating the excitation system at rated field voltage of the synchronous machine, then suddenly creating the terminal voltage input signal conditions necessary to drive the excitation system voltage to ceiling. If nominal response is used as a figure of merit for comparing different types of excitation systems, misleading results may be obtained if different types of limiters or differing values of synchronous machine inductance are used.

3.2.5 *Transient responses*

Many of the large signal performance criteria provide a single numerical value. Excitation system ceiling voltage and nominal response are two examples. These criteria are useful for comparing performance of different systems and they are valuable as design criteria which can be used to verify that the manufacturer fulfilled specification requirements. However, these single value criteria do not provide sufficient information in all instances for model parameter selections or verification. A specific response can be achieved in models with different combinations of model parameters. Although transient response is frequently associated with small signal analysis, it is a useful criterion for large signal performance evaluation, especially for applications involving the refinement or validation of computer models.

A large signal transient response is a time response with the input and output variables of the components being evaluated as a function of time. Although transient response is generally associated with a step change in the input variable, it is only necessary that the change in the input variable be large enough and fast enough that the response at the output is classified as a large signal response for the resulting response to be useful.

Système de contrôle d'excitation



CEI 032/96

$$G_1 = \frac{1}{1 + T_1 s} \quad G_2 = \frac{1}{1 + T_2 s}$$

où

$$K = 25$$

$$T_1 = 0,3 \text{ s}$$

$$T_2 = 6 \text{ s}$$

Figure 1 – Système d'excitation et machine synchrone simplifiés

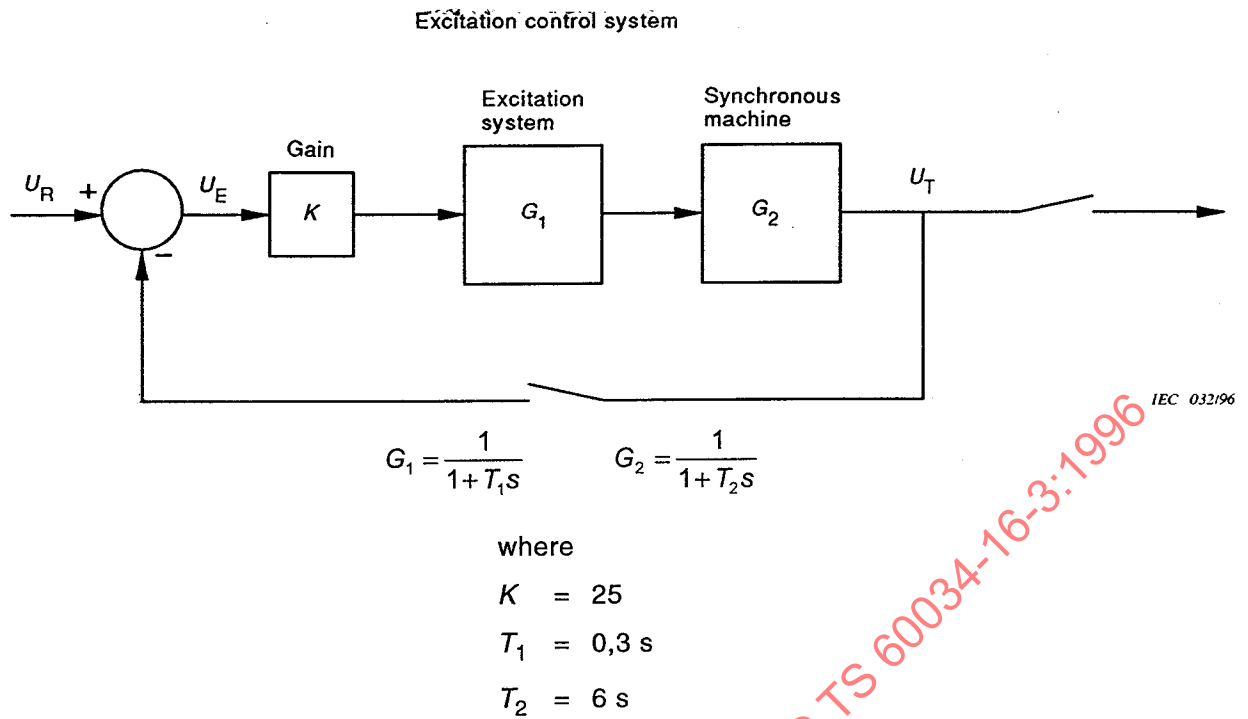
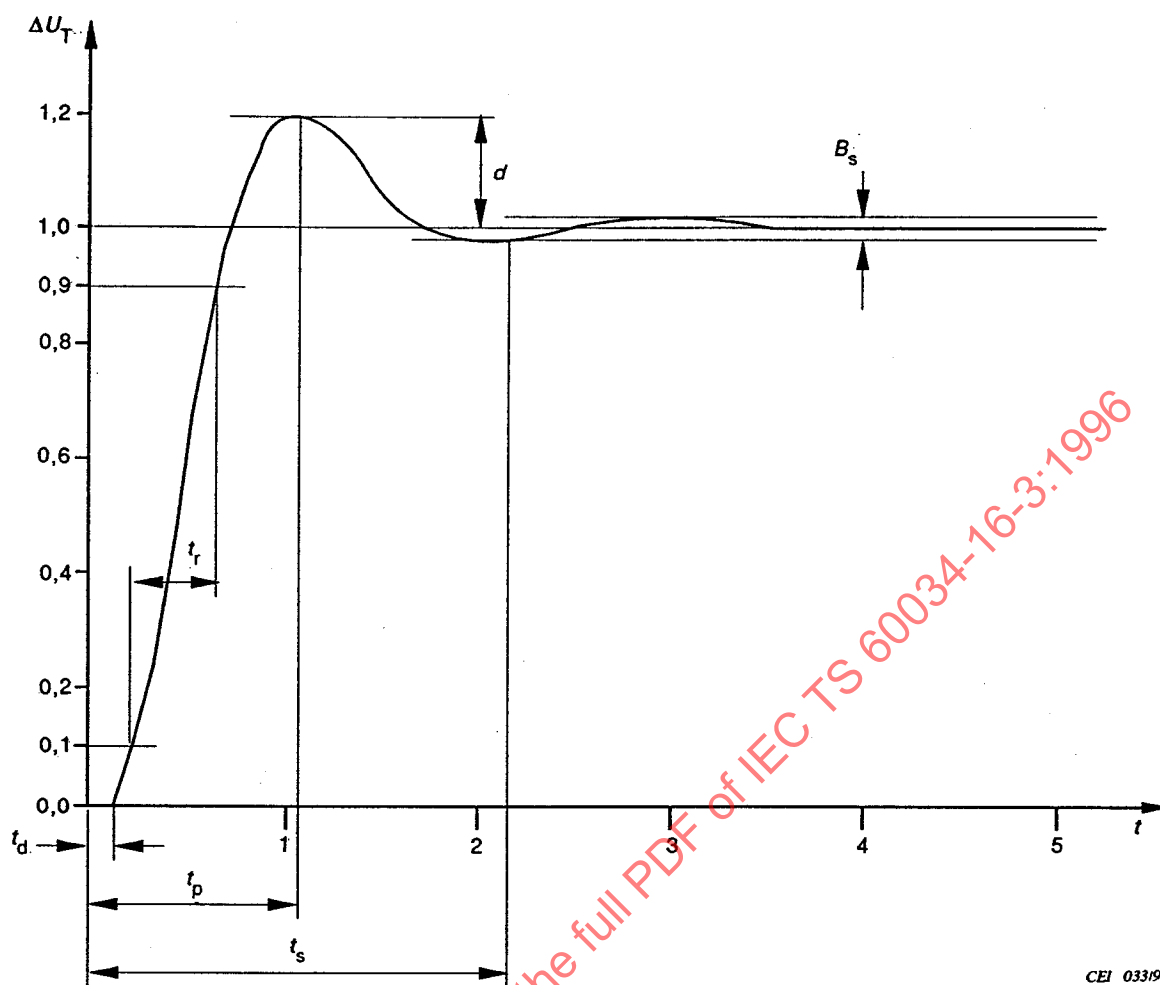


Figure 1 – Simplified excitation system and synchronous machine



CEI 033196

Indices de performances:

t_r = temps de montée

d = dépassement

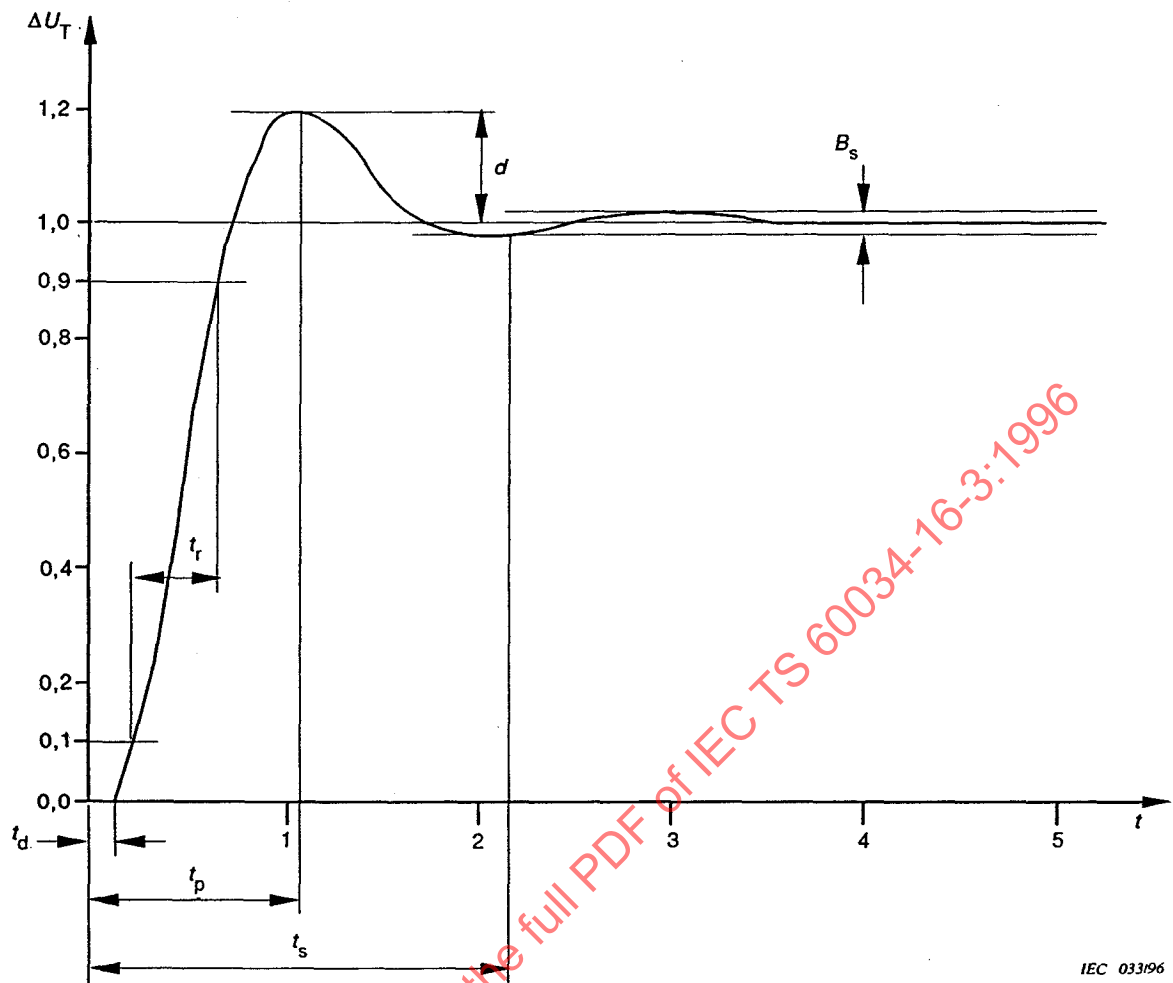
t_s = temps d'établissement

B_s = bande spécifiée pour le temps d'établissement

t_d = retard pur

t_p = temps pour atteindre la valeur crête

Figure 2 – Réponse temporelle d'un système de contrôle d'excitation simplifié à un échelon

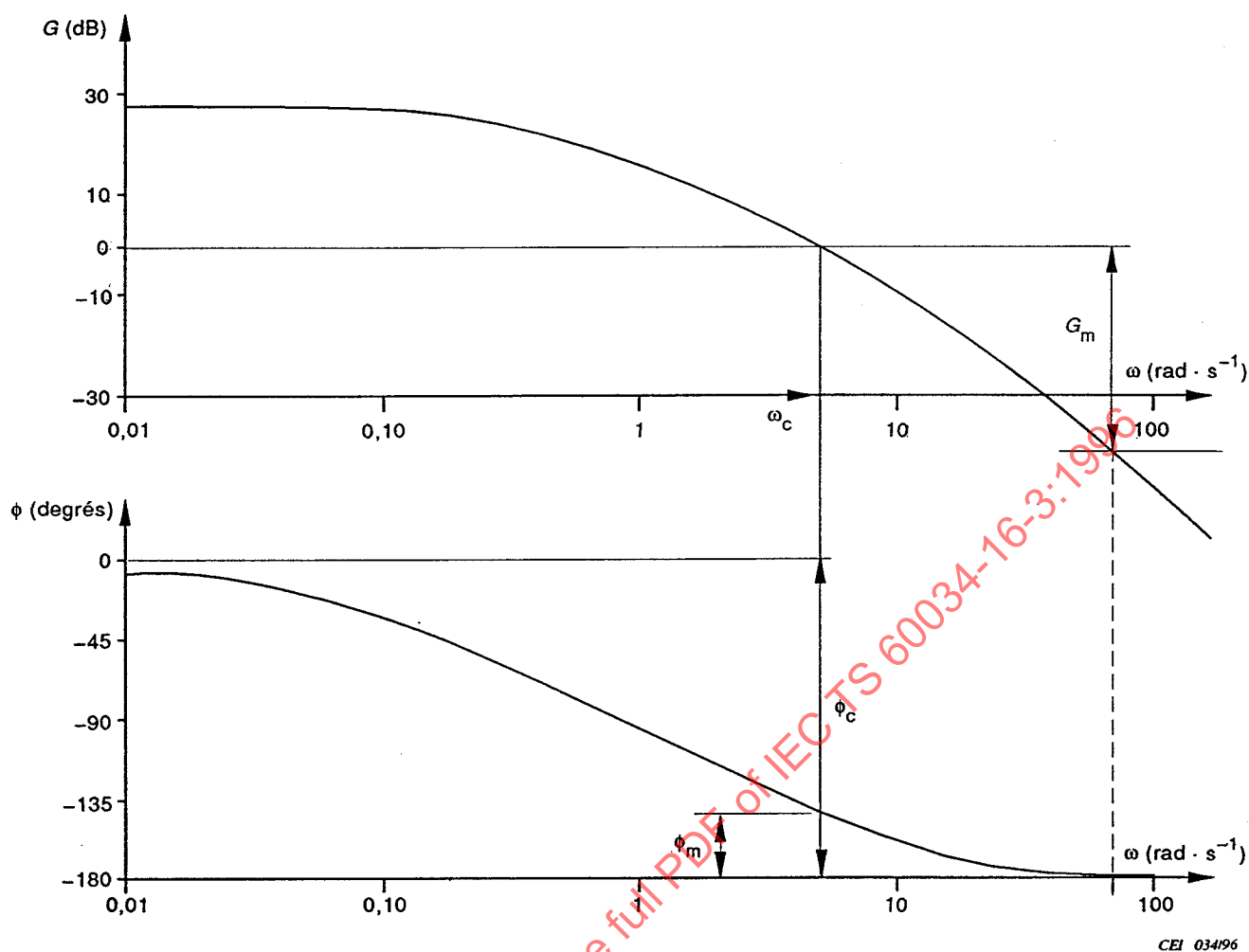


IEC 033196

Performance indices:

 t_r = rise time d = overshoot t_s = settling time B_s = specified band for settling time t_d = delay time t_p = time to reach peak value

Figure 2 – Time response of a simplified excitation control system to a step change



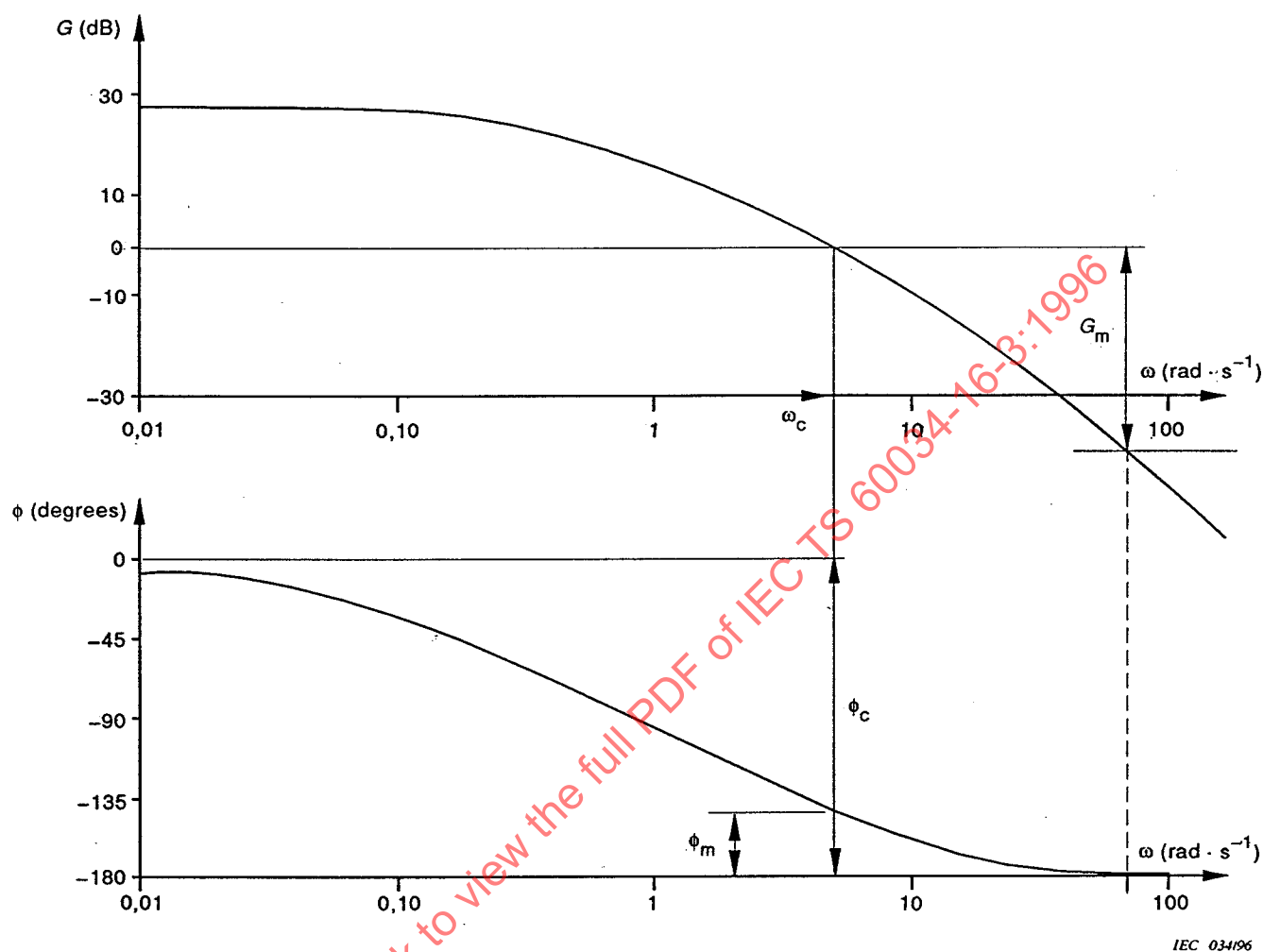
Indices de performances:

ϕ_m = marge de phase = $(180 - |\Phi_c|)$ à ω_c

G_m = marge de gain = $(0 - G)$ pour $\phi = -180^\circ$

ω_c = pulsation de coupure au gain unité ($G = 0$)

Figure 3 – Réponse harmonique en boucle ouverte d'un système de contrôle d'excitation simplifié avec la machine synchrone à vide



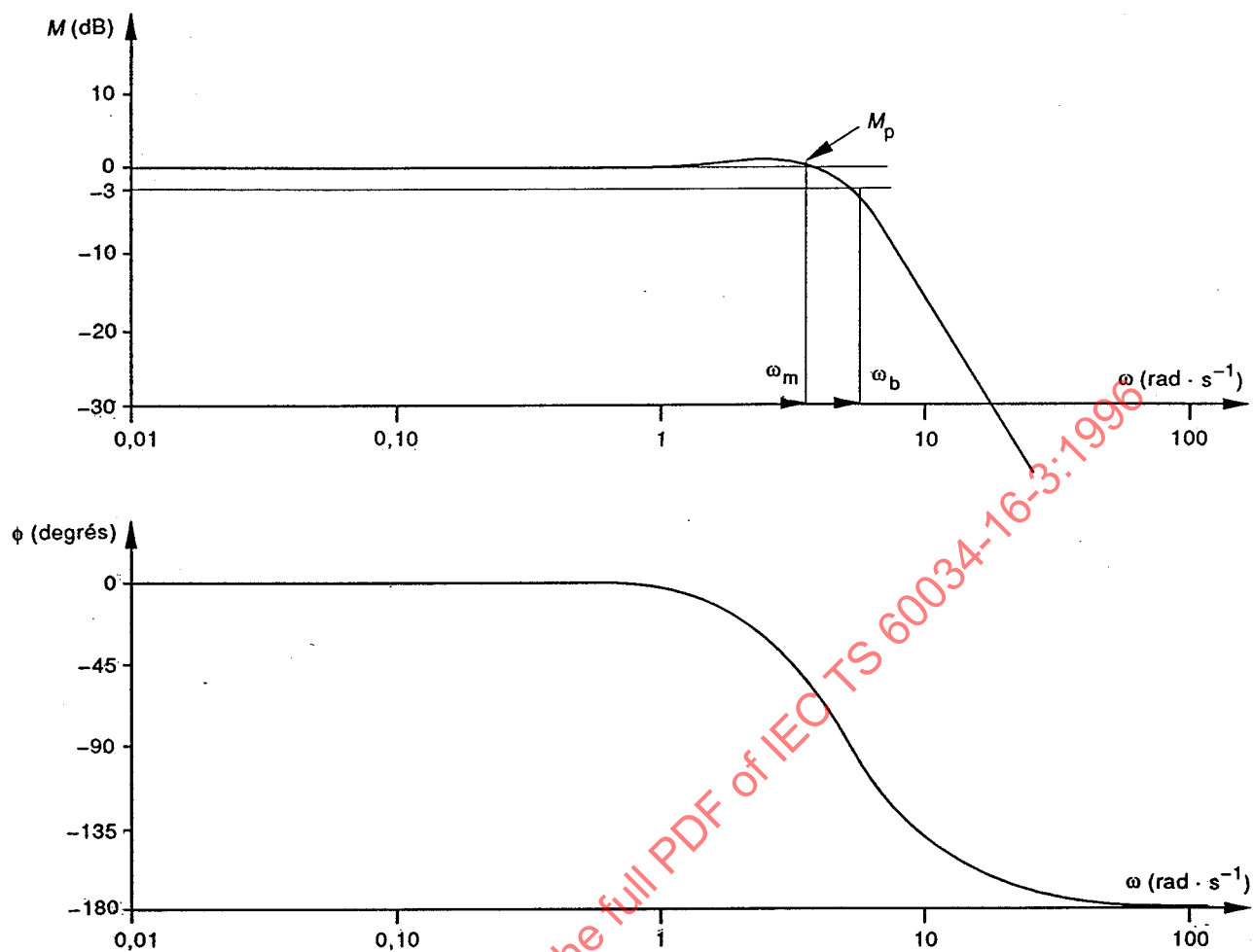
Performance indices:

ϕ_m = phase margin = $(180 - |\phi_c|)$ at ω_c

G_m = gain margin = $(0 - G)$ at $\phi = -180^\circ$

ω_c = cross-over frequency at unity gain ($G = 0$)

Figure 3 – Open-loop frequency response of a simplified excitation control system with the synchronous machine open-circuited



CEI 035196

Indices de performances:

M_p = valeur crête de la réponse en amplitude

ω_m = pulsation où M_p est atteinte

ω_b = bande passante (où $M = -3$ dB)

Figure 4 – Réponse harmonique en boucle fermée d'un système de contrôle d'excitation simplifié avec la machine synchrone à vide