

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
34-16-2**

Première édition
First edition
1991-02

Machines électriques tournantes

Seizième partie:

Systèmes d'excitation pour machines synchrones

Chapitre 2: Modèles pour les études de réseaux

Rotating electrical machines

Part 16:

Excitation systems for synchronous machines

Chapter 2: Models for power system studies



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 34-16-2: 1991

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 électrotechnique*;
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

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

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

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

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology

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

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

Graphical and letter symbols

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

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

and for medical electrical equipment,

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

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

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
34-16-2**

Première édition
First edition
1991-02

Machines électriques tournantes

Seizième partie:

Systèmes d'excitation pour machines synchrones

Chapitre 2: Modèles pour les études de réseaux

Rotating electrical machines

Part 16:

Excitation systems for synchronous machines

Chapter 2: Models for power system studies

© CEI 1991 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

V

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
INTRODUCTION	8
 Articles	
1 Domaine d'application	10
2 Catégories d'excitatrices - Représentation graphique et modèles mathématiques pour les études de stabilité	12
2.1 Excitatrice à courant continu	12
2.2 Excitatrice à courant alternatif	14
2.3 Excitatrice statique à source de tension	20
2.4 Excitatrice statique composée	22
2.5 Modèles mathématiques pour la fonction de réglage	30
3 Nomenclature	42
3.1 Paramètres	42
3.2 Variables	44
 Annexe A - Système de valeurs réduites (p.u.)	46
Annexe B - Caractéristique externe d'un redresseur	48
Annexe C - Fonction de saturation	52
Annexe D - Représentation des limites	54
Annexe E - Exemples de construction de modèles mathématiques pour des systèmes d'excitation spécialisés	56

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	9
 Clause	
1 Scope	11
2 Exciter categories - Graphical representation and mathematical models for stability studies	13
2.1 D.C. exciter	13
2.2 A.C. exciter	15
2.3 Potential source static exciter	21
2.4 Compound source static exciter	23
2.5 Mathematical models for the control function	31
3 Nomenclature	43
3.1 Parameters	43
3.2 Variables	45
 Appendix A - Per unit system	 47
Appendix B - Rectifier regulation characteristic	49
Appendix C - Saturation function	53
Appendix D - Representation of limits	55
Appendix E - Examples of building computer models for specialized excitation systems	57

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

Seizième partie: Systèmes d'excitation pour machines synchrones Chapitre 2: Modèles pour les études de réseaux

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Comité d'Etudes n° 2 de la CEI: Machines tournantes.

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
2(BC)533	2(BC)548

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

Le présent rapport constitue le chapitre 2 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, éditée 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), éditée comme CEI 34-2.
- Troisième partie: Règles spécifiques pour les turbomachines synchrones, éditée comme CEI 34-3.
- Quatrième partie: Méthodes pour la détermination à partir d'essais des grandeurs des machines synchrones, éditée comme CEI 34-4.
- Cinquième partie: Classification des degrés de protection procurés par les enveloppes des machines tournantes, éditée comme CEI 34-5.
- Sixième partie: Modes de refroidissement des machines tournantes, éditée comme CEI 34-6.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES

Part 16: Excitation systems for synchronous machines
Chapter 2: Models for power system studies

FOREWORD

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

PREFACE

This report has been prepared by IEC Technical Committee No. 2: Rotating machinery.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
2(CO)533	2(CO)548

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

This report forms Chapter 2 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 for rotating machines, issued as IEC 34-5.
- Part 6: Methods of cooling rotating machinery, issued as IEC 34-6.

Septième partie:	Symboles pour les formes de construction et les dispositions de montage des machines électriques tournantes, éditée comme CEI 34-7.
Huitième partie:	Marques d'extrémités et sens de rotation des machines tournantes, éditée comme CEI 34-8.
Neuvième partie:	Limites de bruit, éditée comme CEI 34-9.
Dixième partie:	Conventions relatives à la description des machines synchrones, éditée comme CEI 34-10.
Onzième partie:	Protection thermique incorporée. Chapitre 1: Règles concernant la protection des machines électriques tournantes, éditée comme CEI 34-11.
Partie 11-2	Protection thermique incorporée. Chapitre 2: Détecteurs thermiques et auxiliaires de commande utilisés dans les dispositifs de protection thermique, éditée 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, éditée 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, éditée comme CEI 34-12.
Treizième partie:	Spécification pour les moteurs auxiliaires pour laminoirs, éditée 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, éditée comme CEI 34-14.
Quinzième partie:	Niveaux de tension de tenue au choc des machines tournantes à courant alternatif à bobines stator préformées, éditée comme CEI 34-15.
Partie 16-1:	Systèmes d'excitation pour machines synchrones. Chapitre 1: Définitions, éditée comme CEI 34-16-1.

- Part 7: Symbols for types of construction and mounting arrangements of rotating electrical machinery, 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.
- 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.

INTRODUCTION

Lorsque le comportement des machines synchrones doit être simulé avec précision dans les études de stabilité des réseaux, il convient de modéliser les systèmes d'excitation de ces machines en conséquence. Du fait qu'il est nécessaire de limiter, autant que possible, la dépense associée à l'acquisition des données, la programmation et le calcul, on doit utiliser des modèles simplifiés procurant une précision raisonnable. Les modèles devront représenter correctement les performances réelles des systèmes d'excitation:

- pendant les conditions de régime permanent précédant l'apparition du défaut étudié;
- pendant l'intervalle de temps séparant l'application et l'affranchissement du défaut;
- pendant les oscillations consécutives à l'affranchissement du défaut.

La modélisation ne tient pas compte des écarts de fréquence. On suppose que, dans les études de stabilité, des écarts de fréquence jusqu'à ± 5 % de la fréquence assignée peuvent être négligés pour ce qui concerne le système d'excitation.

Les modèles de systèmes d'excitation seront valables pour les conditions de régime permanent, pour les fréquences naturelles d'oscillation des machines synchrones et pour la gamme de fréquences correspondante. La gamme de fréquences à couvrir est typiquement de 0 Hz à 3 Hz.

L'analyse du fonctionnement hors synchronisme, de la résonance subsynchrone ou des effets de torsion sur l'arbre sort du domaine d'application de ces modèles.

Le fonctionnement des organes de protection et de l'équipement destiné à la décharge ou à la suppression du champ sort également du domaine d'application de ces modèles.

Les guides d'usage pour la modélisation des systèmes d'excitation ainsi que les modèles standards peuvent aussi être utilisés pour l'étude d'autres problèmes dynamiques concernant les machines synchrones. Cependant, les modèles devront alors être vérifiés pour déterminer leur adéquation à ce propos.

Le schéma fonctionnel général de la figure 1 indique les différents composants du système d'excitation qui doivent être pris en considération dans les études de stabilité des réseaux. Ces composants comprennent:

- des éléments de réglage de la tension;
- les limiteurs;
- la boucle de stabilisation (éventuellement);
- le convertisseur de puissance de l'excitatrice (excitatrice).

Les limiteurs ne sont normalement pas représentés dans les études de réseaux.

Les systèmes d'excitation se distinguent principalement par la manière dont la puissance d'excitation est fournie et convertie.

INTRODUCTION

When the behaviour of synchronous machines is to be accurately simulated in power system stability studies, the excitation systems of these machines should be modelled adequately. Since expenditure for data acquisition, programming and computation has to be limited in so far as is permissible, it is necessary to use simplified models that provide reasonable accuracy. The models should adequately represent the actual excitation system performance:

- during steady-state conditions prior to occurrence of the fault studied;
- during the time interval from application to clearing of the fault;
- during the oscillations following fault clearing.

The modelling does not account for frequency deviations. It is assumed that in stability studies frequency deviations of up to ± 5 % from the rated frequency can be neglected as far as the excitation system is concerned.

The excitation system models should be valid for steady-state conditions, for the natural oscillation frequency of the synchronous machines, and the frequency range in between. The frequency range to be covered will typically be from 0 Hz to 3 Hz.

Analysis of out-of-step operation, of sub-synchronous resonance or of shaft torsional effects is beyond the scope of these models.

The operation of protective functions and field discharge or suppression equipment is also beyond the scope of these models.

The excitation system modelling guidelines and standard models may also be used for studies of other dynamic problems regarding synchronous machines. However, the models should then be checked to determine their suitability for that purpose.

The general functional block diagram in figure 1 indicates the various excitation system components which have to be considered in power system stability studies. These components include:

- voltage control elements;
- limiters;
- power system stabilizer (if used);
- exciter power converter (exciter).

The limiters are not normally represented in power system studies.

The main distinctive feature of an excitation system is the manner in which the excitation power is supplied and converted.

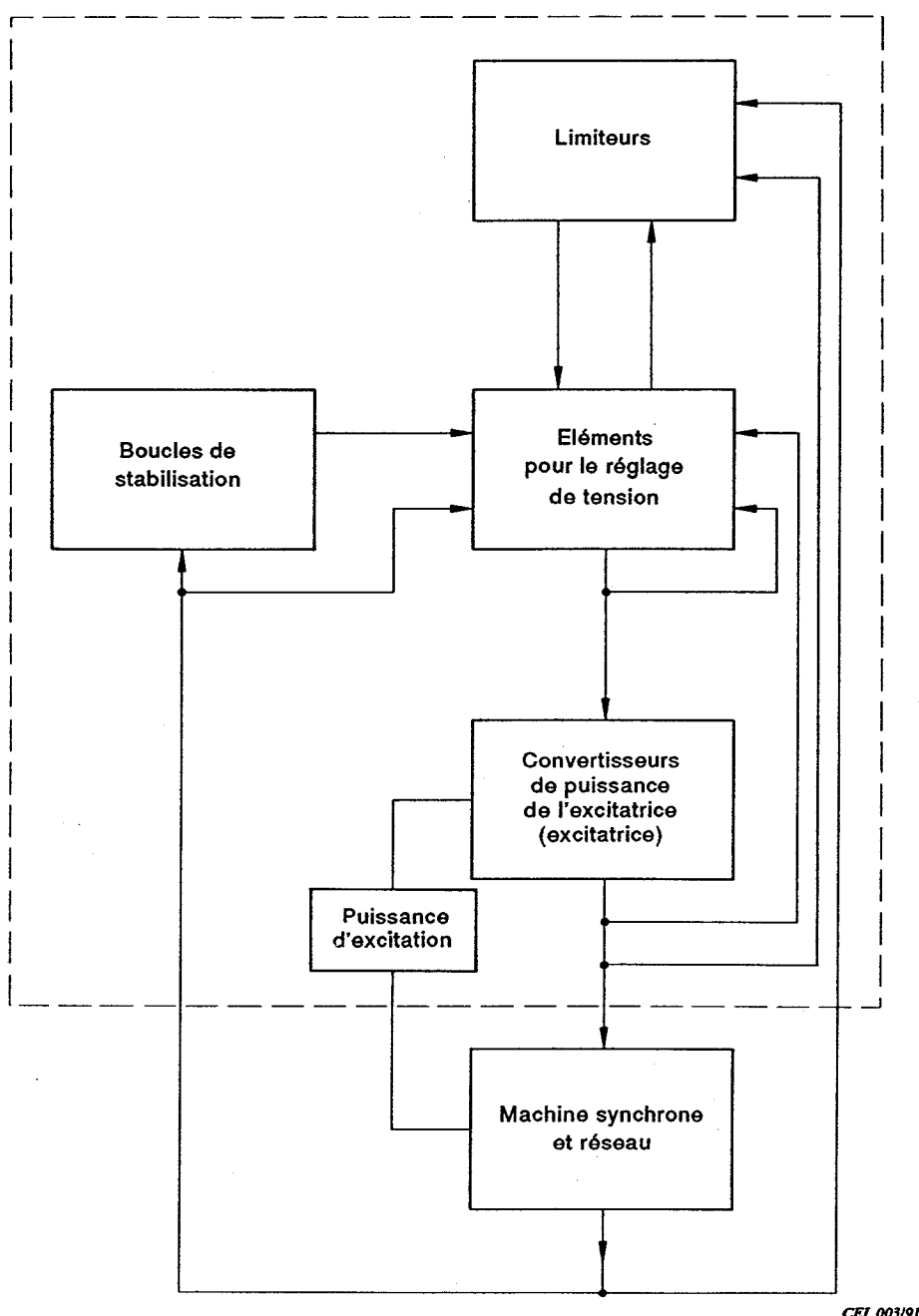
MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

Seizième partie: Systèmes d'excitation pour machines synchrones Chapitre 2: Modèles pour les études de réseaux

1 Domaine d'application

Le présent rapport recommande un guide d'usage pour la modélisation, ainsi que des modèles appropriés de systèmes d'excitation en vue de leur utilisation pour les études de stabilité des réseaux; il comporte également une nomenclature définissant les paramètres et les variables utilisés.

Les définitions des termes utilisés se trouvent dans la CEI 34-16-1.



CEI 003/91

Figure 1 – Schéma fonctionnel général (délimité par le pointillé) des systèmes d'excitation pour machines synchrones

ROTATING ELECTRICAL MACHINES

Part 16: Excitation systems for synchronous machines Chapter 2: Models for power system studies

1 Scope

This report recommends modelling guidelines and appropriate models for excitation systems for use in power system stability studies and includes a nomenclature defining the parameters and variables used.

Definitions for the terms used are given in IEC 34-16-1.

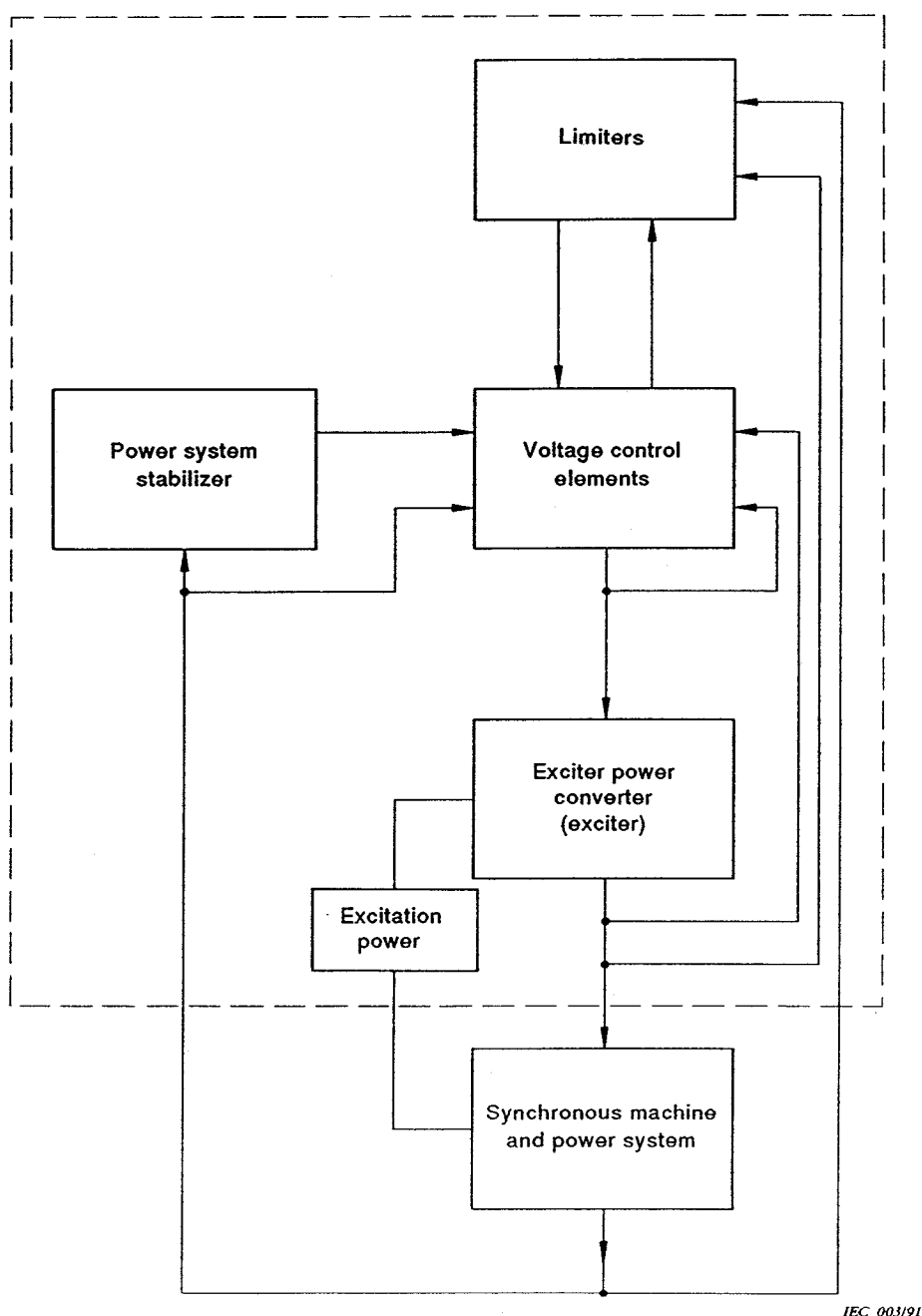


Figure 1 – General functional block diagram of excitation systems (within the dotted block) for synchronous machines

2 Catégories d'excitatrices - Représentation graphique et modèles mathématiques pour les études de stabilité

2.1 Excitatrice à courant continu

Bien que rarement utilisées pour les machines nouvelles, les excitatrices à courant continu sont prises en compte, car de nombreuses machines synchrones actuellement en service sont équipées de ce type d'excitatrice. La figure 2 montre une représentation graphique de la disposition comportant un enroulement de champ excité séparément, et la figure 3 montre le modèle correspondant. Le terme K_E a été introduit dans le modèle pour tenir compte de la caractéristique des excitatrices auto-excitées. Noter que $K_E = 1$ dans le cas des excitatrices à excitation séparée.

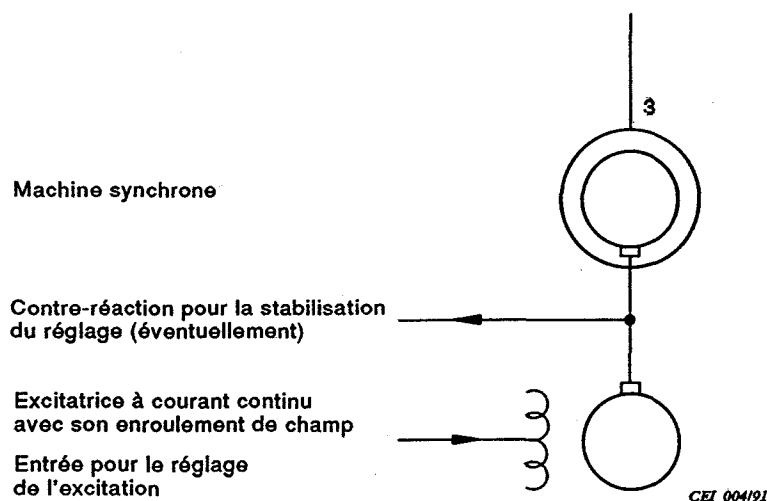


Figure 2 – Excitatrice à courant continu dont un enroulement de champ est excité séparément

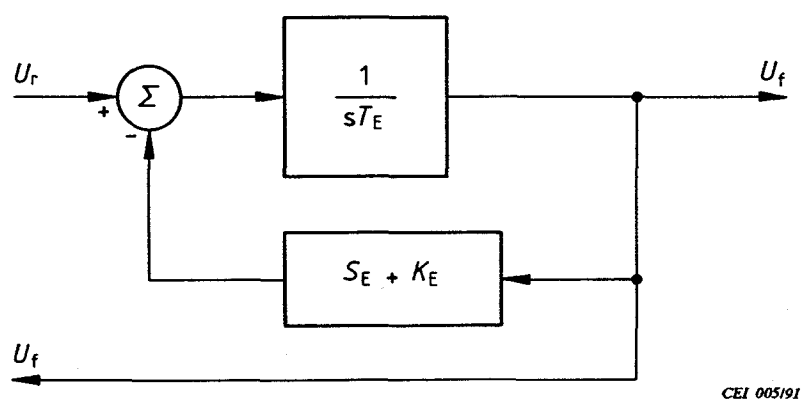


Figure 3 - Modèle correspondant à la figure 2

Plusieurs modes de réglage de l'excitation sont utilisés:

- rhéostat actionné électromécaniquement;
- rhéostat motorisé;

2 Exciter categories - Graphical representation and mathematical models for stability studies

2.1 D.C. exciter

Although not frequently used on new machines, d.c. exciters are considered because many synchronous machines presently in service are equipped with this type of exciter. Figure 2 shows a graphical representation of the type with one separately excited field winding and figure 3 shows the corresponding model. The term K_E has been introduced in the model to account for the characteristic of exciters having self-excitation. Note that $K_E = 1$ in the case of separately excited exciters.

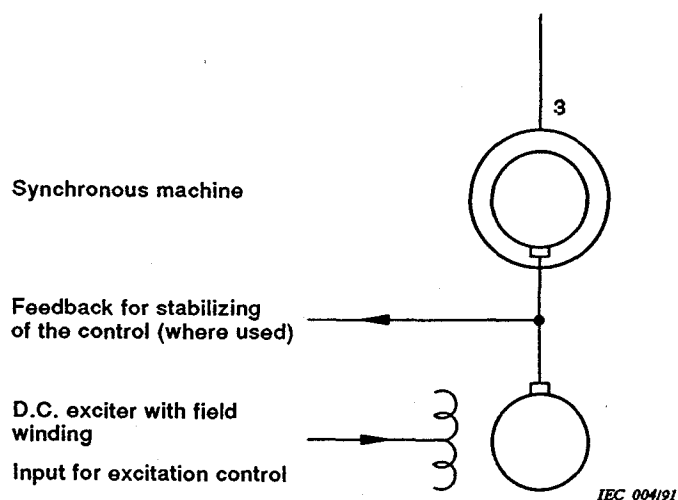


Figure 2 – D.C. exciter with one separately excited field winding

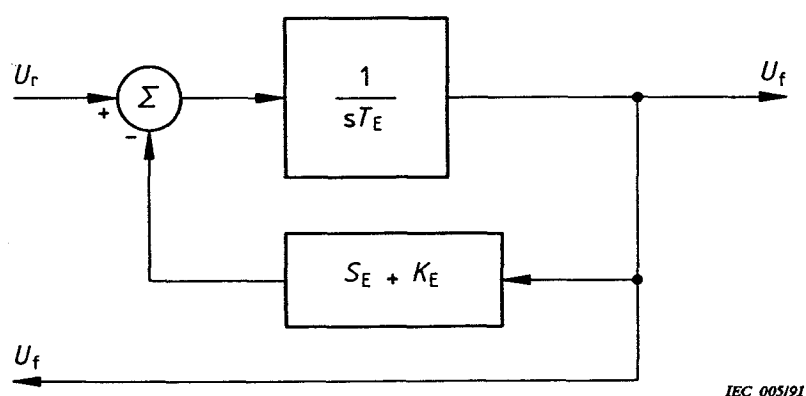


Figure 3 - Model corresponding to figure 2

Several forms of excitation control are in use:

- electro-mechanically operated rheostat;
- motor-operated rheostat;

- enclenchement et mise en court-circuit périodique du circuit de champ en dérivation;
- utilisation de circuits de champ additionnels, excités séparément, pour des actions de sur- et sous-excitation forcées;
- utilisation de la tension aux bornes d'une amplidyne en série avec l'enroulement de champ pour des actions de sur- et sous-excitation forcées.

Considérant la diminution de la représentativité et de l'importance des unités équipées d'excitatrices à courant continu, le modèle simple de la figure 3 devrait se révéler convenable pour ces cas.

2.2 Excitatrice à courant alternatif

Les excitatrices à courant alternatif utilisent un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ de la machine synchrone. Les redresseurs peuvent être commandés ou non. Dans le cas de redresseurs non commandés, le réglage est effectué en agissant sur un ou plusieurs enroulements de champ de l'excitatrice à courant alternatif.

Pour modéliser le réglage, il est essentiel de connaître la source alimentant le courant de champ de l'excitatrice à courant alternatif, par l'intermédiaire de son équipement de réglage. La source peut être un générateur auxiliaire, une source statique de tension ou une source statique composée.

La figure 4 montre la représentation graphique d'une excitatrice à courant alternatif comportant un redresseur stationnaire non commandé. Le redresseur stationnaire est alimenté par l'alternateur et fournit du courant continu à l'enroulement de champ de la machine synchrone par l'intermédiaire de bagues et balais. La connexion entre l'enroulement tournant, créant le champ de l'alternateur exciteur, et le réglage de l'excitation est également réalisée par bagues et balais.

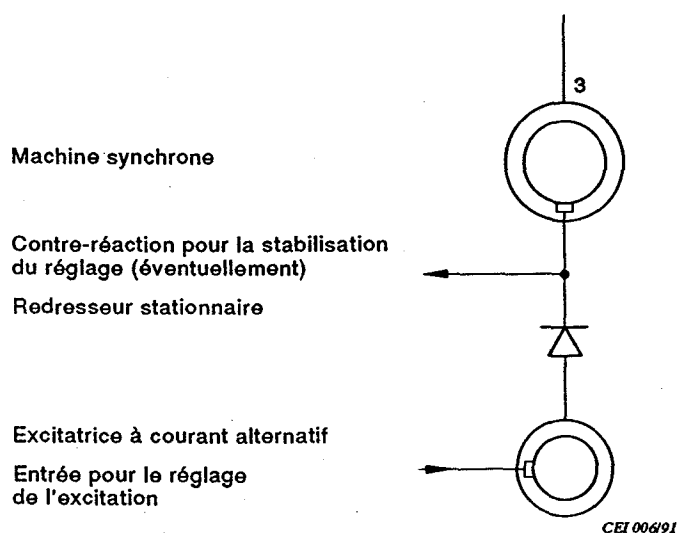


Figure 4 – Excitatrice à courant alternatif comportant un redresseur stationnaire non commandé

- periodically closing and short-circuiting of the shunt field circuit;
- use of additional, separately excited fields for buck and boost action;
- use of the terminal voltage of an amplidyne in series with the field winding for boost and buck action.

Considering the dwindling percentage and importance of units equipped with d.c. exciters, the simple model of figure 3 should prove adequate for these cases.

2.2 A.C. exciter

A.C. exciters employ an a.c. generator together with a stationary or rotating rectifier to produce the field current for the synchronous machine. The rectifiers may be uncontrolled or controlled. In the case of uncontrolled rectifiers, control is effected via one or more field windings of the a.c. exciter.

It is essential to know the source of supply for the a.c. exciter field current via its control equipment in order to model the control. The source may be an auxiliary generator or a potential or compound static source.

Figure 4 shows the graphical representation of an a.c. exciter with an uncontrolled stationary rectifier. The stationary rectifier is fed from the a.c. generator and delivers d.c. current to the field winding of the synchronous machine via brushes and slip-rings. The connection of the rotating field winding of the exciter generator to the excitation control is also made by slip-rings and brushes.

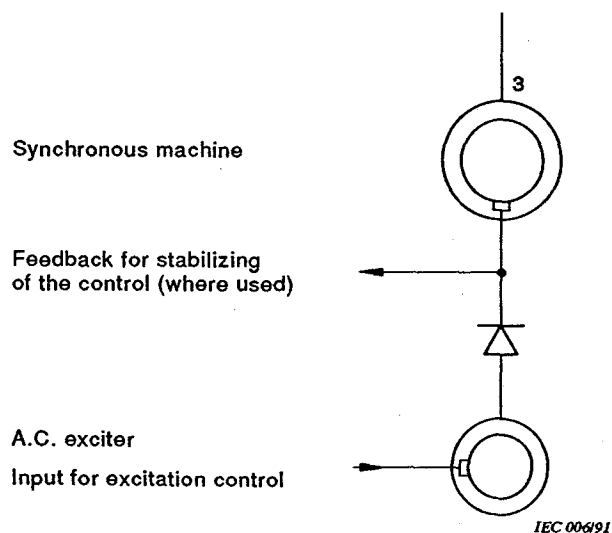


Figure 4 – A.C. exciter with an uncontrolled stationary rectifier

La figure 5 montre la représentation graphique d'une excitatrice à courant alternatif avec un redresseur tournant non commandé (excitatrice sans bagues ni balais), et une excitatrice auxiliaire à aimants permanents pour l'alimentation de l'équipement de réglage de l'excitation. Le redresseur tourne sur le même arbre que la machine synchrone et l'induit tournant de l'excitatrice à courant alternatif. La sortie du redresseur tournant est reliée, sans bagues ni balais, directement à l'enroulement de champ de la machine synchrone.

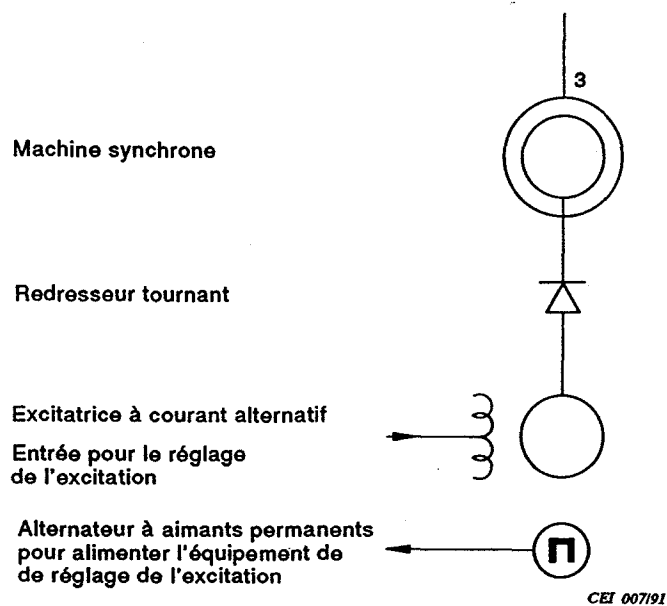


Figure 5 – Excitatrice à courant alternatif avec un redresseur tournant non commandé (excitatrice sans bagues ni balais)

Figure 5 shows the graphical representation of an a.c. exciter with an uncontrolled rotating rectifier (brushless exciter) and permanent magnet auxiliary exciter for supply of the excitation control equipment. The rectifier rotates on a shaft common to the synchronous machine and the rotating armature for the a.c. exciter. The output of the rotating rectifier is connected without slip-rings or brushes directly to the field winding of the synchronous machine.

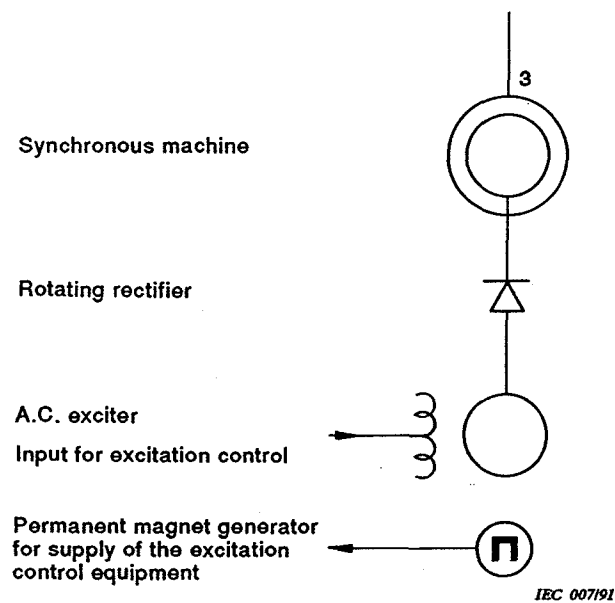


Figure 5 – A.C. exciter with an uncontrolled rotating rectifier (brushless exciter)

L'excitatrice à courant alternatif peut être modélisée conformément à la figure 6 qui tient compte des effets de la charge de l'excitatrice en régime permanent et en régime transitoire. (Dans certains cas, on peut utiliser un modèle encore plus détaillé pour prendre en compte les effets des charges transitoires.)

Un modèle simplifié est montré en figure 7. Bien qu'il ne prenne en compte les effets de la charge qu'en régime permanent par l'intermédiaire de la courbe de saturation en charge, il peut être satisfaisant pour la plupart des études. On peut également utiliser le modèle simplifié en l'absence de données complètes.

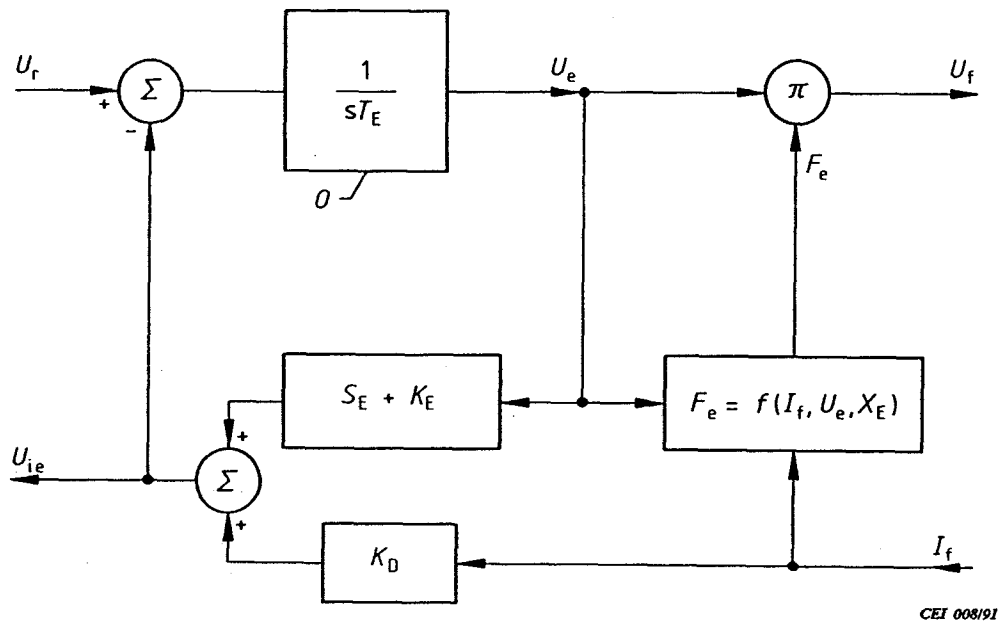


Figure 6 - Modèle détaillé d'une excitatrice à courant alternatif

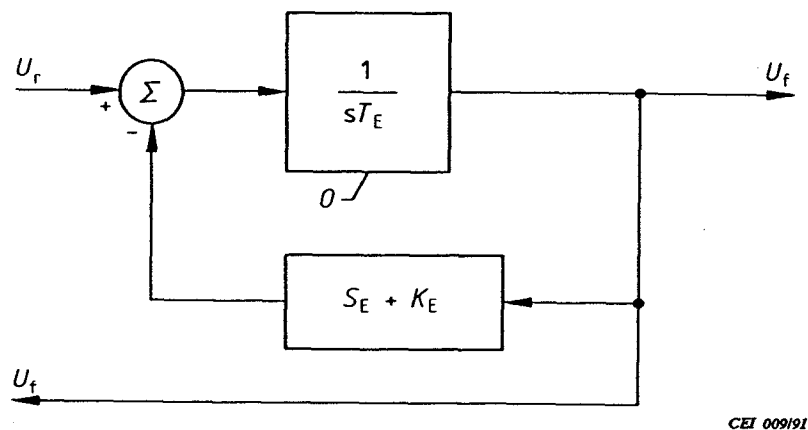


Figure 7 - Modèle simplifié d'une excitatrice à courant alternatif

The a.c. exciter can be modelled as shown in figure 6, accounting for both steady-state and transient exciter loading effects. (In certain cases an even more detailed model may be used to take into account the effects of transient loads.)

A simplified model is shown in figure 7. Although it accounts only for steady-state loading effects by use of the load saturation curve, it may be adequate for most studies. The use of the simplified model may also be indicated where complete data are not available.

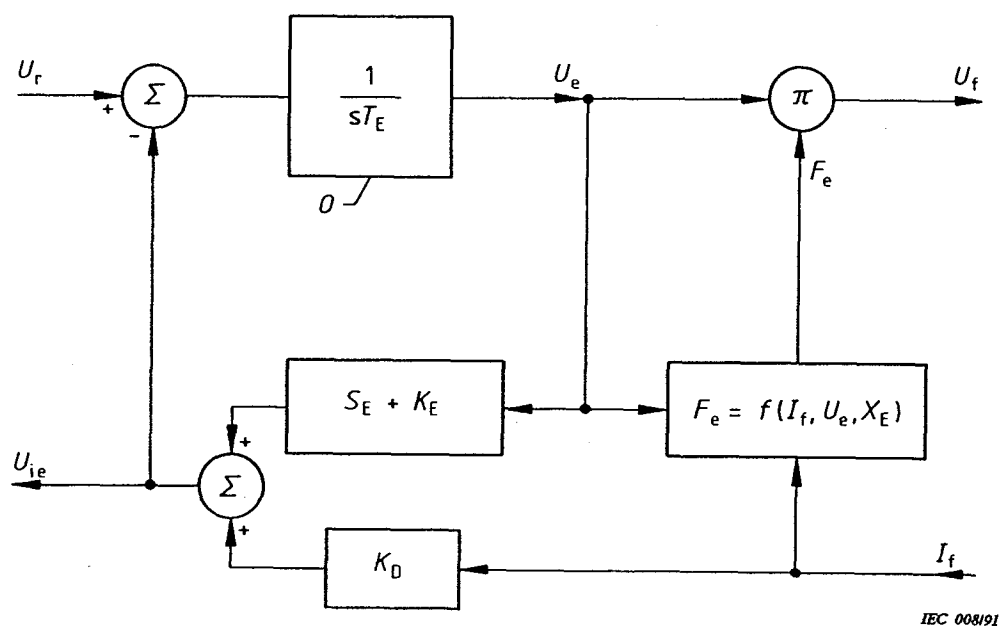


Figure 6 - Detailed model of an a.c. exciter

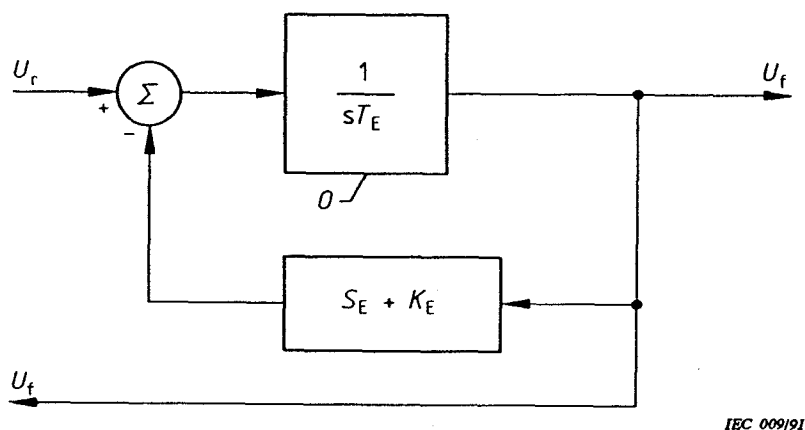


Figure 7 - Simplified model of an a.c. exciter

2.3 Excitatrice statique à source de tension

Les excitatrices statiques à source de tension sont constituées de transformateurs, débitant sur redresseurs, qui peuvent être alimentés par un alternateur auxiliaire monté sur le même arbre que la machine synchrone, par un jeu de barres auxiliaire, indépendant de la tension de l'alternateur principal, ou par la tension aux bornes de la machine synchrone. Dans ce dernier cas, on emploie le terme d'"excitation statique par soutirage en dérivation", et les variations de tension de cette source doivent être prises en compte pour les performances et pour la modélisation. La figure 8 montre la représentation graphique de ce système.

On peut utiliser soit un pont tout thyristors, soit un pont mixte dont la moitié est constituée de thyristors, et l'autre moitié de diodes. On utilise fréquemment le réglage de l'angle d'allumage pour limiter inférieurement la tension de plafond négative U_{p-} , dont la valeur absolue peut être différente de U_{p+} . Le pont mixte ne permet pas l'inversion de tension, et conduit à une valeur nulle pour U_{p-} .

Dans les équipements les plus courants, des ponts à redresseurs commandés n'autorisent que des valeurs positives du courant de champ. Si les perturbations aux bornes de la machine synchrone tendent à faire circuler un courant de champ négatif, le modèle mathématique de la figure 9 n'est plus valable. La tension aux bornes de l'enroulement de champ de la machine synchrone ne sera plus déterminée par la commande du régulateur, mais par d'autres considérations qui sortent du cadre de ce rapport.

Un équipement autorisant la circulation du courant de champ dans les deux sens ne sera exigé que dans des conditions de fonctionnement inhabituelles. Le modèle mathématique de la figure 9 est applicable même dans ces conditions pour de tels systèmes.

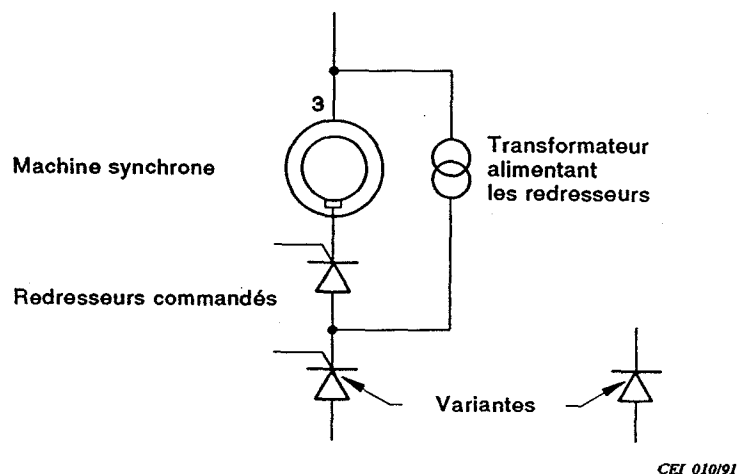


Figure 8 - Système d'excitation statique à source de tension

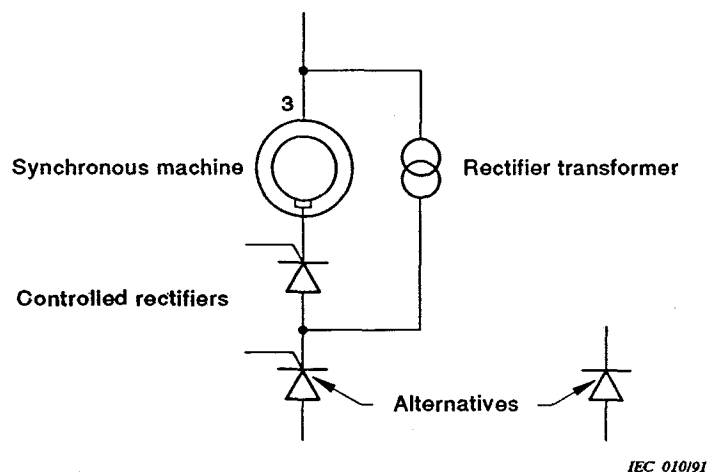
2.3 Potential source static exciter

Potential source static exciters use rectifier transformers which can be supplied from an auxiliary generator mounted on the same shaft as the synchronous machine, from an auxiliary bus system not dependent on the main generator voltage or from the synchronous machine terminal voltage. The latter is called a shunt static excitation system and the voltage variations of this system have to be taken into account for the performance and the modelling. Figure 8 shows the graphical representation of this system.

Either a full thyristor bridge, or a hybrid bridge having a complement of one half thyristors and one half diodes, may be used. Firing angle control is frequently used to limit the value of negative voltage available, giving absolute different values of U_{p+} and U_{p-} . The hybrid bridge configuration does not allow inverting and will have a value of U_{p-} equal to zero.

In the most commonly applied equipment, the controlled rectifier bridges will allow only positive excitation current to flow. If synchronous machine terminal disturbances cause a negative induced field current to flow, the computer model of figure 9 is no longer valid. The voltage across the synchronous machine field winding will no longer be determined by the regulator control command but is determined from other considerations beyond the scope of this report.

Equipment allowing both positive and negative excitation current flow will be required only under unusual operating circumstances. The computer model of figure 9 is applicable even under these conditions for such systems.



IEC 010/91

Figure 8 - Potential source static excitation system

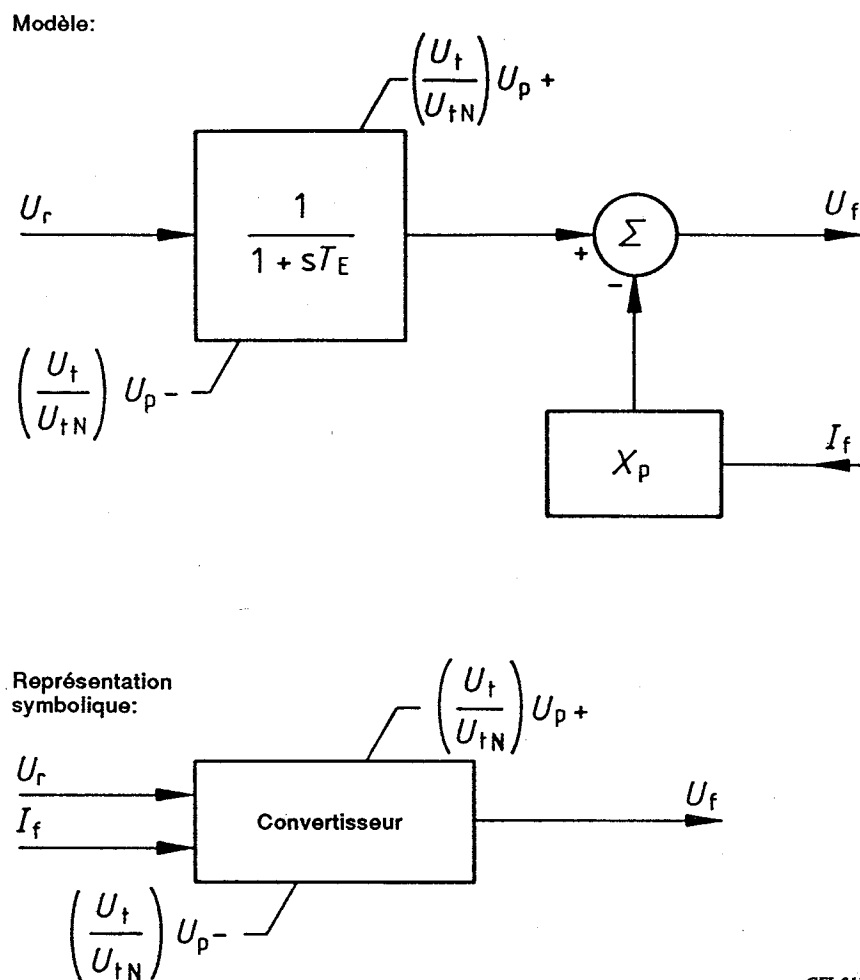


Figure 9 – Modèle et représentation symbolique du système d'excitation à source de tension

2.4 Excitatrice statique composée

Les excitatrices statiques composées sont constituées de transformateurs, débitant sur redresseurs, alimentés à la fois par une source de courant et une source de tension provenant de la machine synchrone. Il y a de nombreux schémas possibles; trois d'entre eux, d'usage courant, vont être décrits.

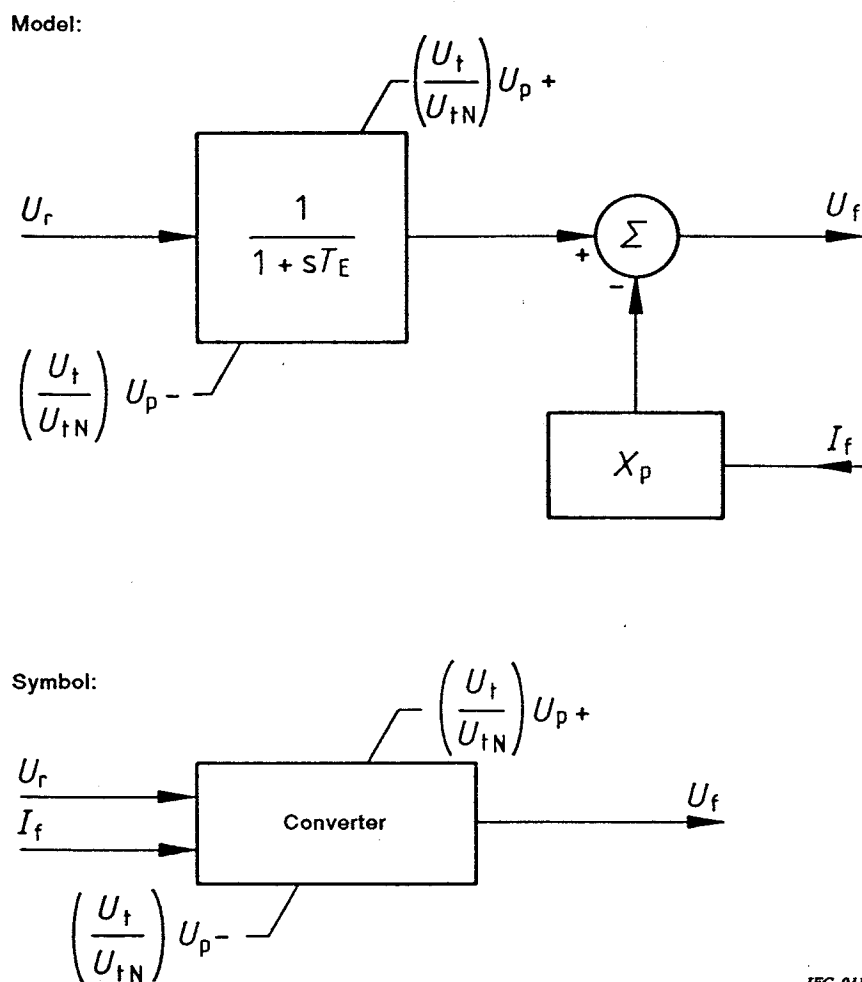


Figure 9 – Potential source excitation system model and symbol

2.4 Compound source static exciter

Compound source static exciters use rectifier transformers supplied from both current and voltage sources (synchronous machine quantities). There are a number of design possibilities. Three commonly used forms will be described.

Le premier exemple, figure 10, illustre le concept de l'addition de tensions provenant de deux sources mises en série du côté continu des redresseurs. Les transformateurs de courant ont un circuit magnétique spécial, ou sont associés à des réactances séparées comme indiqué sur la figure 10, dont le modèle correspondant est donné en figure 11.

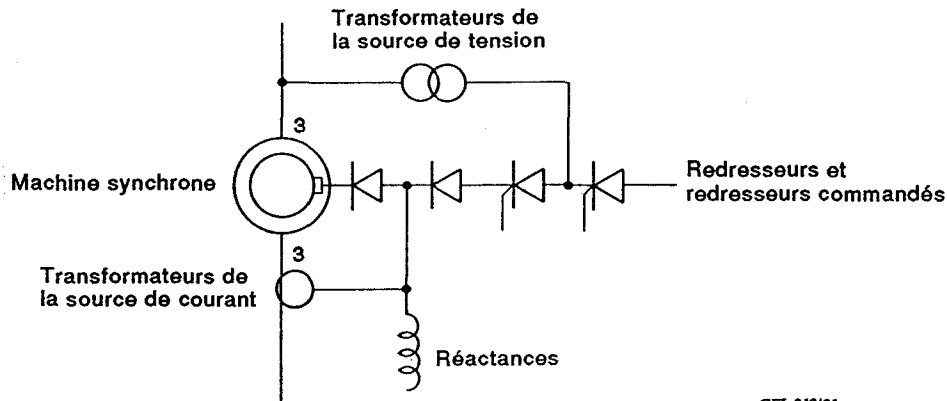


Figure 10 – Excitatrice statique composée, avec addition des tensions en série du côté continu

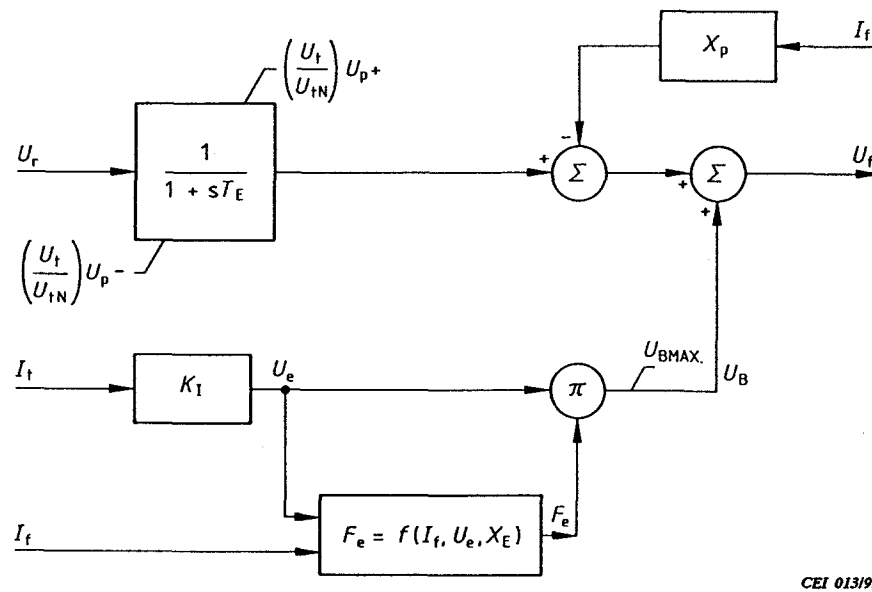


Figure 11 - Modèle correspondant à la figure 10

Un second exemple, figure 12, illustre le concept de l'addition de courants provenant de deux sources mises en parallèle du côté alternatif des redresseurs. Les transformateurs sources de tension ont un circuit magnétique spécial, ou sont associés à des réactances séparées comme indiqué sur la figure. Le réglage est réalisé en dérivant une partie de la somme des courants à travers des redresseurs commandés.

The first example, figure 10, illustrates the concept of addition of voltages from the two sources in series on the d.c. side of the rectifiers. The current transformers have a special magnetic circuit design or use separate reactors as shown in figure 10, the corresponding model of which is given in figure 11.

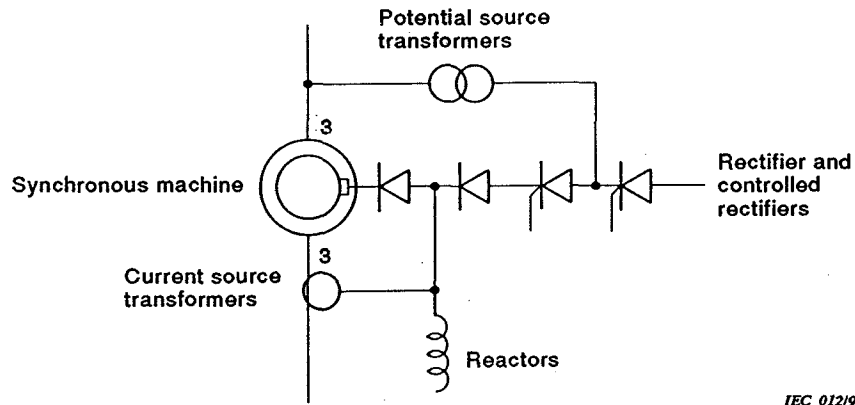


Figure 10 –Compound source static exciter with addition of voltages in series on the d.c. side

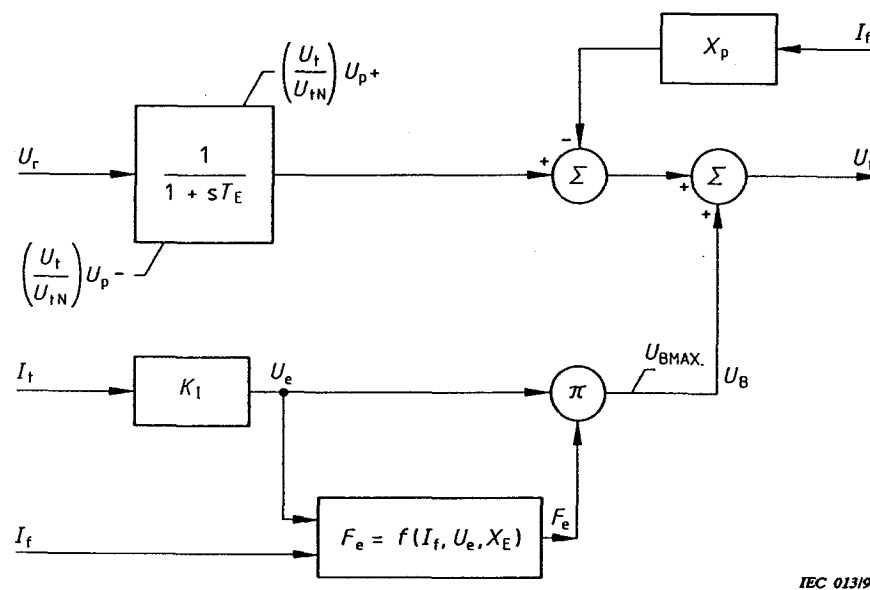
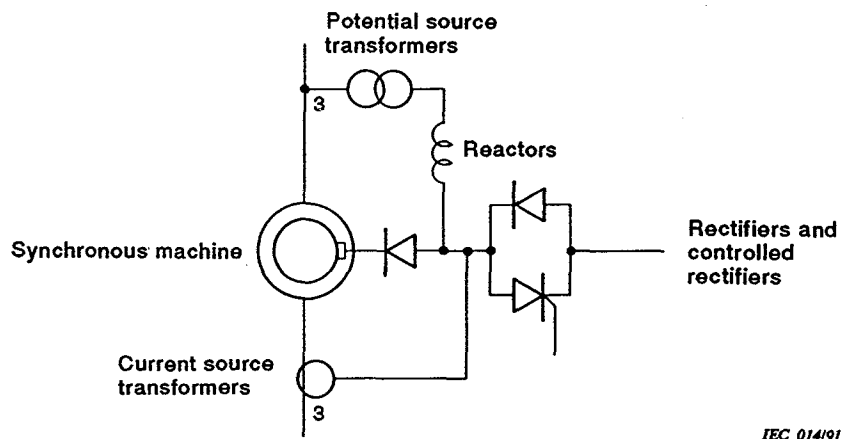


Figure 11 - Model corresponding to figure 10

A second example, figure 12, illustrates the concept of addition of currents from the two sources in parallel on the a.c. side of the rectifiers. The potential source transformers have a special magnetic circuit design or use separate reactors as shown. Control is accomplished by diverting a part of the current sum through controlled rectifiers.

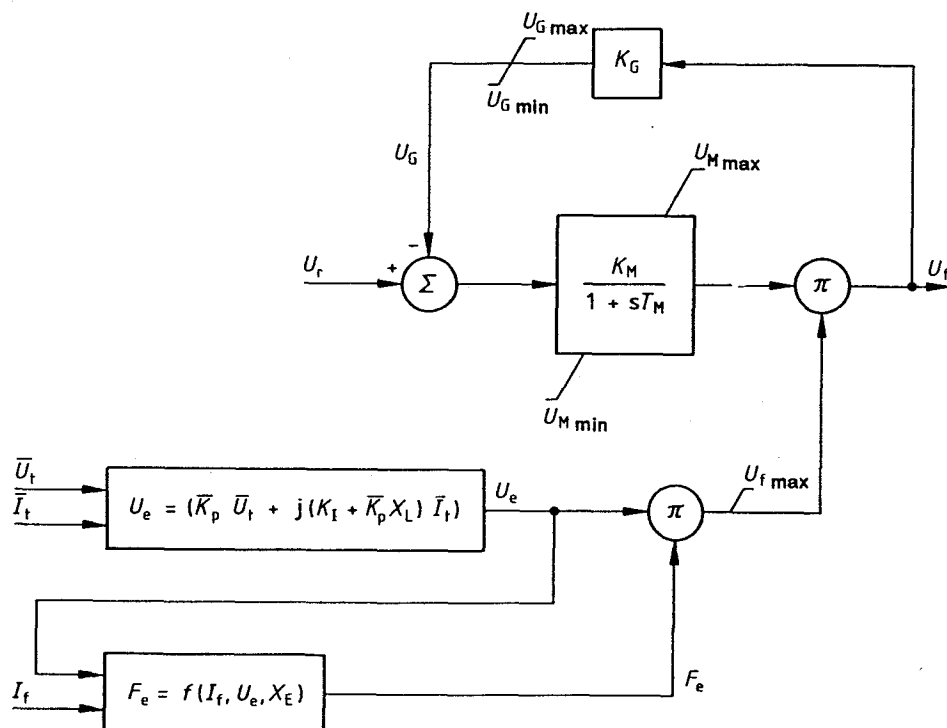
Another design variation (not illustrated) uses separate internal machine windings for the potential sources, with or without the machine terminal current as a second source.

The computer model, figure 13, is sufficiently general to allow all of the design parameters for both of these systems to be accommodated. .



IEC 014/91

Figure 12 – Compound source static exciter with addition of currents from both sources on the a.c. side

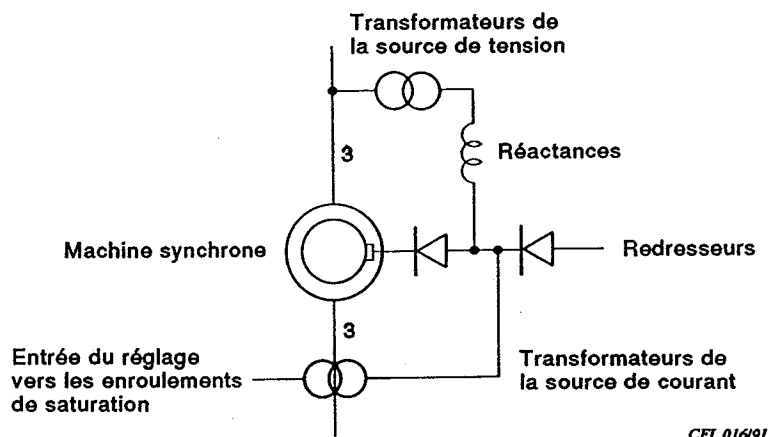


IEC 015/91

where $\overline{K}_p = K_p \varepsilon^{j\theta_p}$

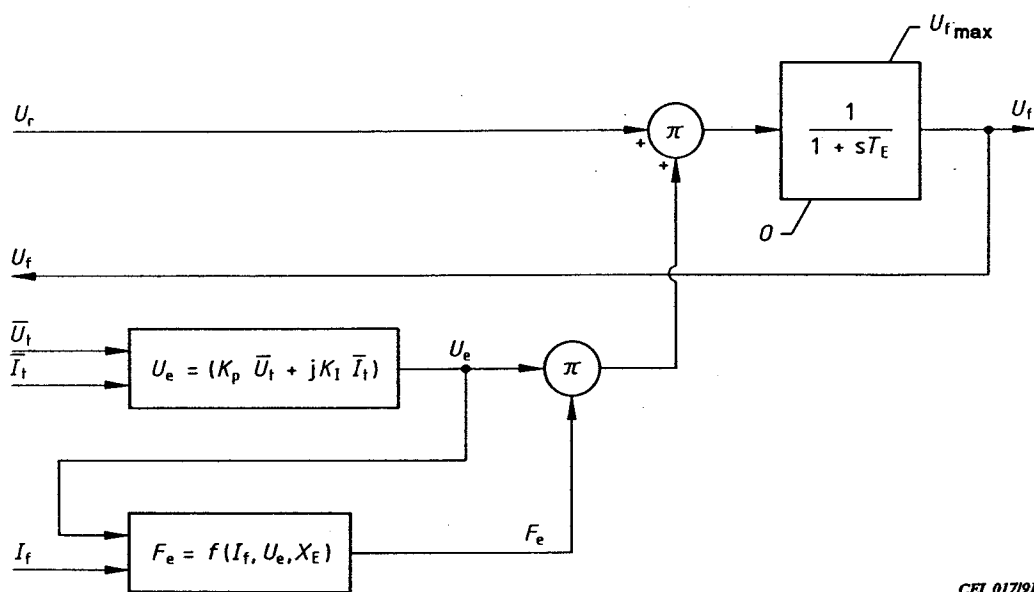
Figure 13 – General model for compound source static exciter

Une variante supplémentaire de ce système utilise, pour le réglage de la tension de sortie de l'excitatrice, la saturation des transformateurs sources de courant. Ce système est illustré en figure 14, ci-dessous, et le modèle mathématique en figure 15.



CEI 016/91

Figure 14 – Excitatrice statique à source composée, avec addition des courants des deux sources du côté alternatif



CEI 017/91

Figure 15 - Modèle correspondant à la figure 14

Certaines configurations d'excitatrices composées n'utilisent pas deux transformateurs distincts à deux enroulements pour la source de tension et pour la source de courant. Ces schémas utilisent des transformateurs à trois enroulements, la combinaison des sources étant obtenue magnétiquement. Les relations mathématiques et les schémas des figures 13 et 15 sont applicables à de tels systèmes.

A further variation of the system provides for control of the exciter output by saturation of the current source transformers. This system is illustrated in figure 14 below, and the computer model in figure 15.

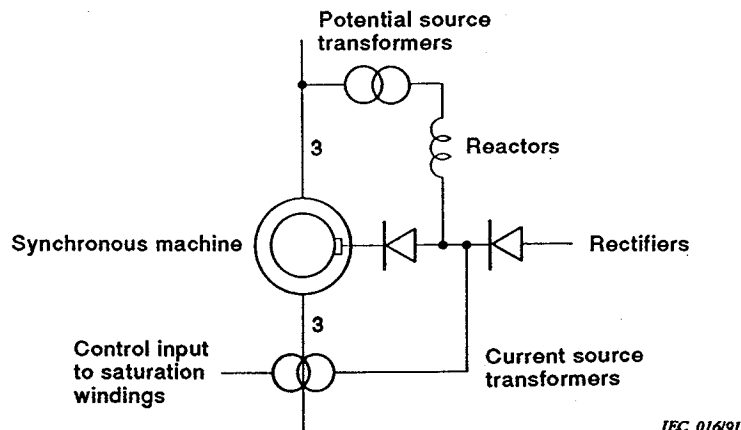


Figure 14 – Compound source static exciter with addition of currents from both sources on the a.c. side

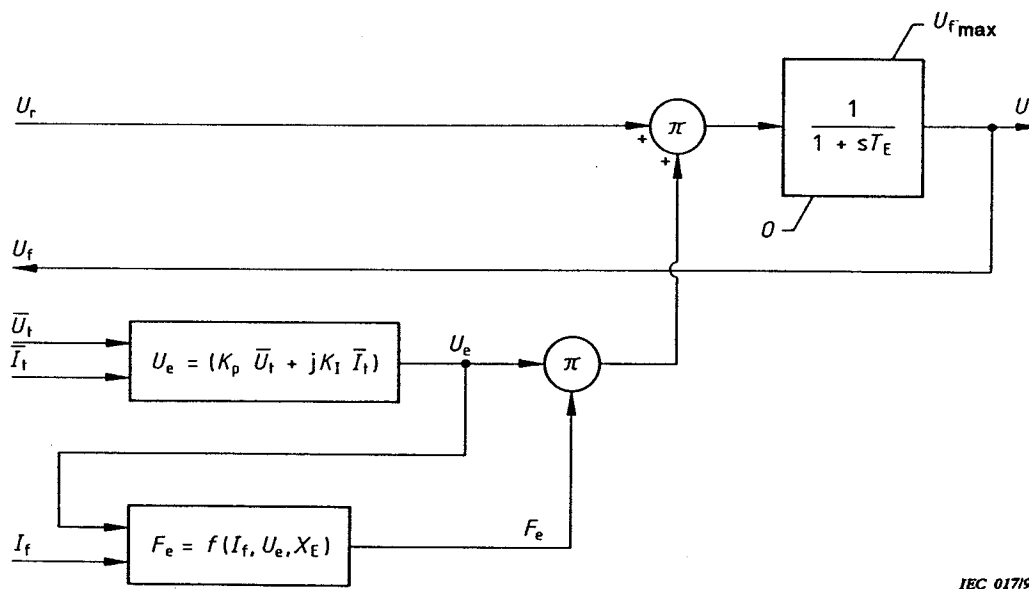


Figure 15 - Model corresponding to figure 14

Some forms of compound exciters do not utilize separate two-winding transformers for the potential source and current source. These designs employ three-winding transformers instead, with the combination of sources being accomplished magnetically. The mathematical relationships and block diagrams of figures 13 and 15 are applicable to such systems.

2.5 Modèles mathématiques pour la fonction de réglage

Une part considérable de l'effort nécessaire pour préparer les études de stabilité à grande échelle réside dans la collecte et l'évaluation des données nécessaires pour la description mathématique des systèmes d'excitation concernés. L'utilisation de modèles mathématiques simplifiés, pour réduire cet effort, peut devoir être restreinte lorsque l'étude s'étend au-delà de la première oscillation angulaire. La détermination de la stabilité des réseaux modernes interconnectés exige souvent de poursuivre la simulation pendant plusieurs secondes et plusieurs oscillations angulaires, et, dans ce cas, on devra parfois renoncer aux simplifications.

Les équipements provenant des divers constructeurs ont en commun les fonctions de base du réglage d'excitation qui peuvent être décrites mathématiquement par un réglage PID généralisé. Cela permet la représentation des parties essentielles du réglage d'excitation sous une forme standardisée.

Dans le réglage PID de la figure 16, le premier bloc avec les constantes de temps T_{C2} , T_{B2} représente la fonction de dérivation (D), les autres blocs avec les constantes de temps T_{C1} , T_{B1} et le gain K_R , la fonction PI. Les limitations de sorties $U_{r\max}$, $U_{r\min}$ sont, dans leur effet, du type avec antisaturation, c'est-à-dire qu'elles empêchent le terme d'intégration de dépasser ces limites. La comparaison des limites sans antisaturation et avec antisaturation fait l'objet de l'annexe D. Un opérateur logique sert de sélecteur de signal lorsqu'on doit représenter des limiteurs.

Les termes qui ne sont ni applicables ni exigés pour la mise en oeuvre du modèle standard sont fixés à 1 ou 0 respectivement. En fonction de la solution technique, il est parfois nécessaire de donner au moins une valeur minimale de constante de temps de retard, coordonnée avec la durée du pas de calcul digital, pour éviter l'instabilité numérique du calcul.

La fonction proportionnelle-intégrale est parfois structurée comme le montre la figure 17, avec une limitation avec antisaturation fournie par des amplificateurs proportionnels dans un élément de contre-réaction. La figure 17 donne également la relation algébrique pour exprimer cette structure dans les termes de la figure 16. Lorsqu'il faut représenter la limite avec antisaturation, la structure de la figure 16 peut être nécessaire pour éviter des problèmes lors du calcul numérique, dus au gain élevé des amplificateurs dans la contre-réaction.

La figure 18 montre un modèle de base du type PID, parmi les plus anciennement introduits et fréquemment utilisés, dont le comportement est similaire à celui de la figure 16, mais introduisant un retard dans le bloc de contre-réaction, au lieu d'une fonction avance dans la chaîne directe. Ce modèle est nécessaire en option, car l'équivalence avec la structure de la figure 16 n'est pas possible.

La modélisation de la détection de tension aux bornes de la machine synchrone est commune à tous les régulateurs de tension. La figure 19 montre la détection de tension combinée avec la compensation de courant de charge du côté alternatif. Dans ce cas, les grandeurs d'entrée (tension et courant de la machine synchrone) sont introduites sous forme vectorielle, et le signal résultant est alors redressé. La compensation de courant de charge est normalement utilisée sous les formes suivantes:

2.5 Mathematical models for the control function

A considerable part of the effort required to prepare large scale stability studies is in collecting and evaluating data for the mathematical description of the excitation systems involved. The use of simplified mathematical models to reduce this effort may be restricted when studies extend beyond the first rotor angle swing. The determination of the stability of modern inter-connected power systems frequently requires the simulation to be continued for many seconds and many swing oscillations. Thus simplification will be ruled out in some instances.

Common to the equipment of different manufacturers are basic functions of the excitation control which can be mathematically described by a generalized PID-control. This allows representation of essential parts of the excitation control in a standardized form.

In the PID-control of figure 16 the first block with time constants T_{C2} , T_{B2} represents the derivative function (D), the other blocks with time constants T_{C1} , T_{B1} and gain K_R the PI-function. The output limitations $U_{r\max}$, $U_{r\min}$ are, in their effect, of the non-wind-up type, i.e. they prevent the integration term from excursions beyond these limits. Comparison of wind-up and non-wind-up limits is included in Appendix D. A gate serves as signal selector when limiters are to be represented.

Terms which are neither applicable nor required in the special application of the standard model are set to 1 or 0 respectively. Depending on the solution technique, it is sometimes necessary to provide at least a minimum value of lag time constant, co-ordinated with the length of the digital calculation time interval, to avoid numerical instability of the calculation.

The proportional-integral function is sometimes structured as shown in figure 17 with non-wind-up output limitation provided by proportional amplifiers in a feedback element. Figure 17 also gives the algebraic relationship to express this structure in terms of figure 16. When the non-wind-up output limit is to be represented, use of the structure of figure 16 may be required to avoid numerical calculation problems due to the high gain of the amplifiers in the feedback.

Figure 18 shows one of the earliest introduced and frequently used basic models of the PID-type, which in its function is similar to figure 16 but provides a delay in the feedback block instead of a lead function in the forward direction. This model is required as an option because equivalence with the structure of figure 16 is not possible.

Modelling of generator terminal voltage sensing is common to all voltage regulators. Figure 19 shows voltage sensing combined with load current compensation on the a.c. side. In this case the input variables (generator voltage and current) are entered in phasor form and the resulting signal is then rectified. Load current compensation is normally used in one of the following forms:

- lorsque des alternateurs sont mis en parallèle sans impédance de liaison entre eux, la compensation de courant est utilisée pour créer une impédance de couplage artificielle, de sorte que les alternateurs partagent correctement la puissance réactive. Dans ce cas, on donne à X_C une valeur positive;
- lorsqu'un seul alternateur est relié au réseau par une impédance non négligeable, ou lorsque deux ou plusieurs alternateurs sont reliés par l'intermédiaire de transformateurs individuels, il peut être souhaitable de régler la tension en un point situé au-delà des bornes des machines. Par exemple, il peut être souhaitable de compenser une partie de l'impédance du transformateur. Dans ce cas, R_C et X_C prennent des valeurs négatives.

Dans la plupart des cas de compensation du courant de charge, la composante R_C est négligeable et seule est nécessaire une valeur pour X_C . Dans ce cas, il est suffisant de réduire l'influence du courant à sa composante réactive, cette fonction restreinte étant appelée "compensation de courant réactif". L'influence du courant réactif peut, en outre, être ajoutée, sous forme d'un signal à courant continu filtré, au signal filtré de la tension aux bornes, conformément à la figure 20.

Lorsqu'on n'utilise pas de compensation, le filtre de la tension aux bornes redressée subsiste seul dans les figures 19 et 20. Alors que le filtrage lui-même peut être complexe, pour les besoins de la modélisation, il peut d'ordinaire être réduit à la seule constante de temps indiquée. Dans de nombreux systèmes, cette constante de temps est assez petite et on devra prévoir de pouvoir la rendre égale à zéro.

Certains compensateurs peuvent utiliser les puissances active et réactive comme variables de compensation. Les signaux correspondants peuvent avoir des filtrages différents de celui qui est utilisé pour la tension aux bornes. La figure 21 représente un compensateur de ce type.

La tension aux bornes, après addition de l'influence du compensateur de charge et filtrage, est comparée à une référence qui représente la consigne désirée de tension aux bornes. Le signal de référence équivalent pour le régulateur de tension, U_{REF} , est choisi de façon à satisfaire aux conditions initiales de fonctionnement.

Lorsqu'on utilise la compensation, il faut noter qu'elle peut entraîner un amortissement positif ou négatif en cas d'oscillations de puissance.

- when units are paralleled with no impedance between them, the current compensation is used to create an artificial coupling impedance so that the units will share reactive power appropriately. For this case, X_C would have a positive value;
- when a single unit is connected through a significant impedance to the system, or when two or more units are connected through individual transformers, it may be desirable to regulate voltage at a point beyond the machine terminals. For example, it may be desirable to compensate for a portion of the transformer impedance. For these cases, R_C and X_C take on negative values.

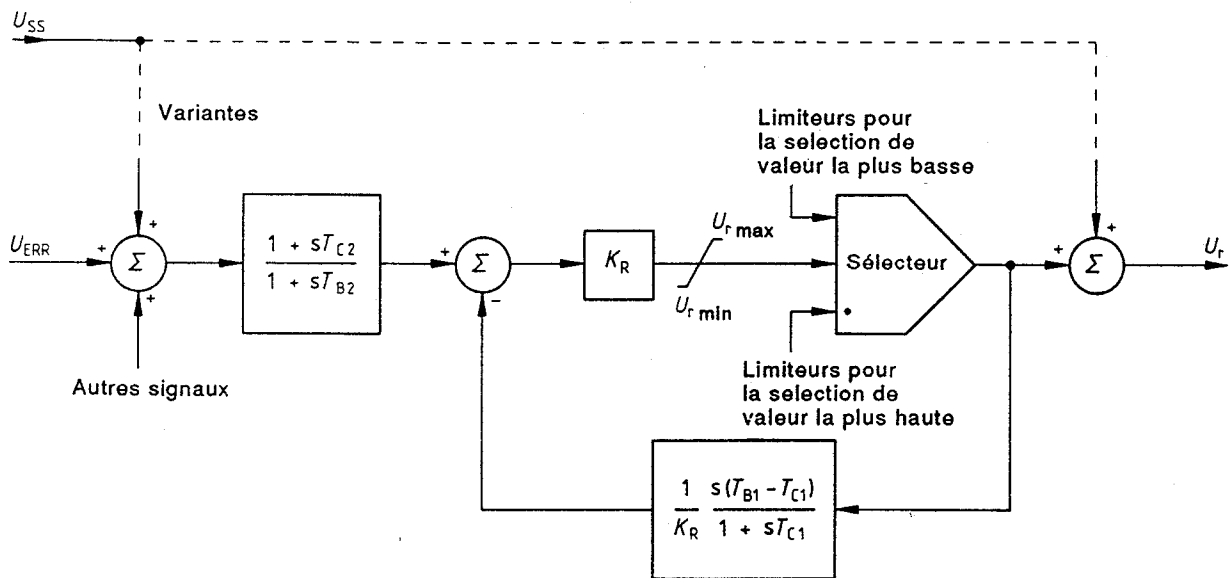
In most cases of load current compensation, the R_C component is negligible and only a value for X_C is required. In this case it is sufficient to reduce the current influence to the reactive component, the reduced function being designated as reactive current compensation. The reactive current influence can then also be added as a filtered d.c. signal to the filtered terminal voltage signal, according to figure 20.

When compensation is not employed, only the filter for the rectified terminal voltage remains in figures 19 and 20. While the filtering may be complex, for modelling purposes it can usually be reduced to the single time constant shown. For many systems, this time constant is rather small and provision should be made to set it to zero.

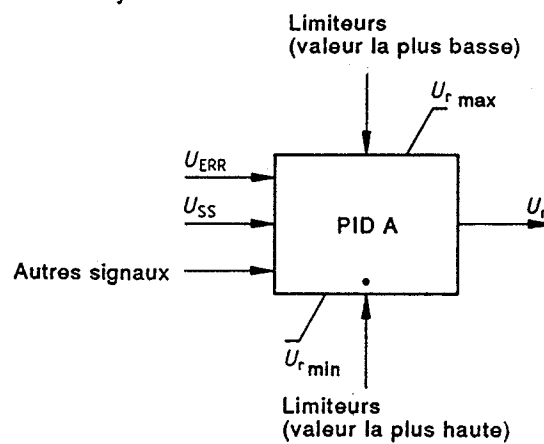
Some compensators may utilize real and reactive power as the compensation variables. These signals may have filtering different from that used for terminal voltage. Figure 21 represents a compensator of this type.

The terminal voltage after adding the load compensator influence and filtering is compared with a reference which represents the desired terminal voltage setting. The equivalent voltage regulator reference signal, U_{REF} , is chosen to satisfy the initial operating conditions.

When compensation is used, it has to be noted that it may add positive or negative damping in case of power oscillations.



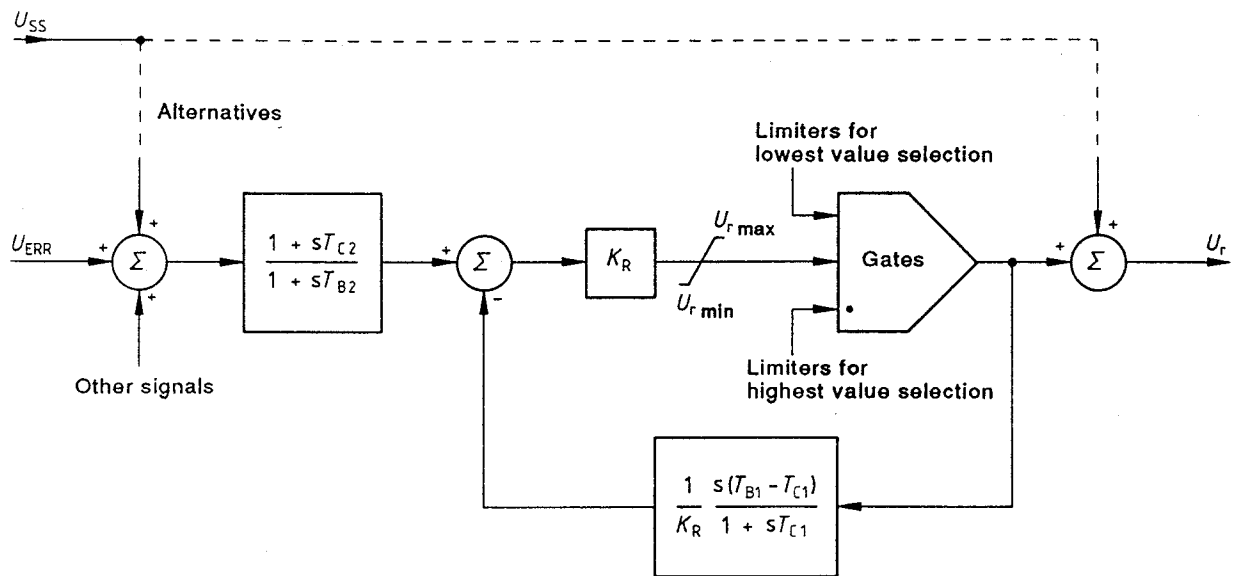
Symbole:



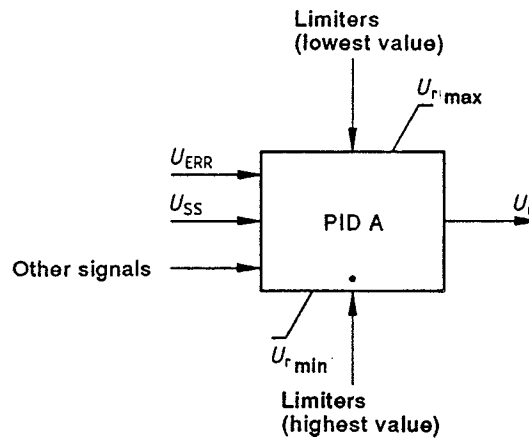
CEI 018/91

NOTE - • indique la priorité entre limiteurs.

Figure 16 – Régulateur PID généralisé avec limiteurs
Structure et modèle mathématique



Symbol:

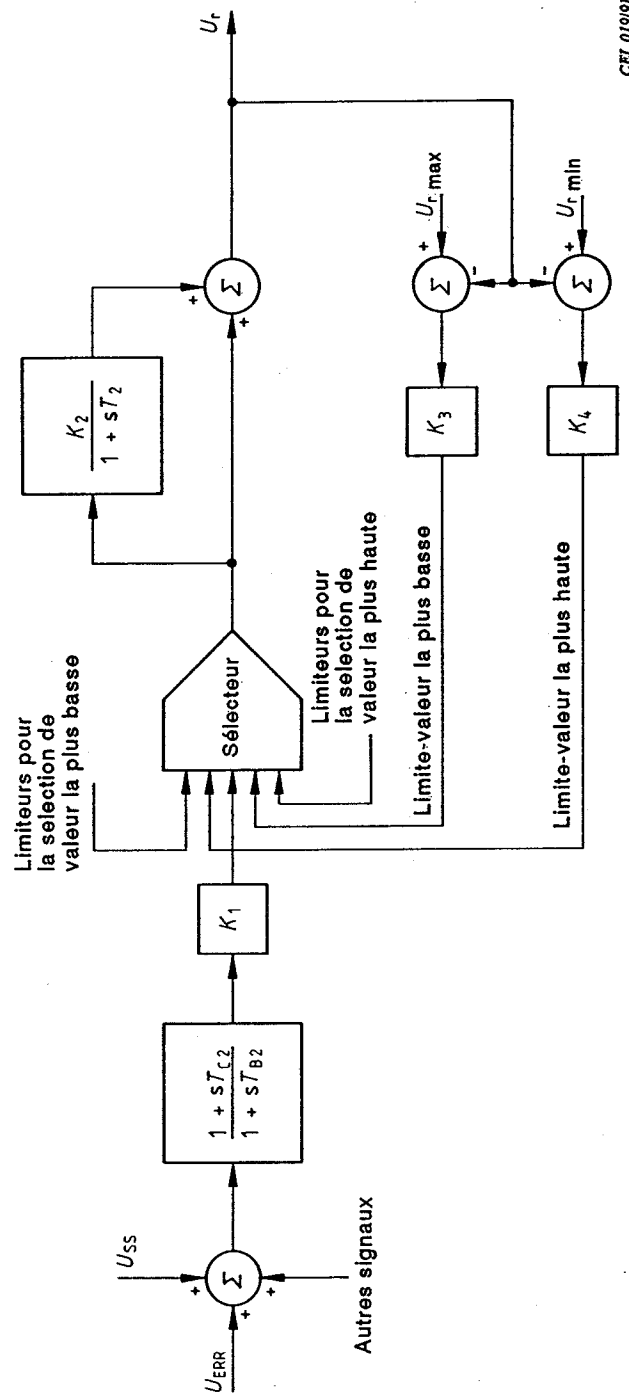


IEC 018/91

NOTES

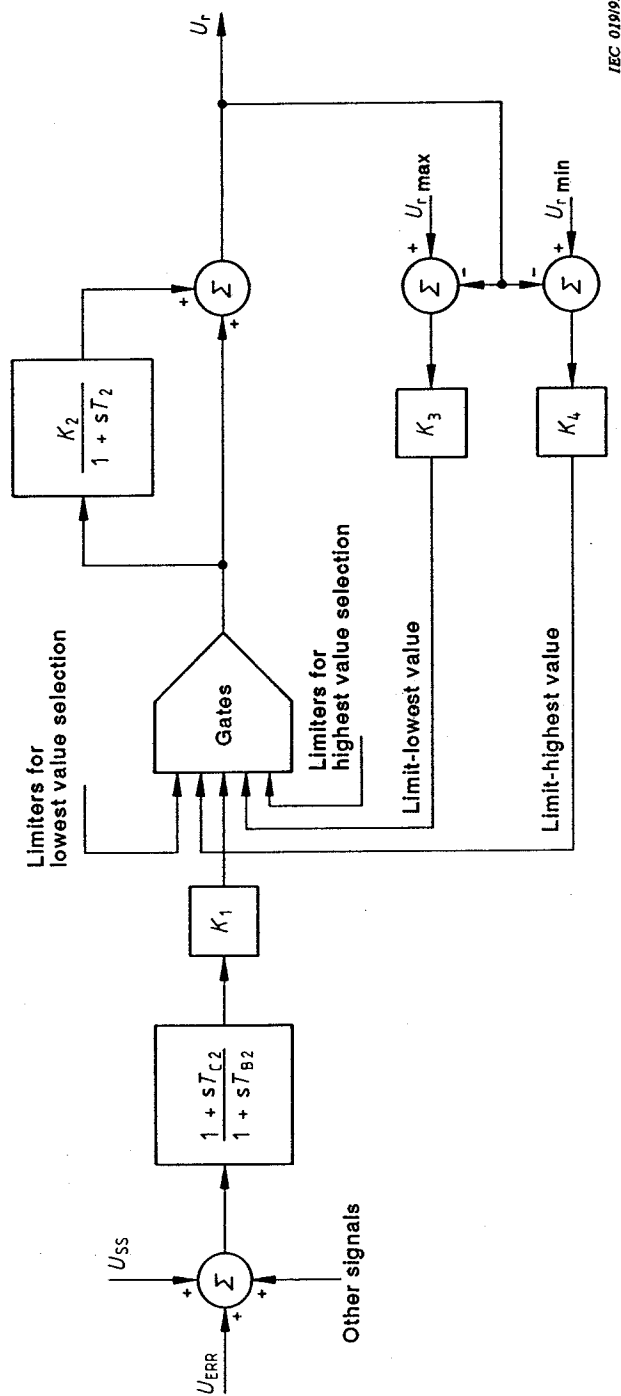
- 1 • indicates priority between limiters.
- 2 Lowest value is sometimes abbreviated to LV.
- 3 Highest value is sometimes abbreviated to HV.

Figure 16 – Generalized PID regulator with limiters
Structure and mathematical model



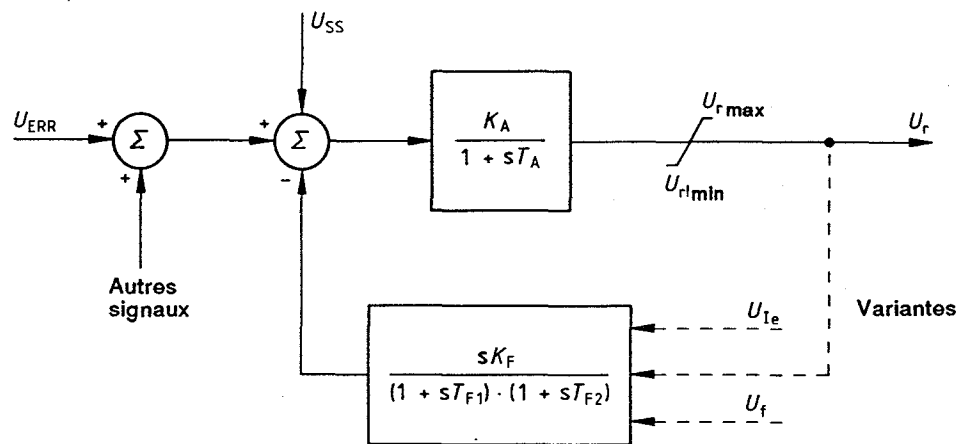
Equivalence avec la figure 16:
$$F_{(s)} = \frac{1+sT_{C2}}{1+sT_{B2}} K_1 (1+K_2) \frac{1+sT_2}{1+sT_2} \frac{1+sT_{C2}}{1+sT_{B2}} = \frac{1+sT_{C1}}{1+sT_{B1}} K_R$$

Figure 17 – Variante de régulateur PID – Structure et équivalence avec la figure 16

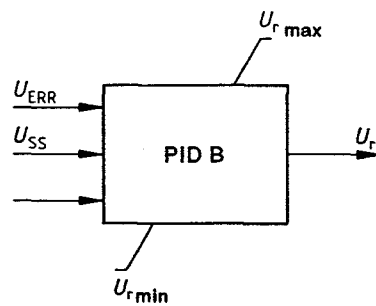


Equivalence with figure 16:
$$F_{(s)} = \frac{1+sT_{C2}}{1+sT_{B2}} K_1 (1+K_2) \frac{1+sT_2}{1+sT_2} = \frac{1+sT_{C2}}{1+sT_{B2}} K_R \frac{1+sT_{C1}}{1+sT_{B1}}$$

Figure 17 - Alternative PID regulator - Structure and equivalence with figure 16

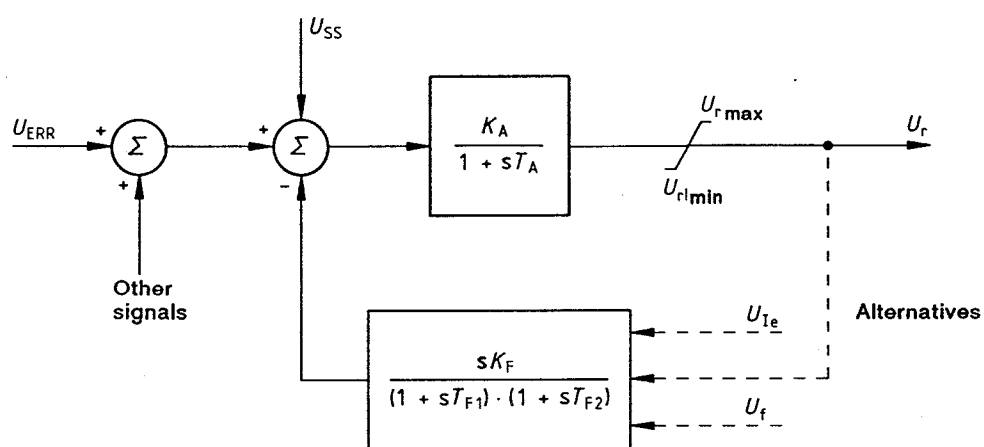


Symbole :

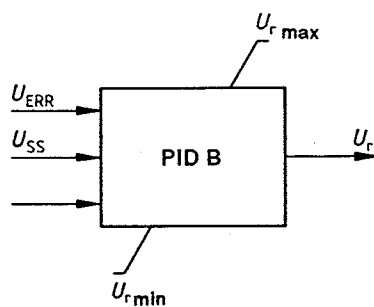


CEI 020/91

Figure 18 – Régulateur avance-retard sans limiteurs



Symbol:



IEC 020/91

Figure 18 – Lead lag regulator without limiters

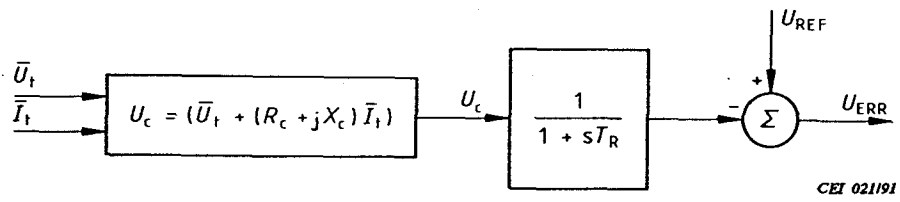


Figure 19 – Détection de la tension aux bornes et compensation du courant de charge

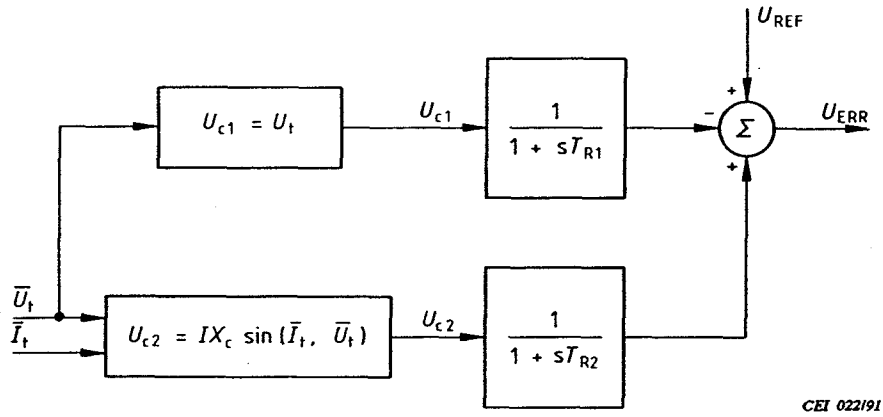
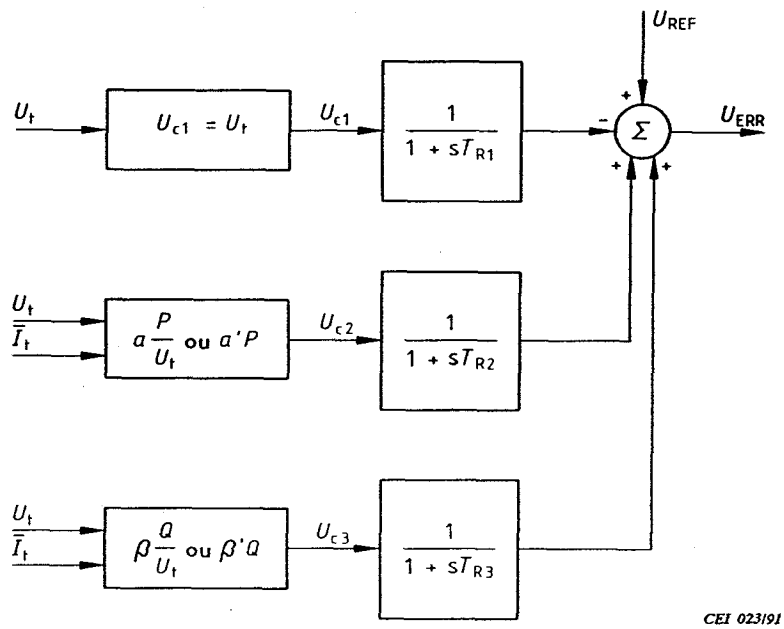


Figure 20 – Détection de la tension aux bornes et compensation de courant réactif à la sommation de référence



où

a, a', β, β' sont des nombres complexes

P, Q sont les puissances active et réactive aux bornes de l'alternateur

Figure 21 – Détection de la tension aux bornes et compensation de la puissance active et réactive à la sommation de référence

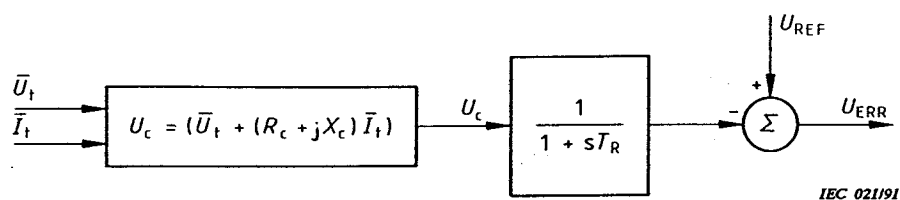


Figure 19 – Terminal voltage sensing and load current compensation

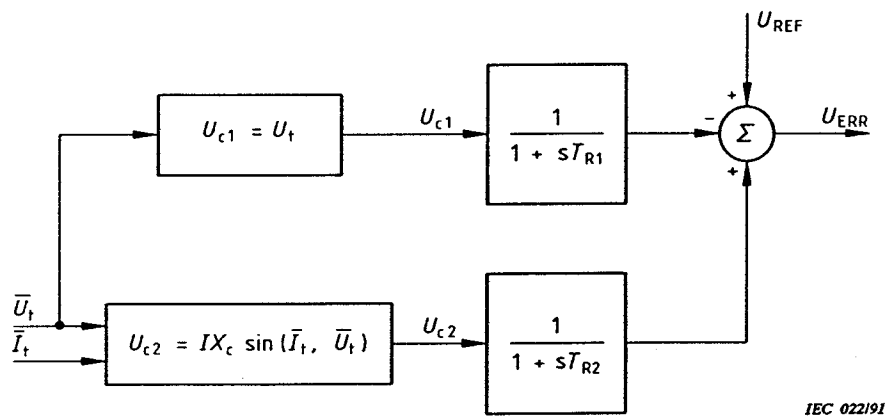
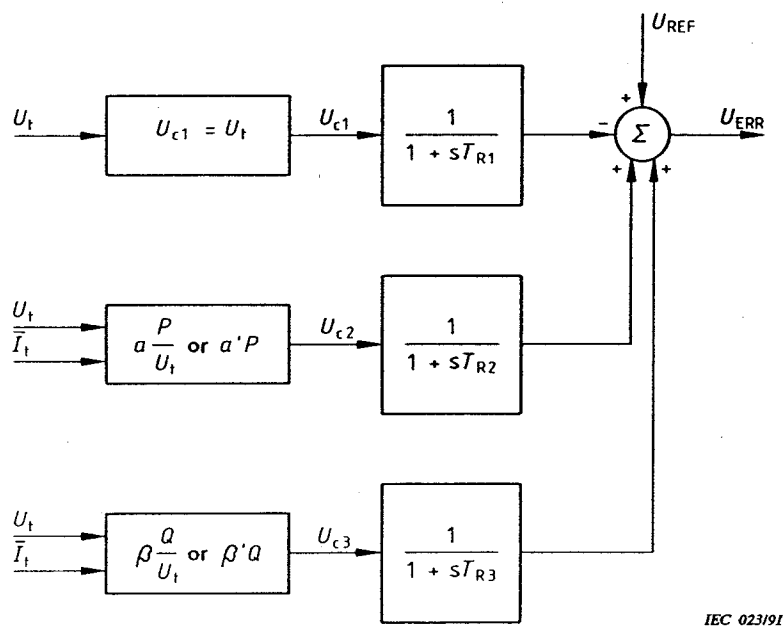


Figure 20 – Terminal voltage sensing and reactive current compensation at the reference junction



where

a, a', β, β' are complex numbers

P, Q are the active and reactive power at the generator terminals

Figure 21 – Terminal voltage sensing and active and reactive power compensation at the reference junction

3 Nomenclature

3.1 Paramètres

T_E	{	Constante de temps associée aux excitatrices tournantes à courant alternatif et à courant continu.
		Constante de temps associée à l'enroulement de saturation des excitatrices statiques.
		Constante de temps associée à la commande du pont à thyristors.
S_E		Fonction de saturation associée aux excitatrices tournantes à courant alternatif et à courant continu.
K_E		Constante associée à la partie auto-excitée du champ des excitatrices tournantes à courant alternatif et à courant continu. Pour les excitatrices à excitation séparée, $K_E = 1$.
K_M		Gain de la chaîne directe de la boucle interne du régulateur de champ des excitatrices statiques composées.
K_D		Coefficient démagnétisant, fonction des réactances des excitatrices à courant alternatif.
X_E		Coefficient de charge du redresseur, proportionnel à la réactance de commutation de la source de tension, de la source de courant ou de la combinaison équivalente de ces deux sources.
T_M		Constante de temps équivalente de la boucle interne du régulateur de champ dans les excitatrices statiques composées.
F_e		Coefficient de chute de tension due à la commutation, voir annexe B.
K_I		Constante associée à l'entrée du circuit de courant.
K_P		Constante associée à l'entrée du circuit de tension.
X_L		Coefficient associé au calcul de la tension de l'enroulement interne du générateur, proportionnel à la réactance de fuites stator du générateur.
$U_{f \max}$		Tension de sortie maximale, correspondant au niveau de saturation, pour une excitatrice composée.
$U_{r \max}$	{	Valeurs maximale et minimale de la tension de sortie du régulateur.
$U_{r \min}$		
$U_{B \max}$		Tension maximale correspondant au niveau de saturation de la source de courant d'une excitatrice composée.
U_{p+}	{	Tensions de sortie maximale et minimale, à vide, de l'excitatrice statique à source de tension lorsque l'alternateur est à sa tension assignée.
U_{p-}		
K_G		Gain de contre-réaction du régulateur de champ en boucle interne.

3 Nomenclature

3.1 Parameters

T_E	{	Time constant associated with rotating a.c. and d.c. exciters.
		Time constant associated with saturating winding of static exciters.
		Equivalent time constant associated with thyristor bridge control.
S_E		Saturation function associated with a.c. and d.c. rotating exciters.
K_E		Constant associated with the self-excited field of a.c. and d.c. rotating exciters. For separately-excited exciters, $K_E = 1$.
K_M		The forward gain of the inner loop field regulator of compound static exciters.
K_D		Demagnetizing factor, a function of a.c. exciter reactances.
X_E		Rectifier loading factor, proportional to commutating reactance of voltage source, current source, or equivalent combined voltage and current source.
T_M		Equivalent time constant of the inner loop field regulator of compound static exciters.
F_e		Commutating drop factor, see Appendix B.
K_I		Constant associated with current circuit input.
K_p		Constant associated with potential circuit input.
X_L		Coefficient associated with calculation of generator internal winding voltage, proportional to generator stator leakage reactance.
$U_{f \max}$		Maximum output voltage, corresponding to saturation level, of compound exciter.
$U_{r \max}$	{	Maximum and minimum output of regulator.
$U_{r \min}$		
$U_{B \max}$		Maximum voltage corresponding to saturation level of current source component of compound exciter.
U_{p+}	{	Maximum and minimum unloaded output voltage of potential source exciter with rated generator voltage.
U_{p-}		
K_G		The feedback gain of the inner loop field regulator.

$\left. \begin{array}{l} U_{G \max} \\ U_{G \min} \end{array} \right\}$ Limites maximale et minimale de la contre-réaction du régulateur de champ en boucle interne

$T_R, T_{R1}, T_{R2}, T_{R3}$ Constantes de temps associées au transducteur de tension aux bornes et au compensateur de courant de charge

X_P Coefficient de charge du redresseur pour les convertisseurs de source de tension

$\left. \begin{array}{l} K_R, K_A, K_F \\ K_1, K_2, K_3, K_4 \end{array} \right\}$ Constantes de gain associées au régulateur de tension

$\left. \begin{array}{l} T_{B1}, T_{B2}, T_{C1}, T_{C2} \\ T_A, T_2, T_{F1}, T_{F2} \end{array} \right\}$ Constantes de temps associées au régulateur de tension

$X_c, R_c, \alpha, \alpha', \beta, \beta'$ Constantes de gain associées aux compensateurs de charge

3.2 Variables

U_r Sortie du régulateur.

U_f Tension de champ de l'alternateur, sortie du système d'excitation (en valeur réduite, rapportée à la tension de champ d'entrefer).

I_f Courant de champ de l'alternateur (en valeur réduite rapportée au courant de champ d'entrefer)

$\overline{U}_t, U_t$ Valeurs vectorielle et scalaire de la tension aux bornes de l'alternateur (en valeur réduite, rapportées à la valeur assignée).

$\overline{I}_t, I_t$ Valeurs vectorielle et scalaire de la tension aux bornes de l'alternateur (en valeur réduite, rapportées à la valeur assignée).

U_e Tension de l'excitation derrière la réactance de commutation (en valeur réduite, rapportée à la valeur correspondant à la tension de champ d'entrefer de l'alternateur).

U_{REF} Tension de référence du régulateur (déterminée pour satisfaire aux conditions initiales).

U_B Tension de la source de courant d'une excitatrice composée.

U_{SS} Sortie des boucles stabilisatrices.

U_{ERR} Signal d'erreur de la voie du réglage de tension.

U_{ie} Chute de tension dans la résistance de l'enroulement de champ de l'excitatrice.

$\left. \begin{array}{l} U_{G \max} \\ U_{G \min} \end{array} \right\}$ Maximum and minimum limits of feedback of inner loop field regulator.

$T_R, T_{R1}, T_{R2}, T_{R3}$ Time constants associated with terminal voltage transducer and load current compensator.

X_P Rectifier loading factor for potential source converters.

$\left. \begin{array}{l} K_R, K_A, K_F \\ K_1, K_2, K_3, K_4 \end{array} \right\}$ Gain constants associated with voltage regulator.

$\left. \begin{array}{l} T_{B1}, T_{B2}, T_{C1}, T_{C2} \\ T_A, T_2, T_{F1}, T_{F2} \end{array} \right\}$ Time constants associated with voltage regulator.

$X_c, R_c, \alpha, \alpha', \beta, \beta'$ Gain constants associated with load compensators.

3.2 Variables

U_r Output of regulator.

U_f Generator field voltage, output of excitation system (in per unit of generator air gap field voltage).

I_f Generator field current (in per unit of generator air gap field current).

$\overline{U}_t, U_t$ Phasor and scalar values of generator terminal voltage (in per unit of rated value).

$\overline{I}_t, I_t$ Phasor and scalar values of generator terminal current (in per unit of rated value).

U_e Exciter voltage behind commutating reactance (in per unit of that value corresponding to generator air gap field voltage).

U_{REF} Voltage regulator reference (determined to satisfy initial conditions).

U_B Output voltage of current source component of compound exciter.

U_{SS} Power system stabilizer output.

U_{ERR} Error signal of the voltage control channel.

U_{ie} Voltage drop across exciter field resistance.

ANNEXE A

Système de valeurs réduites (p.u.)

Les courants et tensions d'un alternateur dans les études de réseaux sont exprimés en valeurs réduites. Ils sont généralement obtenus en utilisant le système de valeurs réduites dans lequel la valeur de base:

- de la tension aux bornes de l'alternateur est la tension assignée;
- du courant stator est le courant assigné;
- du courant de champ de l'alternateur est le courant de champ d'entrefer;

- de la tension de champ de l'alternateur est la tension de champ d'entrefer.

Les modèles de systèmes d'excitation doivent se raccorder aux modèles d'alternateurs aux bornes du stator et de l'enroulement de champ. Les signaux à sommer à la tension aux bornes de l'alternateur, exprimée en valeur réduite, à l'entrée du régulateur de tension, doivent être exprimés en valeurs réduites compatibles. Le courant délivré par l'excitatrice doit être exprimé en valeur réduite sur la même base que le courant de champ de l'alternateur, et la tension délivrée par l'excitatrice doit être exprimée en valeur réduite sur la même base que la tension de champ de l'alternateur.

APPENDIX A

Per unit system

Generator currents and voltages in system studies are represented by per unit variables. They are generally derived using the per unit system in which one per unit is defined:

- for generator terminal voltage as the rated voltage;
- for stator current as rated current;
- for generator field current as that current required to produce rated generator terminal voltage on the generator air gap line;
- for generator field voltage as the corresponding field voltage.

Excitation system models should interface with generator models at both the stator and field terminals. Signals which are summed with the per unit generator terminal voltage at the input to the voltage regulator should be compatible per unit variables. The exciter output current should be in per unit on the generator field current base, and exciter output voltage should be in per unit on the generator field voltage base.

ANNEXE B

Caractéristique externe d'un redresseur

Toutes les sources alimentant des circuits à redresseurs ont une impédance interne à prépondérance inductive. L'effet de cette impédance affecte le processus de commutation et provoque une décroissance de la tension moyenne redressée suivant une loi extrêmement non linéaire en fonction du courant de charge. Les montages redresseurs triphasés double alternance communément utilisés ont trois modes de fonctionnement distincts. Les équations caractérisant ces trois modes sont déterminées par le courant débité par le redresseur.

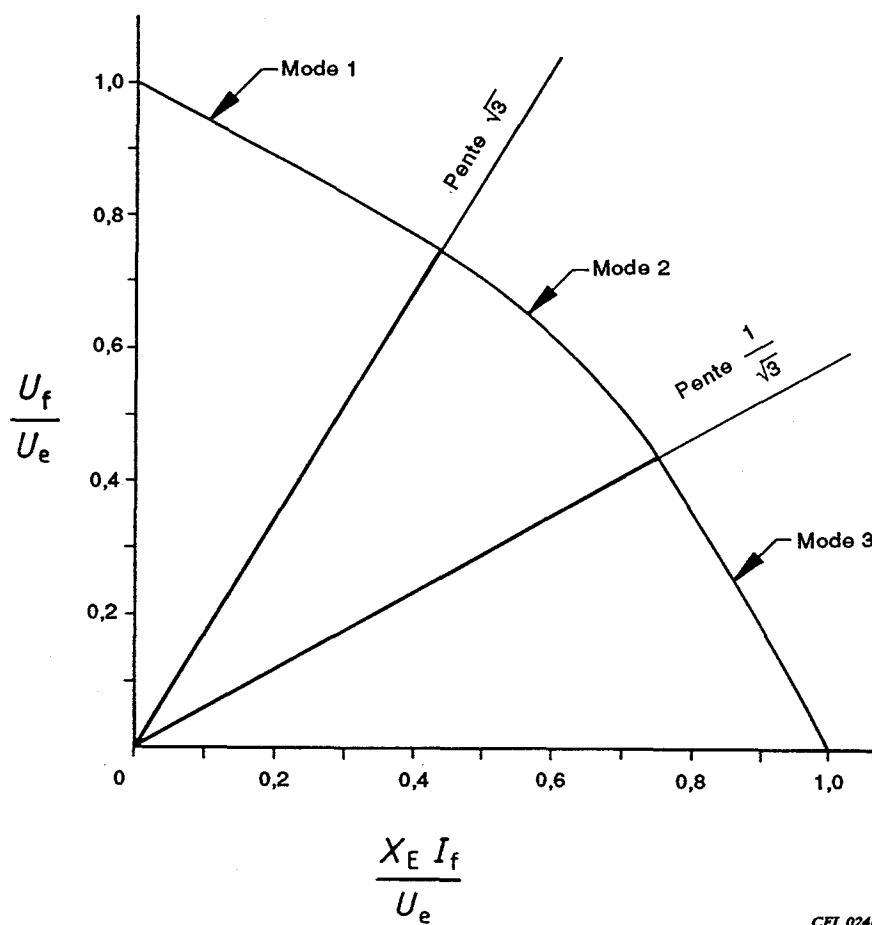
La figure B.1 montre la caractéristique de la tension en fonction du courant débité et les équations correspondantes. Pour les faibles valeurs de X_E , on n'a besoin de modéliser que le mode 1, comme on peut le voir sur le modèle de la figure 9.

APPENDIX B

Rectifier regulation characteristic

All a.c. sources which supply rectifier circuits have an internal impedance which is predominantly inductive. The effect of this impedance alters the process of commutation and causes a very non-linear decrease in rectifier average output voltage as the rectifier load current increases. The three-phase full wave bridge circuits commonly employed have three distinct modes of operation. The equations characterizing these three modes are determined by the rectifier load current.

Figure B.1 shows the load voltage versus load current characteristic and the corresponding equations. For small values of X_E , only mode 1 operation need be modelled, as shown by the model of figure 9.

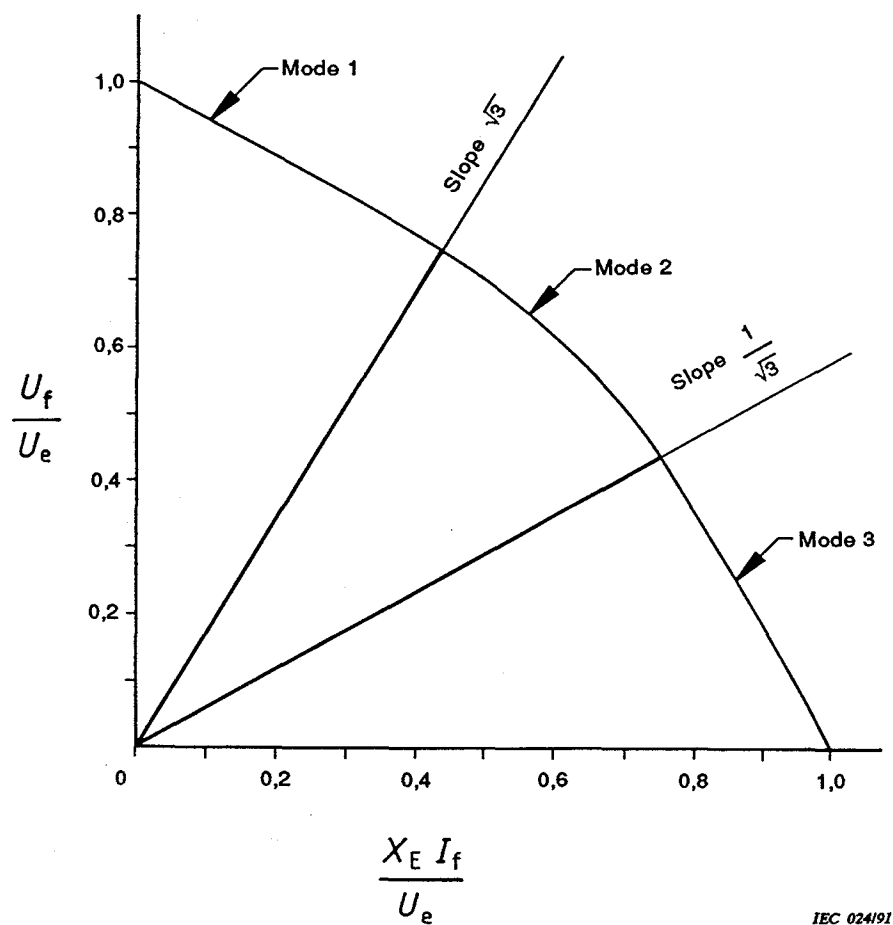


$$\text{Si } \frac{X_E I_f}{U_e} < 0,433 \quad \text{alors } F_e = 1 - 0,577 \left(\frac{X_E I_f}{U_e} \right)$$

$$\text{Si } 0,433 < \frac{X_E I_f}{U_e} < 0,75 \quad \text{alors } F_e = \sqrt{0,75 - \left(\frac{X_E I_f}{U_e} \right)^2}$$

$$\text{Si } \frac{X_E I_f}{U_e} > 0,75 \quad \text{alors } F_e = 1,732 \left(1 - \frac{X_E I_f}{U_e} \right)$$

Figure B.1 - Caractéristique externe du redresseur et équations correspondantes



$$\text{If } \frac{X_E I_f}{U_e} < 0,433 \quad \text{then} \quad F_e = 1 - 0,577 \left(\frac{X_E I_f}{U_e} \right)$$

$$\text{If } 0,433 < \frac{X_E I_f}{U_e} < 0,75 \quad \text{then} \quad F_e = \sqrt{0,75 - \left(\frac{X_E I_f}{U_e} \right)^2}$$

$$\text{If } \frac{X_E I_f}{U_e} > 0,75 \quad \text{then} \quad F_e = 1,732 \left(1 - \frac{X_E I_f}{U_e} \right)$$

Figure B.1 - Rectifier regulation characteristic and corresponding equations

ANNEXE C

Fonction de saturation

La fonction de saturation S_E de l'excitatrice représente l'accroissement des besoins en excitation dû à la saturation. Pour une valeur donnée de la tension de sortie de l'excitatrice, les quantités A , B , C sont définies comme étant l'excitation de l'excitatrice nécessaire pour produire cette tension, respectivement sur la courbe de saturation à résistance de charge constante, sur la droite d'entrefer, et sur la courbe de saturation à vide (figure C.1).

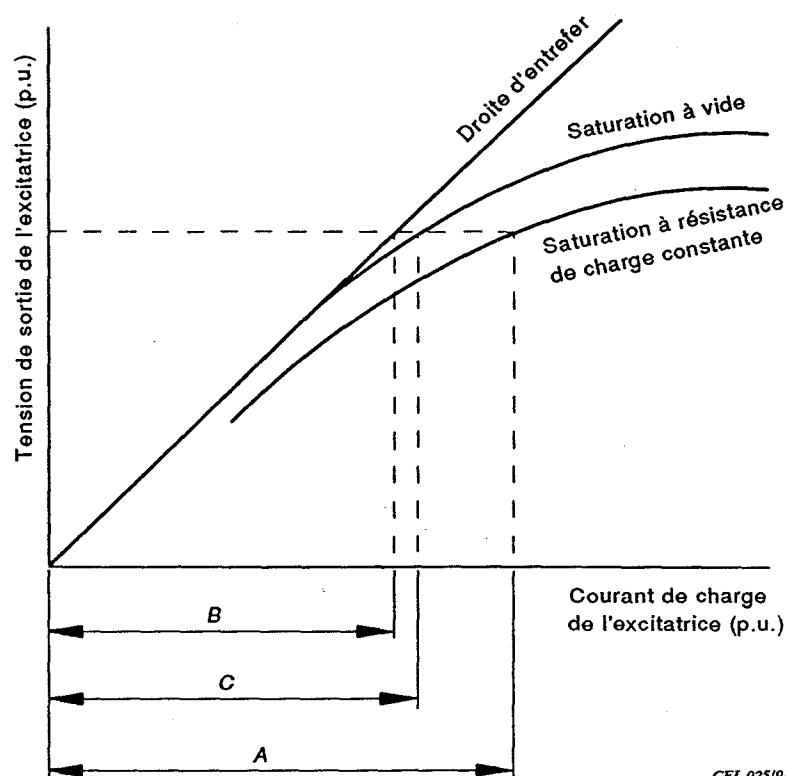
Pour les excitatrices à courant alternatif, lorsque l'influence de la charge n'est pas modélisée séparément (modèle figure 7) et pour les excitatrices à courant continu à collecteur:

$$S_E = \frac{A - B}{B}$$

Pour les excitatrices à courant alternatif, lorsque les effets sur la charge de la réactance synchrone et de la réactance de commutation sont modélisés séparément (figure 6):

$$S_E = \frac{C - B}{B}$$

En général, la fonction de saturation peut être suffisamment définie par deux points, choisis usuellement à 1,0 et 0,75 fois la valeur plafond de la tension de sortie de l'excitatrice.



CEI 025/91

Figure C.1 - Caractéristique de saturation de l'excitatrice

APPENDIX C

Saturation function

The exciter saturation function S_E reflects the increase in exciter excitation requirements due to saturation. At a given exciter output voltage, the quantities A, B, C are defined as the exciter excitation required to produce that output voltage on the constant-resistance-load saturation curve, on the air gap line, and on the no-load saturation curve respectively (figure C.1).

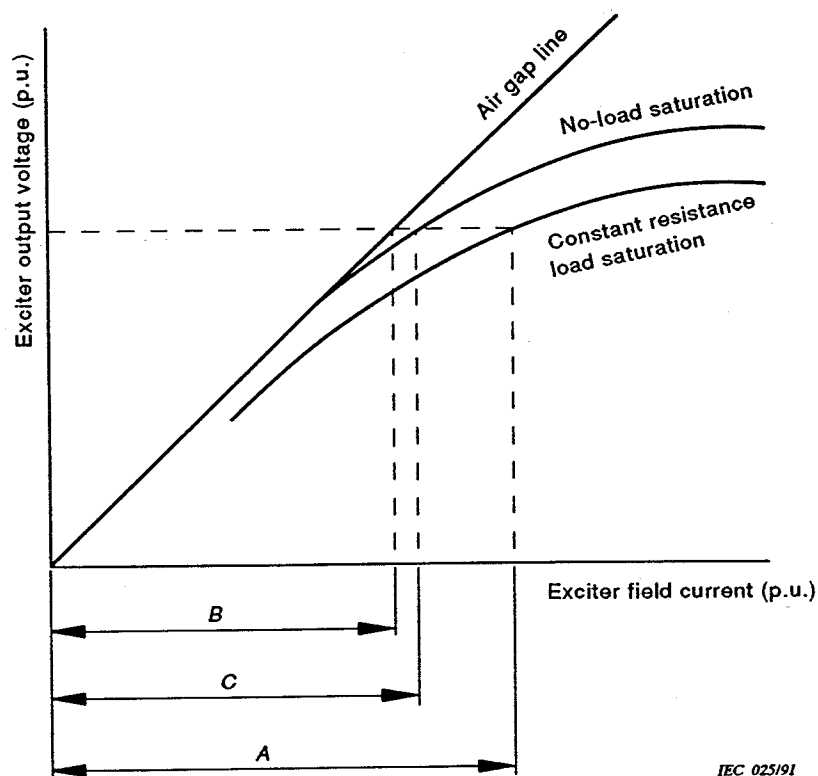
For a.c. exciters, when the load-dependent effects are not separately modelled (model figure 7), and for d.c. commutator exciters:

$$S_E = \frac{A - B}{B}$$

For a.c. exciters, when the load-dependent effects of synchronous reactance and commutating reactance are separately modelled (figure 6):

$$S_E = \frac{C - B}{B}$$

In general, the saturation function can be defined adequately by two points, usually chosen at 1,0 times and 0,75 times the ceiling value of the exciter output voltage.



IEC 025/91

Figure C.1 - Exciter saturation characteristic

ANNEXE D

Représentation des limites

Dans les circuits de réglage et la modélisation des excitatrices, on doit considérer deux sortes de limites. La limitation "sans antisaturation" permet à la grandeur de sortie y de dépasser les limites, mais permet à la grandeur x de varier seulement entre les limites (figure D.1). La limitation "avec antisaturation" (figure D.2) ne permet pas à la grandeur y de dépasser les limites, ce qui peut exiger, pour la réalisation pratique, une sorte de contre-réaction. La description mathématique de la limitation avec antisaturation, donnée en figure D.2, ne s'applique pas à la fonction de retard indiquée.

Si la limitation avec antisaturation est appliquée à des fonctions plus complexes, la représentation exacte dépend de la fonction. Le régulateur PI de la figure 16, par exemple, a en fait une limitation avec antisaturation, comme le montre le symbole du régulateur sur la même figure. Dans le modèle détaillé, la limitation avec antisaturation résulte d'une limitation sans antisaturation dans la partie proportionnelle du trajet direct avec le gain K_R et d'une contre-réaction autour de ce composant.

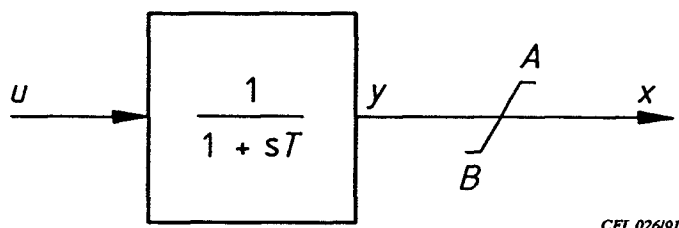


Figure D.1 – Limiteur sans antisaturation

Equations du système: $dy/dt = (u - y)/T$
 Si $B \leq y \leq A$, alors $x = y$
 Si $y > A$, alors $x = A$
 Si $y < B$, alors $x = B$

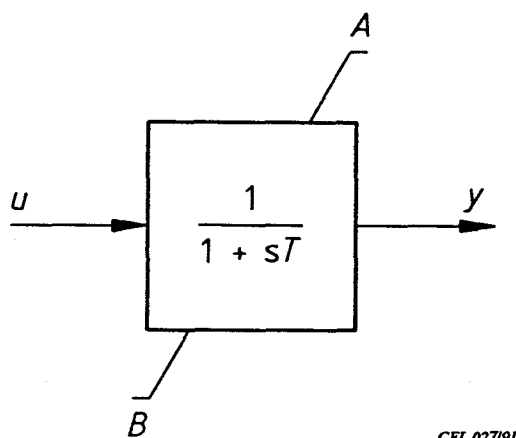


Figure D.2 – Limiteur avec antisaturation

Equations du système: $f = (u - y) T$
 Si $y = A$ et $f > 0$, alors dy/dt est maintenu égal à 0
 Si $y = B$ et $f < 0$, alors dy/dt est maintenu égal à 0
 sinon $dy/dt = f$
 $B \leq y \leq A$

APPENDIX D

Representation of limits

In control circuit and exciter modelling two sorts of limits have to be considered. The "wind-up" limitation allows the output y to go beyond the limits, but allows the quantity x to change only inside the limits (figure D.1). The 'non-wind-up' limitation (figure D.2) does not allow the limited quantity y to go beyond the limits, which in the hardware may require some form of feedback. The mathematical description of the non-wind-up limitation given in figure D.2 does not apply for the delay function shown.

If the non-wind-up limitation is applied to more complex functions, the full not-simplified representation depends on the function. The PI-regulator of figure 16, for example, in effect has non-wind-up limitation, as shows the regulator symbol in same figure. In the detailed model the non-wind-up limitation results from wind-up limitation in the proportional part of the forward path with gain K_R and feedback around this component.

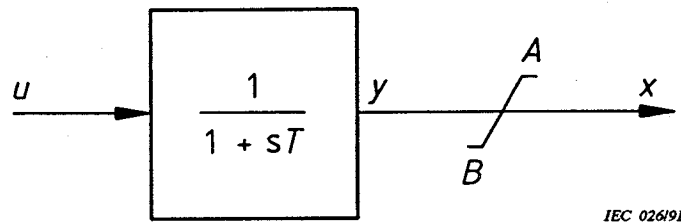


Figure D.1 – Wind-up limiter

System equations: $dy/dt = (u - y)/T$

If $B \leq y \leq A$, then $x = y$
 If $y > A$, then $x = A$
 If $y < B$, then $x = B$

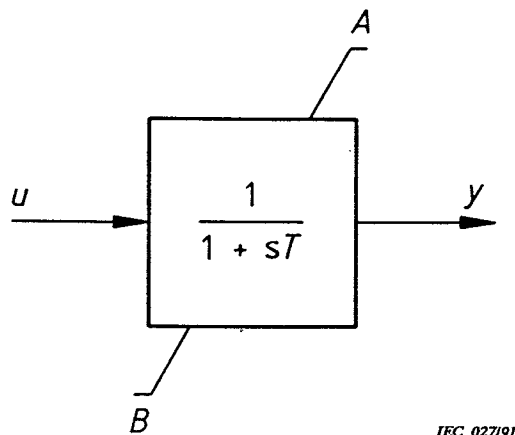


Figure D.2 – Non wind-up limiter

System equations $f = (u - y) T$

If $y = A$ and $f > 0$, then dy/dt is set to 0
 If $y = B$ and $f < 0$, then dy/dt is set to 0
 Otherwise $dy/dt = f$
 $B \leq y \leq A$

ANNEXE E

Exemples de construction de modèles mathématiques pour des systèmes d'excitation spécialisés

- Figure E.1: Exemple d'excitatrice statique avec réglage PID de la tension aux bornes de la machine synchrone, sans utilisation de limiteurs.
- Figure E.2: Exemple d'application d'un limiteur de courant de champ sur une excitation avec réglage PID de la tension aux bornes de la machine synchrone.
- La limite de courant de champ, $I_{f \text{ ref}}$, peut être une constante ou peut être modifiée en fonctionnement, selon l'application considérée.
- Figure E.3: Exemple d'excitatrice statique avec réglage PID de la tension aux bornes de la machine synchrone et avec réglage du courant de champ dans une boucle interne.
- Figure E.4: Exemple d'excitatrice à courant alternatif avec réglage PID de la tension aux bornes de la machine synchrone et avec réglage en parallèle du courant de champ. L'amplificateur intermédiaire est un convertisseur à thyristors alimenté par une source de tension constante telle qu'un alternateur à aimants permanents.
- Figure E.5: Exemple d'une excitatrice à courant alternatif avec réglage PID de la tension aux bornes de la machine synchrone, et une boucle interne de contrôle pour le courant de champ de l'excitatrice. L'amplificateur intermédiaire est un convertisseur à thyristors alimenté par la tension aux bornes.

APPENDIX E

Examples of building computer models for specialized excitation systems

Figure E.1: Example of a static exciter with PID-control for the synchronous machine terminal voltage with no limiters employed.

Figure E.2: Example for application of a field current limiter on a static exciter with PID-control of the synchronous machine terminal voltage.

The field current limit $I_{f \text{ ref}}$, may be a constant or be modified during operation according to application.

Figure E.3: Example of a static exciter with PID-control of synchronous machine terminal voltage and with field current control in a sub-loop.

Figure E.4: Example of an a.c. exciter with PID-control of the synchronous machine terminal voltage and with parallel field current control. The intermediate amplifier is a thyristor converter fed from a constant potential source such as a PMG.

Figure E.5: Example of an a.c. exciter with PID-control of the synchronous machine terminal voltage, sub-control loop for the exciter field current. The intermediate amplifier is a thyristor converter fed from the terminal voltage.

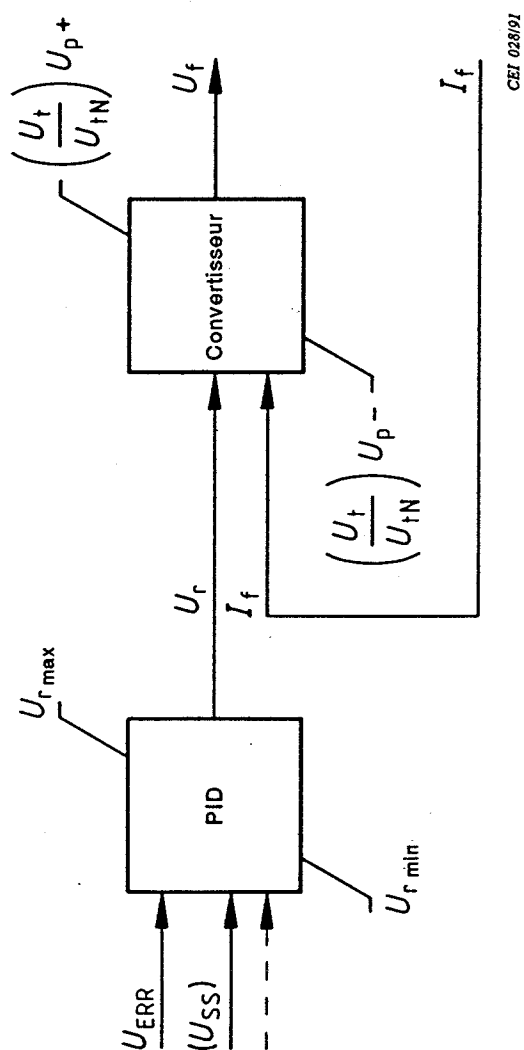


Figure E.1 – Exemple d'application: excitatrice statique sans limiteurs

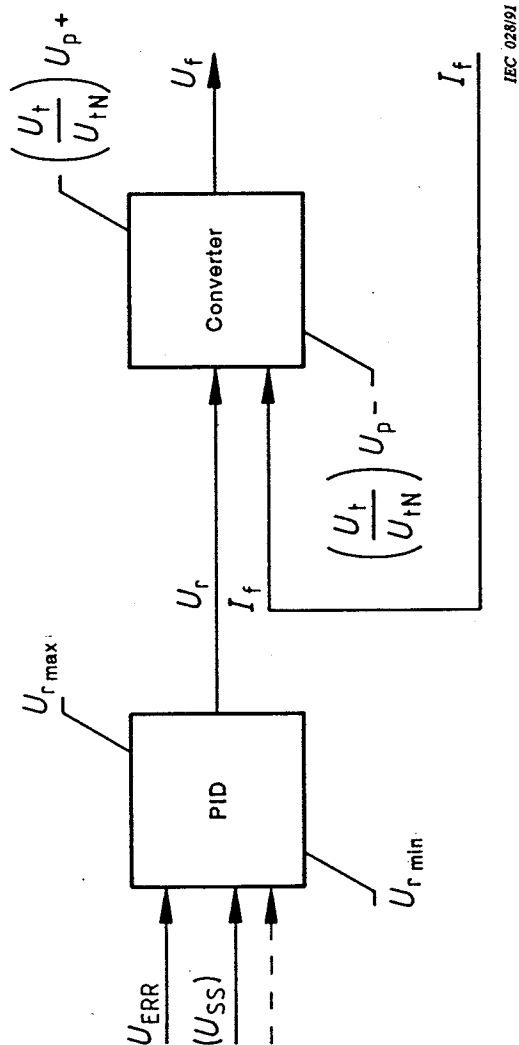


Figure E.1 - Example of application: static exciter without limiters

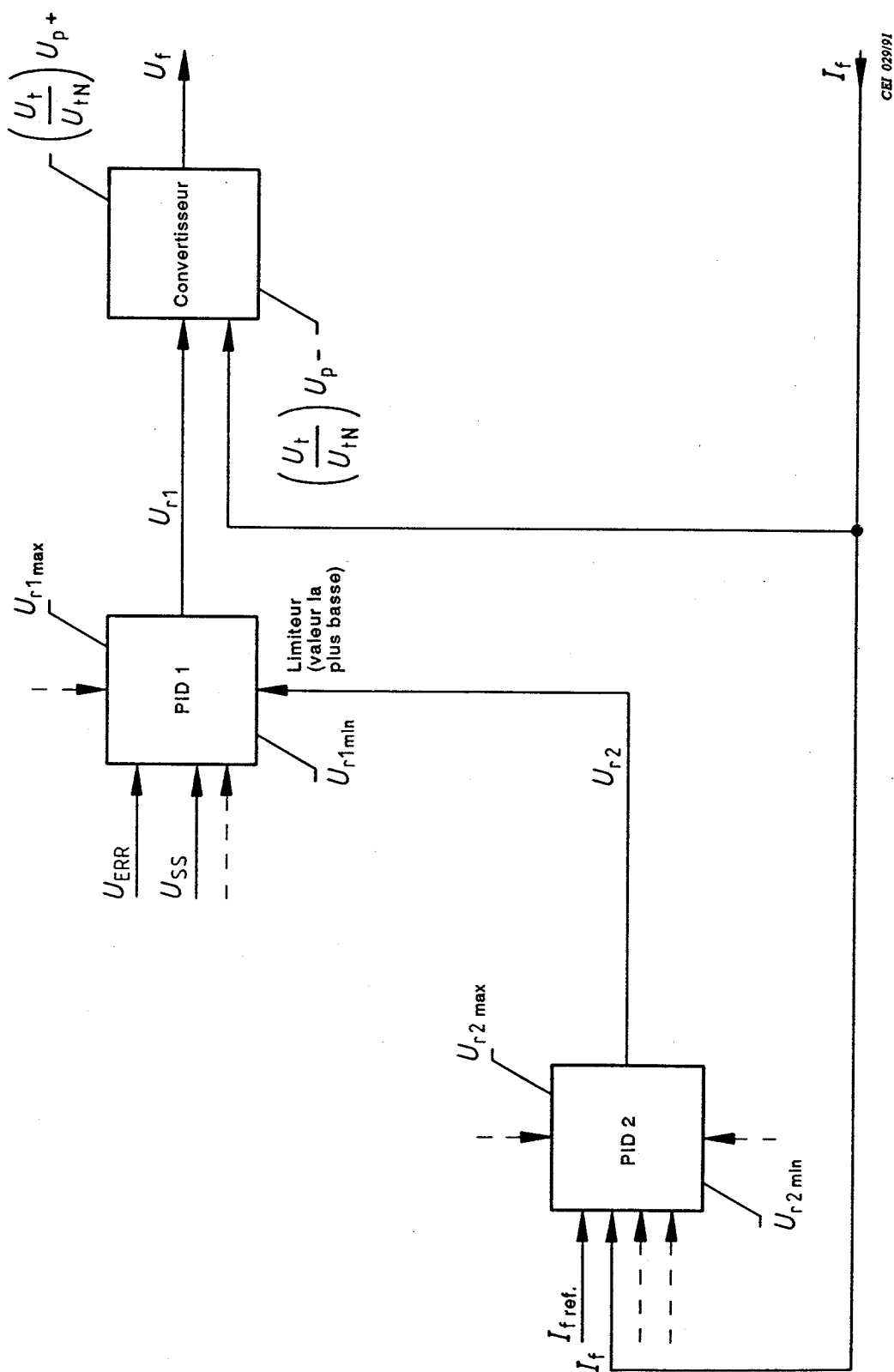


Figure E.2 - Exemple d'application: limiteur de courant de champ d'une excitatrice statique à l'aide d'un sélecteur de valeur la plus basse

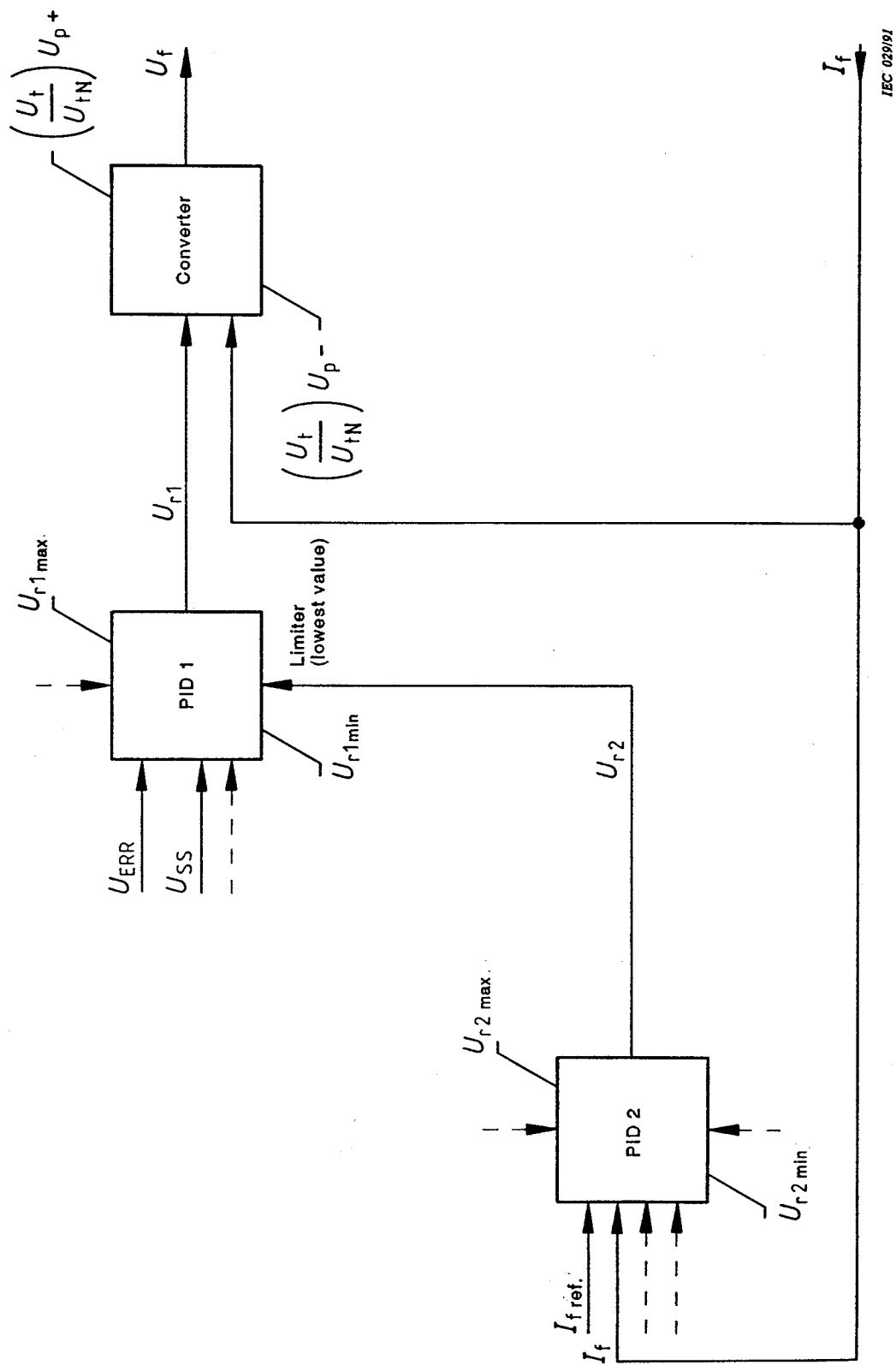


Figure E.2 - Example of application: static exciter field current limiter via LV gate

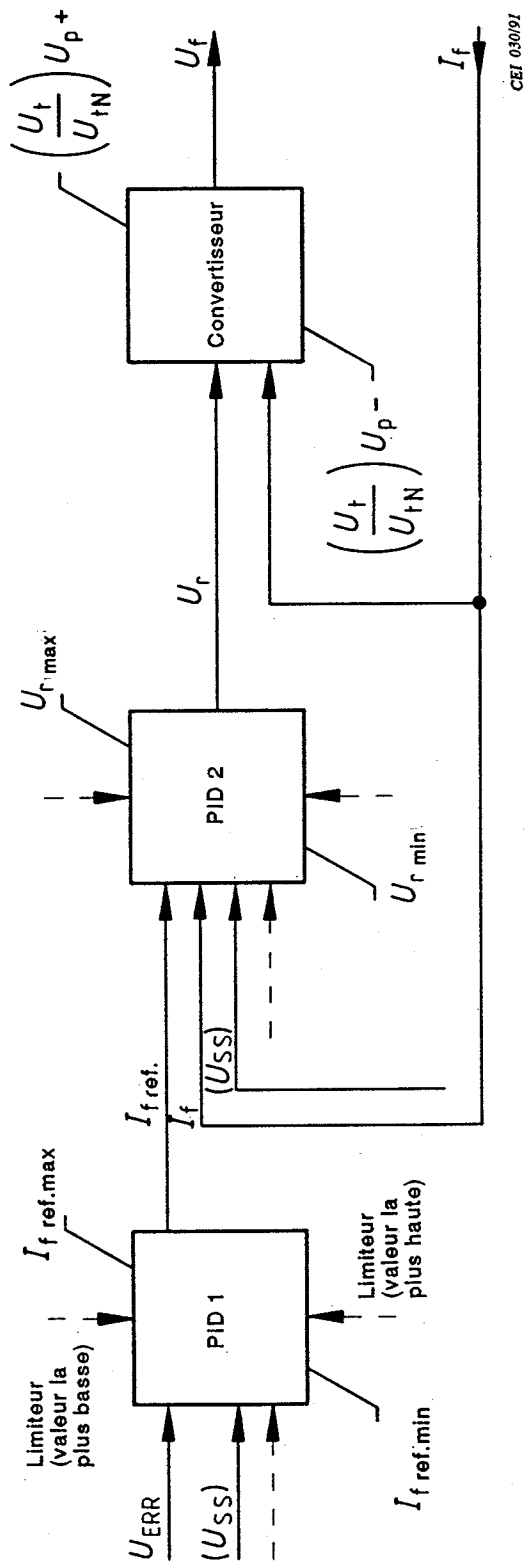


Figure E.3 – Exemple d'application: excitatrice statique avec régulateur du courant de champ dans une boucle interne

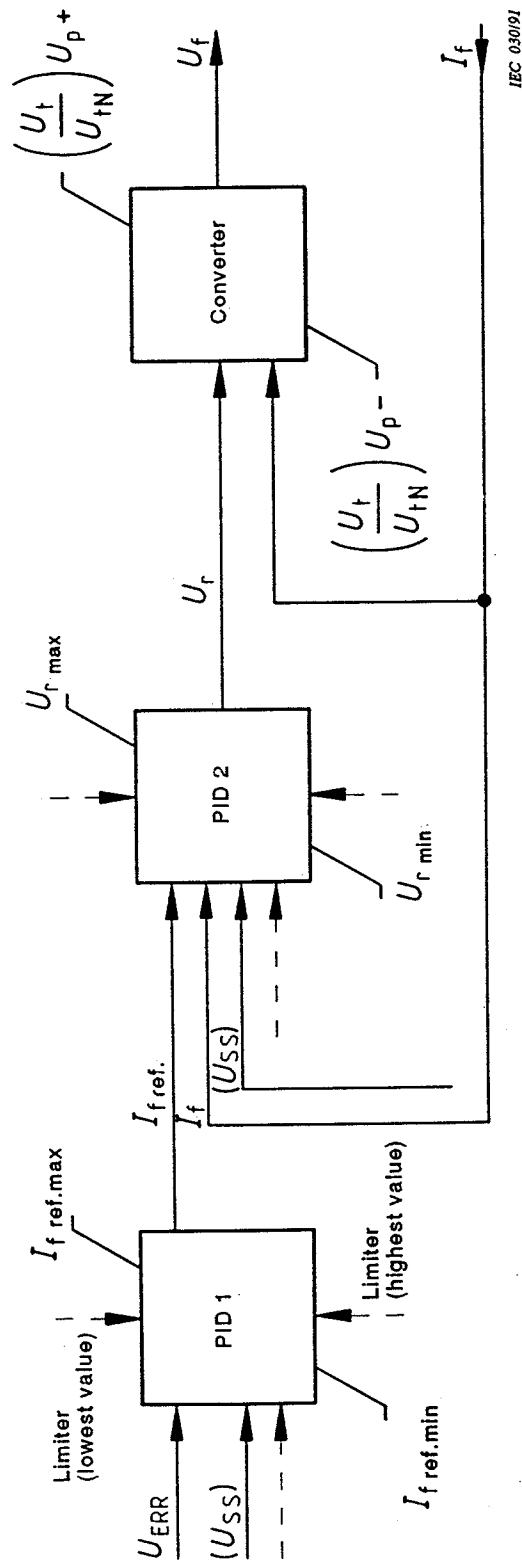


Figure E.3 - Example of application: static exciter with field current regulator in sub-loop

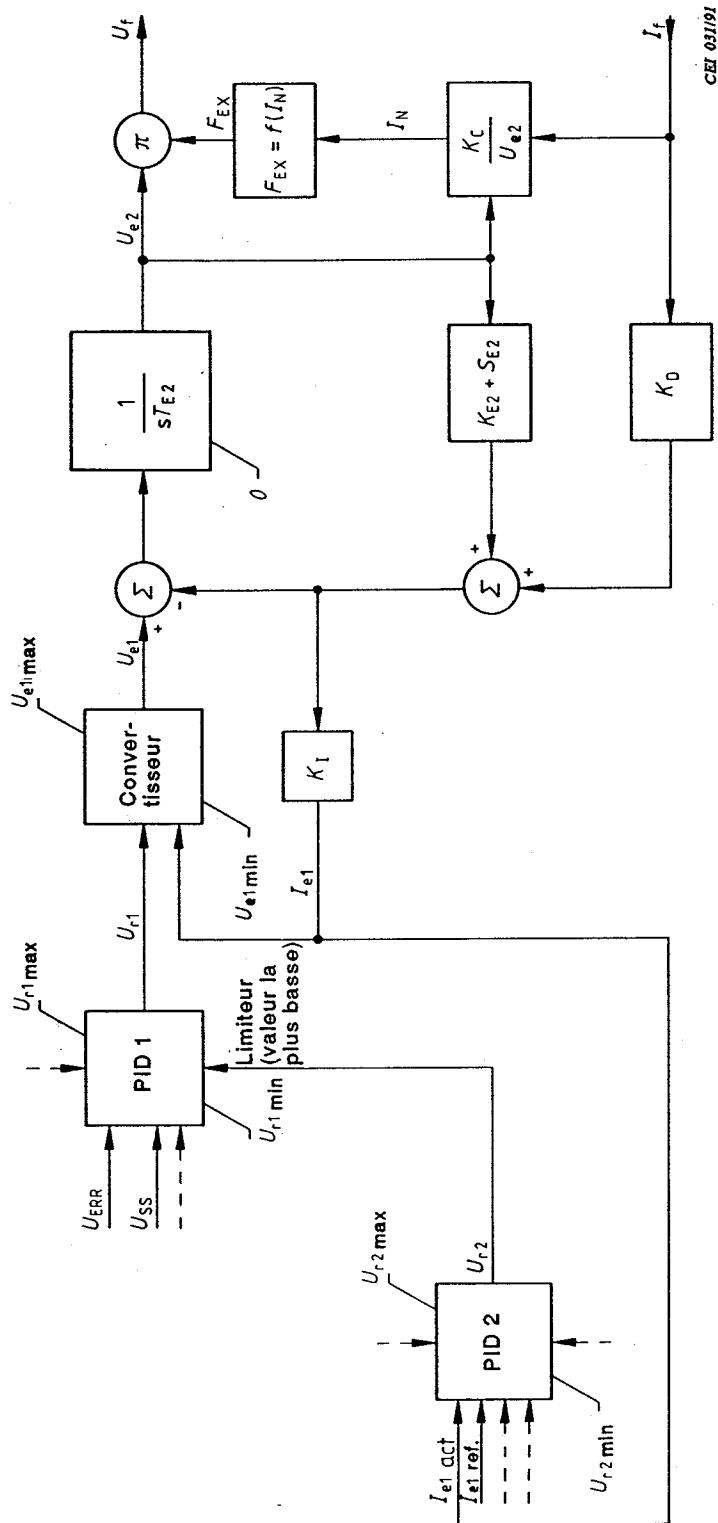
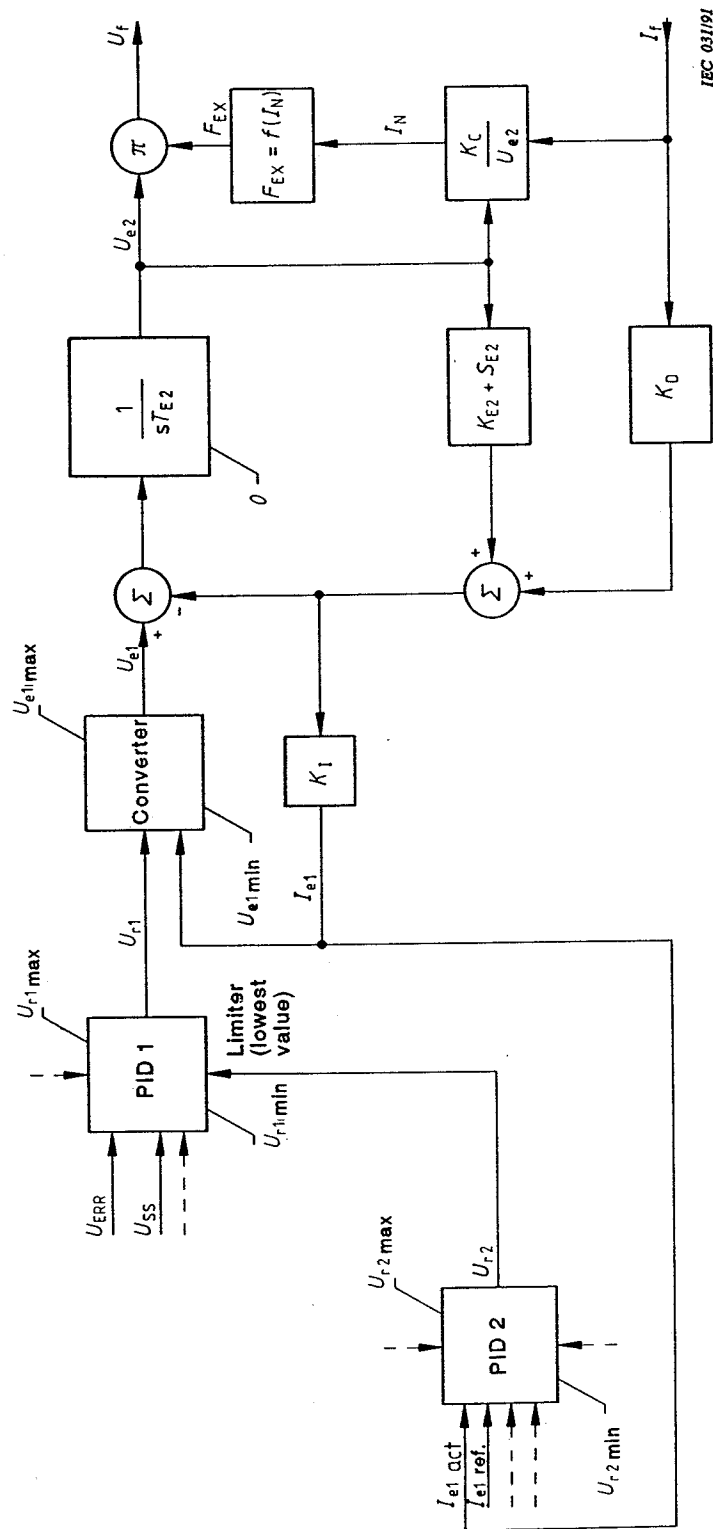


Figure E.4 – Exemple d'application: excitatrice à courant alternatif à diodes - courant de champ de l'excitatrice délivré par un pont à thyristors (source de tension constante).
Régulateur de tension avec un limiteur de courant de champ de l'excitatrice à l'aide d'un sélecteur de valeur la plus basse



**Figure E.4 – Example of application: a.c. exciter with diodes - exciter field current from thyristor rectifier (constant potential source).
Voltage regulator with exciter field current limiter LV gate**

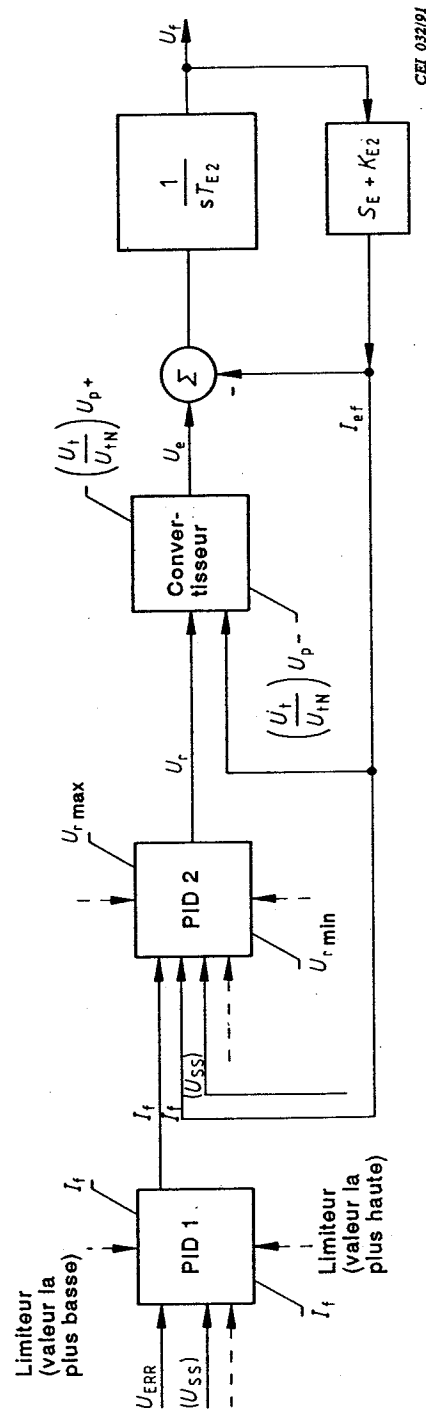


Figure E.5 – Exemple d'application: excitatrice tournante avec régulateur du courant de champ dans une boucle interne

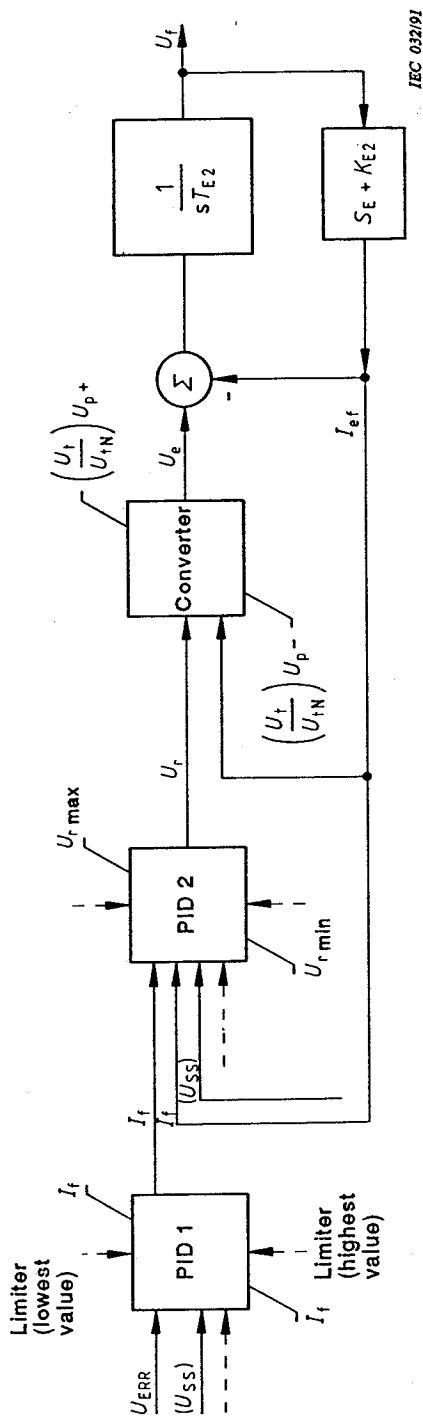


Figure E.5 – Example of application: rotating exciter with exciter field current regulator in sub-loop

ICS 29.160.00

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND