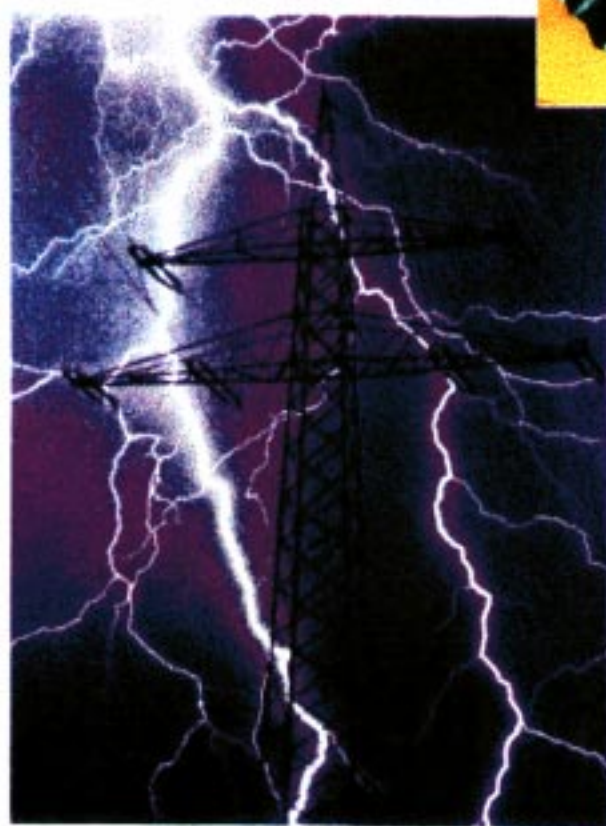


COLLECTION ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Méthodes d'études des convertisseurs statiques

Par une équipe d'enseignants de l'ENSEEIH



Nous tenons particulièrement à remercier l'équipe d'enseignants de la filière Electrotechnique de l'ENSEEIH de nous avoir gracieusement autorisé à diffuser cet ouvrage.

Ce document doit apporter aux enseignants des Lycées Techniques et des Lycées Professionnels des compléments de connaissance en Electronique de Puissance tant sur le plan scientifique que sur le plan pédagogique.

Les membres du Centre National de Ressources en Electrotechnique

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

A PRINCIPES FONDAMENTAUX

A 30 LES OUTILS DE BASE DE L'ELECTRONICIEN DE PUISSANCE

1/ RAPPELS SUR LES SYSTEMES LINEAIRES

1-1/ Variables d'état

1-2/ Réponse d'un système linéaire

1-2-1/ Régime libre

1-2-2/ Régime forcé

2/ EXEMPLES DE CIRCUITS DU PREMIER ORDRE

2-1/ Circuit RL série alimenté en tension

2-1-1/ Réponse à un échelon de tension

2-1-2/ Réponse à une impulsion de tension rectangulaire

2-1-3/ Réponse à un signal rectangulaire périodique

2-1-3-1/ Etude en régime permanent

2-1-3-2/ Etude en régime transitoire

2-1-4/ Réponse à une tension sinusoïdale

2-2/ Circuit RL parallèle alimenté en courant

2-2-1/ Réponse à un échelon de courant

2-2-2/ Réponse à une impulsion de courant rectangulaire

2-2-3/ Réponse à un courant rectangulaire périodique

2-3 / Circuit RC série et parallèle

2-3-1/ Réponse d'un circuit RC série

2-3-2 : Réponse d'un circuit $R + R // C$

3/ EXEMPLES DE CIRCUITS DU DEUXIEME ORDRE

3-1/ Etude des configurations obtenues avec une source de tension, une source de courant et un circuit LC

3-2/ Réponse d'un circuit LC à un échelon de tension et de courant. Méthode du plan de phase

3-2-1/ Cas général

3-2-2/ Exemples

3-3/ Réponse d'un circuit LC avec prise en compte d'un amortissement

A 40 ELEMENTS CONSTITUTIFS ET SYNTHESE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

1/ INTRODUCTION

2/ ETUDE FONCTIONNELLE DES INTERRUPTEURS

2-1/ Régime statique

2-2/ Régime dynamique - Mode de Commutation

2-2-1/ La commutation commandée d'un interrupteur.

2-2-2/ La commutation spontanée d'un interrupteur.

2-2-3/ Le cycle de fonctionnement d'un interrupteur.

2-3/ Classification des interrupteurs

2-3-1/ Interrupteurs à deux segments

2-3-2/ Interrupteurs à trois segments

2-3-3/ Interrupteurs à quatre segments

3/ CARACTERISATION DES SOURCES

3-1/ Sources de tension - Sources de courant

3-1-1/ Définitions

3-1-2/ Exemples

3-1-3/ Conclusion sur la caractérisation des sources

3-2/ Réversibilité des sources d'entrée et de sortie

4/ REGLES D'INTERCONNEXION DES SOURCES

5/ STRUCTURE DES CONVERTISSEURS DIRECTS

5-1/ Convertisseurs directs tension courant

5-2/ Convertisseurs directs courant tension

6/ STRUCTURE DES CONVERTISSEURS INDIRECTS

6-1/ Solutions permettant de se ramener à des convertisseurs directs

6-2/ Convertisseurs Indirects tension tension

6-3/ Convertisseur indirect courant courant

7/ CLASSIFICATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES

8/ SYNTHESE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

8-1/ Description de la méthode à utiliser pour réaliser la synthèse

8-2/ Etude de cas

8-2-1/ Hacheur non réversible en courant

8-3-1/ Hacheur réversible en courant

8-3-2/ Onduleur de tension

A 50 LA COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

1/ GENERALITES SUR LA COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS

1-1/ Définition relative à la commutation

1-2/ La cellule élémentaire de commutation

2/ ASPECT LOCAL DE LA COMMUTATION

2-1/ Régime statique

2-2/ Régime dynamique - Mode de commutation

2-2-1/ La commutation commandée

2-2-2/ La commutation spontanée

2-2-3/ Le cycle de fonctionnement d'un interrupteur

3/ ASPECT SYSTEME DE LA COMMUTATION

3-1/ Loi fondamentale de la commutation

3-2/ Remarques : cas particuliers

3-3/ Synthèse des interrupteurs de la cellule de commutation

3-3-1/ Fonctionnement à cycle unique

3-3-2/ Fonctionnement à plusieurs cycles

3-4/ La commutation forcée en commande au blocage

4/ INFLUENCE DE LA NATURE REELLE DES SOURCES

4-1/ Position du problème

4-2/ Commande à l'amorçage avec sources de tension inductives

4-3/ Commande au blocage avec sources de tension inductives

4-3-1/ Découplage de la cellule de commutation

4-3-2/ Circuits de commutation forcée

5/ CONCLUSION

A 60 LA DUALITE DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

1/ INTRODUCTION

2/ RAPPEL SUR LA DUALITE DANS LES GRAPHS ET LES CIRCUITS

3/ INTERRUPTEURS STATIQUES DUAUX

4/ LE THYRISTOR DUAL

5/APPLICATION DES REGLES DE DUALITE DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

5-1/ Recherche du convertisseur dual d'un convertisseur donné

5-2/ Exemples

6/ EXTENSION A DES STRUCTURES COMPLEXES

7/ CONCLUSION

E METHODES D'ETUDES DES CONVERTISSEURS STATIQUES

E 5 INTRODUCTION AUX METHODES D'ETUDES DES CONVERTISSEURS STATIQUES 1/

METHODES D'ETUDES ANALYTIQUES ET REPRESENTATIONS GRAPHIQUES

1-1/ Méthodes d'études analytiques

1-2/ Représentations graphiques

1-3/ Méthodes analytico-graphiques

2/ METHODES DE SIMULATION

2-1/ Méthode d'étude fonctionnelle

2-2/ Méthodes d'études séquentielles

2-2-1/ Méthodes d'études séquentielles sans à priori (S. A. P.)

2-2-2/ Méthodes d'études séquentielles avec à priori (A. A. P.)

E 20 REPRESENTATION COMPLEXE DU FONCTIONNEMENT D'UN ONDULEUR

1/ DEFINITION DE LA REPRESENTATION COMPLEXE D'UN SYSTEME DE GRANDEURS TRIPHASES

2/ REPRESENTATION COMPLEXE DU FONCTIONNEMENT D'UN ONDULEUR TRIPHASE

2-1/ Représentation complexe des tensions

2-2/ Représentation complexe des courants

2-3/ Mode de fonctionnement du convertisseur

2-4/ Mode de commutation du convertisseur

E 40 METHODE D'ETUDE ANALYTIQUE SEQUENTIELLE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

1/ INTRODUCTION

2/ PRINCIPE DE LA METHODE ANALYTIQUE

3/ PLAN D'ETUDE

4/ REMARQUES SUR LES DIFFERENTES OPERATIONS

5/ CHOIX DE LA PREMIERE SEQUENCE

6/ ETUDE D'UN HACHEUR DE WAGNER

E 60 SIMULATION SANS A PRIORI DES CONVERTISSEURS STATIQUES PAR OPERATEURS ANALOGIQUES

1/ CARACTERISTIQUES DE CETTE SIMULATION

2/ CONSTITUTION DU SIMULATEUR

2-1/ Interrupteurs

2-2/ Charges

2-3/ Sources

2-4/ Mesures des tension et des courants

2-5/ Circuits de commande

3/ UTILISATION DU SIMULATEUR

E 70 SIMULATION NUMERIQUE SANS A PRIORI DES CONVERTISSEURS STATIQUES

1/ INTRODUCTION

2/ MODELISATION DES INTERRUPTEURS

2-1/ Modèle électrique des Interrupteurs

2-2/ Modèle logique des Interrupteurs

2-2-1/ Interrupteur généralisé

2-2-2/ Représentation des interrupteurs par réseau de Pétri

3/ METHODE DE SIMULATION

3-1/ Représentation d'état

3-1-1/ Etude topologique

3-1-2/ Détermination des équations d'état

3-1-3/ Equations de sortie

3-2/ Résolution des équations d'état

3-2-1/ Système discret équivalent

3-2-2/ Pas de calcul

3-2-2-1/ Changements d'états commandés

3-2-2-2/ Changements d'état spontanés

3-3/ Détermination d'une configuration. Tests de compatibilité

3-4/ Gestion des résultats

4/ LOGICIEL SCRIPT

4- 1/ Organisation générale du programme SCRIPT

4-2/ Aspect interactif

4-3/ Environnement de SCRIPT

4-4/ Applications de SCRIPT

4-4-1/ Etude d'un hacheur autoadaptatif

4-4-2/ Redresseur contrôlé haute tension

INTRODUCTION GENERALE

L'éventail des convertisseurs permettant, dans la pratique, la transformation d'énergies diverses pour obtenir l'énergie sous forme électrique est peu étendu, surtout dans le domaine des fortes puissances.

Pratiquement nous trouvons principalement :

- EN CONTINU, les batteries d'accumulateurs encombrantes et qu'il faut souvent recharger ou très rarement des convertisseurs électromécaniques (dynamo) ;

- EN ALTERNATIF, les alternateurs synchrones, travaillant généralement à fréquence fixe, le plus souvent 50 Hz (en Europe).

Or de nombreux dispositifs nécessitent l'utilisation de l'énergie électrique sous des formes plus diverses :

- tension variable en continu ou alternatif,
- fréquence variable en courant alternatif.

D'où la nécessité de CONVERTISSEURS d'énergie électrique.

Il existe de nombreuses machines ou ensembles de machines permettant d'apporter au problème des solutions ELECTROMECHANIQUES : transformateurs, groupes convertisseurs, commutatrices, etc.

Longtemps utilisés, sûrs, fiables mais lourds et peu souples, ces dispositifs disparaissent peu à peu au profit des convertisseurs statiques grâce aux énormes progrès accomplis ces dernières années dans le domaine des composants électroniques et de leur utilisation, tant au niveau des faibles puissances (contrôle et commande) que des puissances élevées (interrupteurs électroniques : diodes, thyristors et transistors).

Quelques exemples feront mieux apparaître les domaines très variés d'utilisation des convertisseurs statiques ainsi que les plages de puissance atteinte :

1) Transformation de l'énergie électrique à partir des réseaux de distribution à fréquence industrielle

- chargeurs de batterie,
- excitation des machines tournantes (alternateurs),
- contrôle de vitesse de machine à courant continu (papeterie, laminoirs, etc.) jusqu'à 1 MW,
- redresseurs pour l'électrochimie - installations de 1 MW (courants jusqu'à 300 000 A),
- alimentation d'électro-aimants en physique des hautes énergies (pointes de puissance de plusieurs dizaines de MW),
- interconnexion des réseaux HT à courant alternatif par ligne à courant continu jusqu'à 40 000 MW prévus,
- alimentation à fréquence et tension variables de machines à courant alternatif (broyeurs - 6 MVA).

2) Transformation de l'énergie électrique à partir d'une source en continu

- alimentations continues variables à découpage,
- contrôle de machines à courant continu (en traction ferroviaire jusqu'à 4 MW),
- alimentation de secours 50 Hz (aéroports, hôpitaux... quelques 100 KW),
- alimentation de sécurité (centre de calcul - 1 MW),
- alimentation en haute fréquence, fours à induction, ozoneurs, dépoussiéreurs (quelques KHz, quelques MW),
- alimentation à fréquence et tension variables de machines à courant alternatif :
 - . machines asynchrones: 500 KW,
 - . machines synchrones: 50 MW.

Notons que pour certaines de ces applications, deux convertisseurs statiques sont parfois utilisés. Par exemple, la source continue utilisée pour l'alimentation à fréquence et tension variable de machines à courant alternatif est souvent obtenue par redressement à partir du réseau de distribution d'énergie électrique. L'association de convertisseurs ainsi réalisée est appelée convertisseur indirect.

Au niveau des structures ou des technologies, il existe une variété très grande de convertisseurs. Toutefois en se référant au type de con-

version effectuée, on peut les regrouper en quelques grandes classes.

Les exemples ci-dessus nous ont montré que le problème de la conversion d'énergie était celui du transfert de puissance entre une source d'énergie électrique continue ou alternative et un récepteur ou un réseau exigeant une modification de la forme de cette énergie (du continu à l'alternatif ou inversement) ou de ses caractéristiques (changement de tension en continu, changement de fréquence et de tension en alternatif).

La figure ci-dessous indique les différents types de conversion possible et le nom usuel des convertisseurs suivant leur fonction.

Nous noterons E_1 et E_2 deux valeurs distinctes de tensions continues, (v_1, f_1) et (v_2, f_2) les tensions et fréquences caractérisant deux systèmes différents de tensions alternatives.

