

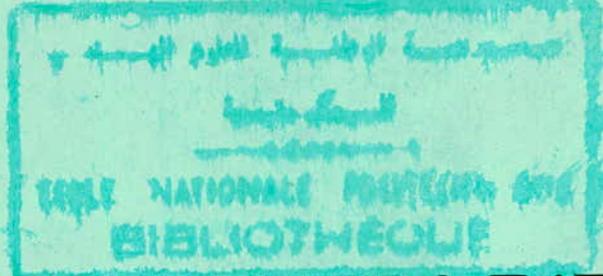
11/76

UNIVERSITE D'ALGER

FACULTÉ DES SCIENCES

1-01

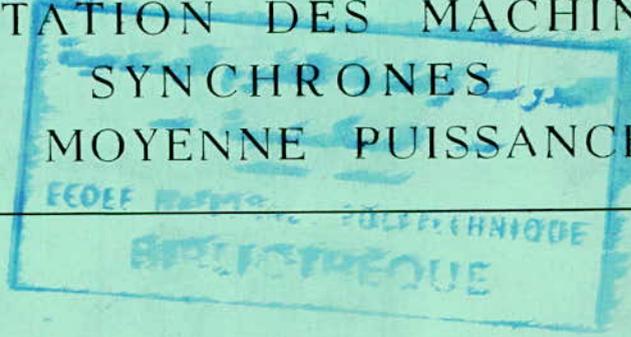
DEPARTEMENT ELECTRICITE



PROJET DE FIN D'ETUDES

INGÉNIORAT EN ELECTROTECHNIQUE

EXCITATION DES MACHINES
 SYNCHRONES
 DE MOYENNE PUISSANCE



Proposé par

M. ARTICHEVSKY

Etudié par

M. YEKKOUR

PROMOTION 1976

A MES PARENTS

UNIVERSITE D'ALGER

FACULTÉ DES SCIENCES

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGÉNIORAT EN ELECTROTECHNIQUE

EXCITATION DES MACHINES
SYNCHRONES
DE MOYENNE PUISSANCE

Proposé par

M. ARTICHEVSKY

Etudié par

M. YEKKOUR

PROMOTION 1976

AVANT-PROPOS

JE REMERCIE TOUS LES PROFESSEURS QUI ONT CONTRIBUE A MA
FORMATION AINSI QUE LES MEMBRES DU JURY QUI ONT BIEN VOULU M'HONORER DE LEUR
PRESENCE.

JE TIENS A ~~RAMERCIER~~ RAVMERCIER VIVEMENT MONSIEUR ARTICHEVSKY QUI M'A
GUIDE DANS L'ELABORATION DE CE PROJET ET QUI M'A CONSEILLE TOUT AU LONG DE MON
TRAVAIL.

QUE TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUE A L'ELABORATION DE CE PROJET
TROUVENT ICI L'EXPRESSION PROFONDE DE MA SYMPHATIE.

oooooooooooooooooooo

—PLAN D'ETUDE—

INTRODUCTION

I-DIFFERENTS TYPES D'EXCITATION

- I. -Introduction
- I.2- Necessite d'une excitation
- I.3- Modes d'excitation
 - I.3.1-Excitation avec machines tournantes
 - I.3.2.-excitation avec convertisseurs statiques
 - a) Convertisseurs à gaz
 - b) convertisseurs à semi-conducteurs
 - I.3.3-Excitation par aimants permanents

II-CHOIX DU MODE D'EXCITATION

- II.1-Introduction
- II.2- Critères relatifs à l'excitation
- II.3- comparaison de l'excitation classique et de l'excitation statique
 - II.3.1- Tubes à gaz et redresseurs
 - II.3.2- Thyristors et tubes à gaz

III-APERÇU SUR LE FONCTIONNEMENT EN MOTEUR

- III.1-Introduction
- III.2- Généralités
- III.3- Réaction magnétique d'induit
- III.4- Caractéristique angulaire
 - III.4.1- Détermination de $P = f(\theta)$
- III.5- Rôle de l'excitation
- III.7- Démarrage
- III.8- Moteur SYNCHROME et ses applications

IV -EXCITATION STATIQUE

IV.2.2-Appels sur les semi-conducteurs

IV.3-Différents types de convertisseur

IV.3.1-Montages monophasés

IV.3.2-Montages en pont de Gräetz triphasés

IV.4-Schéma synoptique d'une excitation

IV.4.2-Fonctionnement

IV.4.3-Circuit d'excitation

IV.4.6-Réglage de la tension d'excitation

IV.4.8-Transformateur d'alimentation

IV.4.9-Schéma global

V-SUMMARY

VI-CONCLUSION

I N T R O D U C T I O N

Le développement intervenu dans la technique de l'excitation des machines synchrones a apporté sur le marché un grand nombre de système d'excitation très divers au cours de la dernière décennie.

Partant du principe qu'il faut élever la sécurité de service du système d'excitation et par suite la disponibilité des installations, deux circonstances ont en substance influencé le développement d'une façon décisive.

D'une part, la demande d'énergie de plus en plus croissante qui a amené les constructeurs à fabriquer des machines de plus en plus grandes, et par suite, le besoin en énergie d'excitation plus élevé, ont conduit à l'abandon du mode d'excitation classique à l'aide de l'excitatrice couplée, directement ou par intermédiaire d'un mécanisme de transmission.

D'autre part, avec l'avènement, aux U.S.A en 1957, du thyristor dans la grande famille des dispositifs à semi-conducteurs, les redresseurs ont permis de concevoir des systèmes d'excitation statique, commandés, robustes, de puissance élevée, et sûrs, dont l'utilisation est aujourd'hui le point de départ de tout système d'excitation moderne.

L'intérêt qu'on porte aux installations fortement automatisées, dont la première condition est une marche sans entretien, pousse les constructeurs à étendre ce système d'excitation à toutes les catégories de machines synchrones.

I- DIFFERENTS TYPES D'EXCITATION

I.1. Introduction

Avant d'entrer dans le vif du sujet définissons ce qu'on entend par MOYENNE PUISSANCE.

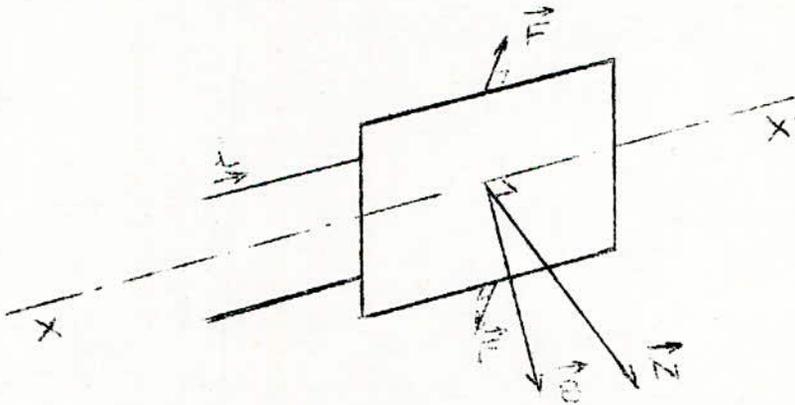
On classe les machines en quatre grandes catégories :

- Faible puissance : 0,6 à 1 Kw
- Petite puissance : 1 à 10 Kw
- Moyenne puissance : 10 à 100 Kw
- Grande puissance : Supérieure à 100 Kw

I.2. Nécessité d'une excitation.

Le principe de fonctionnement des machines synchrones nous permet facilement de réaliser la nécessité d'une excitation :

Considérons un cadre, formé de fils conducteurs, parcouru par un courant i et qui peut tourner autour de l'axe $X'X$.



On se rend compte qu'un couple de rotation ne pourra prendre naissance que s'il existe un champ inducteur \vec{B} , constant en grandeur et en sens dans lequel baigne ce cadre.

I.3. Modes d'Excitation :

Pour satisfaire au principe de fonctionnement à induction \vec{B} constante en grandeur et en sens, la machine synchrone doit nécessairement être excitée par un courant continu.

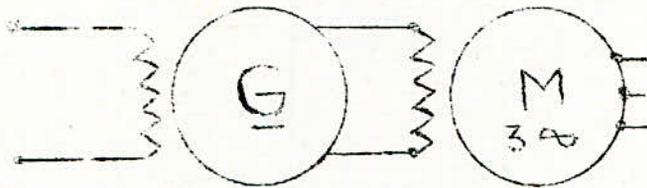
Il existe plusieurs types d'excitation :

- a) Excitation avec machines tournantes
- b) " " convertisseurs statiques
- c) " par aimants permanents
- d) " mixte.

Signalons tout d'abord que les 2 premiers types cités sont les plus courants.

I.34. Excitation avec machines tournantes

Nous utilisons dans ce cas des génératrices à courant continu qui seront chargées sur l'inducteur de la machine synchrone. Cette génératrice est appelée alors EXCITATRICE.



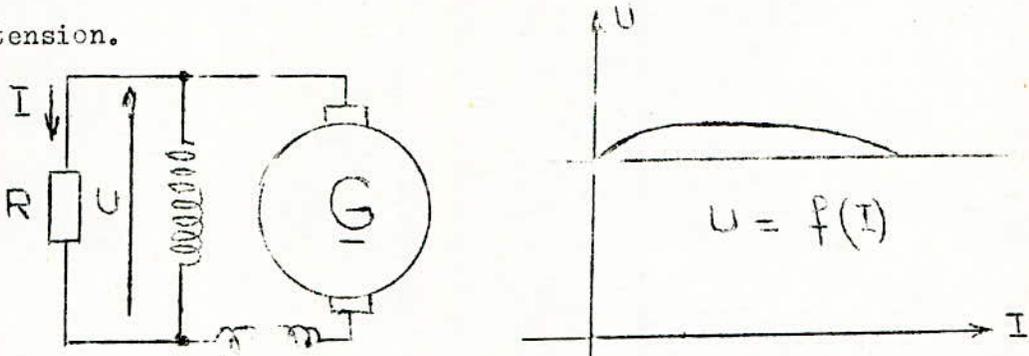
A priori on peut utiliser n'importe quelle génératrice à courant continu à savoir :

- Indépendante
- Shunt
- Série
- Compound

Cependant, sans rentrer dans le domaine des critères demandés pour une bonne excitation, on peut déjà faire un choix sommaire de l'excitatrice.

La première génératrice (indépendante) nécessite une alimentation séparée de son inducteur par un dispositif à courant continu. Quant à la génératrice série, elle n'est guère utilisée dans l'industrie, à cause de la forte variation de la tension à ses bornes en fonction de la charge.

Le choix reste à faire entre la shunt et la compound. La génératrice compound est mieux venue pour répondre au critère de stabilité de la tension.



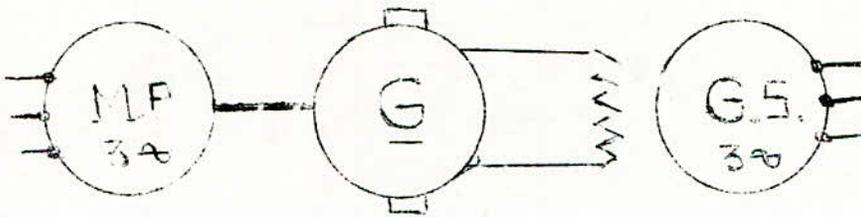
Aperçu sur le montage des machines tournantes :

L'entraînement de cette excitatrice peut se faire de différentes façons

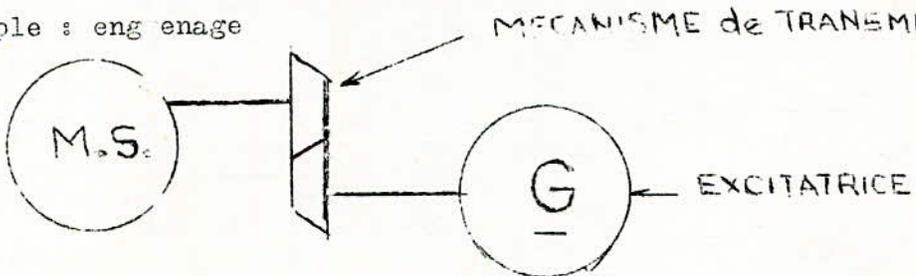
- Pour les machines synchrones de faibles vitesses :

Il existe 2 méthodes classiques.

L'excitatrice peut être entraînée par un moteur Asynchrone indépendant mécaniquement de la machine synchrone à exciter.



- On réalise aussi l'entraînement de l'excitatrice par la machine synchrone à exciter, par l'intermédiaire d'un mécanisme de transmission par exemple : engrenage



pour les machines synchrones de grande vitesse ($N:750 \text{ t}/\text{mn}$)
La génératrice est montée sur le même arbre que la machine à exciter ou reliée par un manchon d'accouplement. Ce montage est appelé excitatrice en "bout d'arbre.)

Le choix de ces différents montages est motivé par la vitesse, car la tension d'excitation fournie par la génératrice dépend de sa vitesse de rotation.

Le système d'excitation avec génératrice est un système classique.

I.3.2. Excitation avec convertisseurs statiques.

L'évolution de la technique de conversion du courant alternatif en courant "continu", grâce aux développements prodigieux ces dernières années des semi-conducteurs, a contribué à l'apparition de nouveaux dispositifs d'excitation qui viennent s'ajouter à l'arsenal des machines tournantes à courant continu.

On distingue les convertisseurs à gaz et à semi-conducteurs.

a) Convertisseurs à gaz :

Il existe une multitude de tubes redresseurs. En électrotechnique, nous faisons appel à des convertisseurs de puissance.

Les redresseurs les plus couramment utilisés sont :

- les thyratrons
- et les tubes à cathode de mercure

- Thyratrons :

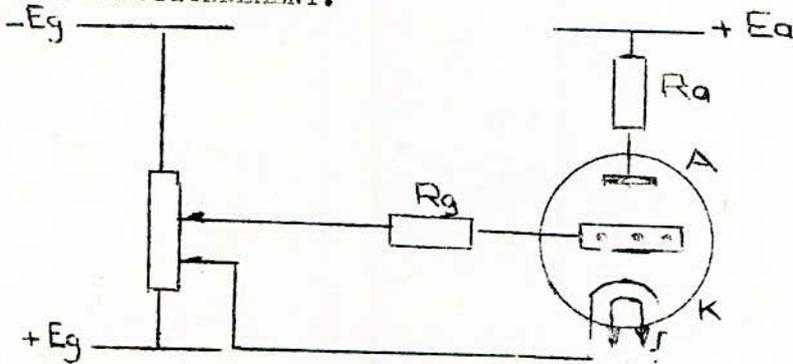
Ce sont des tubes redresseurs commandés à cathodes chaudes.

Un thyatron est un tube à gaz qui comporte une anode, une cathode chaude et une ou plusieurs grilles. La forme la plus simple pourrait être appelée triode à gaz. En général on emploie des gaz rares. Les fonctions de la grille diffèrent considérablement de celles que la grille remplit dans les tubes à vide. Dans les tubes à vide, la grille de commande est capable de faire varier de façon continue le flux d'électrons passant par les trous de la grille, en modifiant ainsi les valeurs instantanées du courant anodique.

Dans les tubes à gaz l'action de la grille est plus limitée. A l'aide de celle-ci on peut régler l'instant d'amorçage de la décharge dans

le tube, mais après l'amorçage elle n'a plus aucun pouvoir de contrôle.

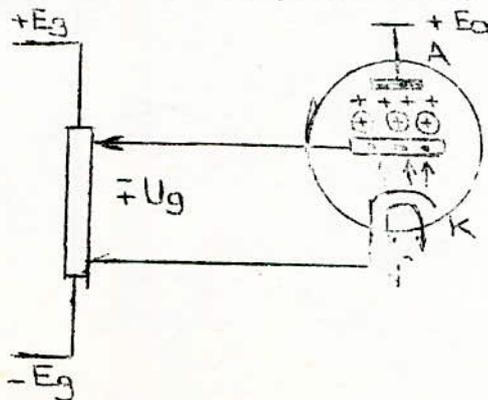
- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.



On règle l'instant d'amorçage de la décharge en portant la grille d'abord à un potentiel négatif considérable par rapport à l'anode, et en le diminuant ensuite.

En plus du champ négatif créé par la grille dans l'espace grille-cathode, dans ce même espace, par les trous de la grille pénètre le champ positif de l'anode. Lorsque celle-ci est portée à un potentiel positif par rapport à la cathode. Tant que dans l'espace grille-cathode, y compris les trous de la grille, prédomine un champ négatif les électrons quittant la grille sont freinés par ce champ :

le nombre d'électrons pénétrant dans l'espace grille-anode est extrêmement réduit. Lorsqu'on remplace le potentiel négatif élevé de la cathode par un potentiel moins négatif ou même positif $+U_g$, les électrons sont soumis à un champ à faible freinage, ou accélérateur dans l'espace grille-anode pénètre un grand nombre d'électrons.



- 0 -

En arrivant ils sont accélérés par le champ d'anode positif, et acquièrent une énergie cinétique suffisante pour ioniser les atomes de gaz. Ainsi la décharge débute.

Les phases suivantes du développement sont liées à la multiplication par avalanche des porteurs qui provoque l'amorçage pendant un temps très court d'une décharge en arc : les charges des deux signes qui se trouvent en grande concentration forment le PLASMA.

Dans un thyatron la décharge en arc est non autonome car les électrons qui assurent la décharge sont émis par une cathode chaude qui reçoit de l'énergie d'une source extérieure.

Dès que le plasma électronique-ionique est créé, son champ dirige les ions vers la grille lorsqu'elle est négative par rapport à la cathode et les électrons lorsqu'elle est positive.

Les charges qui entourent les tiges de la grille forment près de sa surface une gaine mince (quelques millièmes de mm d'épaisseur), la concentration des charges qui forment la gaine étant suffisamment élevée. Dans cette gaine se concentre le champ de la grille. Ce champ ne sort pas au-delà de la gaine. Le changement de potentiel de la grille provoque simplement un changement faible de l'épaisseur de la gaine.

Dans l'industrie on fabrique des grilles ayant des trous dont le rayon dépasse l'épaisseur des gaines : dans les zones centrales des trous le champ de grille n'existe pas. La décharge produite dans le tube n'est pas soumise à l'action du champ de grille. Pour cette raison la grille ne peut pas commander les valeurs instantanées du courant de décharge.

Au voisinage de la surface de la grille, les charges ne restent pas immobiles, elles se déplacent continuellement vers la grille sous l'influence de son champ.

De nouvelles charges venant du plasma arrivent à la place des charges qui quittent la grille.

Ainsi est maintenue l'existence de la gaine de grille et du courant de grille tant que le plasma existe.

Les gaines continuent à faire écran au champ de la gaine pendant un certain temps après l'extinction de la décharge du fait que les charges dans les intervalles entre électrodes ne disparaissent pas instantanément mais seulement après un certain temps appelé temps de désionisation.

L'extinction de la décharge dans les tubes à gaz a lieu après que la tension anodique baisse jusqu'à une valeur inférieure à la tension de décharge. Cette extinction peut-être obtenue aussi par passage d'un courant inverse.

Pendant le temps de désionisation les charges résiduelles provenant du plasma en décomposition, augmentent l'épaisseur de la gaine ; au centre des trous de grille apparaît un champ négatif excédentaire. Au fur et à mesure de la réduction de concentration des charges dans l'espace entre les électrodes le champ de grille s'étend et augmente. Ce champ devient donc suffisant pour freiner les électrons émis par la cathode chaude.

b) TUBES A CATHODE DE MERCURE

Dans les tubes à cathode chaude tel que le thyatron la source d'électrons est cette cathode elle-même. Une source de courant extérieure est nécessaire au chauffage.

Des difficultés surgissent dans la fabrication des cathodes lorsque l'on veut des courants d'émission de 50 à 100 A.

On utilise dans ce cas des tubes à cathode de mercure.

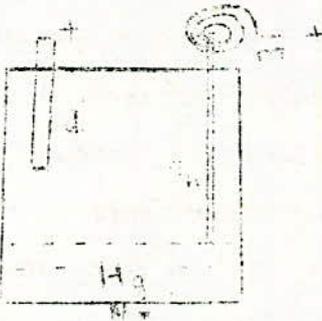
La décharge en arc entre l'anode et la cathode, nécessaire pour l'amorçage de ces tubes à mercure repose dans la formation d'une tache cathodique qui se déplace à la surface du mercure. Cette tache constitue une puissante source d'émission d'électrons.

Une tache cathodique apparaît toujours lorsqu'on coupe un contact entre l'anode et la cathode, bain de mercure. Mais il n'est pas aisé d'obtenir le même résultat en appliquant simplement une tension entre les 2 électrodes.

La décharge dans un tube à cathode de mercure doit par conséquent être déclanchée. Il existe plusieurs méthodes normalisées toutes basées sur la production d'une décharge auxiliaire qui peut déclancher un arc principal. Si l'anode est alimentée en alternatif, la décharge doit être amorcée périodiquement.

- Electrode à immersion.

Un conducteur élastique placé juste au-dessus de la surface du mercure au repos peut être immergé par un électro-aimant placé à l'extérieur du tube. Lorsque le contact est rompu, une petite décharge en arc se produit entre la cathode en mercure et l'électrode à immersion. Cette méthode ne convient pas pour les fonctionnements rapides.

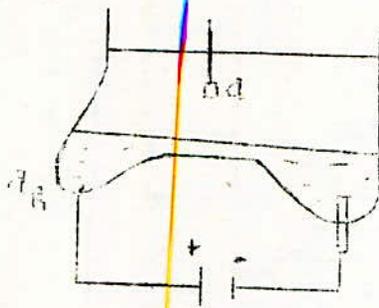


un courant passante à travers l'électrode et le contact. La tache cathodique auxiliaire est amorcée à la surface du mercure.

- Amorçage par contraction.

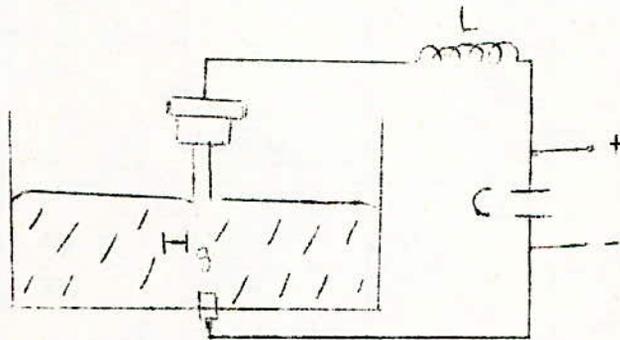
Un filet de mercure relie la cathode de mercure à l'électrode auxiliaire "a" également en mercure. Un courant intense de courte durée passant par ce filet, provoque une étincelle, en interrompant le filet par son champ ou par évaporation. Cette étincelle donne lieu alors à

l'amorçage de l'arc principal.



Amorçage par igniteur : (Excitateur)

Une tige d'un semi-conducteur, est en contact avec la surface par son extrémité spécialement effilée. La tige et le mercure sont reliés, à son extrémité à une capacité C chargée, en série avec une self L. Si le courant produit par la décharge de C est suffisamment intense, une tache cathodique prend naissance et la décharge principale peut s'amorcer.



Dans tous les cas la conduction interne durant la partie de la période où l'anode est positive par rapport à la cathode est assurée par la décharge autonome en arc.

Les tubes à cathode de mercure sont utilisés dans les grandes puissances.

Versions de redresseurs à cathode de mercure.

On rencontre des tubes monoanodiques :

- Ignitron
- Excitron

Ils diffèrent entr'eux en ce qui concerne la tache cathodique. Dans l'ignitron cette dernière est formée périodiquement. Ainsi la commutation est obtenue au moment voulu.

Dans l'excitron la tache cathodique est formée une fois pour toute au lieu de chaque période. Cette tache cathodique est due à un arc auxiliaire formé entre l'anode auxiliaire et le mercure. Cet arc est alimenté par redresseur. Comme cet arc existe en permanence, une grille de commutation est nécessaire pour commander le tube exactement comme un thyatron.

L'avantage de l'excitron sur l'ignitron est que le circuit d'amorçage compliqué, volumineux nécessité pour une alimentation périodique de la tige d'amorçage est remplacé par l'alimentation plus simple et légère de la grille de commande. De plus la transition simple de la décharge auxiliaire à l'arc principal fait que la fiabilité de l'excitron est bonne.

Mutateur.

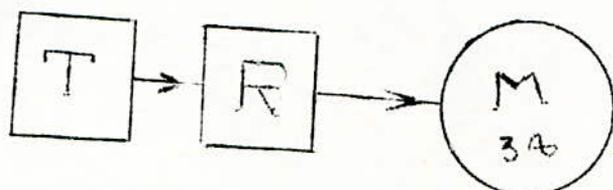
Si l'on a à faire à des puissances élevées on a avantage à utiliser des tubes polyanodiques équipés de grilles : en d'autres termes plusieurs excitrons dans un seul tube, avec toujours formation d'un arc auxiliaire permanent.

Comment utiliser ces tubes redresseurs.

Ces tubes sont alimentés en courant industriel (alternatif) et donne un courant redressé. Ils doivent être substitués aux excitatrices tournantes.

Cette technique d'excitation permet l'utilisation direct du réseau mais nécessite d'autres appareils tels que transformateur et amortisseur qui est un enroulement inductif monté en serie avec l'enroulement primaire du transformateur.

Cet amortisseur permet la réduction du courant de court circuit et surtout les rebours d'arcs.



T : Transformateur
R : Redresseur
M : Machine Syn-
chrone

I.3.2. b. Semi-conducteurs.

Il n'est pas nécessaire ici de rappeler le principe de fonctionnement de ces éléments. Nous en parlerons au moment jugé utile.

Les principaux éléments utilisés sont :

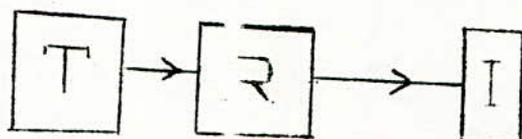
- DIODES (semi-conducteurs non commandés)
- THYRISTORS (semi-conducteurs commandés)

On réalise avec ces éléments des blocs d'excitation de différentes sortes.

Abstraction faite d'une classification selon les caractéristiques on peut diviser en 3 groupes selon leur structure les systèmes d'excitation, non classiques connus ces dernières années.

- Système purement statique.

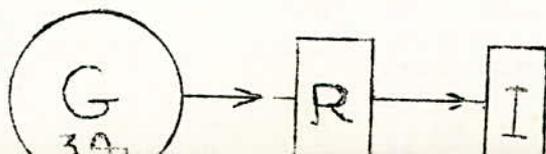
Alimentation au moyen d'un transformateur avec organe de réglage d'un combiné redresseur à semi-conducteurs.



I : Inducteur

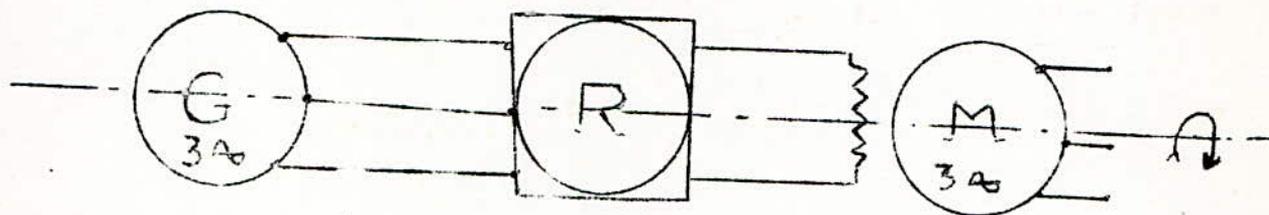
- Système combiné statique tournant.

Une génératrice triphasée alimente un pont redresseur, statique.



- Système tournant

L'induit d'une génératrice triphasée à inducteur fixe, monté sur l'arbre solidaire du rotor de la machine synchrone principale, alimente un pont redresseur fixé sur l'arbre. Les bornes de sortie de ce pont sont reliées par l'intermédiaire de conducteurs aux bornes de l'enroulement d'excitation dans le trou central de l'arbre.



Les 3 groupes sont caractérisés par l'emploi d'un redresseur statique à semi-conducteur au lieu du système mécanique à collecteur.

Dans les groupes 1 et 2 des bagues sont nécessaires pour la transmission du courant à la roue polaire. Elles disparaissent dans le groupe 3 où le pont redresseur est monté sur l'arbre et tourne avec lui.

C'est le système d'excitation sans balais ni bagues.

1.3.3. Excitation par aimant permanent

Le développement intervenu dans la conception des aimants modernes, tels que les aimants au NICOTAL isotropes (unidirectionnels) a permis la construction d'excitateurs à aimants permanents pour les machines de faibles puissances. C'est une méthode surtout économique

la construction de tels aimants étant assez avancée, de prix de revient moyen et surtout ne demandant aucune source d'énergie.

1-3 * Excitation mixte.

On entend par ces termes une excitation par aimants permanents et par méthode électromagnétique.

II- CHOIX DU MODE D'EXCITATION

1. Introduction

Nous avons jusqu'à présent fait un rapide tour d'horizon des principales méthodes d'excitation des machines synchrones sans aborder une étude détaillée, ni préciser pour quelle catégorie de machines synchrones ces systèmes sont destinés. Nous, nous intéressons particulièrement à l'étude de l'excitation des machines synchrones de moyenne puissance. Il nous apparaît déjà nécessaire de choisir un mode d'excitation vu le nombre important de méthodes décrites.

Mais avant de faire un choix une question importante se pose.

Qu'attend l'utilisateur du système d'excitation d'un moteur synchrone ?

2. Critères relatifs à l'excitation.

L'utilisateur attend du système d'excitation non seulement un bon fonctionnement en régime normal mais aussi qu'il joue en général un rôle efficace en période trouble.

Nous demanderons qualitativement aux diverses régulations d'être stables et efficaces

Par ailleurs, l'utilisateur ^{doit} avoir assurance de la plus grande SECURITE de fonctionnement et en particulier éliminer tout risque d'instabilité en régime permanent.

Le système d'excitation doit être à action continue, linéaire les organes de détection devant présenter un seuil d'insensibilité le plus faible possible ; il doit fonctionner pour des plages de variation de la tension et de la fréquence.

Le système doit permettre une SUREXCITATION rapide de façon à maintenir ou permettre la reprise du synchronisme, afin d'éviter le décrochage de la machine. Cette surexcitation intervient aussi dans d'autres domaines (c.f. III).

De plus le réglage du facteur de puissance doit être assuré. Enfin, ce que tout utilisateur demande, c'est d'avoir une installation dont le prix de revient soit le plus bas possible.

Pour comprendre ces spécifications, en particulier la surexcitation il faut se pencher sur le fonctionnement du moteur synchrone que nous verrons plus loin au chapitre III.

Les points essentiels présentés ci-dessus permettent aisément de faire le choix de notre mode d'excitation.

3. Comparaison de l'excitation classique et de l'excitation statique.

Les différentes solutions possibles pour l'entraînement de l'excitric classique des machines synchrones sont comme nous les avons signalées.

- l'entraînement direct par l'arbre de la machine synchrone.
- " par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse.
- " " moteur asynchrone (c.à.d. groupe séparé d'excitation).

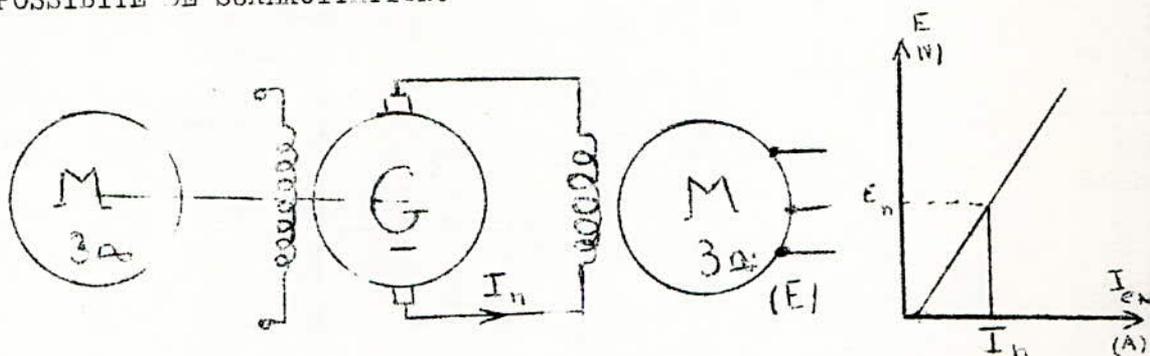
La première méthode apparaît comme étant la plus économique mais ne peut être appliquée aux grandes puissances à cause des difficultés de commutation. De plus c'est une solution adoptée pour les grandes vitesses.

Le procédé avec réducteur de vitesse est le plus généralement adopté. Les réalisations d'entraînement par moteur séparé sont nombreuses. Cependant dans ce système les difficultés apparaissent pour la réalisation du collecteur dont la vitesse périphérique atteint la limite admissible.

A la lumière des critères d'utilisation, nous ne pouvons comparer la sécurité de fonctionnement d'un générateur à courant continu avec une installation statique. Cette dernière l'emporte de loin vu

toutes les pièces tournantes qui entrent en jeu dans le fonctionnement d'une génératrice.

L'inconvénient majeur de l'excitation classique réside dans le fait que la génératrice entraînée par moteur asynchrone NE DONNE PAS LA POSSIBILITE DE SUREXCITATION.



Si nous voulons surexciter de façon que $I_{ex} = 2 I_n$ il faut que E_{ex} passe à $2 E_n$ car E est proportionnelle à I_{ex} en négligeant la saturation.

Initialement la puissance demandée au moteur asynchrone était $P_n = E_n I_n$ elle passe subitement à

$$P_f = 2 E_{ex} \cdot 2 I_{ex} = 4 P_n.$$

Le moteur asynchrone ne peut supporter cette surcharge même s'il est alimenté par une tension constante. En réalité quand la tension du réseau baisse le moteur asynchrone décroche car son couple est fonction du carré de la tension. Avec l'excitatrice en bout d'arbre apparaissent encore les problèmes mécaniques: frottements, volant d'inertie.

Quant à l'excitation par convertisseur statique, elle présente dans ces conditions l'avantage d'éviter la réalisation de contacts glissants, volumineux et délicats, et conduit à une réduction de l'encombrement susceptible de se répercuter sur les dimensions de l'installation. En général ces convertisseurs statiques ont une stabilité dynamique et statique supérieure à celle des générateurs tournants. A l'heure actuelle toutes possibilités d'améliorations des générateurs tournants semblent épuisées.

3.1. Conditions particulières d'exploitations classiques

Les groupes d'excitation classique, lorsqu'ils sont entraînés par machines asynchrones présentent l'inconvénient d'être bruyants et de nécessiter un volant d'inertie très important pour pouvoir fournir leur pleine puissance pendant la durée d'un défaut qui peut momentanément priver le moteur de sa tension d'alimentation.

Mais le principal inconvénient de l'excitation classique au point de vue de l'exploitation est la nécessité d'une surveillance et d'un entretien fréquent des balais car les incidents intéressant ce matériel sont très nombreux et entraînent des arrêts de travail. Signalons que sur certaines machines existe un système permettant un changement de balais en cours de fonctionnement. Mais cela ne résout pas le problème. La fréquence d'entretien c.à.d. rectification des bagues, remplacement des balais, est très variable, non seulement d'une installation à une autre mais aussi dans une installation donnée, d'une période à l'autre. La durée de vie de ce matériel dépend de facteurs extrêmement divers non encore complètement élucidés.

Par contre le système d'excitation statique nécessite un entretien réduit et une surveillance négligeable par rapport aux générateurs tournants à courant continu. Ceci à la suite d'absence de collecteur à lames, de réduction des pièces en mouvement et en frottement. De plus l'intérêt qu'on porte de plus en plus aux installations fortement automatisées dont la principale condition est la marche sans entretien nous poussent à écarter la méthode d'excitation classique, et à généraliser l'emploi du système statique que l'on réalise par bloc de montage simple.

3.2. Critère économique

C'est le plus important

à l'heure actuelle le prix des excitations classiques est bien déterminé, voire bien étudié. Le système statique est mal connu économiquement. Il peut coûter cher mais les avantages qu'on en tire compensent tout déficit. De plus il semble que ce système revienne moins cher que l'excitation tournante pour les machines de moyennes puissances en raison de la fabrication en série d'éléments semi-conducteurs.

L'excitation statique s'impose

3. g. Tubes et redresseurs secs.

Dans certains cas particuliers, l'utilisation des redresseurs à tubes, pour l'excitation des machines synchrones peut être envisagée. Les raisons qui peuvent orienter un constructeur vers une telle solution sont d'ordre économique d'abord et en particulier d'ordre purement technique. Si l'on recherche une installation d'excitation pour grosses machines synchrones, économique au point de vue coût de premier établissement et entretien, les redresseurs à cathode de mercure présentent un grand intérêt.

De part sa construction le thyatron est utilisé pour les machines de moyenne puissance mais il est préférable d'employer des semi-conducteurs, thyristors et diodes. Ces éléments présentent un avantage certain sur les tubes à gaz dans le domaine des puissances moyennes à savoir que :

- Ce sont des corps solides de construction robuste, petits compacts, de rapport puissance/poids élevé.

- Fonctionnent dans un intervalle de température, important au-dessus et au-dessous de 0°C, dans toutes les positions et ne craignent pas les accélérations.

- De plus n'ont pas besoin de chauffage, donc démarrent immédiatement.

- Restent identiques à eux-mêmes dans le temps et leur durée de vie est illimitée, ont une grande fiabilité.

- Leur puissance utile augmente avec l'efficacité du refroidissement car étant petits la surface offerte au dégagement de chaleur est réduite.

Mais le THYRISTOR lui-même comparé aux autres semi-conducteurs offre d'autres avantages :

résumons les dans un tableau :

DIODES A JONCTION	§	THYRISTOR
débit reprend pour V anode Vcathode	! ! !	débit peut être retardé jusqu'à ce que la tension Vanode -cathode de atteigne une valeur déterminée
ne peut effectuer par elle même le réglage de la tension de sortie	! ! !	règle la tension continue de sortie : réglage de phase
la chute directe augmente avec le débit	! !	la chute de tension est indé- pendante du débit
pas de discontinuité de la tension aux bornes lorsqu'il y a croissance à partir de 0	! ! !	discontinuité de tension dans le cas d'amorçage retardé

Ajoutons encore que le thyristor fonctionne par tout ou rien (2 états stables). L'électrode de commande ne peut servir au blocage que dans certains thyristors dits à blocage, utilisés jusqu'à 10 A.

Les pertes sont très inférieures à la puissance commandée.

3. 4. Comparaison du thyristor et des tubes à gaz

Il existe entre eux une ressemblance frappante : ce sont des dispositifs à 3 électrodes : anode, cathode, grille (électrode de commande pour les thyristors).

Ils fonctionnent tous par tout ou rien avec 2 états stables : état bloqué, état conducteur.

Mais les différences sont plus importantes.

Le thyristor ne possède pas la possibilité de surcharge de l'ignitron et du mutateur; c'est pourquoi il ne peut pour l'instant être utilisé d'une façon généralisée dans les installations de haute puissance.

Les principaux avantages qu'il présente sont :

- chute de tension directe plus faible
- pas de circuit d'eau pour le refroidissement
- pas de raté d'allumage

Le plus intéressant est de voir le thyristor aux côtés du thyatron. Ce sont des éléments tous deux destinés par leur construction aux moyennes puissances.

Tableau de comparaison

(voir page suivante)

THYRATRON	!	THYRISTOR
dispositif pour tension élevée mais faible courant	!	courant fort, tension dépassant 1 000 V
chute de tension directe 10 à 20 V	!	chute de tension faible de l'ordre de 5 V
courant inverse négligeable	!	courant inverse non négligeable
signal de commande d'assez forte tension, mais de faible courant	!	signal de commande de faible tension mais fort courant
doit être chauffé, démarrage lent	!	pas de chauffage : amorçage immédiat
les caractéristiques se détériorent avec le temps (épaulement de la cathode, raréfaction du gaz)	!	reste identique à lui même
sensible aux variations de température ambiante	!	fonctionne sans modification sensibilité des paramètres dans une grande plage de température

De toutes les comparaisons que nous venons de faire se dégage l'importance que prend le thyristor.

On peut encore hésiter devant un tel choix en se référant aux critères économiques qui sont à la base de toute construction; d'autant plus qu'aucune étude poussée n'a été entreprise dans ce domaine. Mais les nombreux avantages du thyristor font que ce dernier remplace partout les tubes à gaz de moyenne puissance.

III- APERCU SUR LE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR SYNCHRONE

I- Introduction

Il est important de bien voir qu'il est impossible d'étudier l'excitation d'une machine synchrone sans aborder le rôle que joue cette excitation dans le fonctionnement de la machine.

Nous ne pouvons en aucun cas séparer l'excitation du reste de la machine. L'une et l'autre de ces 2 parties n'ont de sens que si elles existent ensemble afin de satisfaire aux conditions de fonctionnement.

Du principe de fonctionnement, même, découle que la machine synchrone n'aurait aucune raison d'être sans la partie "Excitation". De plus une excitation sans les autres parties de la machine tel que l'induit n'aurait aucune signification, aucune utilité.

Dans les pages qui suivent, nous nous penchons sur le fonctionnement du moteur synchrone, en insistant particulièrement sur tout ce qui nous permettrait d'expliquer certaines demandes formulées à l'égard de l'excitation.

Nous employons le plus souvent le mot "machine synchrone" à la place de moteur synchrone ou alternateur, car ils ne diffèrent l'un de l'autre que par le sens de transmission de l'énergie. Toutefois, nous préciserons si le fonctionnement est en moteur ou en générateur chaque fois que c'est nécessaire.

2. Généralités

Comme toute machine tournante la machine synchrone comporte 2 parties principales :

- Rotor
- Stator,

polyphasés avec des phases supposées équilibrées par construction. L'une des 2 armatures engendrera l'induction \vec{B} et ce sera l'inducteur, l'autre armature sera l'induit.

L'expérience accumulée par la fabrication et l'exploitation de longue date des machines synchrones montre que l'armature d'excitation la plus commune est le ROTOR (inducteur tournant).

Il faut voir en effet qu'un induit tournant suppose en polyphasé au moins 3 bagues et qu'au delà de 1 500 V l'emploi de bagues devient délicat en raison de l'isolement et de l'importance des courants collectés.

Par contre l'inducteur fixe ne nécessite que 2 bagues puisque l'excitation se fait en continu et sous tension réduite au plus 380 V

Il faut remarquer que le principe de fonctionnement d'une machine synchrone est le même que celui d'une machine à courant continu sauf que dans une machine synchrone on n'a pas besoin de redresser la F.E.M. variable dans le temps, engendrée dans l'induit :

une machine synchrone n'a pas besoin de collecteur

la principale définition qu'on en donne est :

Machine dont la vitesse de rotation N est liée à la fréquence f du réseau par la relation :

$$f = P \cdot N$$

- f : fréquence du réseau
- P : nombre de paires de pôles
- N : tours/seconde

Suivant le signe du couple nous aurons un fonctionnement en

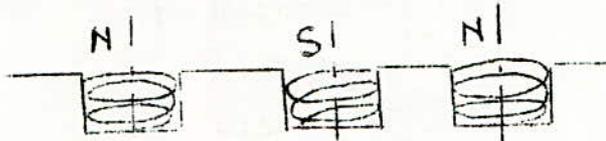
- moteur
- générateur (alternateur)

La question de réversibilité est à priori évidente s'il y a couplage à égalité de fréquence avec la source d'alimentation.

Du point de vue de la construction on distingue deux types principaux :

- machines à pôles lisses
- " " " saillants

Dans la première catégorie les bobines constituant les pôles principaux sont logées dans des encoches.



On considère dans ce cas l'entrefer comme étant constant.

Dans les machines à pôles saillants l'entrefer n'est pas constant par suite de l'existence d'un grand espace interpolaire. Les pôles sont constitués de tôle d'acier.

La plupart des moteurs synchrones sont à pôles saillants.



3. Réaction magnétique d'induit

En charge l'enroulement d'induit est parcouru par un courant. Une F.M.M apparaît en interaction avec la F.M.M principale. Le flux magnétique en charge résulte de la combinaison de ces 2 F.M.M. Dans les machines à pôles saillants l'onde fondamentale de réaction d'induit tournant au synchronisme avec le rotor crée, vu que l'entrefer entre

le rotor et le stator n'est pas uniforme, un flux non sinusoïdal de réaction d'induit et qui à son tour induira une F.E.M non sinusoïdale.

On étudie les phénomènes comme si la F.M.M d'excitation et la F.M.M de réaction d'induit créent dans la machine des flux indépendants, engendrant des F.E.M indépendantes dans l'enroulement d'induit.

Si le fer n'est pas saturé on pourra alors appliquer le théorème de superposition. En prenant en considération le phénomène de saturation du circuit magnétique, le calcul devient complexe. En général pour des entrefers relativement grands l'influence de la saturation est faible ; mais on en tient compte indirectement dans le diagramme de tension.

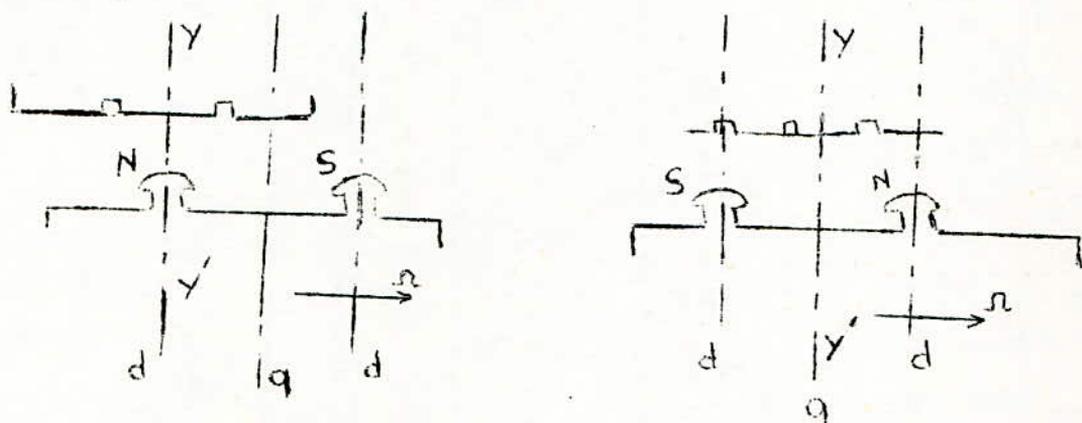
Pour mener à bien l'étude de la réaction d'induit d'une machine à poles saillants on utilise la méthode des 2 réactions de BLONDEL. Nous isolons l'onde fondamentale de réaction d'induit et nous la décomposons en 2 composantes :

- longitudinale dont le maximum coïncide avec l'axe des poles: F_{ad}
- transversale dont le maximum coïncide avec l'axe du milieu de l'espace interpolaire: F_{aq}

Les 2 ondes obtenues sont en quadrature.

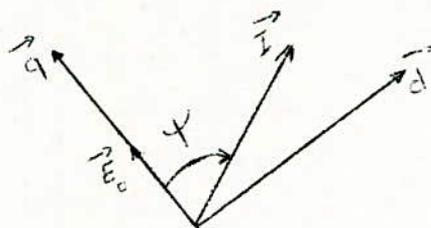
Quand la machine tourne à vide, l'inducteur étant parcouru par un courant constant, les enroulements d'induit ne sont le siège d'aucun courant. La F.M.M tournante de l'inducteur engendre à travers les bobines de phase un flux fixe, sinusoïdal par hypothèse. Cette phase considérée est le siège d'une F.E.M induite sinusoïdale déphasée de $\frac{\pi}{2}$ par rapport au flux. Lorsque l'axe longitudinal "d" d'un pole coïncide avec l'axe YY' de la phase le flux embrassé est alors maximum et la F.E.M induite E_0 est nulle. Au contraire lorsque l'axe transversal "q" se trouve confondu avec l'axe YY' de la phase le flux est nul et la F.E.M E_0 induite est maximale ou minimale.

Nous voyons que l'axe de la F.E.M induite, à vide est porté par l'axe "q".



La réaction d'induit dépend de la nature de la charge en d'autres termes du déphasage du courant de l'induit par rapport à la F.E.M induite à vide.

Soit ψ ce déphasage. ψ sera noté positif pour les déphasages arrières. Nous obtenons alors le diagramme suivant :



$$\begin{aligned} (\vec{q}, \vec{E}_0) &= 0 \\ (\vec{E}_0, \vec{I}) &= \psi \\ (\vec{q}, \vec{d}) &= \pi/2 \end{aligned}$$

On définit encore deux quantités X_d et X_q qui sont respectivement les réactances synchrones longitudinale et transversale de réaction magnétique d'induit.

Il est plus aisé de définir ces quantités en partant d'un fonctionnement en alternateur.

La tension V , simple, aux bornes résulte des facteurs suivants :

- F.M.M fondamentale des pôles d'excitation créant le flux ϕ_0 induisant à son tour E_0 , F.E.M principale .

Nous faisons coïncider la tension avec l'axe des ordonnées. On trace \vec{I} En retard sur \vec{V} d'un angle ϵ

$\vec{\phi}_{ca}$ flux de fuite est en phase avec \vec{I}

$\vec{\phi}_{ad}$ " longitudinal de réaction est en phase avec \vec{I}_d

$\vec{\phi}_{aq}$ " transversal " " " " " " \vec{I}_q

Selon la règle générale, le flux est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur la F.E.M qu'il induit ; on trace le diagramme.

Nous voyons que :

$$\text{la F.E.M } \vec{E} = \vec{V} + R_a \vec{I} + j X_{ca} \vec{I}$$

Modifiant légèrement le diagramme en portant au lieu de

E_{ad}, E_{aq}, E_{ca} leur valeur $(-j \dot{I}_d X_{ad}), (-j X_{aq} I_a)$ et $(-j X_{ca} \vec{I})$

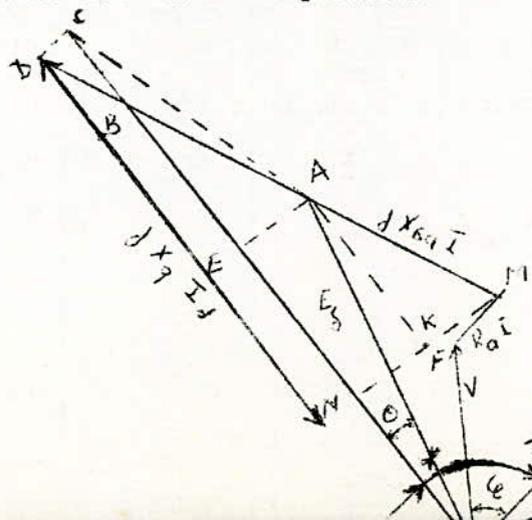
Nous décomposons toujours \vec{I} en :

$$I_d = I \sin \psi$$

$$I_q = I \cos \psi$$

On trace \vec{V} ; $R_a \vec{I}$ en phase avec \vec{I}

On porte à partir de l'extrémité de $R I$ le vecteur chute de tension inductive ou de dispersion



On obtient $\vec{E} = \vec{OA}$

$$\vec{OF} = \vec{V}$$

$$\vec{MF} = R_a \vec{I}$$

$$\vec{AM} = j X_{ca} \vec{I}$$

$$\epsilon = (\vec{V}, \vec{E})$$

La projection du point A sur la direction de \vec{E}_0 (axe q) donnera

$$j X_{aq} I_q = \vec{EA}$$

$\vec{OC} = \vec{E}_0$ du point C nous traçons

$$\vec{CE} = j X_{ad} I_d$$

La projection du segment \vec{AM} sur les axes d et q donnent :

$$\vec{AM} \begin{cases} \vec{AK} = j X_{\zeta a} I \sin \psi = j X_{\zeta a} I_d \\ \vec{KM} = j X_{\zeta a} I \cos \psi = j X_{\zeta a} I_q = \vec{EN} \end{cases}$$

de plus $\vec{CN} = \vec{CE} + \vec{EN}$

$$\vec{CN} = j X_{ad} I_d + j X_{\zeta a} I_d$$

sur axe d : $\vec{CN} = j I_d (X_{ad} + X_{\zeta a})$

de même $\vec{NM} = \vec{NK} + \vec{KM} = \vec{EA} + \vec{KM}$

sur axe q $\vec{NM} = j X_{aq} I_q + j X_{\zeta a} I_q$

$$NM = j I_q (X_{aq} + X_{\zeta a})$$

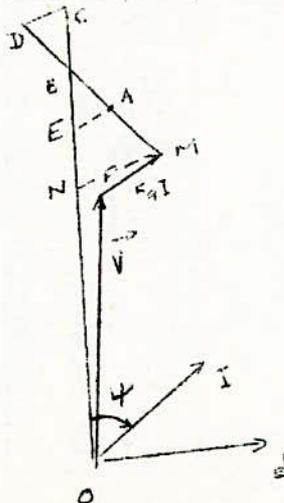
On appelle réactance synchrone d'une machine à pôles saillants suivant les axes longitudinal et transversal les réactances inductive

$$X_q = X_{aq} + X_{\zeta a}$$

$$X_d = X_{ad} + X_{\zeta a}$$

Prolongeant le segment MA jusqu'à l'intersection avec l'axe q

MA coupe l'axe q en B et la parallèle à l'axe d en C.



$$\overline{AB} = \frac{\overline{EA}}{\cos \psi} = \frac{jX_{dq} I_q}{\cos \psi} = \frac{jX_{dq} I \cos \psi}{\cos \psi} = jX_{dq} I$$

$$\overline{BE} = AB \sin \psi = jX_{dq} I \sin \psi = jX_{dq} I_d$$

$$\overline{CB} = \overline{CE} - \overline{BE} = jX_{ad} I_d - jX_{dq} I_d = jI_d (X_{ad} - X_{dq})$$

$$\text{De même } \overline{CB} / \sin \psi = j \frac{(X_d - X_q) I \sin \psi}{\sin \psi} = j(X_d - X_q) I$$

$$\overline{CD} = \overline{BD} \cos \psi = jI_q (X_d - X_q)$$

Lorsqu'il s'agit d'une machine synchrone à pôles lisses la réactance transversale est égale à la réactance longitudinale.

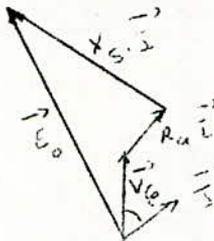
$$X_d - X_q = 0$$

$$\overline{CB} = jI_d (X_d - X_q) = \overline{CD} = jI_d (X_d - X_q) = 0$$

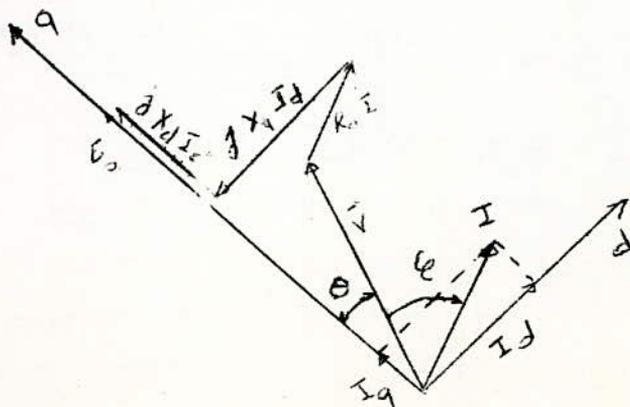
Les points C, B, D sont confondus. Les points B, A, M sont alignés par construction. Le segment CA vient alors se superposer sur le segment BA correspondant à $jX I$

$X_s = X_{ad} + X_{dq}$ X_s réactance synchrone d'une machine à pôles lisses. X_a réactance d'induit.

Nous obtenons le diagramme d'une machine à pôles lisses :



En utilisant les réactances synchrones longitudinale et transversale nous obtenons, Pour une machine à pôles saillants :



L'angle θ entre les vecteurs \vec{V} et \vec{E}_0 , déterminé par la position angulaire du rotor par rapport au flux tournant du stator.

θ : DEPHASAGE INTERNE.

4. Fonctionnement en moteur

Avant d'aborder quoique ce soit, il est nécessaire de se fixer un sens de transmission de l'énergie. Pour simplifier les raisonnements, nous considérerons le cas d'une machine à pôles lisses non saturée.

Pour bien comprendre que la seule différence entre un alternateur et un moteur n'est que le sens de transmission de l'énergie, analysons les deux types de fonctionnement.

Nous adoptons comme sens de référence, pour les courants la puissance active, réactive positifs s'ils sont fournis par la machine.

a) Dans la marche en alternateur la puissance active est fournie au réseau, ainsi que..

d'après nos conventions $P > 0$

$$P = mV I \cos \epsilon \implies \cos \epsilon > 0$$

ϵ étant le déphasage entre \vec{I} et la tension \vec{V} aux bornes de la machine, compté positivement dans le sens horaire.

Si la puissance réactive est positive c.à.d. fournie au réseau.

La phase ϵ est telle que : $0 < \epsilon < \frac{\pi}{2}$

L'alternateur se comporte comme une capacité. c.f. fig. a

La F.E.M d'excitation E_0 efficace est supérieure à la tension aux bornes V . Elle est également supérieure à la F.E.M E_0 nécessaire d'engendrer si la machine fournissait la même tension avec $\cos \epsilon = 1$

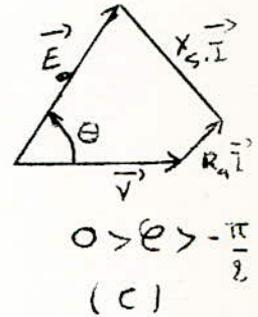
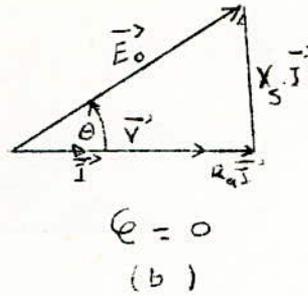
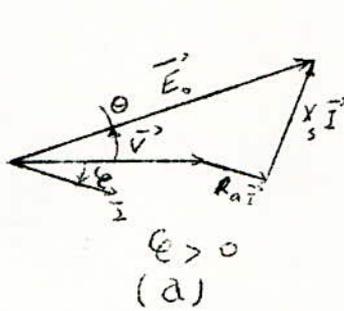
fig. b

Si la puissance réactive est au contraire fournie par le réseau nous avons $0 > \epsilon > -\frac{\pi}{2}$

L'alternateur se comporte comme une self. fig. c.

Le courant d'excitation nécessaire est plus élevé dans le premier cas que dans le second. Respectivement nous avons un alternateur sur-excité et sous-excité.

Diagrammes : \vec{V} axe de référence



b) Dans la marche en moteur, la puissance active est reçue du réseau. Donc elle est négative ainsi que $\cos \phi$ si l'on conserve le sens de référence avec \vec{I} toujours positif.

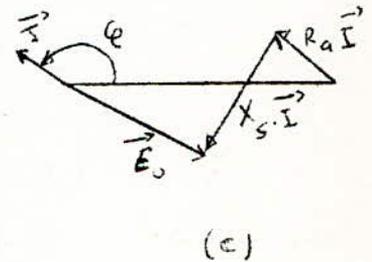
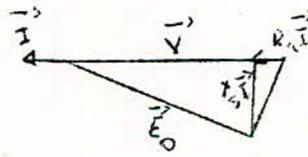
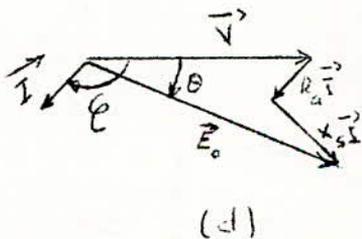
- Si la puissance réactive est positive c.à.d.

fournie par le moteur nous aurons $\frac{\pi}{2} < \phi < \pi$ fig. d.

- Si la puissance réactive est négative, absorbée par le moteur

la phase est : $-\frac{\pi}{2} < \phi < -\pi$ fig. c.

Nous aurons encore, pour le premier cas, surexcitation, et sous-excitation dans le 2ème cas.



L'examen des diagrammes précédents montre que le déphasage θ , de la F.E.M E_0 d'excitation par rapport à la tension (nous allons toujours du vecteur référence vers celui choisi) aux bornes est constamment positif pour un fonctionnement en alternateur, et négatif pour un fonctionnement en moteur.

Ainsi dans le cas d'un alternateur E_0 est en avance sur la tension V . θ correspond au déplacement angulaire relatif effectué par la roue polaire lorsqu'on passe de la marche à vide à la marche en charge. Certains l'appellent angle interne, déphasage interne, d'autres, écart polaire. Nous emploierons l'une ou l'autre appellation.

4.1. Caractéristiques angulaires

Soit P la puissance électrique absorbée par le moteur. Une partie de cette puissance est dépensée pour compenser les pertes dans le cuivre P_c et dans le fer P_f .

La puissance électromagnétique transmise du stator au rotor est

$$P_{em} = P - P_c - P_f$$

Si nous négligeons les pertes d'origine mécanique nous aurons une puissance utile sur l'arbre égale à P_{em} .

$$P_u = P_{em}$$

Le couple sur l'arbre sera alors $C_{em} = C_u = \frac{P_u}{\Omega}$

Ω est la vitesse angulaire synchrone du moteur.

La puissance absorbée par le moteur peut toujours être exprimée, en fonction des grandeurs mesurées aux bornes de la machine, par la relation générale $P = mVI \cos \phi$

- V : tension simple

- I : courant absorbé

- m : nombre de phases.

Mais dans le cas du moteur synchrone il s'avère très intéressant d'exprimer la puissance ou bien le couple en fonction des grandeurs qui caractérisent l'action extérieure du réseau sur l'induit du moteur.

Ces grandeurs sont :

a) la tension V du réseau

b) l'angle interne θ

c) la F.E.M E_o d'excitation.

Ces 3 causes énumérées déterminent entièrement le régime de fonctionnement du stator (induit), donc de façon univoque la puissance du moteur doit être déterminée par les 3 paramètres de la machine,

$$E_o, V, \theta$$

$$P = f(E_o, V, \theta)$$

Pour V constante, F constante, E_o constante (excitation) la

Puissance P ne dépend que de l'angle θ et la relation $P = f(\theta)$ est appelée caractéristique angulaire du moteur synchrone.

4.2. Détermination de $P = f(\theta)$

Nous avons vu que le passage de la marche en générateur à la marche en moteur est donné par le changement du signe de l'angle interne θ

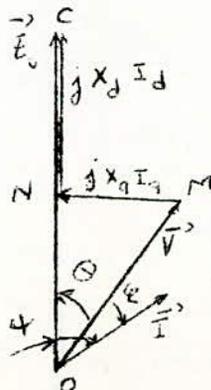
Rappelons encore que θ est positif pour un fonctionnement en alternateur et négatif pour un moteur.

Nous pouvons dans ce cas obtenir les expressions des puissances et des couples du moteur synchrone à partir des expressions correspondantes en générateur en y introduisant les valeurs négatives de l'angle θ . Mais nous avons pris par convention pour un régime en générateur les puissances positives. Nous aboutissons avec le changement de θ en $(-\theta)$ à des puissances et des couples moteurs négatifs, ce qui est peu commode. Nous obtiendrons des expressions adéquates en remplaçant θ par $(-\theta)$ et en changeant le signe du membre de droite de l'expression obtenue pour un générateur.

Considérons le diagramme des F.E.M de la machine à pôles saillants pour un régime de fonctionnement en générateur.

Négligeons la résistance R_a de l'induit qui est très faible devant les réactances X_d et X_q . De plus les pertes citées sont faibles.

Nous admettons que $P = P_{em} = P_u$.



$$\overline{MN} = X_q I \sin \psi$$

$$\overline{OC} = \overline{E_0}$$

$$\psi = \theta + \epsilon$$

D'après le graphe nous avons :

$$V \sin \theta = X_q I_q = X_q I \cos \psi$$

$$E_o = X_d I_d + V \cos \theta = X_d I \sin \psi + V \cos \theta$$

D'où :

$$\cos \psi = \frac{V \sin \theta}{X_q I}$$

$$\sin \psi = \frac{E_o - V \cos \theta}{X_d I}$$

de plus $\varphi = \psi - \theta$

$$\cos \varphi = \cos(\psi - \theta)$$

$$\sin \varphi = \sin(\psi - \theta)$$

Nous aboutissons à :

$$\cos \varphi = \frac{V \sin \theta \cos \theta}{X_q I} + \frac{E_o \sin \theta - V \sin \theta \cos \theta}{X_d I}$$

$$\sin \varphi = \frac{E_o \cos \theta - V \cos^2 \theta - V \sin^2 \theta}{X_d I}$$

Or : $P = m V I \cos \varphi$

$Q = m V I \sin \varphi$

Nous obtenons :

$$P = \frac{m E_o V}{X_d} \sin \theta + m \frac{V^2}{2} \sin^2 \theta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

$$Q = \frac{m E_o V}{X_d} \cos \theta - \frac{m V^2}{X_d} - \frac{m V^2}{2} (1 - \cos^2 \theta) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

Ces formules sont celles qui correspondent au régime de fonctionnement en générateur.

En faisant le changement de signe de θ et celui du membre de droite de chaque expression nous obtenons pour un moteur synchrone :

$$P = \frac{m E_o V}{X_d} \sin \theta + \frac{m V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin^2 \theta$$

$$Q = \frac{m E_o V}{X_d} \cos \theta + \frac{m V^2}{X_d} + \frac{m V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) (1 - \cos^2 \theta)$$

5. Rôle de l'excitation :

Nous avons déjà introduit la notion de surexcitation et de sous-excitation sans aborder les conditions réelles de fonctionnement du moteur.

En pratique, la marche synchrone parfaite n'est jamais réalisée d'une manière durable. Des modifications du couple résistant et ainsi que des variations de charges passives surviennent sans cesse et le rotor de la machine synchrone oscille perpétuellement autour d'une position d'équilibre.

En supposant que les variations soient assez lentes de sorte qu'on peut négliger les phénomènes transitoires.

Examinons le fonctionnement stable :

5.1 Stabilité statique :

Si nous éliminons toutes possibilités d'oscillations de la vitesse les équations de fonctionnement que l'on peut écrire pour le moteur synchrone définissent un équilibre statique indépendant du temps.

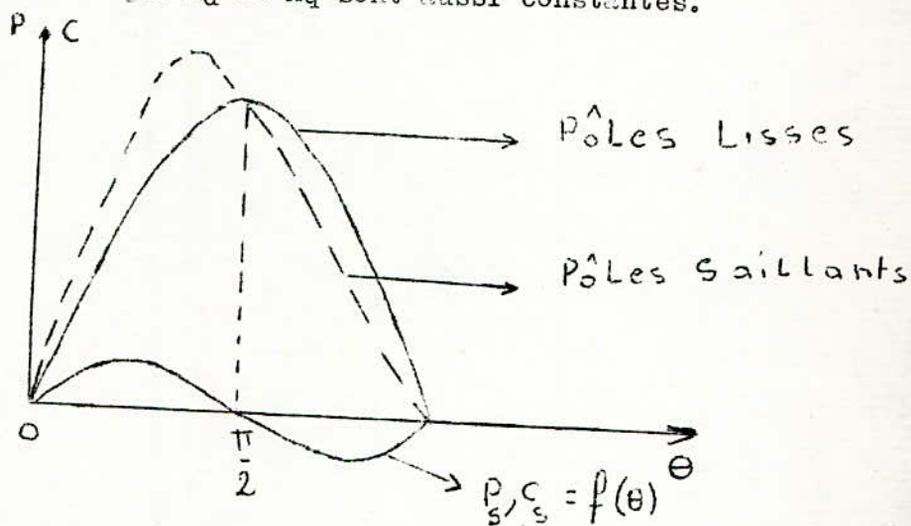
Le couple électromagnétique est déterminé par la puissance électromagnétique P_{em}

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{mE_o V}{X_d} \sin\theta + \frac{mV^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin^2\theta$$

C'est un couple moteur qui agit sur le rotor. Dans un moteur à pôles saillants ce qui est le cas, comme la puissance le couple C_{em} a deux composantes

$$C_{em} = C_p + C_s$$

Nous pouvons, maintenant, étant données les expressions des puissances, tracer la caractéristique angulaire, pour E_0 , V , et F , constantes. On admet que X_d et X_q sont aussi constantes.



Pour la machine à poles lisses la puissance ou le couple maximal est atteint pour $\theta = \frac{\pi}{2}$

Quant à la machine à poles saillants ce maximum est atteint pour une valeur $\theta < \frac{\pi}{2}$, à cause du terme P_s

Considérons les grandeurs E_0 , θ , F qui définissent l'état de fonctionnement du moteur synchrone.

a) La tension V et la fréquence F sont imposées de l'extérieur, par le réseau. L'opérateur agit rarement sur leurs valeurs.

b) Le déphasage interne dépend de l'excitation E_0 si V est fixé.

Seul l'excitation peut varier indépendamment des autres paramètres la puissance $P = f(\theta, E_0, V)$ ne dépend que du couple résistant appliqué au moteur ; en d'autres termes elle est indépendante des variables relatives au moteur lui-même. Il est même des cas où bien souvent l'opérateur ne peut intervenir sur la puissance et où il doit la subir.

Considérons l'expression de la puissance active :

$$\text{le premier terme } P_p = \frac{mE_oV}{X_d} \sin\theta$$

Détermine la composante principale ou fondamentale de la puissance active du moteur qui dépend de la tension du réseau et de l'excitation. Cette composante joue un rôle important.

$$\text{Le second terme } P_p = \frac{mV^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin^2\theta$$

Détermine la composante supplémentaire de la puissance active qui ne dépend pas de l'excitation du moteur.

En absence d'excitation ($E_o = 0$) une machine synchrone à pôles saillants ($X_q \neq X_d$) peut développer une puissance active :

$$P_s = \frac{mV^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin^2\theta$$

à condition de la maintenir au synchronisme et de développer un couple moteur parce que le flux de réaction d'induit tend à passer par le rotor (inducteur) par une voie à réluctance minimale c.à.d suivant l'axe longitudinal.

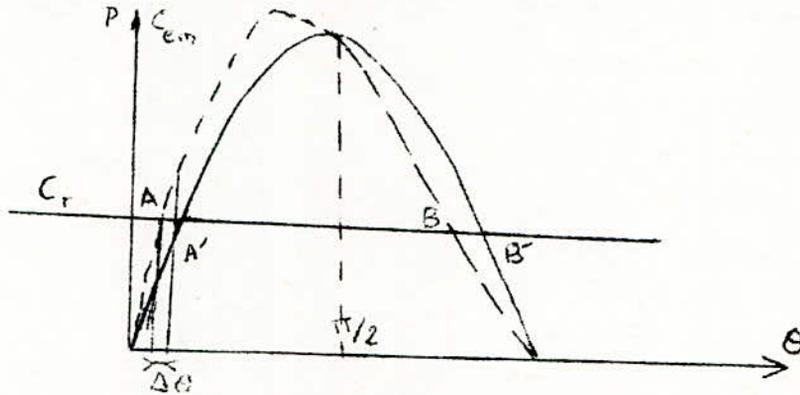
Dans une machine à pôles lisses $X_d = X_q$ et pour cette raison P_s est nulle.

Il nous reste alors :

$$P = P_p = \frac{mE_oV}{X_d} \sin\theta$$

La première condition à remplir pour qu'il y ait possibilité d'équilibre est que le couple moteur soit supérieur au couple résistant C_r que nous supposons constant et indépendant de l'angle interne θ

Ce couple C_r est représenté par une droite horizontale sur la figure.



La droite C_r coupe la caractéristique $C_{em} = f(\theta)$ en deux points distincts et détermine ainsi deux points ou régimes de fonctionnement. Mais un seul est stable.

En effet si par suite des oscillations du régime de travail, le rotor du moteur reçoit une certaine accélération, l'angle θ augmente d'une valeur $\Delta\theta$. Aux points A et A', à cette variation $\Delta\theta$ correspond un accroissement positif du couple moteur. Inversement aux points B et B' à l'accroissement positif θ correspond un accroissement négatif du couple moteur, l'angle θ augmentant d'avantage le moteur décrochera.

En examinant, les accroissements négatifs de l'angle θ nous aboutissons aux mêmes résultats.

Les points de fonctionnement dont seul le point A existe en régime normal sont situés de part et d'autre du couple maximal qui a pour valeur :

$$C_{em} = C_{max} = \frac{mE_0V\cos\theta}{X_d} + \frac{mV^2}{2} \left(\frac{I}{X_q} - \frac{I}{X_d} \right) \cos 2\theta$$

Il se dégage alors les principales idées suivantes :

Le couple électromagnétique présente un maximum au delà duquel il y a "décrochage", qui dépend de l'excitation. Le couple résistant doit être inférieur à ce maximum pour qu'il puisse y avoir équilibre stable ceci implique que l'excitation soit comprise entre un maximum et un minimum pour une puissance motrice donnée.

La condition d'équilibre étant réalisée pour que celui-ci soit stable il faut que la variation $\Delta\theta$ de l'angle θ entraîne une variation du même sens du couple C_{em}

Cette condition se traduit par :

$$\frac{d C_{em}}{d\theta} > 0 \quad \text{ou sous une autre forme :} \quad \frac{d P}{d\theta} > \theta$$

Ceci donne $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$

Pour un petit écart $\Delta\theta$ du régime permanent le déséquilibre de puissance ΔP qui détermine le retour de la machine au régime initial sera d'autant plus grand que la pente ascendante de la courbe $P = f(\theta)$ sera plus raide lors de la variation de θ .

Nous posons $P_s = \frac{dP}{d\theta}$, que nous appelons coefficient de puissance synchronisante et la grandeur $\Delta P = \frac{dP}{d\theta} \Delta\theta$ puissance synchronisante.

De même le coefficient du couple synchronisant $C_s = P_s / \Omega$
d'où

$$C_s = \frac{mE_o V}{\Omega X_d} \cos \theta + \frac{mV^2}{\Omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\theta$$

Pour un moteur à poles saillants.

C_s et P_s sont positifs pour les zones de fonctionnement stable et négatifs pour zones de fonctionnement instable. Le critère de stabilité statique devient

$$P_s > 0 \quad \text{ou} \quad C_s > 0$$

Ces coefficients sont considérés comme des grandeurs caractérisant les degrés de stabilité de la machine.

Plus P_s et C_s sont grands plus seront les forces qui tendent à faire revenir le rotor au régime permanent initial.

A la limite de la stabilité statique C_s et $P_s \rightarrow 0$

58). stabilité dynamique.

Essentiellement fonction de l'écart polaire θ , le couple d'une machine synchrone a toutes les caractéristiques d'un couple élastique. Ce caractère d'élasticité et l'inertie des machines constituent les éléments d'un système oscillant.

Dès qu'une machine est couplée avec une autre ou avec un réseau elle est susceptible de présenter des oscillations de vitesse autour de la vitesse constante de synchronisme.

Ces oscillations, par variation de l'écart polaire qui en résulte facilitent le décrochage de la machine, de sorte que les valeurs limites que l'on peut admettre pour θ sont en réalité très inférieures à celles qui découlent de l'analyse de la stabilité statique.

En second lieu ces oscillations mécaniques s'accompagnent d'oscillation du courant entraînant des fluctuations de la tension qui à partir d'un certain taux, deviennent inacceptables : il s'ensuit de fâcheuses répercussions dans le réseau de distribution.

Il faut distinguer :

1) Les oscillations libres ou propres, dues aux perturbations du régime.

2) Les oscillations forcées imposées par le couple appliqué à la machine lorsqu'il présente des variations cycliques.

5.2.4) Oscillations libres

Lorsque la vitesse de rotation est constante, le couple résistant est équilibré par le couple moteur, et l'équation d'équilibre prend une forme simple :

$$C_{em} \geq C_r$$

Lorsqu'une perturbation apparaît, faisant varier l'écart polaire θ d'une quantité $\theta' = \Delta\theta$ (angle électrique au même titre que θ) la vitesse mécanique n'est plus constante mais devient

$$\omega_i = \frac{\omega}{p} + \frac{d\delta}{dt}$$

étant l'écart angulaire mécanique $\theta' = p\delta$

Le couple électromagnétique varie lui aussi et vaut

$$C_{em} = \frac{E_0 V}{X_d} \sin(\theta + \theta') + \frac{mV^2}{2\Omega_c X_q X_d} (\underline{I} - \underline{I}') \sin 2(\theta + \theta')$$

En principe θ' est une quantité très petite mais finie, nous pourrions sans commettre une grande erreur remplacer $\cos(2\theta')$ et $\cos(\theta')$ par 1, $\sin(2\theta')$ et $\sin \theta'$ par $2\theta'$ ou θ' et Ω_c par Ω de synchronisme

$$C_{em} = \left[\frac{E_0 V}{X_d} \sin \theta + \theta \frac{E_0 V}{X_d} \cos \theta + \frac{V^2}{2} \frac{(\underline{I} - \underline{I}')}{X_q X_d} \sin 2\theta \right] + \frac{mV^2}{2\Omega} \frac{(\underline{I} - \underline{I}')}{X_q X_d} 2\theta' \cos 2\theta$$

Le couple électromagnétique varie donc de la quantité

$$m \left[\frac{E_0 V}{X_d} \sin \theta + \frac{V^2}{X_q X_d} (\underline{I} - \underline{I}') \cos 2\theta \right] \times \theta'$$

qui s'écrit $C_s \theta'$ où C_s est le coefficient du couple synchronisant que nous avons défini.

La variation de vitesse entraîne un couple cinétique égal à $I \frac{d\Omega_i}{dt}$, I étant le moment d'inertie des pièces tournantes, qui fait

$$\theta' = P \quad \text{===} \quad C_s \theta' = P C_s \delta$$

Ainsi tout écart résultant d'une perturbation engendre un couple dit synchronisant qui tend à rétablir le synchronisme.

Nous avons donc :

$$\frac{I d^2 \delta}{dt^2} + PC_s \delta = 0$$

ou bien

$$I \frac{d^2 \delta}{dt^2} + PC_s \delta = 0$$

C'est l'équation d'un mouvement pendulaire qui correspond à la période

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{PC_s}}$$

Nous obtenons pour une machine à poles saillants

$$T = \frac{2\pi}{P} \sqrt{\frac{I}{\frac{mE_0 V}{X_d} \cos \theta + V^2 \cos 2\theta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)}}$$

Pour un observateur tournant à la vitesse de synchronisme Ω ce mouvement se traduit par une oscillation du rotor autour d'une position fixe et d'une façon sonore. Le bruit de la machine présente des maxima et des minima : c'est pour cela que ces oscillations sont vulgairement qualifiées de "pompage".

La période T dépend de E_0 , θ et de la tension V.

D'une façon générale l'expérience prouve que la période diminue quand l'excitation augmente. Au-dessus d'une certaine valeur de cette période les oscillations disparaissent complètement grâce aux amortisseurs.

Toutefois, on constate dans l'industrie, que les moteurs synchrones de faible et moyenne puissance, même munis d'amortisseurs, amorcent spontanément des oscillations qui sont souvent extrêmement gênantes et compromettent totalement leur stabilité.

Ces oscillations prennent naissance quand le moteur est sous-excité et même lorsqu'il fonctionne à $\cos \varphi = 1$

Elles disparaissent même à vide lorsqu'on passe en surexcitation.

Effet des oscillations sur le maintien ou la reprise du synchronisme

L'écart angulaire θ' en s'ajoutant à l'angle interne θ diminue la valeur permise pour cet angle, limite au-delà de laquelle le moteur décroche. La stabilité vi-à-vis du décrochage doit s'exprimer à partir du couple en régime dynamique.

Il faut que le couple soit croissant quand l'écart pôleaire dynamique atteint sa valeur maximale $\theta + \theta'_m$ où θ'_m est l'amplitude de l'oscillation:

$$\left(\frac{d C_{em}}{d \theta} \right)_{\theta + \theta'_m} > 0$$

Pour un moteur à pôles lisses nous avons $\theta + \theta'_m < \pi/2$

Quant au moteur à pôles saillants, la limite de stabilité est encore beaucoup plus petite que dans le cas statique qui était inférieure à $\pi/2$.

θ'_m dépend essentiellement de l'importance des variations brusques de charge auxquelles la machine est susceptible d'être soumise.

Soit ΔP la variation de puissance électromagnétique qui correspond à un amortissement mis à part, à la puissance synchronisante.

$$\Delta P = p_s \theta'$$

$$\Delta P \geq \left[(m E_o V \cos \theta) / X_d + m V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos \theta \right] \theta'_M$$

$$\theta'_M \leq \Delta P / \left(m E_o V \cos \theta + m V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos \theta \right)$$

Nous voyons encore à l'examen de cette formule une raison de plus à surexciter la machine.

5.2.2) Oscillations forcées :

Dans la plupart des cas, on suppose que le couple appliqué à l'arbre de la machine est constant, pouvant toutefois présenter des variations brusques. Il est des cas où ce couple subit des variations cycliques, par exemple moteurs synchrones entraînant des machines à pistons, tels que Pompes, Compresseurs. Le mouvement régulier entraîne des oscillations qui se superposent aux oscillations libres : ce sont des oscillations forcées. Ces dernières peuvent créer la résonance dangereuse, fatalement le moteur décrochera.

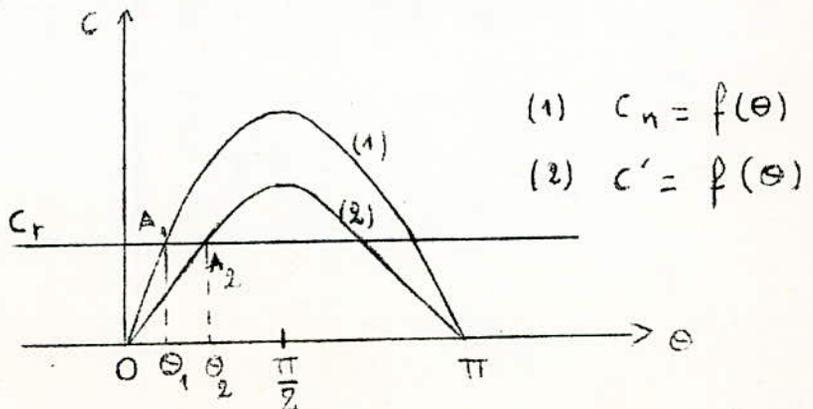
5.3) Rupture de synchronisme - Possibilité de réaccrochage.

Un phénomène important qui se produit très souvent lors du fonctionnement est la chute de tension ou la surtension aux bornes du moteur, durant quelques instants. Ces troubles affectant le réseau (court-circuit, délestage) permettent rapidement le décrochage du moteur. Ce type de perturbation est très fréquent dans la pratique.

Lorsque le moteur fonctionne en régime normal sous tension V_n le couple C_{em} nominal équilibre le couple résistant C_r

$$C_n = C_{em} = \frac{mE_0 V_n}{X_d \Omega} \sin \theta + \frac{mV^2}{2\omega^2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \geq C_r$$

Le point de fonctionnement A_1 correspond à θ_1



La tension baisse et devient $V' < V_n$ le couple $C_{em} = C'$ devient inférieur à C_n .

Supposons qu'à la limite $C' = C_r$ le point A_1 passe en A_2 l'angle θ_2 se rapproche de la limite de stabilité : le rotor se met à osciller.

La tension continue de baisser, il arrivera un moment où $C_{em} \leq C_r$ l'écart angulaire $\theta + \theta_m$ (θ_m amplitude d'oscillation) atteint la limite de stabilité :

Le moteur décroche rapidement.

Ce cas de désaccrochage se ramène donc au cas des oscillations libres.

Si nous surexcitons le moteur le couple C_{em} augmentera malgré la baisse de tension c.à.d l'excitation compensera la chute de tension.

Le point de fonctionnement restera dans la zone de fonctionnement stable : les oscillations sont amorties.

Le cas de surtension sera résolu en désexcitant le moteur.

5) Fonctionnement à facteur de puissance unitaire

Les diagrammes de tension du moteur synchrone que nous avons vus, montrent que l'on peut obtenir un régime de fonctionnement à $\cos \varphi = 1$, en agissant sur l'excitation, pour la charge voulue.

Plus le moteur sera surexcité, plus importante sera la charge pour laquelle $\cos \varphi = 1$

9) Démarrage

La vitesse du moteur synchrone étant liée à la fréquence du réseau qui est habituellement constante, implique une marche synchrone.

La mise en marche jusqu'à la vitesse de synchronisme, puis le couplage en parallèle avec le réseau nécessite un procédé du démarrage.

La méthode la plus employée est le démarrage en asynchrone.

Elle est considérée comme un procédé normal de démarrage du moteur synchrone. Les machines synchrones, comportent une cage appelée amortisseur ou de démarrage. En absence d'excitation on se trouve en présence d'une machine asynchrone à rotor en court-circuit.

Lors du démarrage l'enroulement d'excitation doit être court-circuité ou fermé sur une résistance car, possédant un nombre de spires important, il est le siège d'une F_{em} induite très élevée qui pourrait provoquer le claquage des isolants et la mise hors service du moteur.

Mais ce court-circuit de l'enroulement d'excitation provoque un couple qui risque de bloquer le moteur à la demi-vitesse de synchronisme :

voyons ce qui se passe :

Supposons que la cage de démarrage n'existe pas, la machine avec inducteur court-circuité se présente comme un moteur asynchrone avec enroulements primaire triphasé et secondaire monophasé. Ce dernier engendre un champ pulsatoire monophasé de fréquence $gF_I = F_2$. Selon la règle générale, décomposable en un champ direct et inverse. La vitesse de chacun de ces champs par rapport au rotor $N_s - N$ où N_s est la vitesse de rotation du champ statorique et N est la vitesse du rotor.

Le champ direct tourne par rapport au stator à la vitesse $N_d = N + (N_s - N) = N_s$, c.à.d au synchronisme.

Le 2^e champ tourne à

$$N_{in} = N - (N_s - N) = 2N - N_s = N_s (I - 2g)$$

La fréquence est $F_{in} = PN_{in} = PN_s (I - 2g) = F_I (I - 2g)$

De cette façon lorsque le rotor tourne à $\frac{N_s}{2}$ c.à.d avec $g = 0,5$ $F_{in} = 0$, le champ inverse est alors immobile par rapport au stator.

Si le rotor tourne à $N < \frac{N_s}{2}$ un courant est induit dans le

rotor à la fréquence $F_2 > F_1/2$. Le champ synchrone inverse tournera par rapport au stator en sens opposé. Il en résulte un couple complémentaire dû au courant induit qui entraîne le moteur dans le sens de rotation du rotor : ce couple est "Moteur".

Si le rotor tourne à $N < \frac{N_s}{2}$ nous aurons $F_2 > F_1/2$ et le couple produit tournera dans le sens du rotor et son couple sera dirigé en sens opposé à la rotation : c'est un couple résistant.

Pour $N = \frac{N_s}{2}$ le champ est immobile et les couples complémentaires sont nulles car aucun courant n'est induit.

Donc dès $g > 0,5$ c.à.d $N > \frac{N_s}{2}$ le couple créé par le système de court-circuit de l'excitateur est résistant. Ce phénomène s'appelle branchement monoaxial qu'on obtient en fermant l'inducteur sur une résistante importante que seule l'expérience permet de déterminer.

Conclusion:

IL ressort de cette dernière partie où nous venons d'analyser brièvement le fonctionnement du moteur synchrone, que l'excitation joue un rôle important principalement sur:

- la stabilité de fonctionnement
- le facteur de puissance
- reprise du synchronisme
- démarrage du moteur

7. 8. Moteur synchrone et ses applications :

Une vitesse mathématiquement indépendante de la charge est la principale qualité du moteur synchrone. C'est ^{un} moteur qui au point de vue régulation n'a pas d'équivalent.

Dans la catégorie des puissances moyennes, ils comportent en général 4 à 6 ou 8 pôles, car la vitesse demandée par leur utilisation est assez importante. Souvent on utilise des moteurs à 4 pôles (1 500 t_r/mn à 50 Hz et 1 800 t_r/mn à 60 Hz). Ce nombre de pôles est le plus favorable pour le dimensionnement de la machine car dans l'industrie principale critère de choix est surtout le prix, ensuite vient l'encombrement.

Les moteurs à 2 pôles peuvent entraîner directement des pompes ou des compresseurs, à 3 000 t_r/mn à 50 Hz et 3 600 t_r/mn à 60 Hz.

A 1 500 t_r/mn , les applications sont nombreuses sauf dans le cas ci-dessus et dans le cas où les machines entraînées nécessitent une très basse vitesse. On n'intercale pas de réducteurs de vitesse mais on les entraîne avec des moteurs de grande puissance qui ont en général eux-même une vitesse lente. Ceci est imposé par le fait que les machines à entraînement lent sont en général de grande puissance.

A 1 000 t_r/mn , 750 t_r/mn , des fois moins, on accouple directement des pompes, des broyeurs, des malaxeurs, et des ventilateurs.

Mais ici une question encore se pose :

Pourquoi ne pas choisir un moteur asynchrone de même puissance ?

Un moteur est destiné à entraîner une machine dans des conditions bien déterminées que l'on trouve dans un cahier de charge avec des spécifications précises.

Beaucoup de conditions n'influent pas ou peu sur le choix du type de moteur "asynchrone ou synchrone", tel que la tension d'alimentation, ambiance, protection contre les intempéries, ventilations, types d'accouplement etc...

D'autres au contraire sont à prendre en considération pour le choix :

- vitesse de rotation : en tenant compte ou non d'un réducteur ou multiplicateur.

- fréquences des démarrages : peut-on effectuer des démarrages répétés ou bien le moteur doit-il fonctionner en régime permanent sans décrocher lors de difficultés temporaires ?

- puissance du réseau d'alimentation : Il s'agit ici de la puissance de court-circuit du réseau qui détermine les chutes de tensions correspondant à un appel brusque de puissance réactive au démarrage. Il est important aussi de savoir si le réseau a une capacité de fournir du réactif ou si au contraire il est nécessaire ou économiquement favorable de lui en fournir.

Si un choix est encore possible ce sont alors essentiellement les critères économiques qui interviendront avec examen comparatif

- Coût d'achat du moteur et son appareillage de commande et de contrôle.

- Coût de l'énergie consommée, active, réactive ainsi que les frais annexes d'entretien et d'installation.

En première approximation on peut dire qu'à $3\ 000 t_r/mn$ le moteur asynchrone s'impose. En effet le moteur synchrone avec cette vitesse est réalisé dans la technologie d'un turbo-alternateur, donc construction très chère.

En dessous de $3\ 000 t_r/mn$ on aura au contraire souvent intérêt à choisir un moteur synchrone, surtout si l'utilisation est continue.

En effet pour de grande polarité, la consommation de réactif devient importante par un moteur asynchrone, alors que l'homologue synchrone peut lui-même fournir de l'énergie réactive. Cependant lorsque la consommation de réactif est faible vis à vis de la production locale, on peut admettre l'utilisation du moteur synchrone.

Critère économique : c'est le plus important on se penche sur le prix de l'énergie consommée. Ici rentre en ligne de compte essentiellement le rendement et facteur de puissance.

Les rendements d'un moteur synchrone et asynchrone de même puissance sont assez proches, tout au moins pour des vitesses élevées

Aux basses vitesses le moteur synchrone prend nettement l'avantage.

Les facteurs de puissance, $\cos \phi$, sont toujours en faveur du moteur synchrone et là un élément supplémentaire doit être pris en considération dans de nombreux cas à savoir les primes ou pénalités que les fournisseurs d'énergie appliquent en fonction du $\cos \phi$ global d'installation. C'est assez souvent l'argument décisif qui peut décider de l'installation d'une machine synchrone, alors que les autres critères pourraient faire pencher vers la solution asynchrone.

Le fonctionnement le plus favorable correspond à un facteur de puissance unitaire. Le moteur n'absorbe ni ne produit du réactif. Fournir de l'énergie réactive au réseau c'est demander une puissance importante à l'excitation, solution qui est chère devant la méthode habituelle de compensation d'un réseau par la centrale et par batteries de condensateurs.

Cependant si le réseau est faible par exemple une ligne qui alimente directement une usine, un fonctionnement en surexcitation des moteurs, peut s'avérer nécessaire en plus des batteries de condensateurs.

IV- EXCITATION STATIQUE

L'avantage très important des moteurs synchrones c'est de pouvoir fonctionner normalement, lorsque la tension chute dans le réseau grâce à une surexcitation qui peut durer jusqu'à 2 mn.

I. Introduction.

Nous avons, dans une première étape, passé en revue et analysé les différentes méthodes d'excitation de la comparaison qui a été faite entre elles, il ressortait que les convertisseurs statiques alternatif, continu, étaient ceux qui répondaient le mieux à la construction d'une bonne excitation.

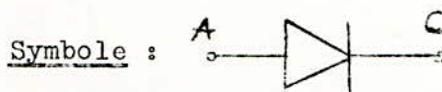
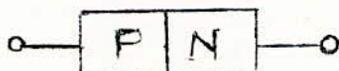
Dans la 3ème partie, nous avons expliqué le rôle de l'excitation dans le fonctionnement de la machine.

Dans les pages qui suivent nous envisageons un système d'excitation statique.

2. Rappel sur les semi-conducteurs :

2.1 Diode

Semi-conducteur constitué uniquement par une jonction PN



- Fonctionnement : Selon le montage de la jonction, on distingue le redresseur à polarité directe et à polarité inverse.

Une diode à polarité directe sera conductrice durant l'alternance positive de la tension alternative il y aura conduction pendant l'alternance négative pour un montage en polarité inverse.

L'amorçage est naturel.

2.2. Thyristor.

a) Définition : dispositif à semi-conducteur bistable possédant 3 jonctions ou plus, qui peut être commuté de l'état bloqué à l'état passant et vice-versa.

Il comporte comme les diodes une anode, une cathode mais possède en outre une électrode de commande appelée aussi GACHETTE, ou PORTE

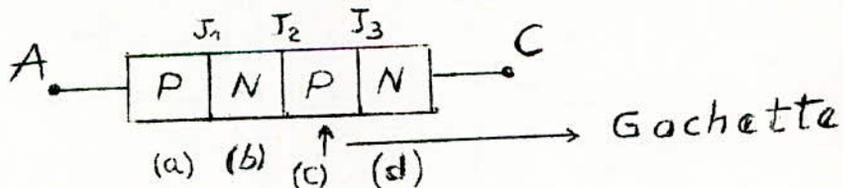
- Thyristor type P

Thyristor dans lequel la commande est appliquée à la région P la plus proche de la cathode et qui est normalement commutée à l'état passant en appliquant un signal positif entre les bornes de la gachette et de la cathode.

Ce type P est le plus courant, toutefois il existe le type N.

b) Constitution :

Qu'ils soient du type P ou du type N, les thyristors sont constitués par un ensemble de 4 couches alternées.



On distingue :

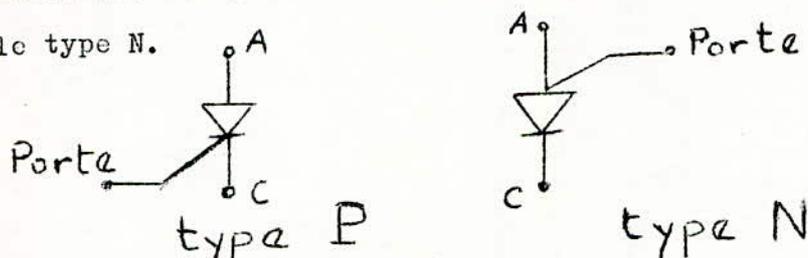
- La couche d'anode (a) qui n'est pas fortement dopée et d'épaisseur moyenne.
- la couche de blocage (b) très peu dopée et se trouve être la plus épaisse des quatre.
- la couche de commande (c) est mince, et son dopage est comparable à celui de la couche d'anode.
- la couche de cathode (d) est fort peu épaisse et très fortement dopée.

L'ensemble de ces quatre couches détermine 3 jonctions :

$J_1 \ J_2 \ J_3$

c) Représentation symbolique :

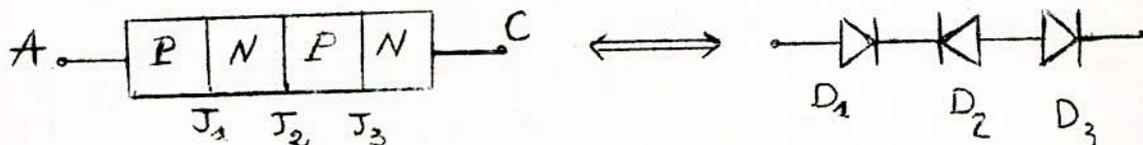
Le symbole employé est celui des redresseurs (diode) auquel on fait figurer une connexion supplémentaire pour l'électrode de commande qui est placée coté cathode pour le type P et coté anode pour le type N.



d) Fonctionnement :

Le principe de fonctionnement des thyristors peut être comparé à celui d'un ensemble de 3 diodes de redressement en série.

On distingue le comportement à l'état bloqué, le comportement au basculement et d'autre part le comportement au blocage.



Si nous appliquons une tension positive sur l'anode du dispositif, les diodes D_1 et D_3 se trouvent dans le sens passant ; la jonction centrale J_2 représentée par la diode D_2 se trouve polarisée en inverse.

Le courant qui peut traverser l'ensemble est le courant de fuite inverse de la diode D_2 .

Le thyristor est dit à l'état bloqué.

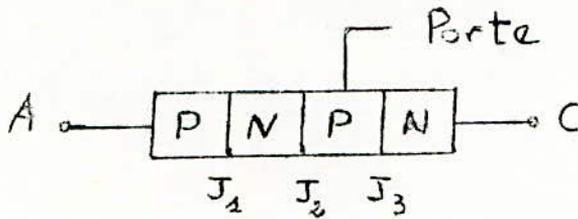
Si les polarités de la tension sont inversées, seule la diode D_2 se trouve dans le sens passant, les jonctions J_1 ET J_3 étant polarisées en inverse.

L'ensemble présente donc toujours une grande résistance interne, seule le courant de fuite inverse des diodes D_1 et D_3 circule.

e) Comportement au basculement :

Le passage de l'état bloqué à l'état passant, conducteur est dénommé basculement, on amorçage ou déclenchement du thyristor.

Deux solutions peuvent être employées pour rendre le système conducteur.



1er) Augmenter la tension anode-cathode jusqu'à ce que le claquage de la jonction J_2 s'en suive.

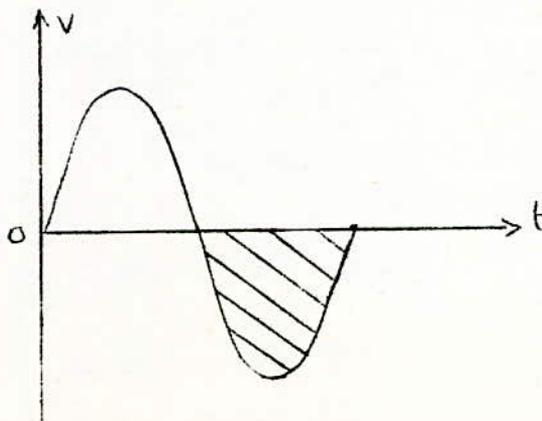
2è) Appliquer une impulsion positive entre J_2 et J_3 . Il en résultera un effondrement de la barrière de potentiel de J_2 et de la résistance directe du thyristor : le courant direct du thyristor atteint sa pleine valeur.

Le système devient alors conducteur.

En pratique l'amorçage est toujours obtenu par le courant de gachette.

f) Alimentation en alternatif :

Si la tension anode-cathode est de forme alternative la conduction dans le circuit s'arrêtera dès que la polarité du signal s'inverse. L'anode se trouve négative par rapport à la cathode (zone hachurée).



Quand la polarité de l'anode redeviendra positive par rapport à la cathode, et si aucun courant de commande n'est appliqué à nouveau sur la porte le système restera à l'état bloqué.

IV.3. Différents types de convertisseurs

On distingue deux grandes catégories, monophasé ou triphasé, suivant la puissance qui leur est demandée.

Rarement polyphasé (plus de 3 phases) car les transformateurs de cette catégorie sont chers.

De plus la puissance demandée à l'excitation d'une machine synchrone est faible devant la puissance de la machine.

3.1. Montages monophasés

En matière de monophasé, il existe deux catégories principales de schémas que nous allons analyser successivement.

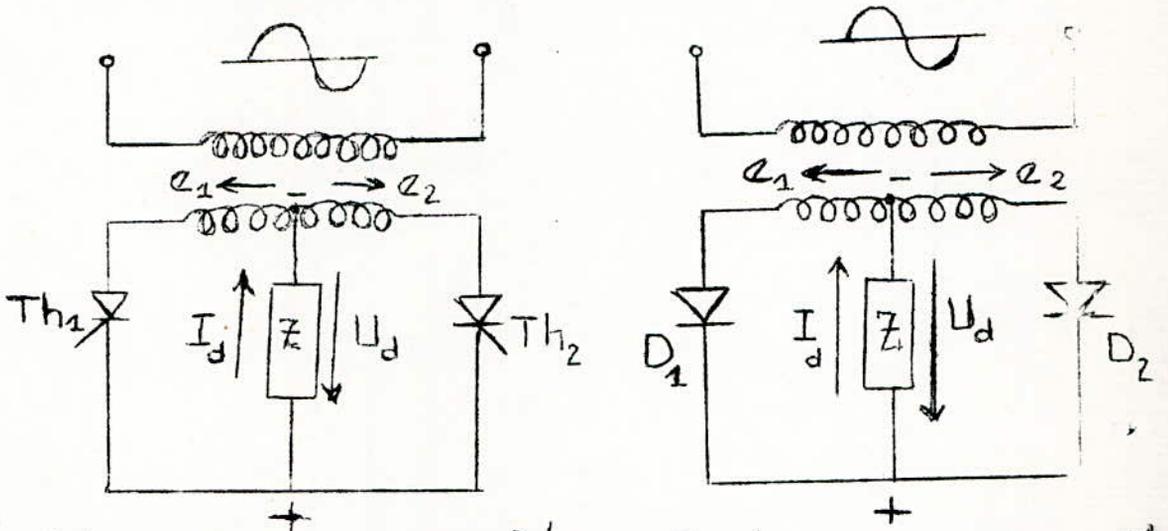
a) Montage à point milieu :

C'est le plus simple des montages monophasés à deux alternances.

Dans ce montage à neutre sorti, les extrémités libres des enroulements secondaires du transformateur sont reliés aux anodes des soupapes.

Les cathodes réunies forment le pôle + le point milieu du transformateur forme le pôle -

Le montage peut être commandé ou non commandé.



Montage commandé

Montage non commandé

Z: charge inductive

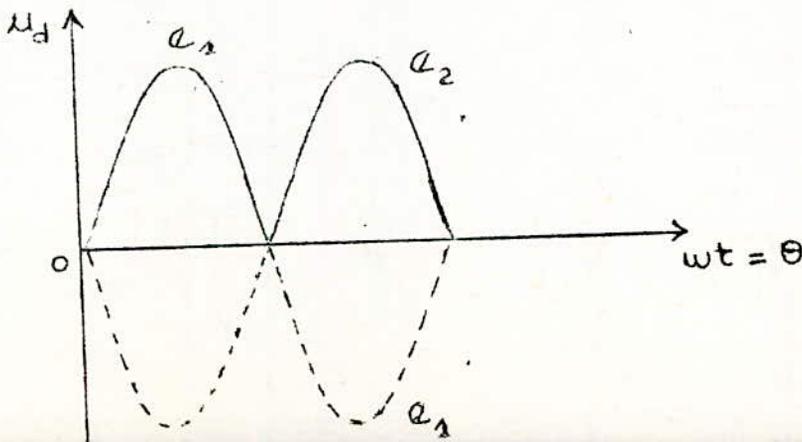
Soit e_1 et e_2 les F.E.M des 2 enroulements du secondaire :

$$e_1 = E_m \sin \theta$$

$$e_2 = E_m \sin \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\text{avec } \theta = \omega t$$

- Pour le pont à diode l'allure de la tension redressée est la suivante :



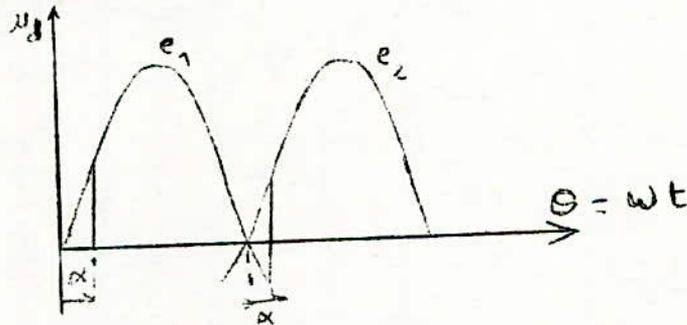
La valeur moyenne de la tension redressée est :

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_m \sin \theta d\theta = \frac{2}{\pi} E_m$$

$$U_d = 0,637 E_m$$

Dans le montage commandé, les soupapes permettent un décalage de l'instant d'amorçage d'un angle α par rapport à l'amorçage naturel qui correspond au passage par zéro, dans le sens positif, de la tension.

Nous obtenons :



La tension moyenne redressée :

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} E_m \sin \theta d\theta$$

$$U_d = \frac{2}{\pi} E_m \cos \alpha$$

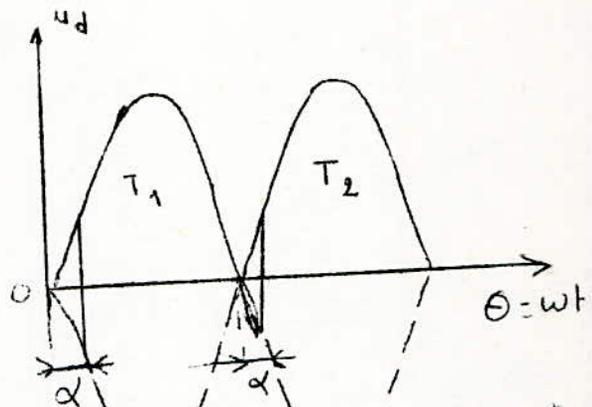
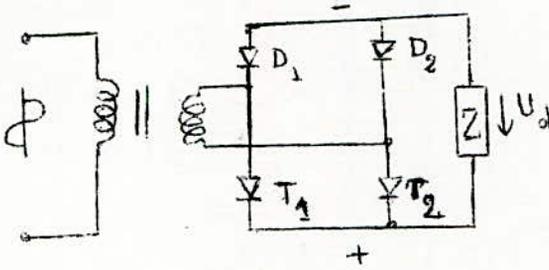
Nous avons négligé la chute de tension due à la commutation.

b) Montage en pont de Graëtz

C'est aussi un montage bialternance.

Pont semi-commandé :

Pour simplifier le circuit de commande, on remplace seulement deux diodes par deux thyristors.



Tension moyenne redressée :

$$U_d = \frac{2E_m}{\pi} \cos \alpha$$

Les propriétés des montages en pont de Graëtz et à point milieu sont pratiquement identiques.

3.2. Montages triphasés

Ici encore nous trouvons 2 catégories de schémas :

3.2.1. Montage triphasé à voie simple.

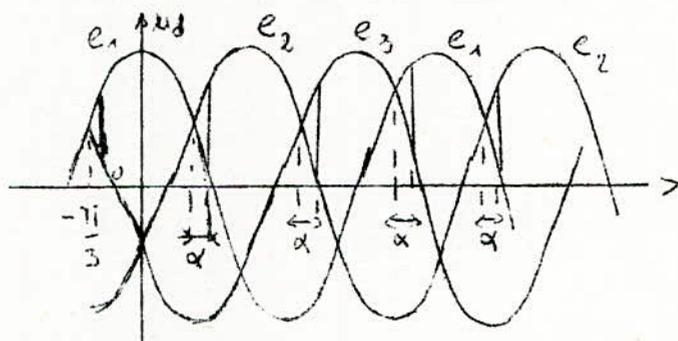
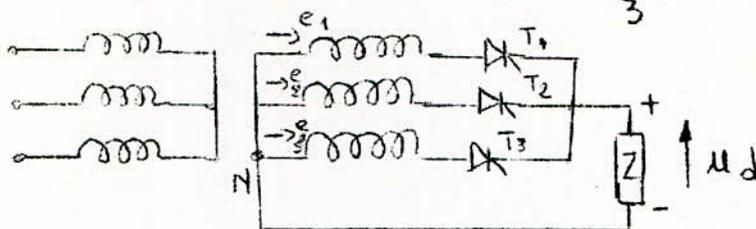
C'est le plus simple des montages triphasés, il peut être commandé ou non.

- Montage commandé :

$$e_1 = E_m \cos \theta$$

$$e_2 = E_m \cos \left(\theta - 2 \frac{\pi}{3} \right)$$

$$e_3 = E_m \cos \left(\theta + 2 \frac{\pi}{3} \right)$$



Dans ce montage l'amorçage naturel se fait tous les $\frac{\pi}{3}$ la soupape non commandée qui a le potentiel d'anode le plus élevé est passante. Pour les soupapes commandées l'amorçage peut se faire à partir de cet instant

La tension redressée comporte 3 maximums par période du réseau, donc cette tension a une fréquence de 3 f.

La valeur moyenne de la tension redressée est :

$$U_d = \frac{E_m}{2\pi} \int_{-\pi+\alpha}^{\pi+\alpha} \frac{3}{2} E_m \cos \theta d\theta$$

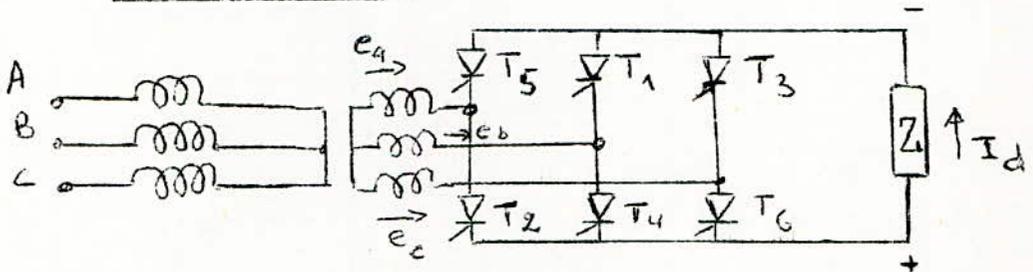
$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} E_m \cos \alpha \approx 0,83 E_m \cos \alpha$$

Dans ce montage la tension redressée est nettement supérieure à celle obtenue pour les montages monophasés.

3.2.2.) Montage triphasé double voie ou pont de Graëtz triphasé

On peut rencontrer les montages complètement commandés, semi-commandés, ou non commandés.

Montage commandé :



Dans ces montages les enroulements du transformateur peuvent être couplés en étoile ou en triangle.

On distingue 2 groupes de soupapes :

- groupe paire : les cathodes sont reliées entr'elles
- groupe impaire : les anodes sont reliées entr'elles

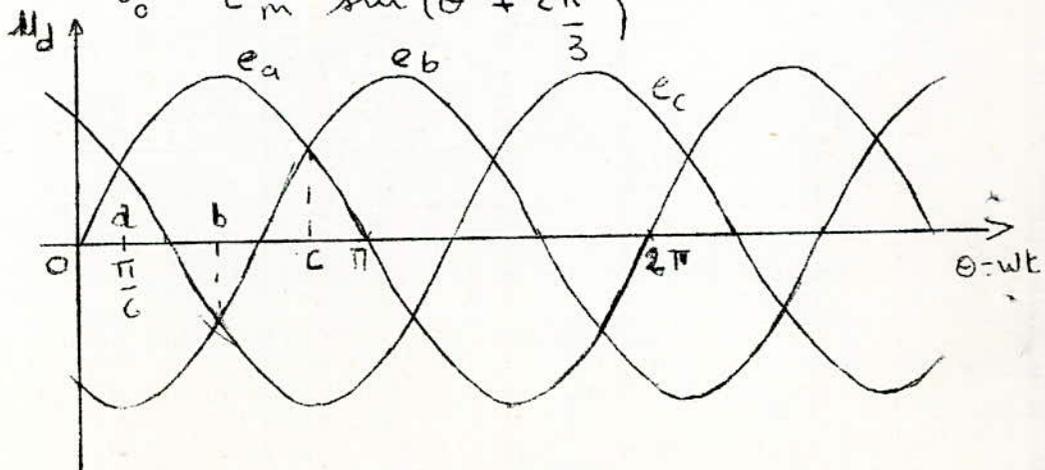
a) Pont de Graëtz triphasé non commandé :

Les soupapes sont des diodes. Les tensions de phase du transformateur sont :

$$e_a = E_m \sin \theta$$

$$e_b = E_m \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$e_c = E_m \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$



Dans le groupe paire ou groupe cathodique, pendant chaque tiers de période de fonctionnement la soupape à potentiel d'anode le plus élevé est passante.

Dans le groupe impair ou anodique durant la même période de temps la soupape dont le potentiel de cathode est le plus négatif est passante.

L'amorçage d'une soupape appartenant au groupe cathodique a lieu à l'instant d'intersection des portions positives correspondantes des sinusoides de tensions appliquées (voir fig. 2)

Celui des soupapes du groupe anodique a lieu à l'instant d'intersection des portions négatives des sinusoides. C'est ce que l'on appelle "L'AMORÇAGE NATUREL"

Supposons encore la commutation instantanée.

D'après ce qui précède, nous constatons qu'à tout instant deux soupapes, une du groupe cathodique, l'autre du groupe anodique laissent passer le courant :

L'alternance de fonctionnement des différentes soupapes durant une période de la tension alternative du réseau peut être suivie sur le diagramme de tension de phase.

Considérons un exemple.

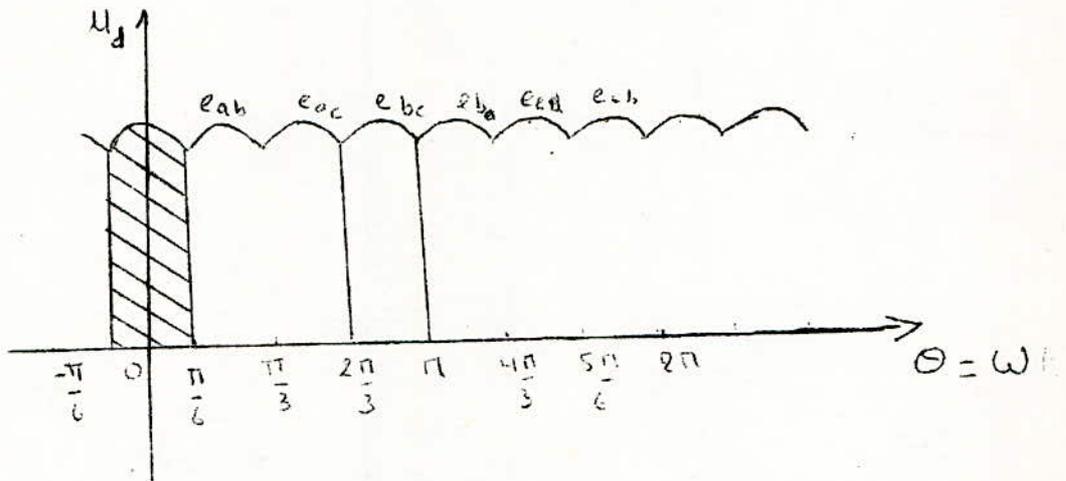
Sur l'intervalle ab de l'axe θ , le courant passe par la soupape N° 2 (phase A) ayant le potentiel d'anode le plus élevé dans le groupe cathodique, et par la soupape I (phase B) à potentiel le plus négatif du groupe anodique.

A l'instant donné par le point b la soupape 3 entre en jeu tandis que la II continue de conduire pendant $(1/6$ de période) jusqu'au point c . Ensuite la soupape II est remplacée par IV. chaque soupape conduit durant $1/3$ de période.

L'ordre de conduction des soupapes est alors le suivant :

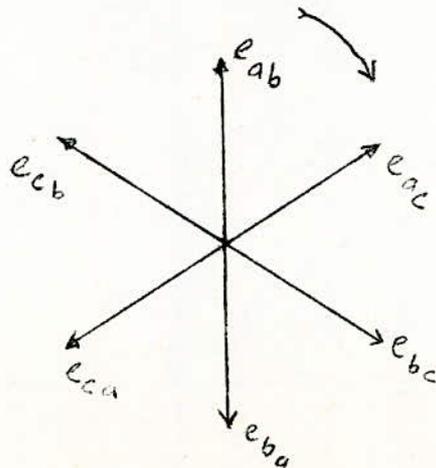
2	4	6	2
1	3	5	1

Nous obtenons une tension redressée ayant la forme suivante



La tension redressée U_d est déterminée par la différence des tensions de phase des enroulements du transformateur fonctionnant pendant la partie donnée de la période.

U_d est formée de portions de sinusoïdes correspondant aux tensions composées suivant l'ordre de succession de phase d'un système hexaphasé :



La tension redressée a pour valeur moyenne, en négligeant les chutes de tension.

$$U_d = \frac{E_m}{2\pi/6} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{3} \cos \theta d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m$$

$$U_d = 2,34 U_2 \text{ avec } U_2 \text{ tension de phase}$$

Le rapport suffisamment grand (2,34) entre la tension de phase U_2 et la tension redressée U_d est un sérieux avantage que ce montage présente sur ceux, vus, jusqu'à maintenant.

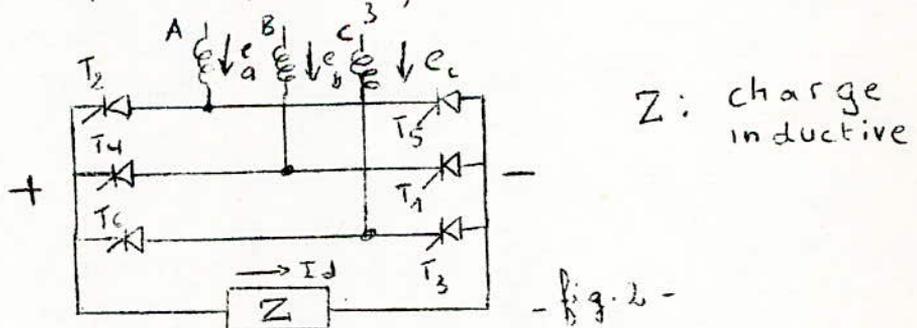
b) Pont de Graëtz triphasé commande :

Le schéma de montage est identique au précédent. Ses soupapes sont des thyristors. Leur blocage est naturel (c.f rappels). Les tensions de phase ont toujours pour expression :

$$e_a = E_m \sin \theta$$

$$e_b = E_m \sin(\theta - 2\pi/3)$$

$$e_c = E_m \sin(\theta + 2\pi/3)$$

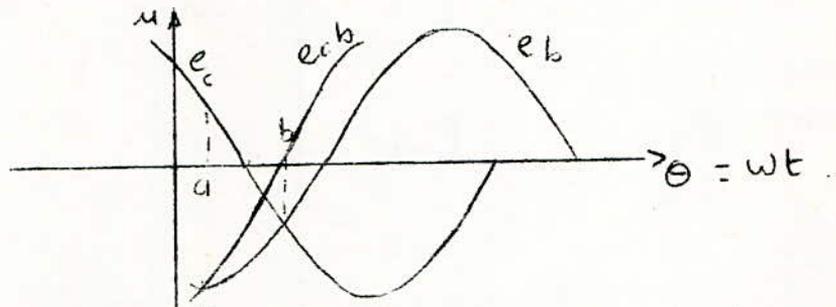


Pour que la soupape ayant le potentiel le plus élevé à l'anode (groupe paire) ou le potentiel de cathode le plus négatif (groupe impaire) puissent être passante, il est nécessaire d'envoyer une impulsion de commande sur la gachette. A partir de l'instant d'amorçage naturel, on comptera les valeurs d'angle d'amorçage

(On prendra par exemple $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_c$)

Supposons T_2, T_I amorcés. A l'instant correspondant au point b T_I se bloque "naturellement". L'étape de conduction de T_I et T_2 correspond à l'intervalle a, b (fig. 2) et la tension aux bornes de T_3 durant cette étape est $e_b - e_c = e_{cb}$

$$e_{cb} = -\sqrt{3} E_m \cos \theta$$



A partir de $\theta = \frac{\pi}{2}$ correspond au point b la tension aux bornes de T_3 devient positive. Une impulsion amorcera la soupape T_3 à l'instant $\theta = \frac{\pi}{2} + \alpha$. A ce moment 2 soupapes du groupe anodique (T_I et T_3) sont débloquentées (T_2 toujours passante) ; 2 phases du transformateur sont court-circuitées (b et c) : Il y a commutation de T_I sur T_3 . Après une autre combinaison de soupapes participe à la conduction du courant. Cette fois ce sont T_2 et T_3

On constate donc que nous avons successivement

Une étape où 2 soupapes conduisent sans commutation (T_I, T_2)

" " où 3 soupapes participent à la conduction

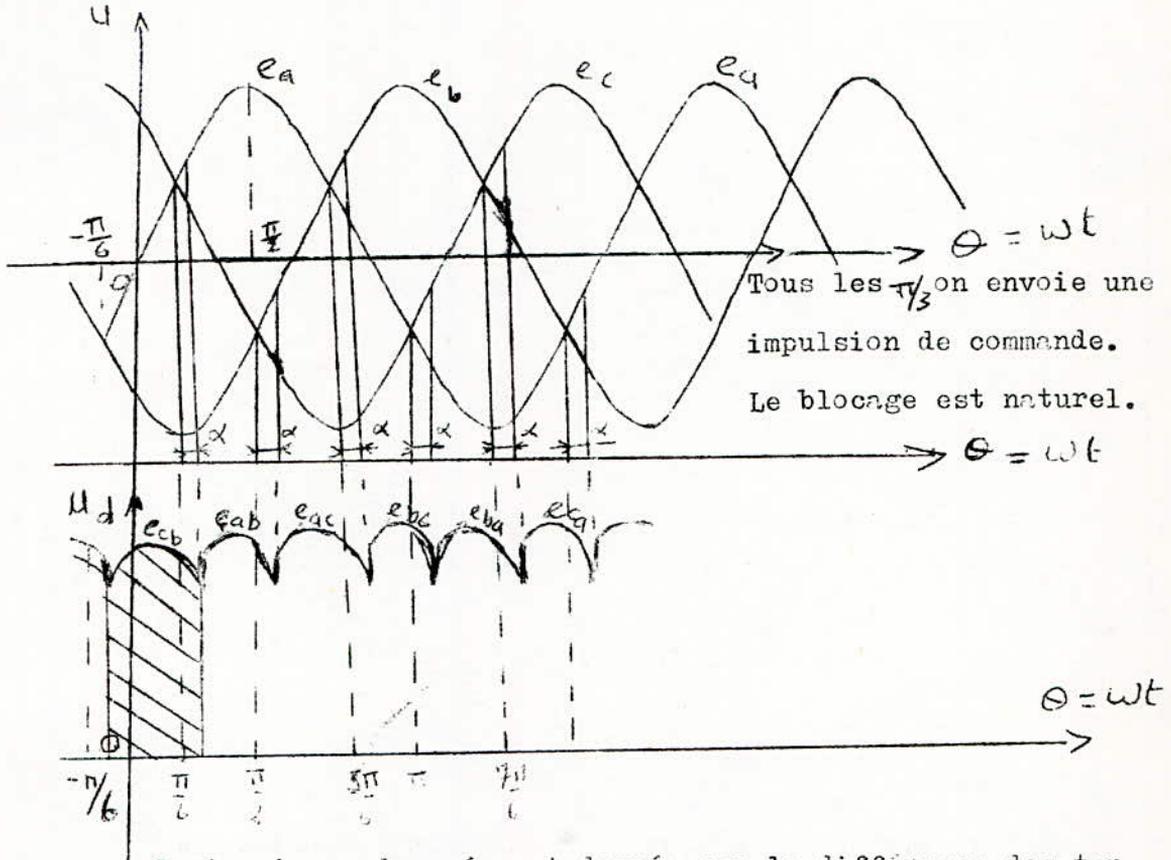
(T_2, T_I, T_3). C'est l'étape de commutation du courant d'une soupape sur l'autre et d'une phase du transformateur sur l'autre sur la fig. 2

Nous voyons les moments d'amorçage des soupapes se succèdent tous les $\frac{\pi}{3}$ qui correspond à l'intervalle de répétition du phénomène.

C'est le régime normal de fonctionnement dit 2-3

$$\text{où } 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{3}$$

Nous obtenons une courbe de tension redressée, formée par des portions de sinusofide.



La tension redressée est donnée par la différence des tensions de phase des enroulements du transformateur fonctionnant pendant la partie donnée de période.

La valeur moyenne de cette tension redressée est :

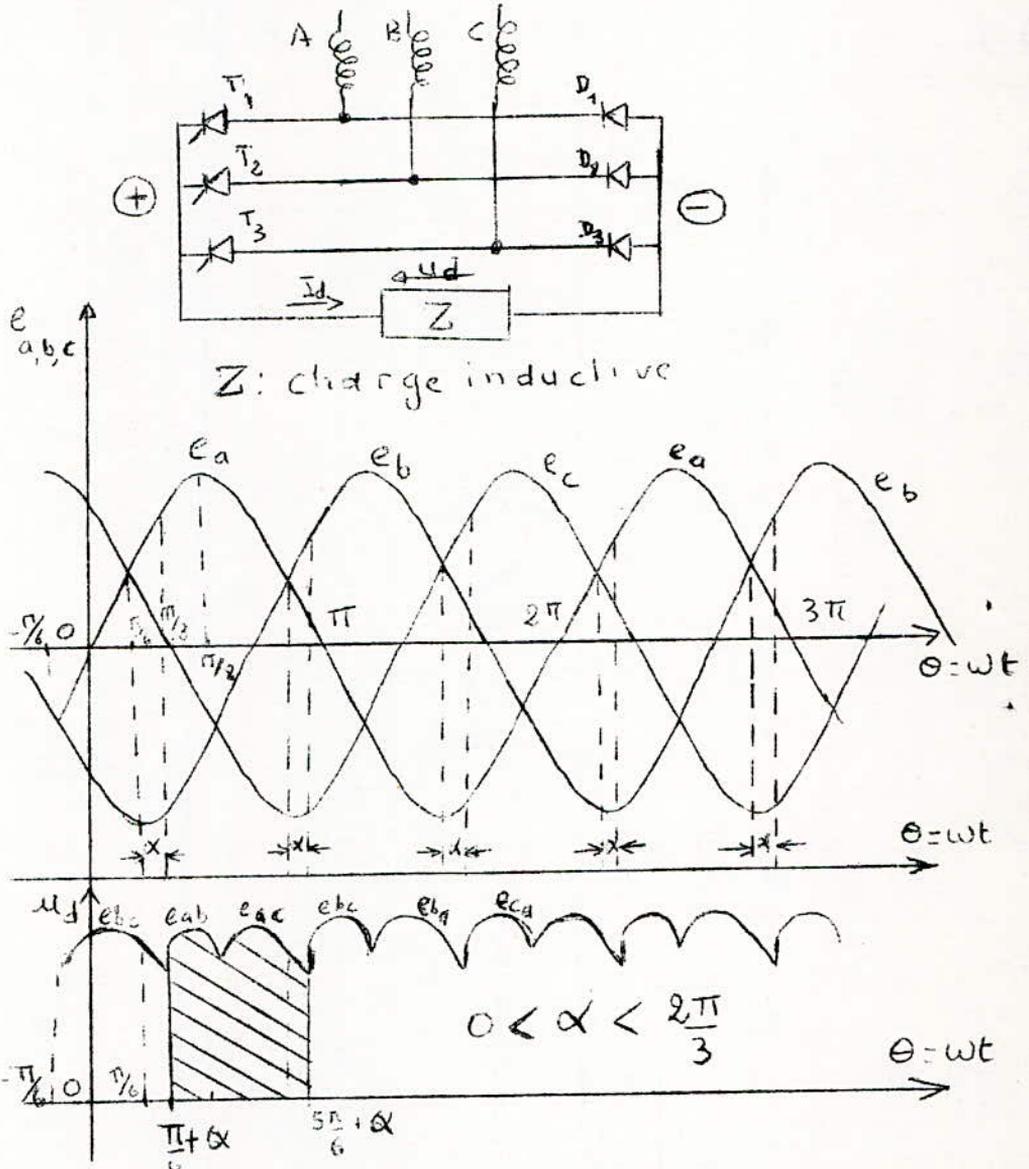
$$U_d = \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\pi/6 + \alpha}^{\pi/6 + \alpha} \sqrt{3} E_m \cos \theta d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \alpha$$

Si $\alpha = 0$, nous retrouvons la valeur obtenue pour le pont à diodes.

c) Pont de Graëtz triphasé semi-commandé, ou pont mixte

Il présente la particulière d'être asymétrique. Un demi pont comporte des diodes l'autre des thyristors.

D'après ce qui a été dit pour tous les ponts précédents, il est très simple de voir l'allure de la tension redressée.



La tension redressée est périodique, de période $\frac{2\pi}{3}$, la valeur moyenne de tension est :

$$U_d = \frac{\sqrt{3}}{2\pi/3} E_m \left[\int_{\pi/6 + \alpha}^{\pi/2} \cos(\theta - \pi/3) d\theta + \int_{\pi/2}^{5\pi/6} \cos(\theta + \pi/3) d\theta \right]$$

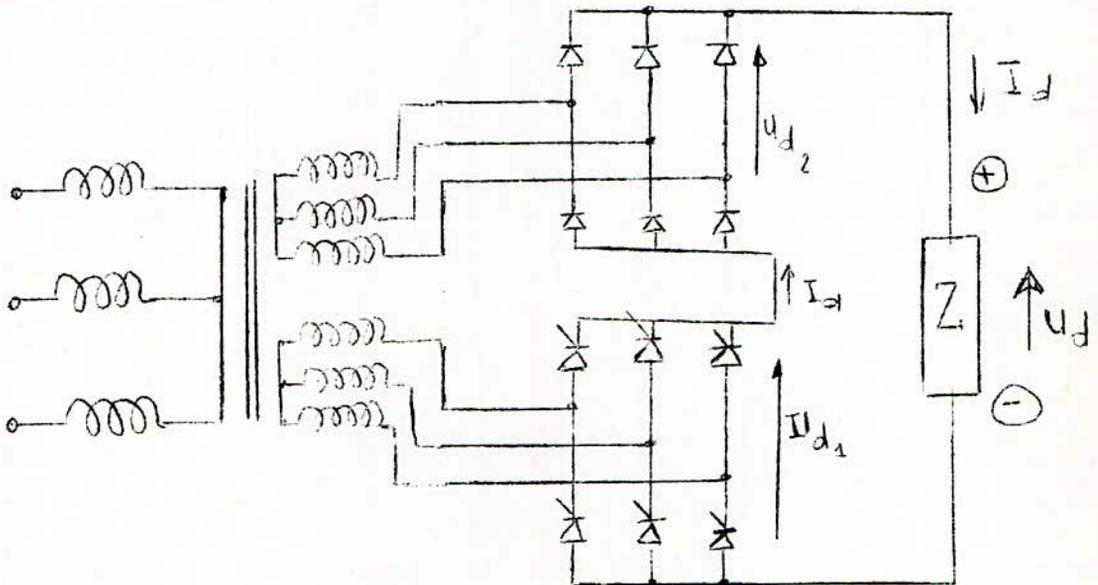
$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} E_m (1 + \cos \alpha)$$

Pour $\alpha = 0$ nous obtenons $\frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m$ valeur qui correspond à la tension redressée par un pont de Graëtz non commande.

d) Double pont triphasé monté en série :

On peut utiliser dans cette catégorie tous les montages triphasés que nous venons de voir et leur combinaison.

Pour des raisons économiques on utilise le montage comprenant un pont triphasé symétrique commandé, monté en série avec un pont non commandé :



Ce montage nécessite un transformateur à 2 secondaires.

Chixdu convertisseur

La distribution d'énergie très réduite en monophasé, et l'ondulation du courant, rend préférable l'utilisation des ponts triphasés. Le pont mixte est le plus utilisé pour les moyennes puissances, cela pour des raisons économiques. Il offre l'avantage de nécessiter moins de thyristors et un circuit de commande plus simple que tous les autres ponts commandés.

Le double pont triphasé, de part son coût très élevé et sa complexité est le moins utilisé.

3.4. Schéma synoptique d'une excitation

Le système d'excitation est destiné à exciter une machine synchrone de moyenne puissance,

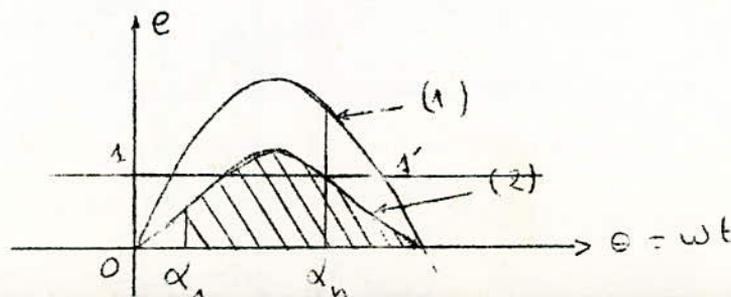
Rappelons que les principaux points demandés à une telle excitation sont :

- d'assurer le fonctionnement en régime normal et permanent
- de permettre le maintien ou la reprise du synchronisme lors de troubles affectant le réseau.
- possibilité de fonctionnement à facteur de puissance unitaire ($\cos \varphi = 1$) si nécessaire. En d'autres termes le système d'excitation doit permettre la surexcitation et même la désexcitation.

4.1. Rôle de α :

Dans les méthodes classiques, un rhéostat monté avec l'inducteur remplissait ces fonctions. Avec les convertisseurs statiques à thyristors, le rhéostat n'est pas nécessaire ; la commande des soupapes cela veut dire, la variation de l'angle d'amorçage joue le rôle de ce dernier. En effet la tension redressée par un pont commandé est fonction de la tension du secondaire du transformateur et de l'angle d'amorçage .

Supposons le régime normal où la tension alternative du réseau est représentée par la courbe e , l'instant d'amorçage ayant lieu à l'instant α_n , compté à partir de l'origine des axes, la tension moyenne redressée U_{dn} correspond à l'aire du trapèze mixtiligne $O - I - I' - D_n$ et donne un courant d'excitation nominal I_{dn}

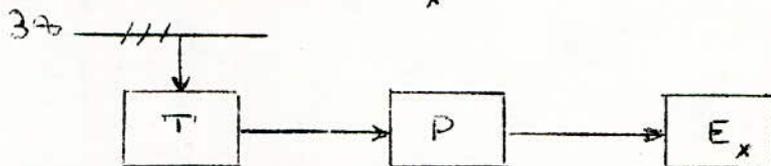


Lors d'une chute de tension, on passe sur la courbe 2. Il nous est possible d'amorcer la soupape à l'instant $\alpha_1 < \alpha_{11}$ de manière à avoir la nouvelle tension redressée U_d supérieure ou égale à U_{dn} . L'impédance de l'enroulement d'excitation étant constante le nouveau courant obtenu sera aussi supérieur à I_{dn} .

Nous voyons ainsi que la variation de l'angle d'amorçage joue le rôle d'un rhéostat.

Le système d'excitation est envisagé simplement de la façon suivante :

Un transformateur alimente un pont redresseur qui à son tour alimente l'enroulement d'excitation E_x .



4.2. Choix du pont redresseur

Pour les raisons économiques précédemment citées, d'une part, et pour simplifier le circuit de commande d'autre part, nous utilisons un pont de Graëtz triphasé semi-commandé. Le transformateur sera donc nécessairement triphasé.

La tension moyenne redressée par ce pont a pour expression :

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) = U_{d0} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

La tension maximale redressée est obtenue pour $\alpha = 0$

$$U_{dmax} = U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m$$

L'angle d'amorçage peut varier entre 0 et $2\pi/3$

La valeur minimale de la tension redressée s'obtient

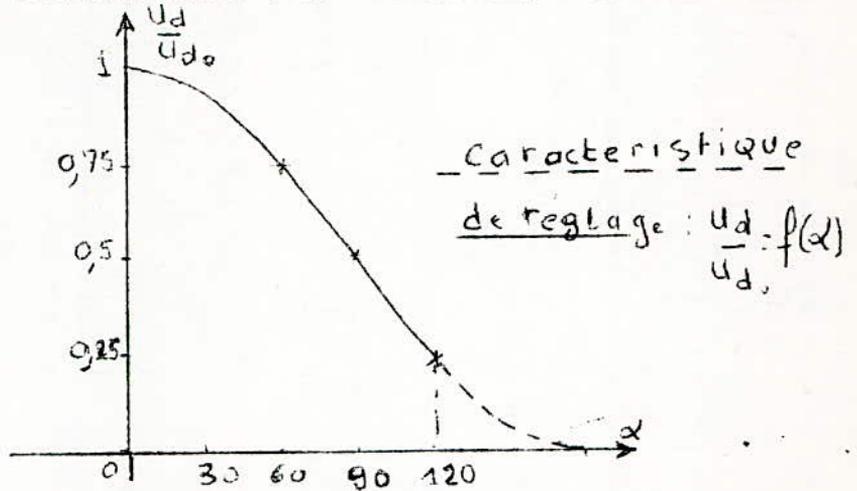
Pour $\alpha = 2\pi/3$

$$U_{dmin} = 0,25 U_{d0}$$

43. Fonctionnement de cette excitation

On peut régler la tension d'excitation aux bornes de l'inducteur de $0,25 U_{d0}$ à U_{d0}

Toutes ces considérations sont traduites par la caractéristique ci-dessous



Le pont et l'enroulement d'excitation sont branchés suivant le schéma de la fig. I

La résistance R_d de protection, nécessaire au démarrage est toujours branchée dans le circuit.

L'enroulement d'excitation E_x et cette résistance R_d constitue un circuit fermé indépendant de la source d'excitation durant l'étape de démarrage en asynchrone. Lorsque la vitesse du moteur atteint environ 95 % de celle de synchronisme, on branche l'enroulement d'excitation à la source d'alimentation.

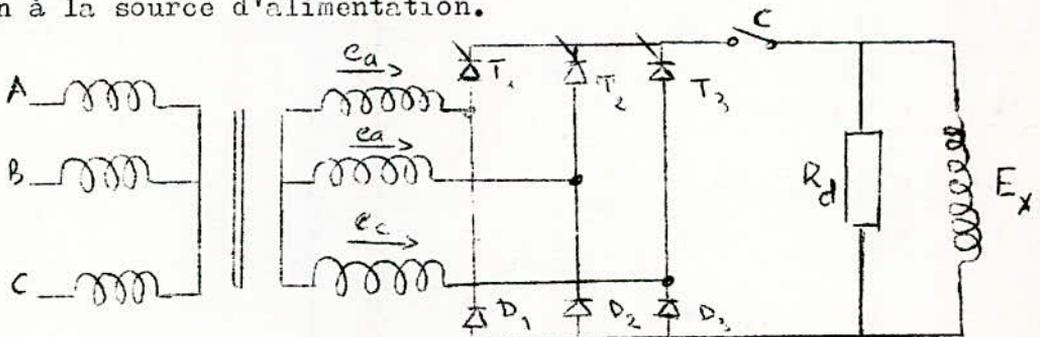
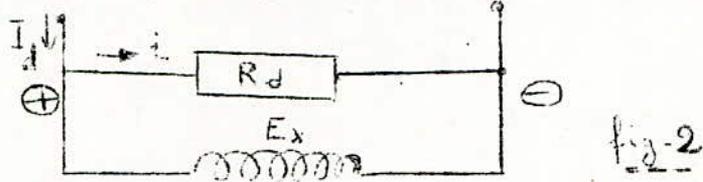


fig. I.

Lorsque le moteur fonctionne en regime normal, la resistance R_d malgré sa forte valeur devant celle de E_x est parcourue par un courant i . Il s'ensuit des pertes Joule dans cette resistance.



Pour éviter ces pertes nous plaçons une diode D_o en série avec R_d . Durant cette étape de fonctionnement D_o étant polarisé en inverse empêche tout passage de courant à travers R_d . Par conséquent aucune perte Joule n'y sera engendrée.

Lors du démarrage asynchrone la diode D_o devra être shuntée, afin d'éviter les surtensions à ses bornes. Toutefois ce court circuit n'est pas nécessaire si l'enroulement d'excitation E_x a un faible nombre de spires.

D_o présente encore l'avantage d'éviter l'appareillage de coupe nécessaire pour brancher ou débrancher R_d . c.f. fig. 3

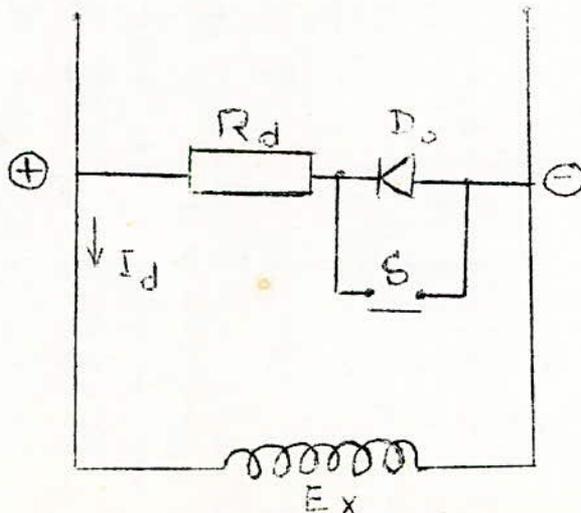


fig. 3 : S shunte D_o au démarrage.

Si une coupure survient au primaire du transformateur ou bien une panne apparaît au niveau de l'induit, le moteur décroche. Il faudra permettre à l'inductance de se décharger facilement. La résistance R_d étant relativement importante il n'y aura pratiquement pas de décharge à travers elle.

Pour réaliser cette décharge nous relierons le neutre du secondaire du transformateur, selon le schéma qui suit, à la borne B de l'enroulement E_x . Le primaire du transformateur est préalablement débranché du réseau afin d'éviter les surtensions, qui seraient engendrées par la tension du réseau et la tension de décharge qui alimentent en même temps, le pont. Ces surtensions si elles apparaissent entraîneraient la destruction de ce pont.

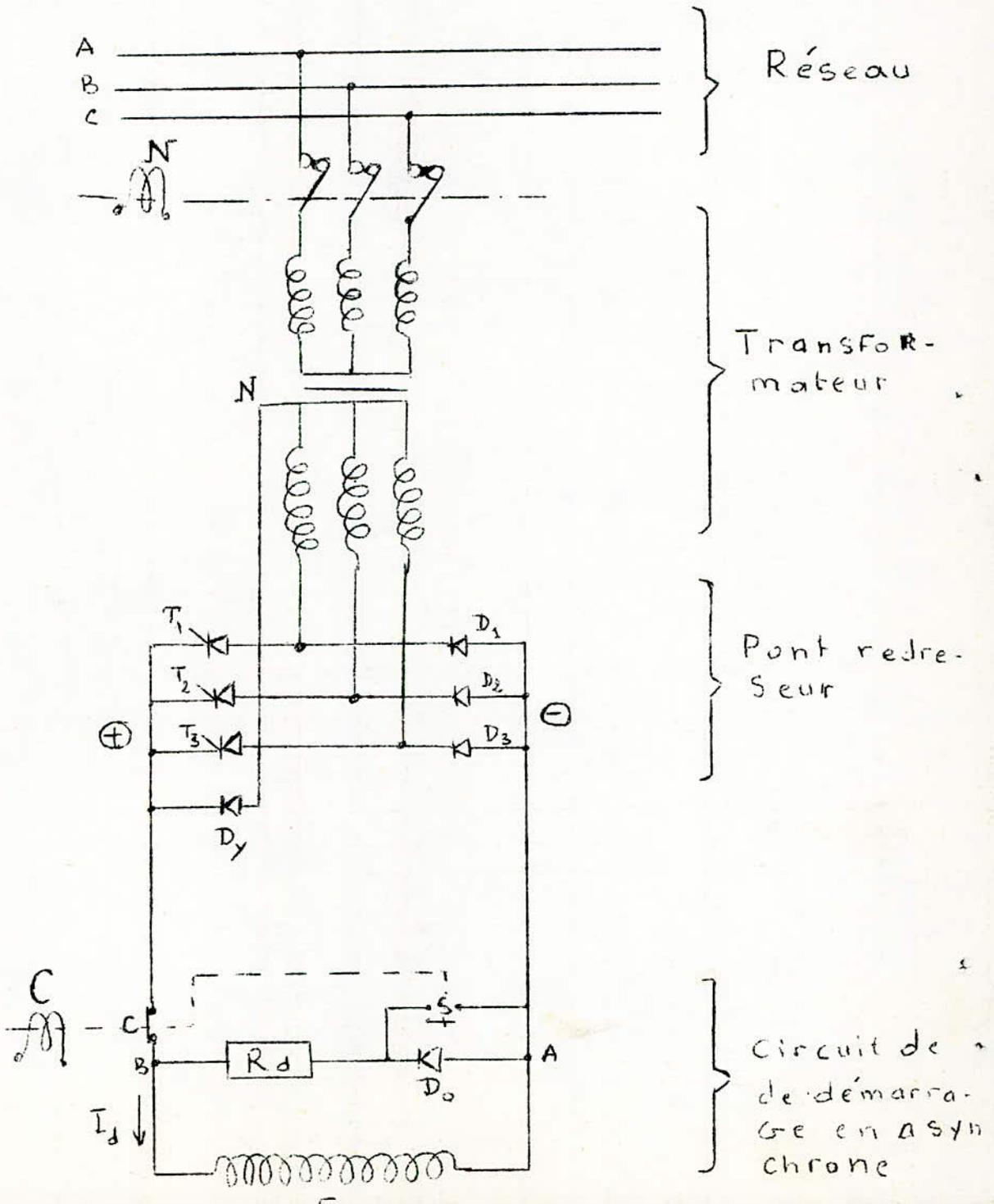
Lors de la décharge les diodes D_1 , D_2 et D_3 seront passantes. Le courant qui est engendré pourra s'écouler à travers les enroulements du transformateur. Pour cela il faudrait que le contact c soit fermé et les thyristors bloqués durant cette période. Ceci est nécessaire car si les thyristors sont en conduction, les diodes D_1 , D_2 et D_3 l'étant aussi

Il y a court-circuit direct de la self de E_x . Les semi-conducteurs seront automatiquement détruits.

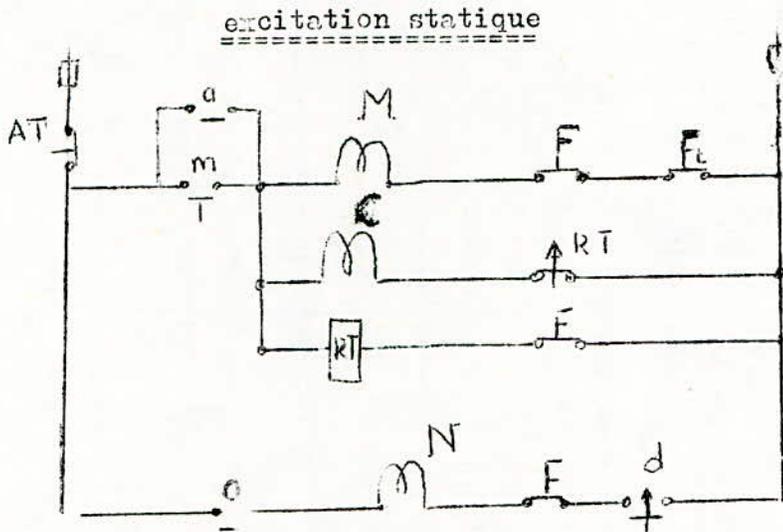
De plus il faudra remarquer, que lors du fonctionnement normal du moteur, à tout instant un thyristor étant en conduction, le fil neutre reliant la borne B de E_x , entraîne un court-circuit de la phase correspondant au thyristor en conduction. Afin d'empêcher l'apparition de ce court-circuit, nous plaçons une diode D_y sur le neutre qui sera polarisée en inverse durant le fonctionnement normal. En régime déséquilibré le potentiel d'anode de D_y ne dépasse pratiquement jamais 20 % du potentiel de cathode qui correspond à la tension de phase. Par conséquent elle sera encore polarisée en inverse. On remarque qu'ici D_y shunte les thyristors ce qui nous permet d'utiliser des éléments de faible classe.

4.4. Schéma du circuit d'excitation

En prenant en considération ce qui vient d'être exposé le schéma d'excitation prend la forme suivante :



4.5 . Schéma de commande du moteur synchrone à



AT : arrêt du moteur

M : contacteur de branchement du moteur (induit) sur le réseau

C : contacteur qui agit sur contact c et le contact S de D₀

RT : relais temporisé

d : contact centrifuge qui s'enclenche dès le démarrage

N : contacteur de branchement du transformateur sur le réseau.

F_t : contact du disjuncteur du transformateur.

F : contact du disjuncteur d'alimentation du moteur.

Fonctionnement :

Le contact c est en position fermée quand le moteur est au repos.

Une impulsion sur m, le moteur est alimenté, c s'ouvre et la diode D₀ est court-circuitée : le moteur démarre en asynchrone.

Le relais RT coupe la bobine C quand la vitesse atteint 95 % de celle de synchronisme : c revient à sa position initiale.

Le pont étant alimenté, le moteur peut entrer en synchro-

Un défaut au primaire du transformateur ouvre le contact F_t de même un défaut aux bornes de l'induit déclenche le contact F .

Une brusque variation de charge calant le moteur ouvre le contact centrifuge d .

Dans tous ces cas la décharge de l'enroulement E_x est possible car c se retrouve en position de fermeture dans le circuit.

Il faut cependant ajouter un contact à ouverture pour bloquer les thyristors lors de la décharge de E_x .

4.6 . Réglage de la tension d'excitation:

La tension redressée a pour valeur moyenne

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \left(\frac{1 + \cos\alpha}{2} \right)$$

α est l'angle d'amorçage des thyristors. Pour un pont mixte α varie entre 0° et 120° .

La tension maximale redressée sera égale a :

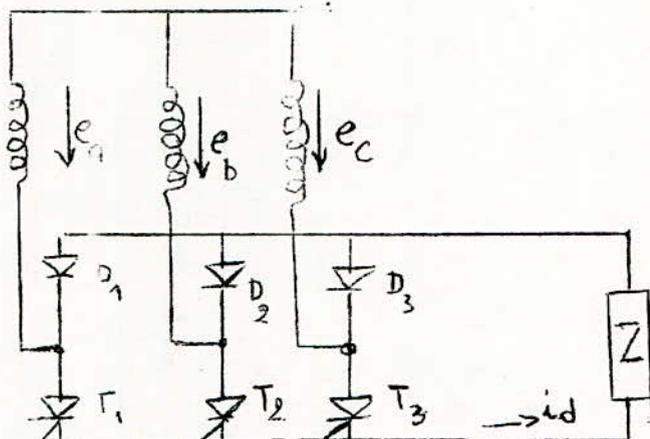
$$U_{dm} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m ; \alpha = 0$$

Quant à la valeur minimale de cette tension, elle est obtenue pour $\alpha = 120^\circ$ et vaut :

$$U_{d\text{min}} = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} E_m$$

Pour avoir la possibilité de surexcitation il est nécessaire que l'excitation nominale correspondante à un angle α le plus grand possible. Ainsi la plage de variation de la tension d'excitation sera importante.

Pour avoir une idée sur le domaine de variation de la tension redressée; reprenons notre pont mixte et traçons pour différentes valeurs de l'angle d'amorçages α , les courbes de tensions redressées.



-On sait que le courant continu instantané i_d à travers la charge Z correspond à la plus grande des six tensions:

$$\begin{array}{ll} e_a - e_b & e_a - e_c \\ e_b - e_c & e_b - e_a \\ e_c - e_a & e_c - e_b \end{array}$$

qui se succèdent dans cet ordre.

$$\begin{aligned} e_a &= E_m \cos \theta ; & e_b &= E_m \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_c &= E_m \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

- Sur les pages suivantes, nous voyons les courbes de tensions redressées obtenues pour les angles d'amorçages $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$.

-Pour l'angle α d'amorçage, nul, sur l'intervalle $-\frac{\pi}{3}$

à 0 la tension $e_a - e_b$ est supérieure aux autres.

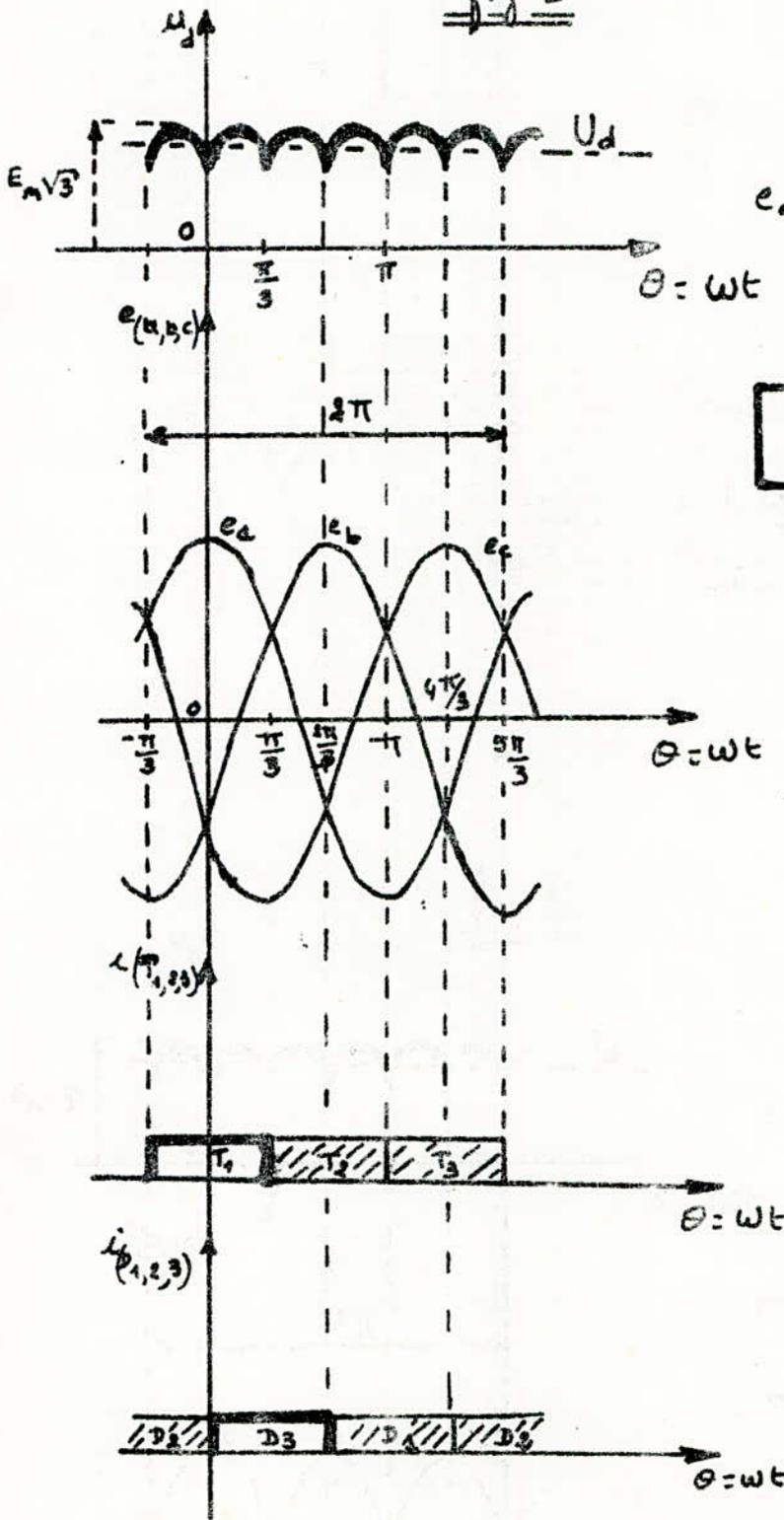
La courbe de tension redressée est celle d'un pont non commandé. (c.f P; 79)

Pour $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$ on obtient (P.80)

$$u_d = e_a - e_b \text{ entre } \left(-\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \text{ et } 0$$

$$u_d = e_a - e_c \text{ entre } 0 \text{ et } \left(-\frac{\pi}{3} + \alpha \right) + 2\frac{\pi}{3} = \alpha + \frac{\pi}{3}$$

figo 1



$$e_a - e_c = \sqrt{3} E_m \cos(\theta - \frac{\pi}{3})$$

$\alpha = 0^\circ$

$$e_a = E_m \cos \theta$$

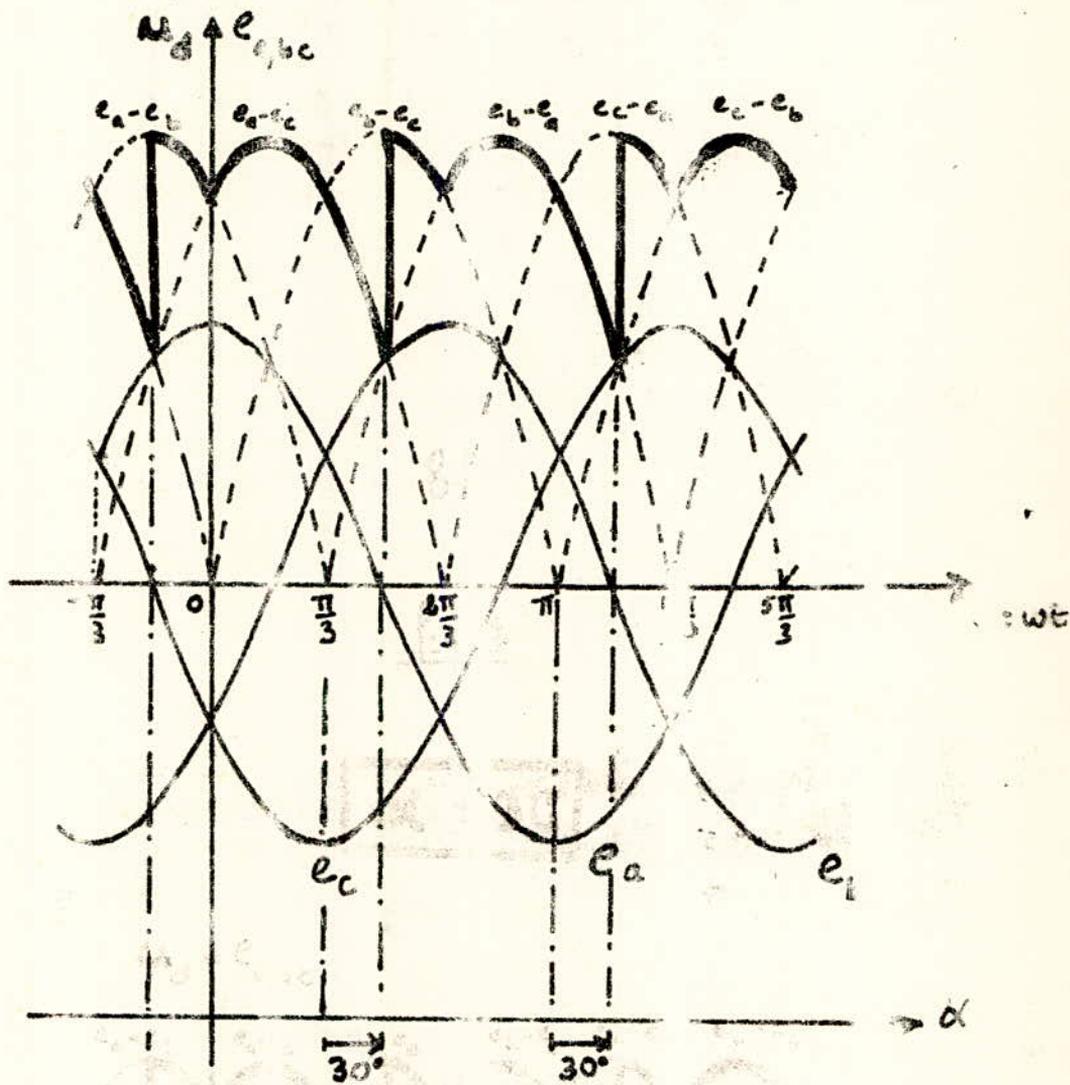
$$e_b = E_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$e_c = E_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})$$

Tension Redressée U_d et Cour $i_{1,2,3}$
Dans Les Bras du pont

Fig. 2

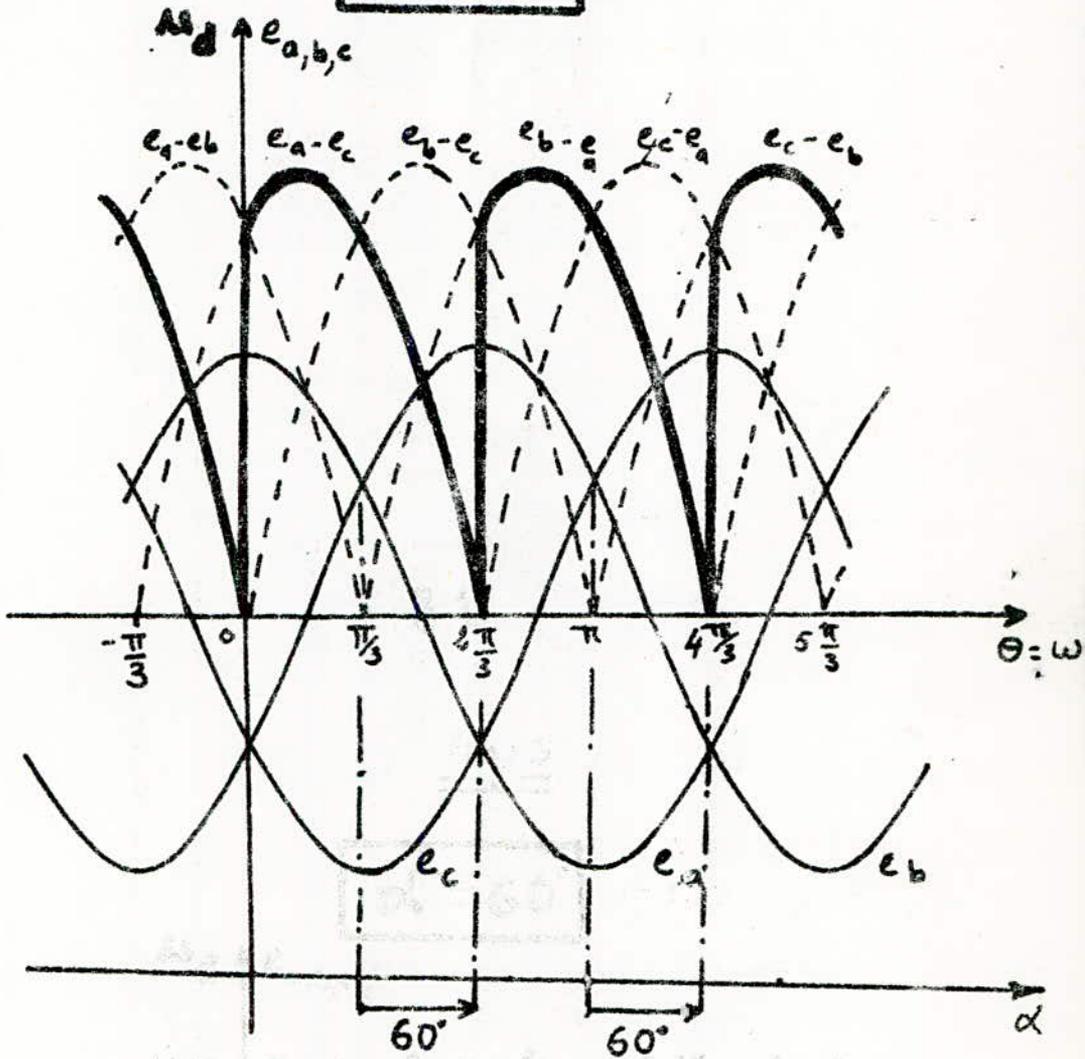
$\alpha = 30^\circ$



Tension redressée en trait gras

fig: 3

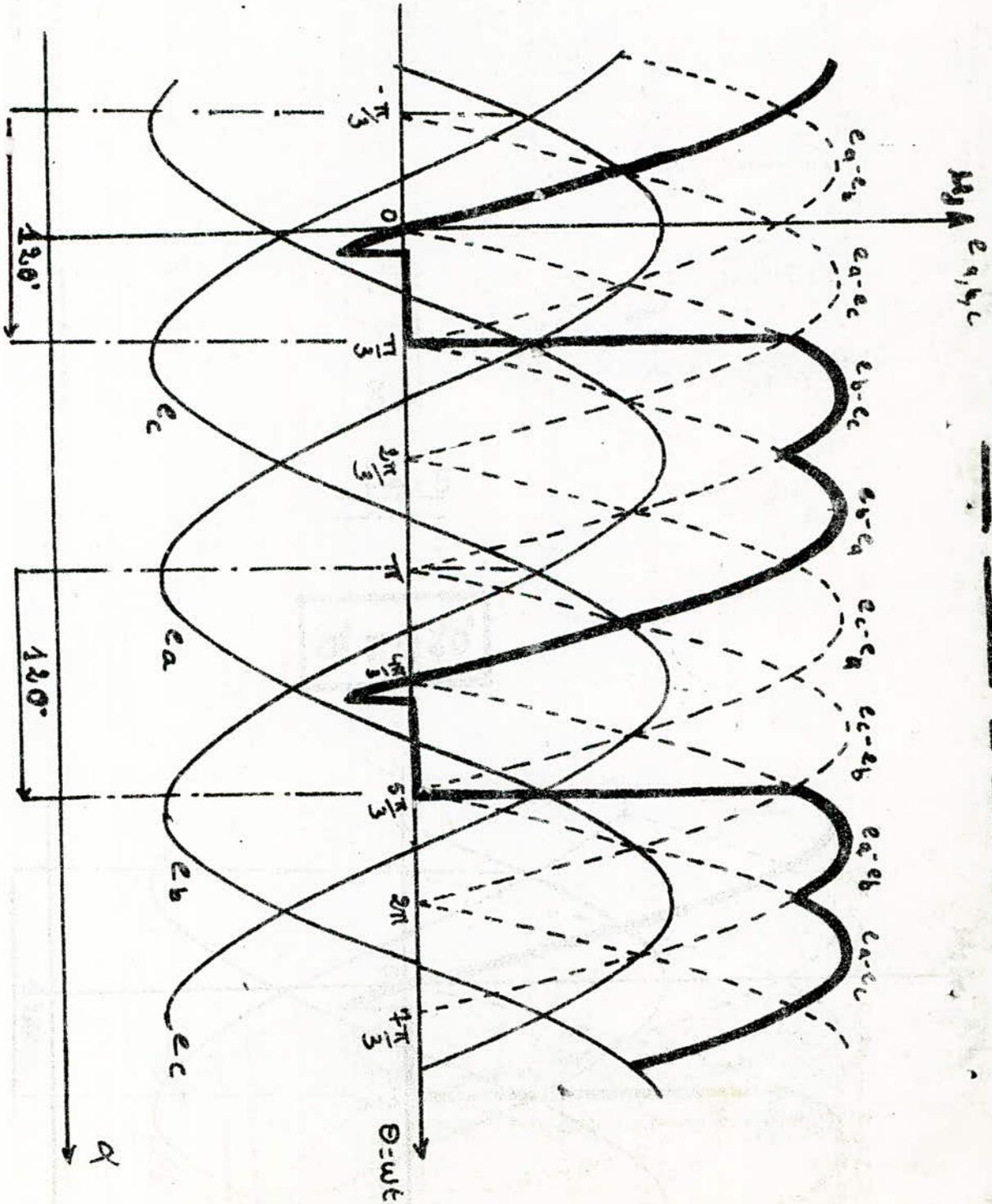
$$\alpha = 60^\circ$$



Tension redressée en trait Gras

fig. 5

$\alpha = 120^\circ$



La tension redressée ne s'annule pas ; le courant instantané i_d à travers la charge ne s'interrompt pas au cours de la période.

- Pour $\alpha \geq \frac{\pi}{3}$ (c.f P 81, 82 83) nous voyons que la tension redressée instantanée aux bornes de l'enroulement d'excitation s'annule .

Par exemple entre $(\alpha - \frac{\pi}{3})$ et $\frac{2\pi}{3}$ $u_d = e_a - e_b$
avec $\alpha = \frac{\pi}{3}$; $e_a - e_b = 0$ pour : $\theta = \alpha - \frac{2\pi}{3}$ et $\theta = \frac{2\pi}{3}$

La tension u_d et i_d deviennent nuls jusqu'au déclenchement du prochain thyristor. Mais ^{leurs} moyennes du courant et de tension d'excitation ne sont pas nulles.

On pourrait penser que durant le laps de temps où la tension instantanée s'annule , la stabilité du moteur serait rompue et le moteur décrocherait. Il en est rien car l'intervalle de temps où la tension s'annule est très faible devant le temps de variation de la tension du réseau dont la fréquence est de 50 Hz :

Le moteur marchera normalement grâce au couple d'inertie de sa masse tournante .

Ainsi nous constatons que l'angle d'amorçage pourrait être choisi selon les besoins entre 0° et 120° .

Pour avoir la possibilité de surexcitation, jusqu'à 2 fois la tension d'excitation nominale, en régime d'avarie, il est nécessaire lors de la marche normal de choisir un angle d'amorçage important. Il en resultera une grande plage de variation de la tension d'excitation.

4.7 - Choix de l'angle d'amorçage Nominal des thyristors

Le transformateur alimentant le pont redresseur a pour tensions simples, primaire E_1 et E_2 au secondaire, en régime normal sans avarie dans le réseau .

La tension E_1 est celle du réseau. La tension E_2 dépend de la tension nominale d'excitation; soit U_{dn} la tension d'excitation nominale correspondant à α_n

$$E_2 = \frac{2\pi U_{dn}}{3\sqrt{3}\sqrt{2}(1+\cos\alpha_n)} = \frac{U_{dn}}{1,17(\cos\alpha_n + 1)}$$

Le rapport de transformation du transformateur est :

$$K = \frac{n_1}{n_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

n_1 et n_2 sont les nombres de spires respectivement des enroulements, primaire et secondaire.

K est un nombre constant indépendant de l'état du réseau.

En régime trouble E_1 chute jusqu'à E'_1 et E_2 jusqu'à E'_2 tel que $E'_1 < E_1$ et $E'_2 < E_2$.

La tension maximale que l'on peut obtenir correspond à un angle α nul .

Quand on a E'_1 au primaire la tension maximale de surexcitation vaut :

$$U_d \text{ surex} = 3 \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot E'_2$$

On désire $U_d \text{ surex}$ soit le double de U_{dn} :

$$3 \frac{\sqrt{3} \sqrt{2}}{\pi} E'_2 = 2 \left(3 \frac{\sqrt{3} \sqrt{2}}{2} E_2 \right) (I + \cos \alpha_n)$$

On obtient : $E'_2 = E_2 (I + \cos \alpha_n)$

$$E'_I = E_I (I + \cos \alpha_n)$$

Pour que : $E_I > E'_I$ il faut que $\alpha_n > \frac{\pi}{2}$

L'angle d'amorçage devra donc être :

$$\frac{\pi}{2} < \alpha_n \leq 2 \frac{\pi}{3}$$

La différence ($E_I - E'_I$) représente la plage de variation de la tension du réseau :

$$(E_I - E'_I) \text{ sera maximale pour } \alpha_n = \frac{2\pi}{3}$$

La chute de tension en % sera $\Delta E = \left(\frac{E_I - E'_I}{E_I} \right) \% = \left(\cos \frac{2\pi}{3} \right) \times 100$

$$\Delta E = 50 \% .$$

Donc si l'on veut surexciter la machine jusqu'à 2 fois la tension d'excitation nominale, lors de chute de tension dans le réseau allant 50 % on prendra comme angle d'amorçage nominal $\alpha_n = 120^\circ$.

4.8. Transformateur d'alimentation :

1) Fonctions du transformateur :

Il joue plusieurs rôles, tous importants.

a) Il procure le nombre de phases nécessaires pour le pont redresseur.

b) Il modifie la tension du réseau d'alimentation pour obtenir la tension continue désirée.

c) Il évite qu'une composante continue parcoure le réseau alternatif en supprimant toute liaison directe entre le pont redresseur et ce réseau.

2) Hypothèses simplificatrices :

Les enroulements du secondaire sont parcourus par le courant alternatif que l'on admet dans tous les calculs comme parfaitement constant (sans ondulations), ce qui revient à considérer comme infiniment grande la réactance du circuit d'utilisation : cette hypothèse est pratiquement exacte.

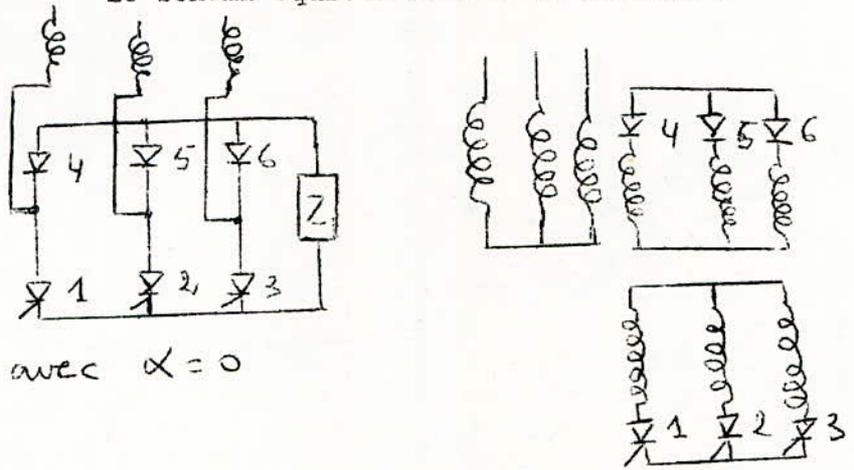
Le courant primaire est naturellement un courant alternatif mais très éloigné de la forme sinusoïdale. Ceci est dû au fait que tout redresseur engendre des harmoniques dans le réseau.

3) Paramètres du transformateur :

Le montage de Graetz triphase est équivalent pour la tension continue à deux redresseurs triphasés, simple voie, en série.

En effet à tout instant deux soupapes en série débitent le courant I_d . Les soupapes 1, 2, 3, constituent le groupe anodique et 4, 5, 6, le groupe cathodique.

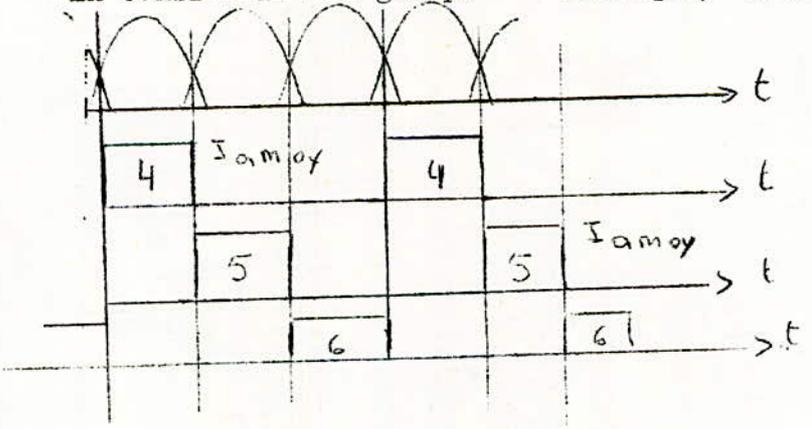
Le schéma équivalent est le suivant :



avec $\alpha = 0$

Soit I_{amoy} le courant moyen d'un bras du pont équivalent, c.à.d le courant d'une anode ; I_{aef} sa valeur efficace et I_d le courant dans la charge.

En considérant le groupe anodique, nous avons :



Le courant d'une phase du groupe passe de la valeur nulle à la valeur I_{amoy} qu'il conserve pendant T/m secondes.

On utilise alors les formules empiriques suivantes :

$$\left. \begin{aligned} I_{amoy} \cdot T &= \frac{I_d}{m} \cdot T \\ I_{aef}^2 \cdot T &= I_d^2 \frac{T}{m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} I_{amoy} &= I_d/m \\ I_{aef} &= \frac{I_d}{\sqrt{m}} \end{aligned}$$

3.1. Facteur de forme du courant :

Par définition c'est F : $F = \frac{I_{aef}}{I_{a moy}}$
d'où $F = \sqrt{m}$

Pour un transformateur triphasé : $m = 3$

$$I_{a moy} = \frac{I_d}{3} \quad ; \quad F = \sqrt{3}$$
$$I_{aef} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

3.2. Courant de phase du secondaire :

Dans le montage pont de Graëtz, les courants dans les enroulements du transformateur sont alternatifs. Par exemple, les courants des anodes 1 et 4 parcourent la phase A en sens inverses et sont déphasés de π

Leur somme a pour intensité efficace I_A .

On utilise encore une formule expérimentale.

Pour un montage en étoile on a :

$$I_A = \sqrt{2} I_{aef}$$

Mais on a déjà trouvé que

Le courant efficace qui traverse l'enroulement en étoile du secondaire est donc :

$$I_A = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d = 0,817 I_d$$

3.3. Facteur de puissance du secondaire :

La puissance active au secondaire, en négligeant les pertes dans les enroulements est :

$$P_d = U_d \cdot I_d$$

La puissance apparente au secondaire est :

$$P_2 = 3 E_2 \cdot I_2$$

avec E tension simple efficace de phase

$$P_2 = 3 E_2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d$$

Le facteur de puissance est : λ_2

$$\lambda_2 = \frac{P_d}{P_2}$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{3\sqrt{3} E_2 \sqrt{2} I_d}{2\pi} \right) / \frac{3 E_2 \sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d$$

$$\lambda_2 = \frac{3}{2\pi} (1 - \cos \alpha)$$

λ_2 sera maximum pour $\alpha = 0$

$$\lambda_{2 \text{ max}} = 0,955$$

3.4 Rapport de transformation :

En fonctionnement normal l'amorçage correspond à $\alpha = 120^\circ$ et à la tension moyenne U_n nominale .

Nous avons :

$$U_n = \frac{3\sqrt{3} \sqrt{2}}{4\pi} E_2$$

Et

La tension simple E_1 au primaire étant ~~comme~~ le rapport de transformation est donné par :

$$K = E_1 / E_2$$

3.5. Courants secondaires :

Nous avons : $n_1 \bar{I}_1 = n_2 \bar{I}_2$

avec n_1 et n_2 respectivement nombre de spire au primaire et au secondaire par phase :

$$\text{Or } I_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d$$

$$\frac{n_1}{n_2} = k$$

3.6. Facteur de puissance global :

C'est le rapport : $\frac{P_c}{P_A} = \frac{U_d I_d}{3 E_1 \bar{I}_1} = \lambda$

$$\lambda = \frac{U_d I_d}{\frac{I_d}{k} 3 E_1 \sqrt{2}/\sqrt{3}}$$

$$\lambda = \frac{3}{2\pi} (\cos \alpha + 1)$$

3.7. Courant moyen I_d dans la charge :

Pour avoir I_d on considère la puissance $P_d = U_d \cdot I_d$ demandée. On fixe la tension nominale d'excitation U_n pour $\alpha = 120^\circ$

d'où : $I_d = \frac{P_d}{U_{dn}}$

Choix des semi-conducteurs :

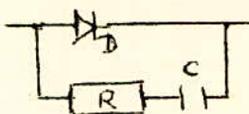
On les choisira dans un catalogue de sorte qu'on ait :

- tension directe $U_d = 2U_n$
- tension inverse $U_{in} \geq 15 \text{ kV}$
- i directe = $2 \cdot I_d$.
- Puissance = $4 P_d = 4 U_n \cdot I_d$.

3.4.9. Dispositifs de protection des semi-conducteurs :

a) Contre les surtensions :

La protection est assurée par des circuits comprenant des résistances et des capacités. Ces circuits R-C absorbent l'énergie transitoire et diminuent l'accroissement rapide de la tension. Ils sont disposés aux bornes des semi-conducteurs.



La valeur de C est déterminée par la formule pratique suivante :

$$C = \frac{10 \cdot I_d}{U_{in}}$$

C_{en} = valeur maximale de la capacité

I_{en} A = intensité directe.

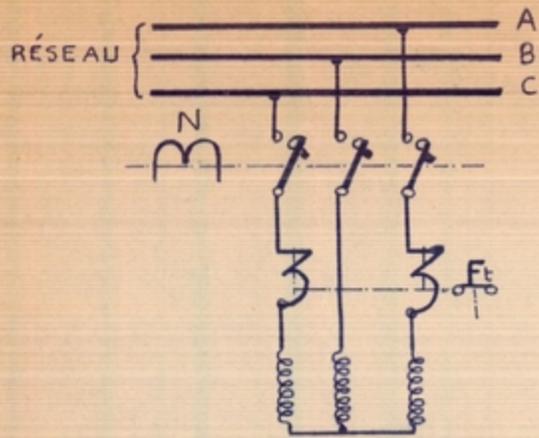
U_{in} en V tension inverse publiée, c.à.d prise dans le catalogue qui a servi au choix des semi-conducteurs.

La valeur de R doit être tel que le produit RC soit de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes. L'expérience montre que R est en général comprise entre 5 et 100 Ω

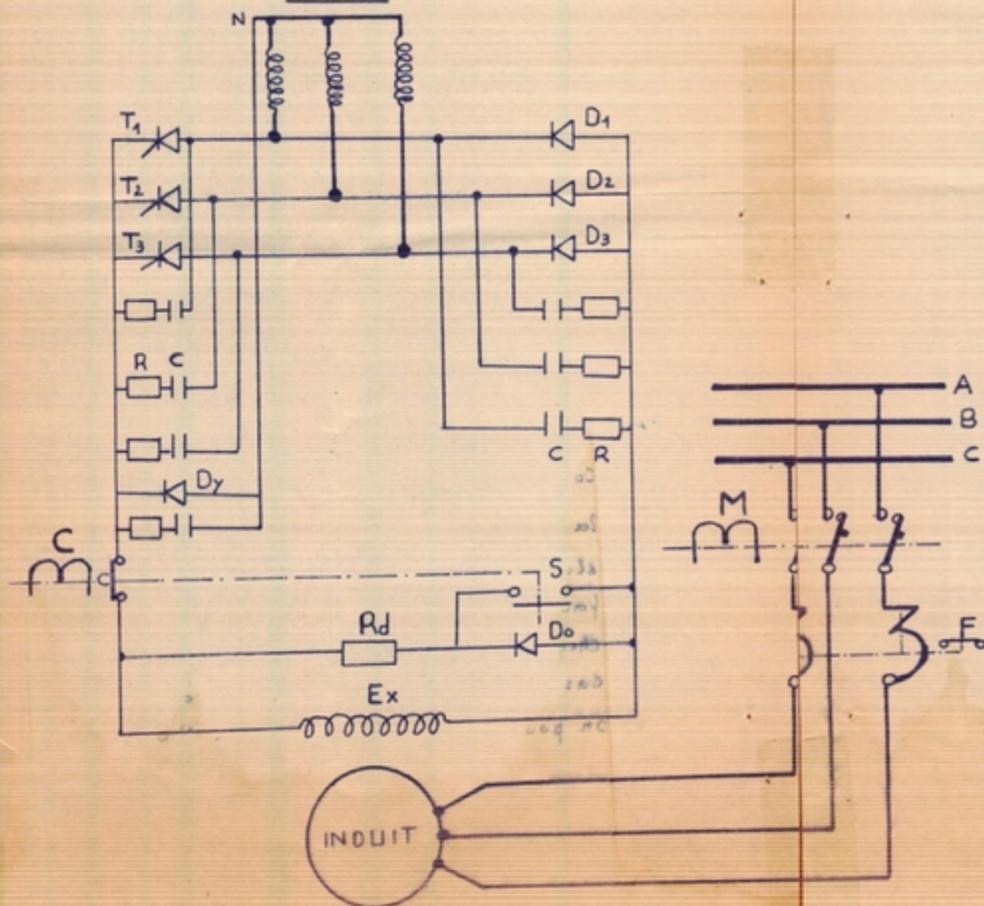
b) Contre les surintensités

Les surintensités sont dues principalement à la présence de court-circuits dans la charge. Les moyens conventionnels tels que les disjoncteurs ou les fusibles ordinaires n'ont pas de temps de réponse suffisants pour assurer la protection des semi-conducteurs. Même avec les fusibles dits "ultra-rapides", dont le temps de réponse est de l'ordre 10 à 15 ms, la protection des semi-conducteurs pose des problèmes ardu. A l'heure actuelle, en pratique, il apparaît presque impossible de protéger les thyristors de puissance contre les surintensités.

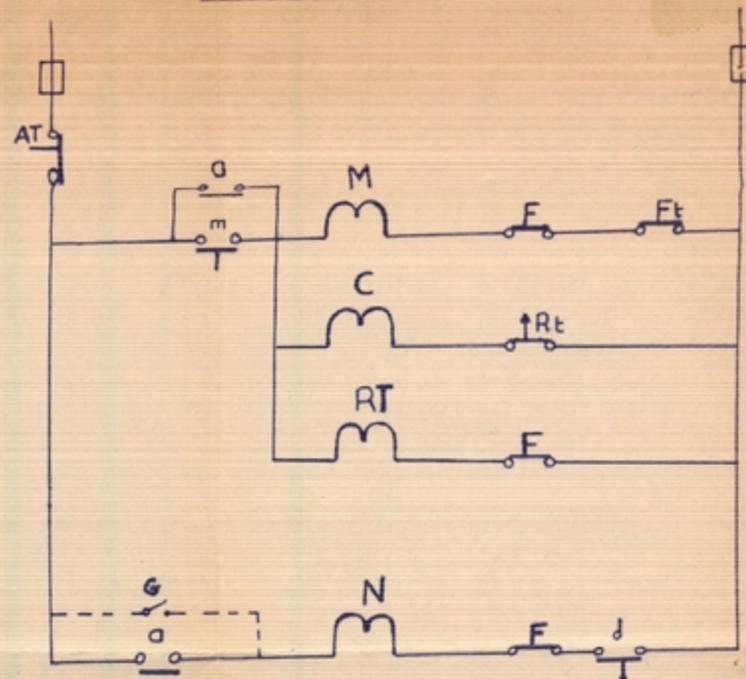
CIRCUIT DE PUISSANCE



SCHEMA GLOIBAL



CIRCUIT DE COMMANDE



N.B.: Si la machine doit fonctionner en Générateur il suffira d'ajouter le Contact manuel "G" en branchant la liaison en pointillés. Si de plus, elle doit débiter sur le réseau, il faudra régler le R.T, tel que son déclenchement soit instantané. Dans ce dernier cas après accrochage sur le réseau on pourra ouvrir le Contact "G"



3.5. Exemple de calcul des paramètres d'un transformateur.

Les données d'une machine synchrone triphasée sont :

$S = 120 \text{ KVA}$; $U = 500 \text{ V}$; 6 pôles ; 400 tr/mn ;

en régime nominal : $\cos \epsilon = 0,8$; la tension d'excitation est de 110 V ; la courant d'excitation nominal 16 A .

Considérons $\alpha = 120^\circ$ pour le régime nominal de fonctionnement de la machine .

$$I_{dn} = 16 \text{ A}$$

$$U_{dn} = 110 \text{ V}$$

La tension simple du secondaire du transformateur est :

$$E_2 = \frac{4\pi}{3\sqrt{2}} U_{dn}$$

$$\text{On obtient : } E_2 = 188,11 \text{ V}$$

On prendra un transformateur qui a pour tensions simples, au secondaire $E_2 = 200 \text{ V}$, et $E_1 = 220 \text{ V}$ au primaire .

Rapport de transformation :

$$K = 380/350 = 1,085$$

Courant efficace du secondaire:

$$I_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{dn}$$

$$\text{d'où : } I_2 = 13 \text{ A}$$

Courant primaire :

$$I_1 = \frac{1}{K} \left(I_{dn} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$I_1 = \frac{13}{K} = 12 \text{ A}$$

Facteur de puissance globale

$$\lambda = 3/2 \cdot (\cos \alpha + 1) \quad ; \quad \text{avec } \alpha = 120^\circ$$

$$\lambda = 0,238 .$$

V SUGGESTIONS

1. Introduction :

Tout redresseur engendre dans le réseau alternatif, des harmoniques dont le rang et l'amplitude sont fonction de la puissance à fournir du côté continu, de l'indice de pulsation du redresseur et de la réactance du réseau. Ces harmoniques provoquent un échauffement important des machines branchées sur le réseau par conséquent engendrent des pertes non négligeables.

Il est donc nécessaire d'envisager un moyen de réduction de ces harmoniques.

La solution la plus utilisée est de placer des filtres qui dévient les courants harmoniques à la terre .

2 Spectre d'harmonique du réseau :

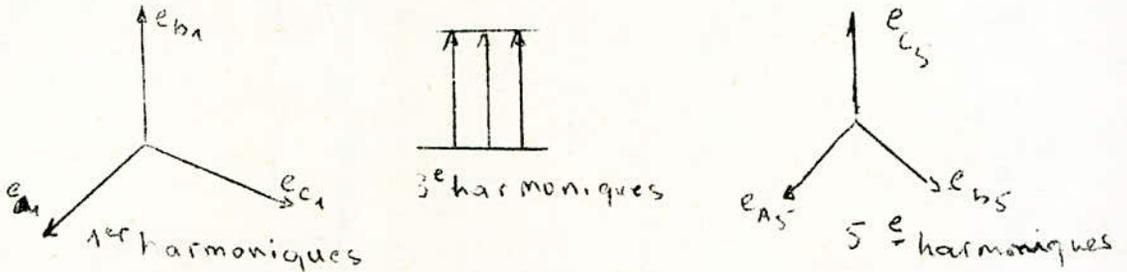
Du fait leur construction les alternateurs produisent des systèmes de tensions périodiques non sinusoïdales dont les courbes en fonction du temps sont symétriques par rapport à l'origine des abscisses. Une décomposition en série de FOURIER montre que tous les harmoniques d'ordre pair sont nuls.

Les systèmes de tension simple, triphasé et équilibré, périodique s'écrit alors :

$$e_a = E_{m1} \sin \omega t + E_{m3} \sin 3\omega t + E_{m5} \sin 5\omega t + E_{m7} \sin 7\omega t \dots$$
$$e_B = E_{m1} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + E_{m3} \sin(3\omega t) + E_{m5} \sin \left(5\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \dots$$
$$e_C = E_{m1} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + E_{m3} \sin(3\omega t) + E_{m5} \sin \left(5\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \dots$$

Nous voyons d'après ces équations que :

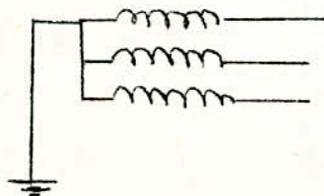
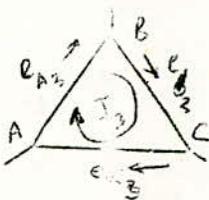
Les premiers harmoniques (ou fondamentaux) des tensions dans les phases forment un système triphasé, en étoile, équilibré.



Les harmoniques multiples de trois, dans tous les enroulements, sont en phase donc dirigés dans chaque enroulement depuis son commencement vers son origine, soit en inverse et ceci indépendamment du mode de couplage. Il en résulte que le système de tension harmonique constitue selon le rang de la fréquence, considérée des systèmes triphasés, d'ordre direct, inverse et homopolaire; rarement équilibrés, même lorsque les 3 tensions fondamentales du réseau sont équilibrées, il est rare que les tensions harmoniques le soient: ceci tient à la nature souvent asymétrique des générateurs d'harmoniques. Lorsque l'on dit que les fréquences d'ordre 3 sont homopolaires cela veut dire que les tensions correspondantes sont nulles entre phases et égales entre phase et terre.

3. Elimination des harmoniques multiples de 3 :

Les courants harmoniques multiples de 3 circulent librement à l'intérieur d'un couplage en triangle. Un passage leur est offert aussi par les couplages en étoile avec neutre à la terre; les courants se refermant par les impédances à la terre du réseau.



Les courants homopolaires ne peuvent pas circuler dans les couplages en étoile à neutre isolé.

Les tensions harmoniques homopolaires apparaissent entre les phases du réseau et le point neutre. Pour les enroulements couplés en étoile avec neutre en étoile, ces tensions se mesurent par rapport à la terre et dépendent de l'impédance harmonique homolaire de court-circuit du réseau. Au contraire pour les couplages en étoile avec neutre isolé les tensions harmoniques se mesurent par rapport au point neutre.

TRANSFO	TRANSFO	TENSION DU POINT NEUTRE ISOLÉ Par rapport au sol		COURANTS Harmoniques		TENSIONS Harmoniques	
		1	2				
Δ	Δ	-	-	0	0	0	0
Δ	Y	Petite		0	0	0	Petites
Δ	Y_{sol}	-	-	0	Selon Z_2	Selon Z_1 et Z_2	
Y_{sol}	Y_{sol}	-	-	Selon Z_1	Selon Z_2	Selon Z_1 et Z_2	
Y_{sol}	Y	Selon Z_1		Selon Z_1	0		
Y	Y	GRANDE		0	0	GRANDES.	

Z_1, Z_2 , Impédances Homopolaires harmoniques de court-circuit du réseau

D'après ce tableau nous constatons qu'un couplage du primaire en triangle est nécessaire pour éliminer les courants homopolaires d'ordre 3.

Donc le transformateur a pour rôle aussi bien l'alimentation du pont redresseur que de selectionneurs d'harmoniques.

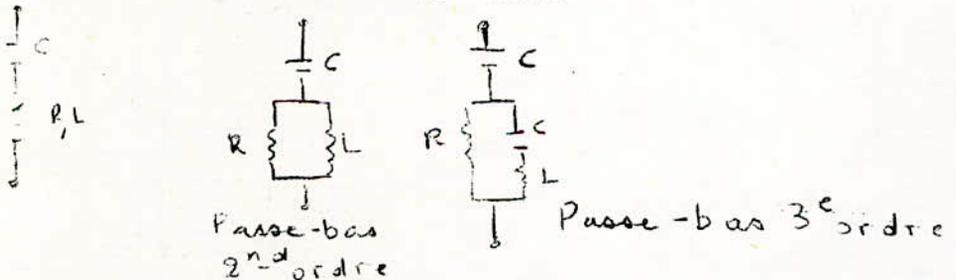
Il nous restera alors les harmoniques d'ordre $2N + 1$, N nul ou pair, c.à.d. les harmoniques 1, 5, 7, 11, 13, 17...etc

Pour éliminer le 5, 7, 11 et même le 13 on utilise des filtres d'harmoniques :

4. Filtres d'harmoniques :

Ils peuvent être placés en série avec le réseau ou en parallèles sur le réseau pour dériver les courants harmoniques.

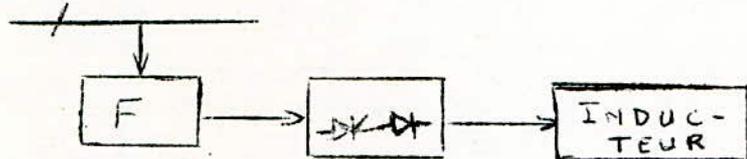
Les filtres courants sont du type shunt:



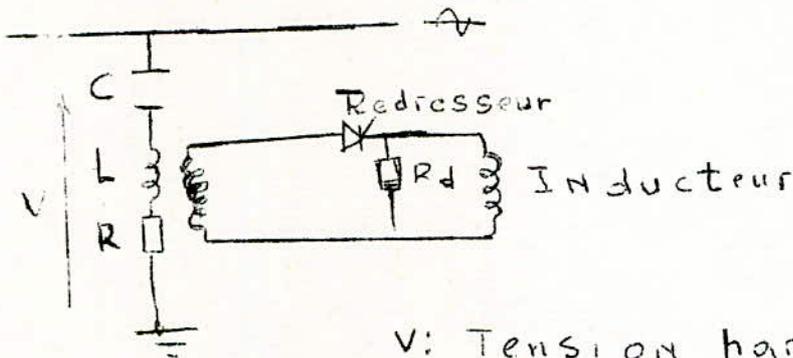
Ils sont placés en parallèle sur le réseau. On utilise des bras en parallèle pour les harmoniques d'ordre faible et un filtre passe - bas pour les harmoniques supérieurs.

Les harmoniques 5, 7, 11 transportent une quantité de puissance qui est acheminée à la terre.

Ne pourrait-on pas utiliser cette puissance pour alimenter un pont redresseur qui à son tour alimentera l'inducteur d'une machine synchrone?



Ce montage n'utiliserait que les harmoniques 5, 7, 11 et même le 13 si l'on veut, en utilisant un transformateur qui aurait pour enroulements, primaire, un filtre sélectif.



V: Tension harmonique

Ainsi on nettoie le réseau et on récupère une énergie qui était au premier abord sans utilité, voire gênante, car le système d'excitation est alimenté uniquement par les tensions harmoniques redressées sans faire intervenir l'harmonique fondamentale.

-CONCLUSION-

Cette étude nous a permis d'analyser les deux modes principaux d'excitation existants.

-Le premier mode, le plus ancien, est dit classique. Il utilise des générateurs à courant continu.

-Le second beaucoup plus récent, utilise des dispositifs à semi-conducteurs.

La comparaison que nous avons faite entre ces deux méthodes, nous a montré que le système classique ne répondait plus entièrement aux exigences de l'utilisation actuelle.

L'inconvénient majeur de ce système d'excitation est de ne pas jouer un rôle efficace en période trouble. De plus la nécessité d'utiliser plusieurs éléments, tels que moteurs asynchrones, mécanismes de transmission, génératrices à courant continu, rhéostats de réglage, fait que, l'encombrement est important et surtout, que la sécurité de fonctionnement n'est point assurée à cause de toutes les pièces en mouvement.

Le système statique, avec des dispositifs à semi-conducteurs quant à lui, réunit les avantages du système classique et d'autres qui font sa supériorité : Il joue un rôle efficace lors d'une période du régime de fonctionnement de la machine synchrone. Il présente l'avantage d'être entièrement statique et de nécessiter aucun entretien. C'est un système facilement asservi.

Pour les moyennes puissances nous estimons qu'un pont de Graetz mixte est le plus favorable. Il est économique et nécessite un circuit de commande des thyristors plus simple que tous les autres ponts commandés. Le schéma complet que nous avons présenté, comporte

tant un schéma de commande du moteur réalise un fonctionnement complètement automatique. Il peut ^{être} utiliser aussi bien pour un régime en générateur synchrone qu'en régime moteur. Nous avons insisté sur le fonctionnement en moteur car les alternateurs de moyenne puissance n'équipent que de petites installations. Un régime trouble du réseau n'affecte pratiquement pas un alternateur du fait qu'il est entraîné. La réalisation du système décrit est assez simple et peut être faite par bloc dont le montage est aisé. Les éléments constituant le pont, thyristors et diodes sont tels que les perfectionnements qu'ils ont reçus ces dernières années et les avantages qu'on en tire font de ce système d'excitation une méthode de premier choix.

De plus pour les moyennes puissances, on ne peut plus aujourd'hui objecter que le prix de revient des éléments constituant le système d'excitation peut être un obstacle à la substitution des générateurs à courant continu par un montage statique car les diodes et les thyristors sont fabriqués en série et ne constituent plus une rareté.

BIBLIOGRAPHIE

- M. GAUDRY Redresseurs et thyristors. DUNOD 69.
- M. KOSTENKO
et
L. PIOTROVSKY Machines électriques Vol. I et II Editions de
Moscou.
- I. KAGANOV Electronique Industrielle Vol. I et II " "
- F. CAHEN Electrotechnique VOL. IV Gauthier Villar Paris.
- H. L. VAN DER HORST Tubes à décharge dans les gaz DUNOD 64.
- M. MOUNIC Redressement. Vol. I, II, III DUNOD 65.
- A. GUILBERT Machines Synchrones DUNOD 65.
- L. Q. ORSINI Théorie et pratique des circuits N.V. Philips'
électroniques Eindhoven. 67.
- V. STRIAPAN Redresseurs de puissance. E.N.P. ALGER 74.
- PH. BARRET Evolution de la technique des systèmes
d'excitation. R.G.E. N°4 Avril 70.
- R. CHAUPRADE Commande électronique des moteurs électriques
L' électricien Industriel N°2174 Sept. 75.
N°2175 Oct. 75.