

11/78

2<sup>ca</sup>

**U. S. T. A.**

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

مدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

الميكانيكية

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

**COMMANDE ÉLECTRIQUE DU  
MOUVEMENT LINEAIRE D'UN  
GODET D'EXCAVATEUR**

PROPOSE ET DIRIGE PAR :

M<sup>r</sup> V. BOUTENKO

PROFESSEUR A L'ENPA

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية

الميكانيكية

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

ÉTUDE PAR :

M<sup>rs</sup> M. MADOUR

M. T. MELIZI

PROMOTION

73 - 78

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**U. S. T. A.**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

**COMMANDE ELECTRIQUE DU  
MOUVEMENT LINEAIRE D'UN  
CODET D'EXCAVATEUR**

PROPOSE ET DIRIGE PAR :

M<sup>r</sup> V. BOUTENKO  
PROFESSEUR A L'ENPA

ETUDIE PAR :

M<sup>rs</sup> M. MADOUR  
M. T. MELIZI

PROMOTION

73 - 78

Que tous ceux qui ont participés de pres  
ou de loin à l'elaboration de notre formation en  
general et de ce projet en particulier , trouvent  
ici, l'expression de nos plus sincerres remerciements

Notre gratitude va à Monsieur BOUTENKO,  
qui, par ses precieux conseils nous a aidé à  
surmonter des difficultés rencontrées dans le  
courant de cette etude .

MOULOUD et  
MOHAMED TAHAR

## INTRODUCTION

L'expansion des reseaux routiers ,l'importance accrue des travaux publiés ,la nette amelioration de la production et du rendement des exploitations des mines aciel ouvert et des carrieres sont indeniablement lies aux performances toujours plus grandes des engins .

L'excavateur, communement utilise pour la charge a vu sa gamme de puissance considerablement elargie et est de ce fait utilise aussi bien dans de petits chantiers que dans des ouvrages exceptionnels .Cet elargissement est essentiellement du a l'application progressif de la commande electrique dans l'industrie ; en effet aux grandes puissances ,seuls les systemes electriques permettent un fonctionnement stable et fiable .

Cinq asservissements d'inegale importance permettent le fonctionnement de l'excavateur :

- Deplacement de l'ensemble sur des chenilles .
- Rotation de la cabine de commande .
- Ouverture du godet .
- Rotation du bras de godet autour de son axe de fixation a la fleche .
- Deplacement lineaire du bras .

C'est ce dernier systeme de commande que nous nous proposons d'etudier en detail .

## I - ADAPTATION ET CHOIX DU SYSTEME DE COMMANDE ELECTRIQUE:

### I - Introduction:

Les criteres de choix et d'adaptation de tout systeme sont conditionnes par la connaissance des caracteristiques de la machine a commander ainsi que par les conditions d'exploitation et de service.

Un choix non conformement etudie entraine un fonctionnement anachronique de l'ensemble et peut etre a l'origine de divers accidents .

### I 62- DESCRIPTION DE LA PARTIE A COMMANDER:

Le role du systeme de commande est le deplacement lineaire adequat de haut en bas et de bas en haut du godet, celui-ci, lors des processus de charge et de decharge, doit "se placer" successivement au niveau du materiau a deplacer et du wagon a remplir, et, c'est ainsi qu'apparait toute l'importance de ce positionnement du godet.

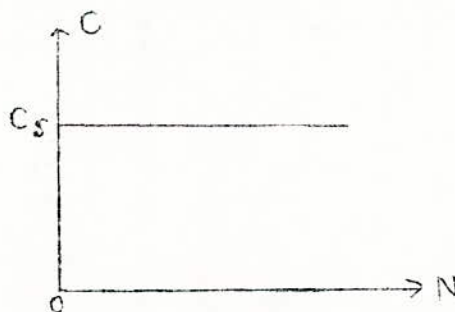
Les composantes de la a commander sont les suivantes:

- Godet
- Bras
- Systeme pignon-cremaillere (servant ala conversion mouvement rotatoire-mouvement lineaire
- Reducteur devitesse .

### I-2-2- DETERMINATION DE LA CARACTERISTIQUE MECANIQUE DE LA MACHINE A COMMANDER/

Le controle du deplacement du bras sous entend une bonne adaptation mecanique interne au systeme, pour assurer cela , il est indispensable de connaitre la caracteristique mecanique de la machine a commander.

Les caracteristiques mecaniques des differentes machines ne sont pas les memes, seulement d'apres l'experience, ce cas se place dans la categorie des systemes a couples statiques constants, invariable avec la vitesse.



### I-2-3- FORCE STATIQUE:

La determination de la force statique n'a aucun caractere rigoureux , elle est en effet experimentale et est donnee par la formule suivante:

$$F_s = f \frac{V}{K_p H}$$

avec :

f: coefficient lié à la résistance opposée par le matériau  
 v: volume du godet.  
 H: hauteur du chantier.  
 K: coefficient de friabilité

I-2-4 Couple statique:

Lavaleur du couple statique doit être ramenée à l'arbre du moteur de commande, son expression s'écrit alors:

$$C_s = \frac{F_s D_p}{2j}$$

avec :

D<sub>p</sub>: diamètre du pignon .  
 j : coefficient du système de réduction de vitesse.  
 : rendement énergétique du système de conversion mécanique

I-2-5 Résultats numériques:

Dans le cas de l'excavateur , les données sont les suivantes:

V: 8m<sup>3</sup>

j: 10

D<sub>p</sub>: 0,3

D'autre part nous prendrons:

f: 15.10<sup>3</sup>

H: 10m

K<sub>p</sub>: 1,2

Ce qui nous conduit aux résultats suivants:

$$F_s = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot 8}{10 \cdot 1,2} = 10^4 \text{ KGF}$$

$$C_s = \frac{10^4 \cdot 0,3 \cdot 0,95}{10 \cdot 1,2} = 1425 \text{ Nm.}$$

I-2-6 conclusion:

Ces valeurs numériques étant prises comme base, nous pouvons affirmer que le système se classe dans la catégorie des moyennes puissances.

### I-3-ETUDE DU SYSTEME DE COMMANDE/

#### I-3-1;Introduction;

Les particularites du service ont une grande importance sur le choix des equipements electriques des dispositifs de commande, la conception de ces derniers tient compte du type de service et un choix non conformement etudie entraine une perte en fiabilite. On distingue trois types de service:

—Service continu; caracterise par un fonctionnement constant, exemple: ventilateur, compresseur, pompe.

—service temporaire; la duree de travail est relativement courte, de tels services sont propres aux divers mecanismes d'action temporaire (ecluses, ponts mobiles...)

—service intermittent; caracterise par le fait que les periodes de travail alternent avec les poses (arret ou marche a vide) et par l'existence de cycles de travail; c'est a dire que la fonction des systemes de commande assurant de tels services est periodique. Comme exemples de mecanismes conformes a ce service, nous pouvons citer les laminoirs, les machines outils a travailler les metaux, les soudeuses...

LE SERVICE DU DISPOSITIF A ETUDIER S'APPARENTE A CETTE DERNIERE CATEGORIE. LE MODE DE TRAVAIL SE FAIT DONC SUIVANT UN CYCLE DIT D'EXCAVATION.

#### I-3-2; Presentation du cycle;

Le cycle ou periode d'excavation comporte les alternances suivantes:

a) Demarrage, fonctionnement en regime nominal, freinage et changement du sens de rotation du systeme. Au cours de cette premiere alternance, le godet se charge.

b) Arret du bras, mais rotation de la cabine, ceci afin d'amener la charge au niveau du wagon.

c) Demarrage, ensuite freinage et arret du bras, ceci pour positionner le godet au dessus du wagon.

d) Arret du bras, c'est au cours de celui-ci que la vidange se fait.

e) Enfin retour au point initial et debut de la periode suivante.

a	correspond a l'intervalle	AB
b	"	BC
c	"	CD
d	"	DE
e	"	EA

### I-4-CHOIX DU SYSTEME DE COMMANDE/

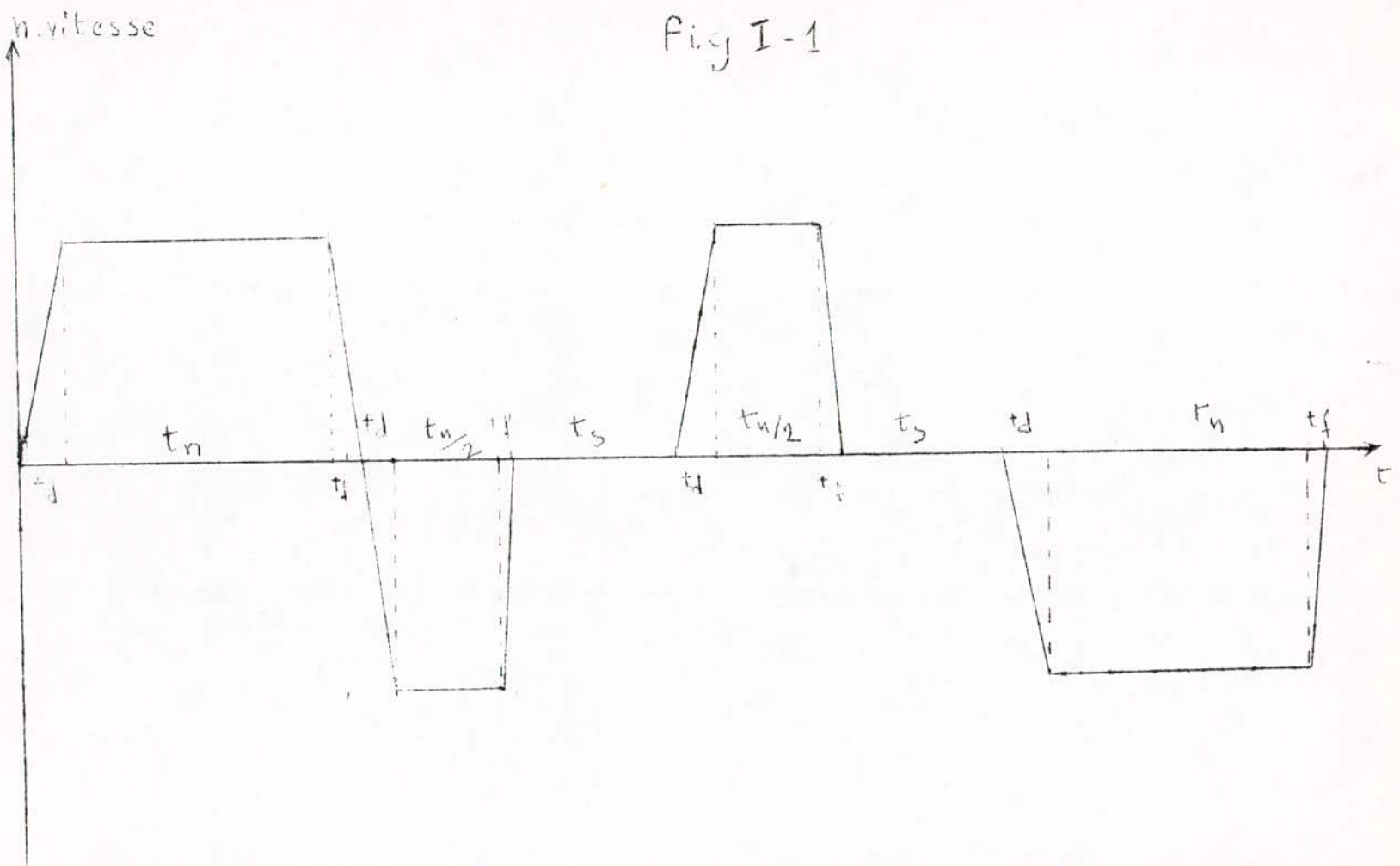
#### I-4- ; Critere de choix:

Le choix du systeme de commande doit s'appuyer sur les considerations suivantes:

—Le systeme doit etre choisi tel que la frequence tres elevee des demarrages, des freinages ainsi que des changements de sens de rotation ne doit pas alterer sa constitution.

CYCLE D'EXCAVATION

Fig I-1





--Le refroidissement doit être étudié de façon à permettre le fonctionnement en service intermittent.

---Forte capacité de surcharge, car le système sera soumis à des démarrages en charge.

---Grande stabilité mécanique, adaptation au travail de chantier.

---Plage de variation de la vitesse importante.

#### I-4-2- ACTION PAR MOTEUR A COURANT ALTERNATIF/

##### a) Moteur Synchronique:

La caractéristique mécanique d'un moteur synchrone est rigide; ceci est dû au fait qu'une variation de la charge mécanique fait changer la position angulaire relative du rotor par rapport au champ magnétique résultant, mais ne fait pas changer la position du rotor. Pour cette raison, le moteur synchrone est utilisé seulement pour commander des systèmes à vitesse non réglable. D'autre part le couple de démarrage d'un moteur synchrone est faible.

##### b) Moteur Asynchrone:

Dans le domaine du réglage de la vitesse, l'utilisation des moteurs asynchrones est de plus en plus répandue, ceci grâce à leur simplicité et à leur coût relativement bas. Mais dans le cas d'un service intermittent, l'utilisation des moteurs asynchrones est à éviter, ceci en raison de leurs courants rotoriques élevés qui donnent naissance à de grandes pertes joules.

Au cours de son exploitation le système sera soumis à des fréquences de démarrage, de freinage, élevées, de ce fait le moteur asynchrone n'atteint pas l'équilibre thermique et au cours de chacune des deux variantes le dégagement de chaleur croît exponentiellement avec le temps et peut donc ainsi détruire les isolants du moteur.

Généralement les moteurs asynchrones ne sont utilisés que dans le cas des fonctionnements stables (ventilateurs, compresseurs) voisins de leurs régimes nominaux où le rendement et le facteur de puissance sont maximums.

Dans certains cas, où la plage de variation de la vitesse est faible, on les utilise, la variation peut être obtenue par action sur:

- Le nombre de pôles du stator.
- Une résistance ohmique variable connectée en série avec le circuit rotorique.
- Sur la fréquence.

#### I-4-3- ) Action par moteur à courant continu:

Le principal avantage d'un moteur à courant continu est de permettre un réglage fin et progressif de la vitesse et ceci dans des rapports élevés.

L'utilisation d'un tel moteur nécessite un entretien approprié et un système convertisseur d'énergie avec transformateur, ce qui

L'utilisation d'un tel moteur necessite un entretien approprié et un systeme de conversion d'énergie alternative-continue avec transformateur, ce qui entraîne des dépenses considerables

Le choix préalable d'un moteur à courant continu se base : donc sur une étude économique, pour certaines utilisations (commande des laminoirs reversibles, et en general tous les dispositifs auxiliaires fonctionnant en service intermitant...), l'avantage présenté plus haut l'emporte largement sur les inconvenients; en effet, un réglage progressif et fin de la vitesse conduit à un travail productif et les dépenses supplémentaires sont vite converties.

Dans le cadre de notre étude, le servomoteur doit non seulement assurer un positionnement précis du godet, ce qui necessite un réglage fin, mais doit fonctionner suivant le cycle précédemment présente.

Le moteur à courant continu nous parait le mieux adapté à toutes ces exigences.

L'action sur la vitesse d'un moteur à courant continu peut se faire de deux manières:

- Par le flux donc par l'inducteur,
- Par la tension d'alimentation de l'induit.

Ce dernier mode qui a l'avantage et de loin, de présenter une plage de variation de la vitesse plus grande est le plus répandu.

La tension de l'induit peut être fournie au moteur de deux façons:

---Par un pont à thyristors relié au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur; le principe consiste à ne laisser passer qu'une fraction des alternances redressées, ceci par amorçage des redresseurs par des impulsions positives appliquées à leurs gachettes. Le retard est réglable par rapport à l'instant où l'anode devient positive relativement à la cathode.

La tension moyenne redressée est d'autant plus faible que ce retard est grand.

---Par une génératrice à courant continu.

Dans ce cas, le réglage se fait par l'excitation de celle-ci.

Les développements récents de l'électronique industrielle ont permis au premier dispositif d'éclipser progressivement le second, mais celui-ci présente l'avantage d'une plus grande 'résistance' aux sollicitations d'ordre mécanique; lorsqu'il s'agit de commander un véhicule de chantier, il est indispensable de choisir le système le plus mécaniquement stable; cette condition est d'autant plus importante que la puissance véhiculée est grande.

Un système de redressement à thyristors commandés comporte un grand nombre de connexions qui assurent le passage de courants forts, d'où un risque d'avoir une déconnexion qui peut avoir de graves conséquences.

Pour des raisons de fiabilité, nous choisirons donc un système génératrice-moteur.

I-4-4- SYSTEME GENERATRICE-MOTEUR/

Constitution

La generatrice, entrainee a vitesse constante par un moteur synchrone ou asynchrone, alimente directement l'induit du moteur de commande.

L'excitation du moteur doit etre independante et a tension constante. Ainsi une eventuelle variation de la tension de l'inducteur de la generatrice se repercuterait directement et seulement sur la tension aux bornes de celle-ci.

D'autre part, le flux du moteur etant constant, la variation de la tension de l'induit agit directement sur la vitesse.

Tout cela peut se resumer par les formules suivantes:

$$E_g = \frac{P_n}{a} N_g \cdot \phi_g = K_g \cdot N_g \cdot \phi_g$$

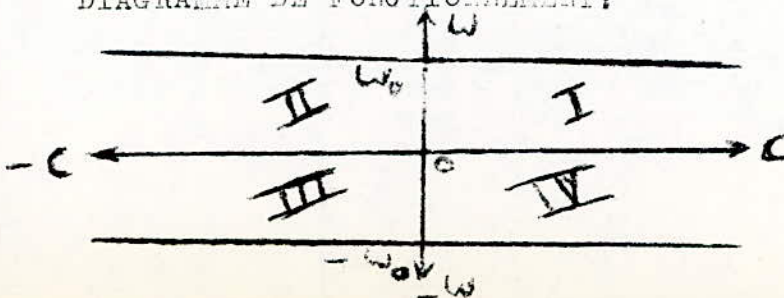
$$E_m = E_g - R_t \cdot I = C_e \cdot N \cdot \phi_n$$

$$N = \frac{E_g - R_t \cdot I}{C_e \cdot \phi_n} = K \cdot U_g \quad U_g = P$$

Le systeme generatrice-moteur permet d'assurer un demarrage rapide et un renversement de marche du moteur sans pertes car sans rheostat, du circuit principal,

Le freinage du moteur se fait egalement par reglage de la tension de la generatrice. Si on reduit rapidement l'excitation de celle-ci de sorte que la F.E.M delivree soit inferieur a la F.C.E.M du moteur, l'energie cinetique accumulee par ce dernier l'oblige a fonctionner en generateur, la generatrice fonctionne ainsi en moteur et le moteur d'entrainement M.A.S restitue de l'energie au reseau. Ce type de freinage est dit par recuperation.

DIAGRAMME DE FONCTIONNEMENT:



I et III; Rotation du moteur dans un sens ou dans l'autre.  
II et IV; Freinages

La variation de la vitesse et la regulation se font par l'intermediaire de la tension d'excitation de la generatrice; celle-ci peut etre fournie par differents dispositifs:

--AMPLIFICATEURS ROTATIFS: --Generatrice à 3 enroulements.  
--Amplidyne  
--Rototrol

--DISPOSITIFS STATIQUES: --Groupes thyristors commandes par amplificateur magnetique.

I-4-4-I) Excitation par amplificateurs rotatifs:

-- Definition

Un amplificateur est un dispositif qui, à partir d'un signal d'entree relativement faible, permet le controle d'un signal de sortie de puissance beaucoup plus grande.

Lorsque ce dispositif est une machine tournante, on l'appelle amplificateur rotatif.

--Generatrice à 3 enroulements :

C'est une generatrice compound qui en plus des enroulements shunt et serie comporte une bobine d'excitation separee.

(Voir schema page )

conformement à ce schema, ecrivons les equations ainsi formees:

La loi d'Ohm appliquee à l'enroulement d'excitation separee:

$$U_2 = r_2 I_2$$

D'autre part:

$$E - U = RI + R'(I + I_2)$$

$$U = r I - RI$$

A vitesse constante, en negligant la saturation, on peut ecrire

$$E = K \omega = K(n_1 i + n_2 i_2 - NI)$$

Le signe moins vient du fait que la F.M.M serie N est notee de façon à se retrancher de la F.M.M ni et d'excitation separee ni. Les relations ecrites precedemment permettent la determination du courant de sortie I :

$$I = \frac{K \frac{n_2}{r_2} U_2}{R \left( I + \frac{R'}{E} - K \frac{n_1}{r_1} \right) + R + KN}$$

Ainsi, dans le cas ou  $1 + \frac{R_1}{R_2} - K \frac{n_1}{n_2} = 0$

$$I = \frac{K \frac{n_2}{n_1} U_2}{R_1 + K n_1}$$

L'interet de la generatrice à 3 enroulements vient du fait que le courant I peut etre controle par la tension U<sub>2</sub>, ceci à vitesse constante. Cette propriété fait que les generatrices de cette conception sont utilisees dans les systemes à auto-regulation.

--- Amplidyne:

—constitution:

Une amplidyne est une generatrice à courant continu comportant deux enroulements: un enroulement de controle necessitant une tension d'entree relativement faible et un enroulement d'induit.

Flottant sur le collecteur, deux paires de balais sont montees à 90 degres, l'une suivant l'axe transversal et court-circuitée, l'autre suivant l'axe longitudinal et debitant sur la charge. (Voir schema page II)

—Principe:

Lorsque l'enroulement de controle est parcouru par un courant, un flux immobile dans l'espace prend naissance et provoque le passage du courant dans le circuit fermé de l'axe transversal de l'induit tournant.

Le flux magnetique de reaction d'induit également immobile dans l'espace est dirigé suivant l'axe des balais transversaux. Ce flux donne naissance à une F.E.M aux balais de l'axe longitudinal de l'induit.

SI on connecte une charge aux balais de l'axe longitudinal, dans le circuit ainsi fermé (conformement au schema) passe un courant qui va créer un flux de reaction d'induit oppose a qu'il faut donc eliminer, c'est pour cela que le stator de la machine comporte des enroulements de compensation. Le gain d'amplification d'une telle generatrice est donnée par :

$$k = \frac{U_2 I_2}{U_0 I_0}$$

Sa valeur peut dépasser 10<sup>4</sup>.

L'enroulement de controle est generalement utilise pour la regulation. Le principe est de le faire parcourir par le courant c del'erreur qui caracterise les systemes asservis à boucle fermée.

Conclusion:

Al'heure actuelle, le domaine d'utilisation des amplificateur rotatifs est tres vaste. Leur avantages, en particulier leur facteur d'amplification sont tres apprecies. cependant ils possèdent certains defauts importants dont une mauvaise commutation qui perturbe le regime de marche de l'installation, et une regulation globale souvent difficile. Pour ces raisons, l'industrie a plutôt tendance à les remplacer par des dispositifs statiques.

I-4-4-2, Dispositifs statiques/

a) Amplificateurs magnetiques;

Il existe divers amplificateurs magnetiques, le plus simple comporte deux enroulements (voir figure page II)

--Un enroulement de puissance, alimente en courant alternatif, dont les deux parties disposees dans les branches extremes, sont identiques, lorsqu'elles sont parcourues par un courant, elles produisent des flux egaux qui parcourent le circuit magnetique dans le meme sens.

--Un enroulement d'excitation, dispose dans la branche du milieu et alimente en courant continu. Les deux bobinages sont completement decouples, le flux alternatif ne passe pas dans la branche du milieu dont le potentiel magnetique est le meme aux deux bornes. Le flux continu passe dans les branches et sature plus ou moins, selon son importance le circuit magnetique. Le principe d'amplification est base sur la valeur tres grande de l'inductance dynamique du circuit de puissance mais qui diminue avec l'etat de saturation des toles.

AINSI? s'il n'ya pas saturation;

$$I_{\text{eff}} = \frac{U}{\sqrt{Z^2 + L^2 \omega^2}} \quad L\omega \text{ tres grand.}$$

S'il y a saturation;

$$I_{\text{eff}} = \frac{U}{\sqrt{Z^2 + L^2 \omega^2}} \quad L\omega \text{ presque negligeable}$$

dans le cas d'une forte saturation.

Il ressort donc que nous avons la possibilite de 'commander' le courant du circuit de puissance par le courant continu de la bobine d'excitation.

Les amplificateurs magnetiques sont utilises pour la commande et le reglage automatique des moteurs, la tension de sortie doit etre alors redressee.

Les A.M presentent l'inconvenient d'avoir une grande inertie

b) Pont à thyristors commandes;

La commande par convertisseurs a semi-conducteurs est de plus en plus recherchee. Leur tres haute competitivite est surtout due à une fiabilite sure, un rendement eleve une grande surete de service et des dimensions faibles.

En outre, les gachettes, actionnees par des dispositifs appropries et alimentees conformement aux variables de sortie, permettent une regulation sure de l'ensemble du systeme.

L'alimentation du pont se fait avec une tension adaptee du reseau, la liaison etant assuree par un transformateur

I-4-5 Presentation du systeme choisi:

Conformement aux considerations precedentes, le sys-

tene choisi sera un systeme Generatrice Moteur. L'excitation de la generatrice , donc la commande est assurée par des thyristors à gachettes.

I-4-6-Choix de la puissance;

Le bon choix de la puissance du systeme de commande est une condition importante pour un fonctionnement correct de l'ensemble.

L'installation d'un systeme dont la puissance est superieure à celle qui est necessaire provoque des pertes d'energie inutiles, donc des dépenses superflues. D'autre part , l'adaptation d'un systeme de puissance deficitaire implique des surcharges élevées qui entraînent la destruction de la partie de commande.

La puissance du systeme Generatrice-moteur doit etre choisie conformement à la puissance statique et au cycle de travail. Au cours de ce dernier et precisement lors des processus de charge et de vidange du godet , le systeme doit fonctionner à un regime élevé et cela entraine un echauffement intense qu'une machine non adaptée n'arrivera jamais à compenser . D'autre part , vu le milieu poussiéreux dans lequel l'engin est amené à travailler, il est necessaire de choisir des machines à version fermée.

C

Compte tenu de toutes ces considerations, ainsi que des calculs relatifs à la partie statique, nous avons choisi les machines dont les plaques signalétiques sont les suivantes:

MOTEUR:

TYPE:

Puissance Nominale: 100KW  
Tension " : 305v  
Courant " : 360A  
Facteur de marche : 80%  
Vitesse de rotation : 750T/MN  
Courant d'excitation : 12,7A  
Nombre de poles : 4  
Resistance de l'enroulement d'induit : 0,011 $\Omega$   
Resistance de l'enroulement d'excitation : 5,1 $\Omega$   
Resistance des poles d'auxiliaire : 0,0086 $\Omega$   
Nombre de sections de l'enroulement d'induit : 31  
Nombre de spires par pole de l'enroulement d'excitation: 470  
Nombre de spires par pole de l'enroulement auxiliaire : 14

GENERATRICE:

TYPE/:

Puissance Nominale : 115KW  
Tension " : 330V  
Courant " : 348A  
Vitesse de rotation : 1000T/MN  
Courant d'excitation : 12,6A  
Nombre de poles : 4  
Resistance de l'enroulement d'induit : 0,0108 $\Omega$   
Resistance de l'enroulement d'excitation: 6,35 $\Omega$   
Resistance de l'enroulement des poles auxiliaire : 0,0058 $\Omega$   
Nombre de spires par pole de de l'enroulement auxiliaire: 14  
Nombre de conducteurs tde l'induit : 744  
Nombre d'encoches dans l'induit : 62  
Tension d'excitation : 80V



I-4-7-Etude du couplage G-M;

a) puissance delivrée par la generatrice pour le systeme:

$$E_g = U_{nm} + I_n(R_g + R_f)$$

- $E_g$  : FEM que doit delivrer la generatrice.
  - $I_n$  : Courant nominal dans le circuit.
  - $R_g$  : Resistance de l'induit de la generatrice.
  - $R_f$  : Resistance des fils conducteurs.
- Nous prendrons  $R_f = 0,0072$

Conformement au tableau precedent nous pouvons ecrire :

$$E_g = 305 + 360(0,0108 + 0,0072) = 311,5 \text{ V}$$

Pour faire fonctionner le moteur à son regime nominal, la generatrice doit debiter un courant de 360A et une FEM DE 311,5V.

b) Resistances du circuit d'induit;

La resistance totale du circuit forme par les deux induits vaut:

$$R_o = R_g + R_{ag} + R_m + R_{am} = 0,0362$$

Pour des calculs ulterieurs, nous prendrons  $R_m$ , comme resistance de mesure.

$$R_m = R_o + 0,5 R_f = 0,0398$$

I-4-8-Characteristique mecanique du moteur choisi;

La caracteristique mecanique peut etre obtenu par le calcul, en effet, dans le cas ou la reaction d'induit est faible; on peut considerer que la caracteristique correspondant à l'evolution de la partie  $N_o$  jusqu'à  $N_n$  est lineaire

$N_o$  : Vitesse à vide.

$N_n$  : Vitesse à regime nominal.

La connaissance de deux points  $(N_o, C_o=0)$  ;  $(N_n, C_n)$  permet donc de connaitre cette evolution.

a) Valeurs de  $C_n$  et  $N_n$ ;

La vitesse nominale est donnée par le tableau:

$$N_n = 750 \text{ T/MN.}$$

Le couple nominal peut etre obtenu à partir du courant;

$$C_n = c_m \cdot I_n$$

$c_m$  etant la constante mecanique du moteur.

$$c_m = \frac{U_n - I_n(R_{ind} + R_{aux})}{I_n \cdot N_n} = \frac{305 - 360(0,0196)}{1,03 \cdot 750} = 0,376$$

$$C_n = 0,376 \cdot 360 = 1353,6 \text{ Nm}$$

B) Valeur de  $N_o$  :

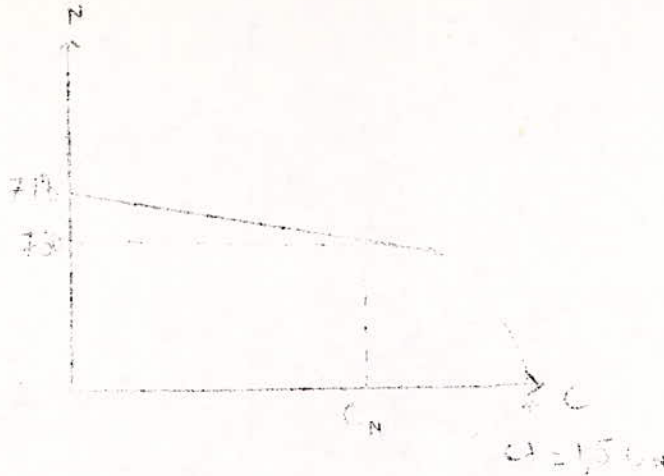
LE moteur fonctionnant à vide, avec  $U_n$  à ses bornes, nous pouvons ecrire:

$$U_n = c_e N_o$$

soit:

$$N_o = \frac{U_n \cdot N_n}{c_e (U_n - I_n (R_{ind} + R_{aux}))} = \frac{305 \cdot 750}{1,03 \cdot 750} = 788,11 \text{ T/MN}$$

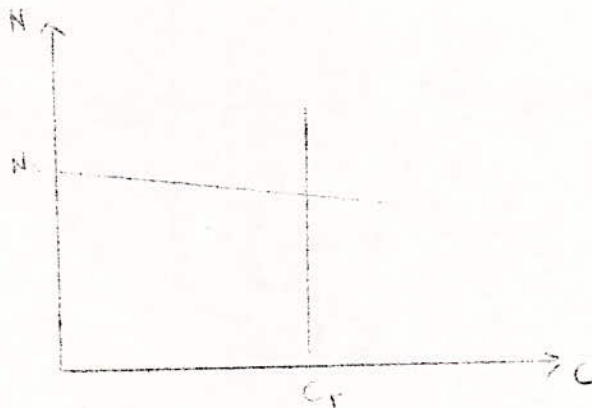
Courbe de la caracteristique mecanique du moteur:



Le couple de decollage du moteur avoisine 1,5 Cn nous prendrons  $C_d = 1,5 C_n = 1,5 \cdot 1353,6 = 2030,4 \text{ Nm}$

I-4-9-Point de fonctionnement du systeme:

Pour avoir le point de fonctionnement, il suffit de tracer les caracteristiques du moteur et de la machine à commander. à la meme echelle.



Le point d'intersection represente le point cherche.  
A ce point correspond une vitesse  $N = 750 \text{ T/MN}$

I -5-COUPLE EFFECTIF/

I-5-I-Definition:

Pendant le déroulement du cycle, le système est soumis à différents régimes de fonctionnement.

Un bon choix du système se concrétise par le fait que le servomoteur est capable de fournir les couples nécessaires pour l'accomplissement de chaque phase sans altérer sa constitution et celle du bras.

Le couple effectif représente le couple moyen développé au cours du cycle d'excavation.

Le calcul de celui-ci se fait par la méthode quadratique relativement au temps.

$$C_{eff}^2 = C_i^2 \cdot t_i / T$$

C<sub>i</sub> : Couple correspondant à la phase i

t<sub>i</sub> : Temps

T : Période d'excavation " " " "

I-5-2-Calcul du temps de démarrage:

Au moment où le moteur est mis sous tension, 2 couples s'opposent:

a) Le couple de démarrage électrique du moteur.

b) Le couple statique.

Il est évident que pour que le moteur démarre, il faut avoir

$$C_d > C_s$$

La phase de démarrage est régie par l'équation fondamentale du mouvement:

$$C_m - C_r = J_t \cdot dw/dt$$

J<sub>t</sub>: Le moment d'inertie des parties tournantes.

J<sub>t</sub> · dw/dt: COUPLE D'INERTIE

Le temps de démarrage correspond à la variation de 0 à W<sub>n</sub> de la vitesse angulaire.

$$dt = J_t \cdot (dw / (C_m - C_r))$$

$$t_d = J_t \cdot (w_n / (C_m - C_r))$$

$$\text{Avec } J_t = M_i R_i^2 = (M_i D_i^2) / 4$$

$$t_d = (P_t D^2 N_n^2) / (4g60(C_m - C_r))$$

$$t_d = (P_t D^2 / 375) \cdot (N_n / (C_m - C_r))$$

$$t_d = ((P D^2 + P' D'^2) / 375) \cdot (N_n / (C_m - C_r))$$

$P \cdot D^2 + PD^2$  / Représente le moment de giration des parties tournantes. Pour notre cas, nous prendrons:

$$\frac{PD^2 + P \cdot D^2}{375} = I$$

Alors:  $t_d = N_n / (C_m - C_r)$

Pour le démarrage (voir la courbe de la caractéristique mécanique du moteur), nous prendrons  $C_m = 1,5 C_n$

Numériquement:

$$C_{MAX} = 1,5 \cdot 1353,6 = 2030,4 N_m$$

$$C_r = 1425 N_m$$

$$t_d = 750 / (2030,4 - 1425)$$

$$t_d = 1,239 \text{ s}$$

I-5-3-Calcul du temps de freinage:

Pendant le régime de freinage, la tension aux bornes de l'induit change de polarité, de ce fait le couple moteur change aussi de sens, il a alors le même signe que le couple résistant:

Alors:

$$t_f = (PD^2 + P \cdot D^2) \cdot N_n / (375(C_m + C_r))$$

La moyenne du couple moteur pendant toute la durée du régime peut être considérée comme étant égale à:  $C_{MAX} - C_r$

$$t_f = 1,750 / (C_r + (1,5 C_n - C_r)) = 1,750 / 2030,4$$

$$t_f = 0,37 \text{ s}$$

I-5-4-Evaluation des durées des différentes phases du cycle:

Le cycle de travail comporte 4 grandes phases:

- Charge du godet dont la durée est approximativement 15s
  - Rotation de la cabine de commande avec la charge, phase dont la durée est évaluée à 10s
  - Décharge de la pelle qui s'effectue environ en 5s
  - Retour au point de départ en 10s
- Soit une durée du cycle de 40s

REMARQUE : CETTE VALEUR N'EST QU'UNE ASPECT APPROXIMATIF ELLE DEPEND SURTOUT DE LA QUALIFICATION, DES REFLEXES ET DE L'ATTENTION DU CONDUCTEUR DE L'ENGIN/.

I-5-5-Evaluation des couples développés lors des différentes phases:

--Conformement aux calculs précédents, le couple de démarrage vaut  $1,5 C_n$  et le couple de freinage ( $1,5 C_n - C_r$ ).

--Evidemment, en régime de fonctionnement normal, nous aurons  $C_m = C_r$ .

--Lors des processus d'arrêt du bras, le couple développé pour vaincre le couple qui résulte des forces de frottement est de l'ordre de  $0,2 C_r$ .

La répartition de ces couples est représentée sur la page suivante:

I-5-6 Calcul du couple effectif:

$$C_{eff}^2 = \frac{C_i^2 \cdot t_i}{T}$$

Numeriquement :

$$C_{eff}^2 = \frac{4t_d C_{max}^2 + 4t_f C_r^2 + 2(0,2C_r^2 t_s) + 3t_n C_r^2}{T}$$

Avec :

$t_d = 1,239s$   
 $t_f = 0,37s$   
 $t_s = 5s$   
 $T = 40s$   
 $t_n = 8,391s$

$C_{max} = 2030,4 Nm$   
 $C_r = 1425 "$   
 $C_f = 605,4 "$

Soit  $C_{eff} = 1350,0262 Nm$ .

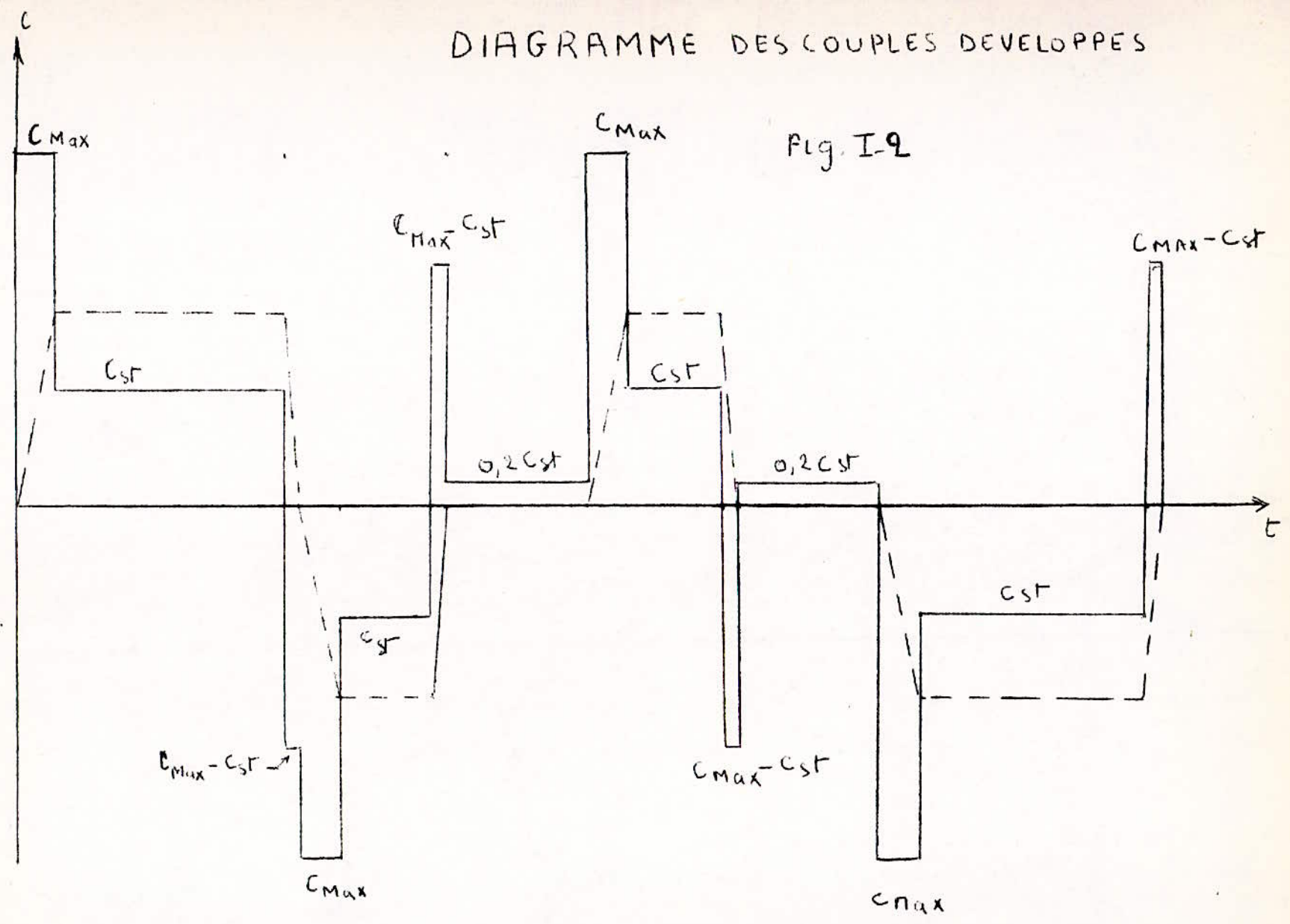
I-5-7 Conclusion :

Cette valeur du couple effectif, très proche de celle du couple nominal confirme le choix adéquat de la puissance du système de commande.

# DIAGRAMME DES COUPLES DEVELOPPES

Fig. I-9

-2I-



CHAPITRE II

ETUDE DU GROUPE CONVERTISSEUR

II-1: GENERALITES/

Au cours d'un cycle d'excavation, le moteur d'entraînement est contraint à des démarrages et des freinages fréquents très souvent intercalés de temps d'arrêt. Le sens de rotation du moteur peut être inverse. Les différentes manoeuvres ne sont possibles que par des changements successifs des régimes de fonctionnement de la génératrice. (Figure II-1)

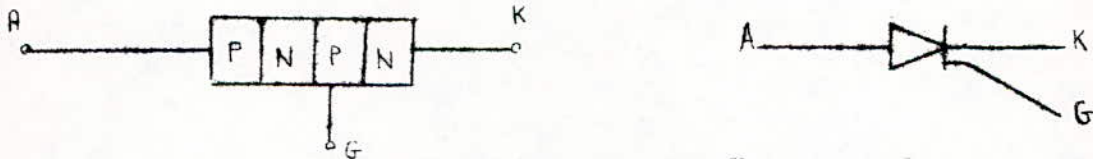
Par la variation du courant d'excitation de la génératrice, le groupe convertisseur permet le changement de la vitesse du moteur. Il est réversible; il peut fonctionner soit en redresseur soit en onduleur.

Le choix du groupe de convertisseurs triphasés alternatif-continu est imposé par la puissance appelée par le moteur et par le réseau d'alimentation.

II-2: THYRISTOR/

On appelle thyristor un semi-conducteur composé de quatre couches de silicium alternativement P, N et formant trois jonctions

Les couches externes constituent deux électrodes principales l'anode et la cathode, une couche médiane, généralement la couche P, forme l'électrode de commande ou la gâchette, l'autre couche médiane Nest la couche de blocage.



DANS le sens de polarisation inverse, la cathode étant positive par rapport à l'anode, le thyristor est bloqué. Il se comporte comme une diode polarisée en inverse.

Dans le sens de polarisation directe, le thyristor reste bloqué, l'amorçage ne sera possible que par l'augmentation de la tension directe jusqu'à une certaine valeur élevée  $V_{BO}$  dite "tension de retournement" ou par injection d'un courant  $I_G$  par la gâchette de polarité positive par rapport à la cathode. L'augmentation du courant  $I_G$  entraîne une baisse de la tension critique  $V_{BO}$ .

## II-3-SYSTEME DE CONVERTISSEURS ALTERNATIF-CONTINU/

### II-3-1; Choix du systeme:

#### a) Systeme convertisseur:

Un systeme convertisseur comprend les organes suivants:  
 — Un ensemble de  $p$  soupapes electriques qui peuvent etre regroupées suivants differents types de montages.  
 — Un transformateur de couplage au reseau alternatif.

Deux types de montages peuvent etre utilisés:

— Le pont de GREATZ triphasé (fig. II-2); Il n'est utilisé que pour des puissances de l'ordre de 300 KW Et plus.

— Le systeme à 2 montages triphasés simple voie en anti-parallele (fig. II-3); Utilisé dans notre cas pour l'excitation de la generatrice.

#### b) SYSTEME CHOISI;

Un systeme à deux montages triphasés simple voie en anti-parallele est constitué de 2 montages identiques, leurs angles de retard de phase à l'amorçage sont supplementaires. Les tensions redressées en valeur absolue, aux bornes des 2 montages, sont egales. Si l'un est redresseur avec un  $\varphi$  tel que  $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ , l'autre sera onduleur avec un  $\varphi$  tel que  $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$ .

Il y a deux manieres possibles pour commander de tels systemes:

— La commande normale; LES 2 montages fonctionnent simultanement, ce qui entraine l'apparition d'un courant de circulation  $I_y$  parcourant le circuit fermé constitué par les 2 montages. Sa limitation se fait par insertion d'une inductance entre les 2 montages. Cette inductance est formée de 2 bobines identiques tel que  $L_y = 2L'_y$ .

— La commande selective; Si un montage fonctionne l'autre est bloqué. LE circuit fermé par les 2 montages est ouvert car l'un des 2 est bloqué.

Dans le systeme étudié, le courant de circulation est tres faible  $I_y = 0, I_{In}$ . On prefero la commande normale à la commande selective dont la conception necessite beaucoup de circuits electroniques.

La reversibilité du systeme permet l'inversion de la tension d'excitation de la generatrice ce qui inverse le sens de rotation du moteur

Pour etudier le systeme choisi, il suffit d'etudier un montage triphasé simple voie (fig. II-4)

### II-3-2; Montage triphasé simple voie equilibré;

I/Tension redressée dans le cas de la commutation instantanée;

#### a) Aspect de la tension continu;

Le secondaire du transformateur fournit des tensions simples dephasées de  $2\pi/3$ ; On pose  $x = \omega t$

$$v_1 = V_m \cdot \cos x$$

$$v_2 = V_m \cdot \cos(x - 2\pi/3)$$

$$v_3 = V_m \cdot \cos(x - 4\pi/3)$$



Sur la figure II-5 sont représentées les sinusoides des tensions  $v_1, v_2, v_3$ , en fonction de  $x$ . Les points d'intersections de  $v_1, v_2$  déphasés de  $\pi$ , représentés par  $O_1$  ET  $O_2$ , delimitent un intervalle de phase où  $v_2 > v_1$ . Avant l'amorçage du thyristor 2, le courant  $i_a$  passe par le thyristor 1, la tension instantanée  $u_c$  aux bornes du circuit continu est  $v_1$ , en négligeant les chutes de tensions internes des thyristors. Durant la commutation des thyristors 1 et 2, le courant continu est transféré de 1 à 2, et la tension continue devient  $v_2$ .

L'amorçage d'un thyristor ne se fait pas instantanément dès que sa tension devient supérieure à celle du précédent mais avec un retard de phase  $\varphi$ . Durant la conductivité d'un thyristor, la tension aux bornes du circuit continu  $u_c$  est égale à la tension de phase du transformateur correspondant dans le cas d'un thyristor parfait. Les chutes de tensions aux bornes des thyristors peuvent être incorporées à  $u_c$  en cas d'existence.

La commutation entre deux thyristors n'est possible, que si on a l'angle de retard  $\varphi$  compris entre  $0 < \varphi < \pi$ , elle est instantanée si les impedances du circuit sont négligeables.

Le fait que la commutation se repete toutes les deux phases successives avec la même valeur de l'angle  $\varphi$ , donne une tension instantanée  $u_c$  aux bornes du circuit continu, formée d'une suite d'arcs de sinusoides identiques, se succedant à des intervalles de phases de  $2\pi/3$ . Au niveau du point de passage d'un arc au suivant qui est en retard d'un angle  $\varphi$  sur le point d'ordonnées positives d'égalité des sinusoides considérées existe une discontinuité. On obtient une tension instantanée  $u_c$  periodique par rapport à la variable  $x$ , sa periode égale à  $2\pi/3$  est trois fois inferieure à la periode de la tension simple du secondaire du transformateur.

b) Determination de la valeur moyenne;

Sur la figure II-5 on prend comme origine de phases le sommet de la sinusoides  $v_1$

Dans l'intervalle  $\varphi - \pi/3$  à  $\varphi + \pi/3$  la tension instantanée aux bornes du circuit continu est  $u_c = V_m \cos x$

Sa valeur moyenne est:

$$\bar{u}_c = \frac{3}{2\pi} \int_{\varphi - \pi/3}^{\varphi + \pi/3} V_m \cos x \, dx = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}\right) V_m \cos \varphi$$

POUR  $\varphi = 0$ :

$$\bar{u}_c = u_{cm} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}\right) \cos 0 \cdot V_m$$

$$u_{cm} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}\right) V_m$$

C'est le maximum de la valeur moyenne; il correspond au cas du redresseur à commutation naturelle ( $\varphi = 0$ )

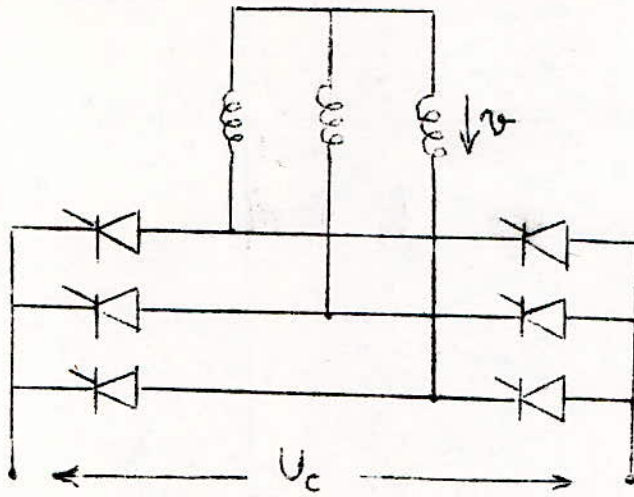


Fig II-2

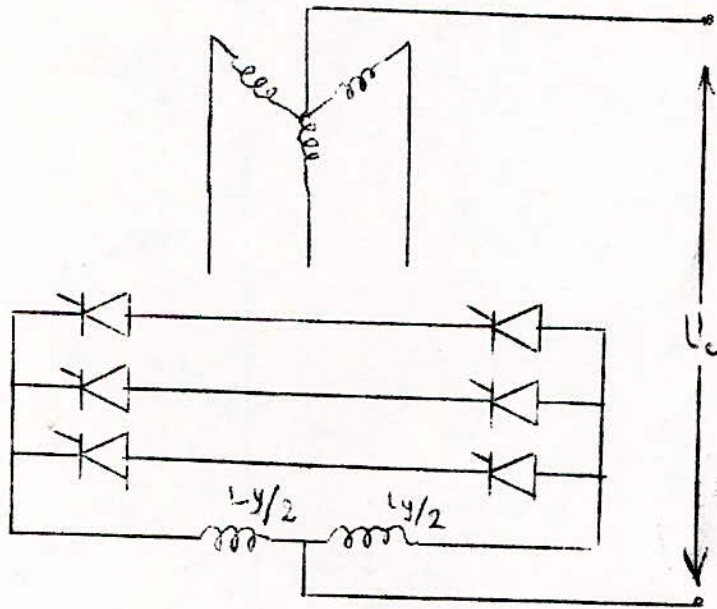


Fig II-3

Le meme montage peut fonctionner soit en redresseur si  $0 < \varphi < \pi/2$  SOIT en onduleur non autonome pour  $\pi/2 < \varphi < \pi$ , mais pour ce cas ci. il faut inverser la polarité de la tension du circuit continu, parce que le courant ne change pas de sens au moment du changement de signe de  $\cos \varphi$ .

La variation de la tension continue proportionnellement à  $\cos \varphi$  permet la réalisation d'un réglage de tension par retard de phase à la commutation. Des dispositifs consommant peu d'énergie asservissent facilement ce retard de phase  $\varphi$ . Ainsi on a un moyen de réglage extrêmement souple, sans perte de puissance active, mais avec consommation d'énergie réactive. Le facteur de puissance alternatif peut être de l'ordre de  $\cos \varphi$ .

DANS LE SYSTEME D'ENTRAINEMENT ETUDIE LA VARIATION DU SIGNE DE  $\cos \varphi$  PERMET L'INVERSION DE LA TENSION D'EXCITATION DE LA GENERATRICE, DONC LE CHANGEMENT DU SENS DE ROTATION DU MOTEUR.

c) Harmoniques regulieres de la tension continue;

Toute fonction periodique peut être developpée en serie de Fourier sous forme:

$$Y = \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \sin kx + B_k \cos kx)$$

$$A_k = (1/\pi) \int_0^{2\pi} y \sin kx dx$$

$$B_k = (1/\pi) \int_0^{2\pi} y \cos kx dx$$

k, Est un entier, y a une periode egale à  $2\pi$ .

La tension continue redressée est une sinusoide de periode  $2\pi/3$ . Elle peut être developpée en serie de FOURIER dont les frequences sont egales à k fois celle de  $u_0$  qui est egale à trois fois la frequence du reseau.

Le developpement de  $u_0$  dans l'intervalle  $\varphi - 2\pi/3$  à  $\varphi + 2\pi/3$  où  $u_0 = V_m \cos x$  necessite un changement de variable:

$$x = (z/3) + \varphi - \pi/3 \quad \text{Ce qui nous permet d'avoir une periode s'etendant de } 0 \text{ à } 2\pi$$

Amplitude de. l'harmonique de rang  $3k$  par rapport au reseau:

$$U_{3k \max} = \sqrt{A_{3k}^2 + B_{3k}^2}$$

$$A_k = (1/\pi) \int_0^{2\pi} \cos((z/3) + \varphi - \pi/3) \sin kx dz$$

$$B_k = \int_0^2 \cos\left(\frac{z}{3} + \varphi - T/3\right) \cos kz dz$$

$$U_{3kmax} = \sqrt{\left(U_{cm} \cdot \left(\frac{2}{(9k^2 - 1)}\right)\right)^2 \cdot 9k^2 \sin^2 \varphi + \left(U_{cm} \cdot \frac{2}{(9k^2 - 1)}\right)^2 \cos^2 \varphi}$$

$$U_{3kmax} = U_{cm} \left( \frac{2 \cos \varphi}{(9k^2 - 1)} \right) \sqrt{9k^2 \cdot \tan^2 \varphi + 1}$$

$$\frac{U_{3kmax}}{U_{cm}} = \left( \frac{2 \cos \varphi}{(9k^2 - 1)} \right) \cdot \sqrt{9k^2 \tan^2 \varphi + 1}$$

Le tableau suivant donne les valeurs du rapport  $U_{3kmax}/U_{cm}$  en fonction de  $k$  et  $\cos \varphi$ .

	$k$	$I$	$3$	$5$
$\cos$	$I$	0,25	0,025	0,0089
	0,8	0,493	0,136	0,0403
	0,6	0,618	0,180	0,0536
	0,3	0,717	0,214	0,0637
$F$		50	450	750

$$F_k = 3k \cdot F_0$$

$F_0$ : Frequence du reseau

$F$ : Frequence de la tension continue redressée

$$F = 3F_0 = 50 \text{ Hz}$$

Les courbes qui representent le rapport  $U_{3kmax}/U_{cm}$  en fonction de  $\cos \varphi$  pour differentes valeurs de  $k$  sont sur la fig. II-6  
Le développement en series de Fourier de la tension continue donne des harmoniques de tous les rangs multiples de 3; 6, 9, 2...

d) Harmoniques irreguliers de la tension continue;

Si le reseau fournit un systeme de tensions triphasé déséquilibré, la composante directe donne les harmoniques reguliers; et la composante inverse fournit des harmoniques supplémentaires de rang  $n = 3k \pm 2$ :

$$-k > 0; n = 3k + 2, (U_n/U_{cm}) = (I/(n - I)) \cdot (U_1/U_d)$$

$$-k > I; n = 3k - 2, (U_n/U_{cm}) = (I/(n + I)) \cdot (U_1/U_d)$$

e) Perturbations dues aux harmoniques :

L'augmentation rapide des frequences des harmoniques d'ordre superieur pouvant atteindre les frequences correspondantes au maximum de la sensibilité auditive, provoque des perturbations sur les circuits telephoniques.

La croissance de l'amplitude des harmoniques en fonction du rang est beaucoup plus rapide dans les montages à commutation, retardée que ceux à commutation naturelle. Le filtrage des tensions continues permet de diminuer ces troubles.

2/Courant continu dans le cas de la commutation instantanée :

Tant que le courant dans le circuit d'excitation de la generatrice reste ininterrompu en regime permanent, les expressions de la tension aux bornes du circuit continu obtenues precedemment sont valables pour definir la forme du courant dans le circuit continu, et nous permettent aussi de determiner les conditions dans lesquelles le courant en demeure ainsi.

Le probleme est etudie dans le cas d'un circuit continu renfermant une resistance et une inductance; c'est le cas du circuit d'excitation de la generatrice. Cette resistance et cette inductance representent la somme de toutes les resistances et inductances presentes dans le circuit continu (enroulement inducteur, demi bobine de limitation de courant  $L_y$  et bobine de lissage  $L_s$ )

a) Composante moyenne du courant continu :

$$I_c = U_c / R = U_{cm} \cdot \cos \varphi / R \quad I_c \text{ est toujours positif}$$

b) Composante alternative :

On determine la composante alternative du courant à partir de la composante alternative de la tension continu redressée considérée comme étant appliquée seule aux bornes du circuit formé de la resistance et de l'inductance. Pour obtenir un bon rendement, la resistance doit être negligeeable devant la reactance c'est le cas du circuit d'excitation de la generatrice où la resistance est tres faible devant la reactance  $\sqrt{3} \omega L_d$ ,  $\sqrt{3} \omega$  est la pulsation de la premiere harmonique de la tension continue, on obtient dans ces conditions des harmoniques du courant continu independantes de la resistance..

La composante instantanée globale du courant continu ne depend que de l'inductance  $L_d$  (totale).

Soit  $u_{ca}$  : la composante alternative de la tension

$i_{ca}$  : la composante alternative du courant

$$u_{ca} = u_c - U_{cm} \cdot \cos$$

L'equation differentielle du circuit :

$$u_{ca} - L_d \cdot \omega \cdot \frac{di_{ca}}{dx} = 0$$

$$D'où l'on tire : \frac{di_{ca}}{dx} = (u_{ca} / L_d \cdot \omega) \cdot dx$$

Considerons l'intervalle  $(\varphi - \pi/3, \varphi + \pi/3)$  :

$$U_c = V_m \cos x = (2\pi/3\sqrt{3}) U_{cm} \cos x.$$

$$U_{ca} = U_{cm} ((2/3\sqrt{3}) \cos x - \cos \varphi)$$

D'où la valeur de l'intégrale générale :

$$i_{ca} = (U_{cm}/Ld.w) (-\frac{2}{3\sqrt{3}} \cos x - \cos \varphi)$$

La valeur moyenne de la composante alternative du courant dont la période est égale à  $2\pi/3$  est nulle; ceci dans l'intervalle envisagé.

$$i_{ca}^- = -\frac{2}{2\pi} \int_{\varphi - \pi/3}^{\varphi + \pi/3} i_{ca} dx = 0$$

La constante A vaut donc :

$$A (U_{cm}/Ld.w) (\varphi \cos \varphi - \sin \varphi)$$

Dans l'intervalle  $(\varphi - \frac{\pi}{3}, \varphi + \frac{\pi}{3})$  ; l'expression de la composante alternative du courant s'écrit :

$$i_{ca} = (U_{cm}/Ld.w) (2\pi/3\sqrt{3} \cdot \sin x + (\varphi - x) \cos \varphi - \sin \varphi)$$

C-Détermination des valeurs extrêmes de la composante alternative :

Le maximum et le minimum du courant continu instantané sont obtenus pour  $di_{ca}/dx = 0$  ou  $U_{ca} = 0$ .  
 Suivant l'importance de  $\varphi$ , la courbe  $U_{ca} = f(x)$  présente deux aspects :

1) Pour nul ou très faible (FIG II-7)  $U_{ca}$  s'annule en deux points, le premier correspond au minimum négatif  $i_{caM}$ , le second au maximum positif  $i_{caM}$ . A CAUSE  $U_{ca}$  n'a pas de discontinuité dans les ordonnées positives.

2) Pour suffisamment grands (FIG II-8°),  $U_{ca}$  ne s'annule qu'en un seul point correspondant au maximum. A cause des discontinuités de tension qui provoquent une brusque variation de  $di_{ca}/dx$ , la courbe  $i_{ca} = f(x)$  présente aux extrémités de l'intervalle  $(\varphi - \frac{\pi}{3}, \varphi + \frac{\pi}{3})$  des points anguleux auxquels correspondent des minimums.

La valeur de  $\varphi_0$ , qui représente le cas limite entre les possibilités (FIG II-9) est déterminée en posant  $U_{ca} = 0$  pour  $x = \varphi_0 - \pi/3$

On obtient :

$$\text{tg } \varphi_0 = 3/\pi - 1/\sqrt{3} \quad \varphi_0 = 20^\circ 30'$$

Si  $\varphi < \varphi_0$  Nous sommes dans le cas envisagé en 1)  
 Si  $\varphi > \varphi_0$  " " " " " " " " 2)

Valeur maximale :

Pour tous les cas dans l'intervalle  $(0; \pi/2)$ , l'abscisse du maximum  $X_M$  EST ; /  
 $\cos X_M = (\sqrt{3}/2\pi) \cos \varphi$ .

La valeur maximale de la composante alternative du courant  $i_c$ , dans tous les cas est égale à :

$$i_{cam} = (U_{cM} / Ld.w) \left( \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \sin x_M + (\varphi - x_M) \cos \varphi - \sin \varphi \right)$$

Valeur minimale :

Pour  $\varphi < \varphi_0$  ; L'abscisse du minimum est  $x_m = x_M - x_M$ .  
 la valeur minimale de  $i_{ca}$  s'écrit alors ;

$$i_{cam} = \frac{-U_{cM}}{Ld.w} \left( \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \sin x_M - (\varphi + x_M) \cos \varphi + \sin \varphi \right)$$

Pour  $\varphi > \varphi_0$  :

$$x_m = \varphi - \frac{\pi}{3}$$

$$i_{cam} = - \frac{U_{cM}}{Ld.w} \left( \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \sin \left( \varphi - \frac{\pi}{3} \right) + \frac{\pi}{3} \cos \varphi - \sin \varphi \right)$$

$$i_{cam} = \frac{-U_{cM}}{Ld.w} \sin \varphi \left( 1 - \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \right)$$

La somme des composantes continue  $I_c$  et alternative est égale au courant instantané  $i_c$ . La variation de  $I_c$  (par action sur  $U_c$  ou sur  $R$ ) entraîne le déplacement de  $i_c = f(t)$  parallèle à l'axe des abscisses ; cette opération suppose l'inductance constante.

Le régime de fonctionnement est défini par la valeur de  $I_c$  :

--- Si  $I_c > I_{ck}$  avec  $I_{ck} = -i_{cam}$  qui est la valeur critique du courant, le régime est dit avec commutation

--- Si  $I_c < I_{ck}$  ; le régime est dit sans commutation.

- a - Coefficient d'ondulation :

Le rapport  $\frac{-i_{cam}}{I_c}$  est appelé coefficient d'ondulation négative du courant continu.

Il peut aussi être écrit :  $\frac{I_c k}{I_c}$ .

Ce rapport est toujours supérieur à 1 pour les régimes à débit avec commutation, est égale à 1 lors du passage aux régimes sans commutation.

Pour  $\varphi < \varphi_0$  
$$-\frac{i_{cam}}{I_c} = \frac{U_{cm}}{\omega \cdot L_d \cdot I_c} (\operatorname{tg} \alpha_m - \alpha_m)$$

Pour  $\varphi > \varphi_0$  
$$-\frac{i_{cam}}{I_c} = \frac{U_{cm}}{\omega \cdot L_d \cdot I_c} \left(1 - \frac{\pi}{3\sqrt{3}}\right) \sin \varphi$$

Pour une tension  $U_{cm}$  et un  $\varphi$  donnés, la connaissance de la valeur de  $\frac{-i_{cam}}{I_c}$  permet de calculer l'inductance de lissage.

$$L_d = \frac{U_{cm}}{\omega \cdot I_c \cdot \left(\frac{-i_{cam}}{I_c}\right)} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{3\sqrt{3}}\right) \sin \varphi$$

Notre cas correspond à celui de la commutation retardée avec une valeur de supérieure à  $\varphi_0$ .

### 3 - Tensions et courants dans les thyristors :

a - courants dans les thyristors :

Dans le cas de la commutation instantanée, chaque thyristor débite seul pendant un tiers de la période du réseau. La forme du courant résultant pour une période, est donnée en juxtaposant les trois courants ainsi obtenus.

- Valeur moyenne du courant dans les thyristors :

Pendant un tiers de la période du réseau, la valeur moyenne du courant dans un thyristor est  $I_c$ , elle est nulle pour le reste de la période.

La valeur moyenne calculée pour une période égale à  $2\pi$ , est :

$$\bar{i}_c = \frac{I_c}{3}$$

- Valeur efficace :

Pour un tiers de période le carré de la valeur efficace du courant du thyristor est égale à celui du courant continu  $I_{cef}^2$ .



Pour le reste , il est nul .

Pour toute la periode :

$$i_{ef} = \frac{i_{cef}}{\sqrt{3}}$$

Dans le cas de très faible ondulation du courant , on peut approximer la valeur efficace  $i_{cef}$  par la valeur continu  $I_c$  .

$$i_{cef} \approx I_c$$

d'où :

$$i_{ef} = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$$

- Valeur crête :  $\hat{i}$  du courant dans le thyristor :

Elle est égale à celle du courant continu instantané

$$\hat{i} = \hat{i}_c .$$

La valeur du courant atteinte lors d'un court - circuit est la valeur de crête que doit supporter un thyristor durant le déclenchement des dispositifs de sécurité.

$$\hat{i} = I_{cc}$$

L'insertion d'une inductance de lissage dans le circuit influence peu la valeur crête .

Dans le cas des commutations non instantanées , en regime permanent, les formules des valeurs moyenne et crête du courant déterminées précédemment restent valables . Pour les valeurs efficaces, elles demeurent suffisamment approchées si les valeurs relatives aux charges nominales de l'angle de commutations binaire sont conservées

b - Tensions aux bornes des thyristors :

Le thyristor 1 debite seul ou en commutation avec un autre , la tension à ses bornes est égale à sa chute de tension interne :

$$U_1 = \eta \quad \text{ou} \quad U_1 - \eta = 0$$

s'il est bloqué, son potentiel anodique

est égale à  $U_1$  , le potentiel cathodique est imposé par le ou les thyristors en debit .

- Si le thyristor 2 est amorcé , le potentiel cathodique du thyristor 1 est  $v_2 - \eta$

$$\text{d'où la tension à ces bornes} \quad U_1 = v_1 - (v_2 - \eta)$$

$$\text{ou} \quad U_1 - \eta = v_1 - v_2 .$$

- Si le thyristor 2 est en commutation avec le thyristor 3 le potentiel cathodique est  $\frac{v_2 + v_3}{2} + \eta$  et la tension du thyristor 1 est :

$$U_1 - \eta = v_1 - \frac{v_2 + v_3}{2}$$

La valeur crete de la tension inverse est deduite de la Fig II - 10

4 - Etude de la commutation .

Dans les calculs precedants , nous avons négligé les impedances des differents circuits en supposant la commutation instantanée ; car les divers inductances et resistances des éléments des circuits nous donnent une commutation non instantanée mais avec un certain angle  $U$  dit angle de commutation :  $U = \omega \tau$

La Fig II - 11 represente le schema du principe de la commutation dans lequel l'inductance  $L$  et la resistance  $R_c$  sont les sommes de toutes les inductances et resistance  $R$  du circuit .

Nous considerons qu'elles sont égales pour les 3 circuits .

Equations de la commutation 1 - 2 '

$$V_1 = L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + n + U_c + R_c \cdot i_1$$

$$V_2 = M \frac{di_1}{dt} + L \frac{di_2}{dt} + n + U_c + R_c \cdot i_2$$

Le courant pendant la commutation est constant .

Il est egale :

$$i = i_1 + i_2 = I_c$$

a - Tensions continue pendant la commutation :

En ajoutant membre à membre les 2 équations on tire :

$$U_c = \frac{V_2 + V_1}{2} - \frac{L + M}{2} \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) - n - R_c \frac{i_1 + i_2}{2}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} = 0$$

$$U_c + n = \frac{V_2 + V_1}{2} - \frac{R_c I_c}{2}$$

b - Determination de la durée de commutation .

Dans les calculs suivants, on neglige  $R_c$  .

Le debut de la commutation est pris pour un nouvel origine

$$V_2 - V_1 = V_m \cdot \cos \left( x + \varphi - \frac{\pi}{3} \right) - V_m \cdot \cos \left( x + \varphi + \frac{\pi}{3} \right)$$

on obtient :  $V_2 - V_1 = 2 V_m \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cdot \sin ( X + \varphi )$

en retranchant membre à membre les deux équations de la commutation, on obtient :

$$V_2 - V_1 = (L - M) \left( \frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right)$$

or 
$$\frac{di_1}{dt} = - \frac{di_2}{dt}$$

$$0 \int_0^{\tau} (v_2 - v_1) dt = 2(L - M) \left| i_1 \right|_0^{\tau}$$

$$0 \int_0^{\tau} V_{in} \sin \frac{\pi}{3} \cdot \sin(x + \varphi) dx = 2(L - M) I_c$$

$$\cos \varphi - \cos(\omega\tau + \varphi) = \frac{2(L - M) \cdot I_c \cdot \omega}{\sqrt{3} \cdot V_{in}}$$

posons :  $(L - M) \cdot \omega \approx X_c$  . reactance entre les thyristors et le circuit alternatif .

$$\cos \varphi - \cos(u + \varphi) = \frac{2 X_c \cdot I_c}{\sqrt{3} \cdot V_{in}} = \frac{3 X_c \cdot I_c}{\pi \cdot V_c}$$

Cette formule permet la détermination de la durée de la commutation

C - Condition de stabilité des onduleurs non autonomes :

Pour éviter les risques d'un réamorçage intempestif des thyristors qui provoque un court - circuit, on laisse un temps de repos  $\tau_r$  ; entre la fin de la commutation et le point d'égalités des tensions commutantes

posons  $\omega \cdot \tau_r = \delta$

on doit avoir :  $\varphi + u < \pi - \delta \Rightarrow \cos(\varphi + u) > -\cos \delta$

or 
$$\cos \varphi - \cos(\varphi + u) = \frac{2 U_x}{U_{cM}}$$

d'où on tire la condition de stabilité :

$$\cos \varphi + \cos \delta > \frac{2 U_x}{U_{cM}}$$

la fig II - 12 représente la tension continue en fonctionnement on duleur.

5 - Chutes de tensions :

Trois formes de chutes de tensions se produisent dans le système convertisseur

a - chutes de tensions resistives:

Elles sont dues aux differentes pertes par effet joule dans l'enroulement du transformateur, les differentes bobines et les conducteurs.

Elles sont exprimées en fonction de la resistance globale du systeme ramené du coté continu.

$$V_r = R_c \cdot I_c$$

C - chutes de tensions inductives:

Elles sont dues à la commutation

$$V(x) = V_2 - \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{V_2 - V_1}{2}$$

$$V_{\text{eff}} = \frac{V_n}{2} (\cos \chi - \cos(\chi - 2\pi/3))$$

d'où la valeur moyenne

$$U_x = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{V_n}{2} \cdot \int_{-\pi/3}^{+\pi/3} 2 \sin \chi \sin(x - \frac{\pi}{3}) dx$$

$$U_x = \frac{V_c n}{2} (\cos \varphi - \cos(\varphi + \frac{\pi}{3}))$$

$$V_x = \frac{3 X_c \cdot I_c}{2\pi}$$

La fig. II - 13 représente la tensions continue en fonctionnement redresseur entenant compte des differentes chutes de tension.

II - 4 Transformateur d'alimentation.

II - 4-1 CIRCUIT SECONDAIRE

Le montage du secondaire en étoile nous permet d'avoir le même courant qui circule dans les thyristors et les enroulements du transformateur.

La figure II-14 donne la forme du courant dans le secondaire pour les trois phases dans le cas d'une commutation instantanée et d'un parfait lissage.

ou aura  $I_{\text{max}} = I_c$ .

II - 4-2 CIRCUIT primaire dans le cas de la commutation instantané.

$$\text{soit } i_1', i_2', i_3' \text{ et } V_m \cos \chi, V_m \cos(x - \frac{2\pi}{3}), V_m \cos(x - \frac{4\pi}{3})$$

les courants et les tensions primaires instantanées de phase. Le dephasage, ou angle de couplage entre la tension d'une phase du reseau et celle de la phase resultante en debit est 0.

Dans l'intervalle  $\varphi - \frac{\pi}{3} + \theta$  et  $\varphi + \frac{\pi}{3} + \theta$ , la tension secondaire est  $V_m \cos(x - \theta)$ . En supposant la puissance du circuit primaire égale à la puissance du secondaire, nous pouvons écrire:

$$V_m \cos x \cdot i_1' + V_m \cos(x - \frac{2\pi}{3}) \cdot i_2' + V_m \cos(x - \frac{4\pi}{3}) \cdot i_3' = V_m \cos(x - \theta) \cdot i_c$$

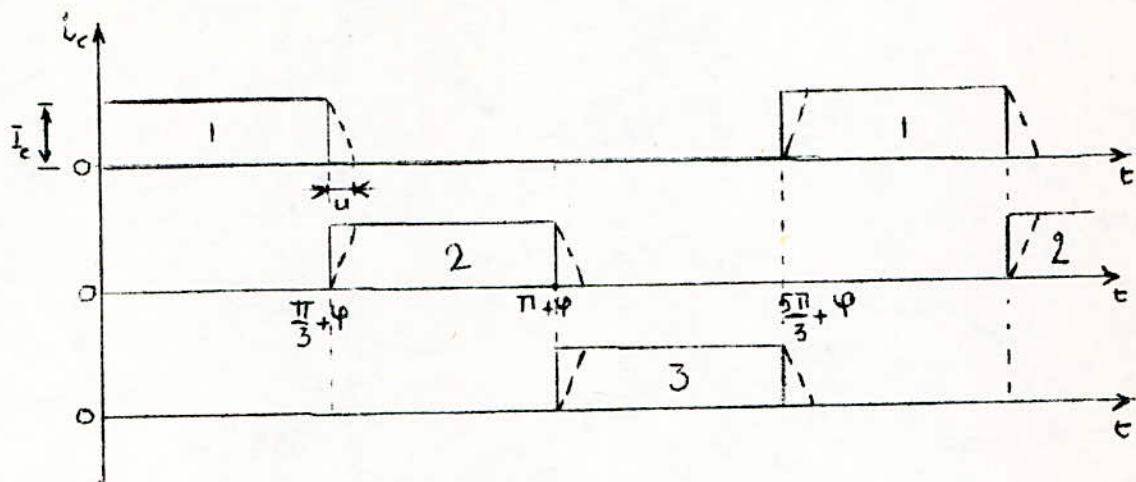


fig II-14

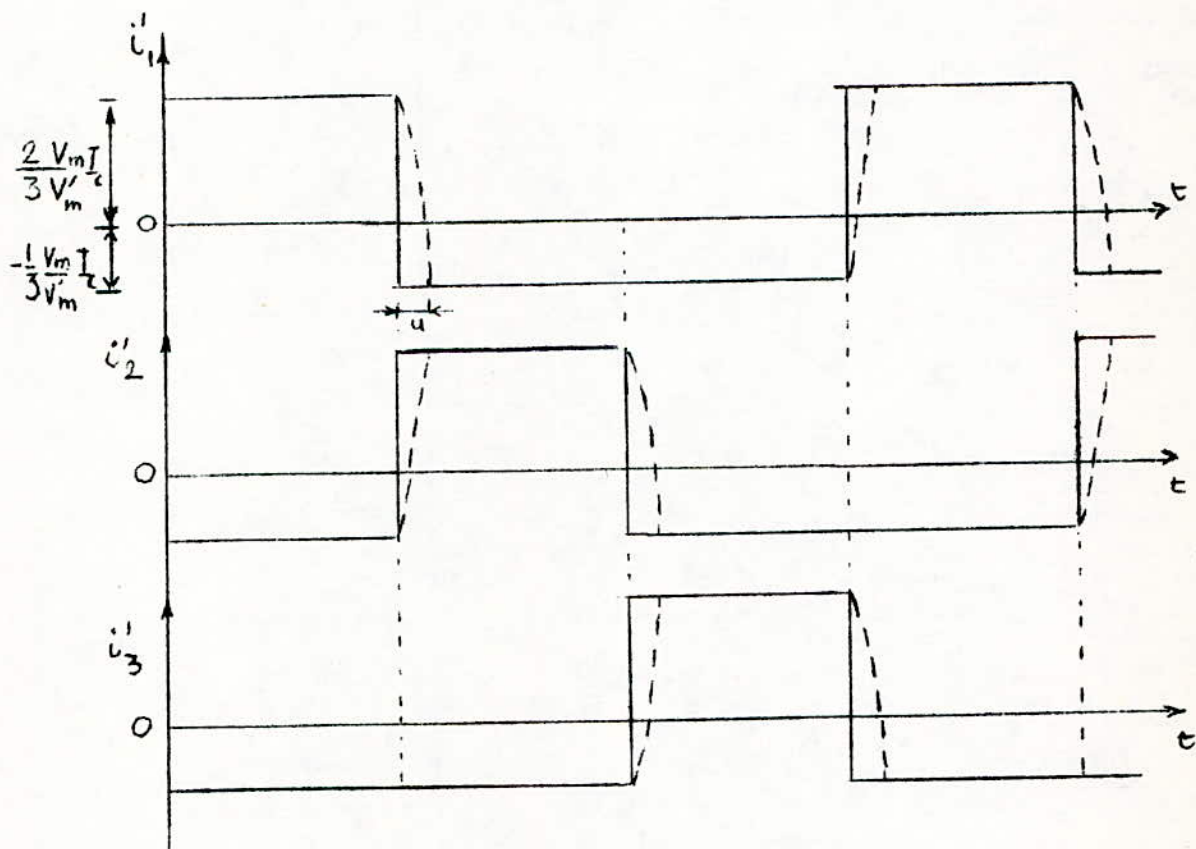


fig II-15

C'est une identité satisfaisante quelque soit  $x$  dans l'intervalle considéré.

$$\left( V_m i_1 + V_m i_2 \cos \frac{2\pi}{3} + V_m i_3 \cos \frac{4\pi}{3} \right) \cos x + \left( V_m i_2 \sin \frac{2\pi}{3} + V_m i_3 \sin \frac{4\pi}{3} \right) \sin x$$

$$= \left( V_m i_c \cos \theta \right) \cos x + \left( V_m i_c \sin \theta \right) \sin x$$

Par identification terme à terme des coefficients de  $\cos(x)$  et  $\sin(x)$ , on obtient 2 équations à 3 inconnues  $i_1'$ ,  $i_2'$ ,  $i_3'$ ; La troisième équation permettant la résolution du système est:  $i_1' + i_2' + i_3' = 0$  (système triphasé équilibré)

on tire :

$$i_1' = \frac{2}{3} \frac{V_m}{V_m'} \cdot i_c \cos \theta$$

$$i_2' = \frac{2}{3} \frac{V_m}{V_m'} \cdot i_c \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_3' = \frac{2}{3} \frac{V_m}{V_m'} \cdot i_c \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right)$$

Ces expressions ne sont valables que dans l'intervalle  $\theta - \frac{\pi}{3}$  à  $\theta + \frac{\pi}{3}$

Pour les intervalles suivants la figure II-15 représente la forme des courants primaire pour un angle  $\theta$  égale à zéro ( $\theta = 0$ ) et une commutation instantanée.

Si la commutation n'est plus instantanée, un changement minime intervient dans la forme des courants primaires et secondaires, les discontinuités sont remplacées par des variations graduelles qui sont représentées sur les figures II - 12 et II - 13 par des pointillés Pendant la commutation 3 - 1 ou a  $i_c = i_1 + i_3$ .

à  $i_1$ , correspond la tension  $V_m \cos(x - \theta)$  et à  $i_3$  correspond la tension  $V_n \cos(x - \theta) + \frac{2\pi}{3}$ , par un calcul analogue à celui effectué précédemment on obtient:

$$i_1' = \frac{2}{3} \frac{V_n}{V_n'} \cdot i_c \left( \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + \left( \cos \theta - \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{i_1}{i_c} \right)$$

C'est l'expression du courant pendant la commutation. 3-1.

II - 4 -3 Puissances réelle et réactive,  $\cos \phi$  et Facteur de Puissance

La tension maximale d'une phase du secondaire est :  $V_n = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \cdot V_c M$

Si la tension en ligne est sinusoïdale, c'est généralement le cas, seul le terme fondamental du courant intervient dans les expressions des puissances.

$$\text{Puissance active: } P = 3 \cdot \frac{V_n'}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_n}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_1'}{\sqrt{2}} \cdot \cos \phi$$

$V_m'$ : tension simple maximale primaire

$I_1'$ : valeur maximale de la fondamentale du courant primaire

$\phi$ : de phasage entre la fondamentale du courant et la tension simple primaire

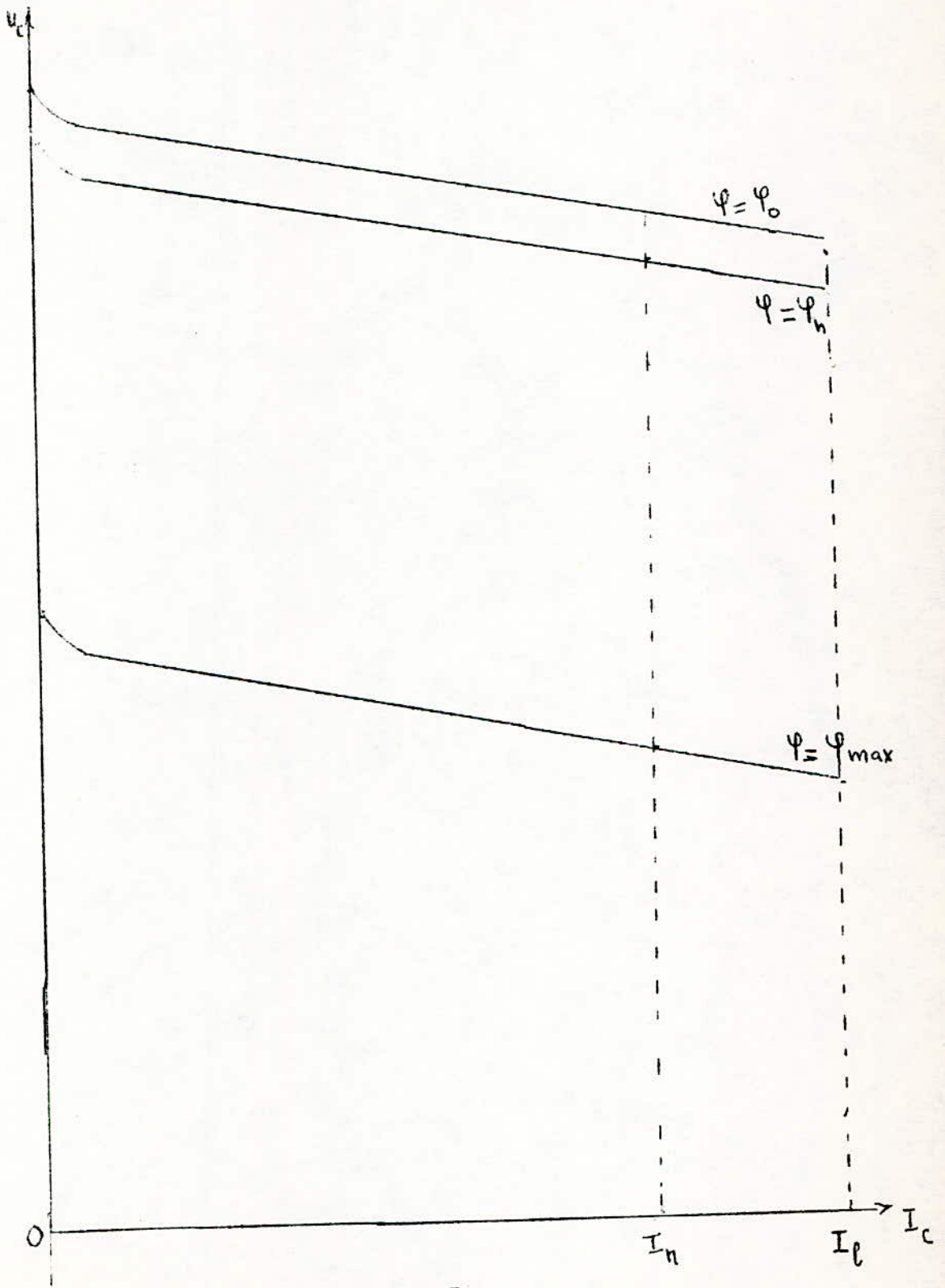


fig II 16

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_m}{V'_m} \cdot I_c$$

Si le courant est parfaitement filtré ou obtient

$$\text{tg } \phi_1 = \frac{2u + \sin 2\varphi - \sin 2(\varphi + u)}{\cos 2\varphi - \cos^2(\varphi + u)}$$

Dans le cas de la commutation retardée ( $\varphi \neq 0$ ) et pour les faibles valeurs de

$$\text{d'où } \phi_1 = \varphi + \frac{u}{2}$$

Au déphasage  $\phi_1$ , il faut ajouter un déphasage supplémentaire pour tenir compte des ondulations du courant continu, il est négligeable en général sauf dans le cas du monophasé.

L'angle  $\phi_1$  est compris entre  $0 < \phi_1 < \pi$  en fonctionnement onduleur ou redresseur,  $\sin \phi_1$  est toujours supérieur à zéro ( $\sin \phi_1 > 0$ ) donc le système convertisseur absorbe de l'énergie réactive au réseau.

Le dimensionnement du primaire du transformateur nécessite la connaissance de la puissance apparente

$$S = \frac{3 V'_m}{\sqrt{2}} \cdot I'_{ef} = \frac{P}{k'}$$

$$I'_{ef} = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_m}{V'_m} \cdot \frac{I_c}{\sqrt{2}} : \text{ valeur efficace du courant primaire}$$

$$k' = \frac{P \sqrt{2}}{3 V'_m \cdot I'_{ef}} : \text{ facteur de puissance alternative}$$

$$k' = \frac{I'_m}{\sqrt{2} \cdot I'_{ef}} \cos \phi_1$$

$$k'_f = \frac{I'_1 / \sqrt{2}}{I'_{ef}} : \text{ facteur de forme du courant primaire}$$

$$\frac{I'_1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cdot \frac{V_m}{V'_m} \cdot I_c : \text{ valeur efficace de la fondamentale du courant primaire}$$

$$\frac{I'_m}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}\pi} \cdot \frac{V_m}{V'_m} \cdot I_c$$

$$k' = k'_f \cos \phi_1$$

$$k'_f = \frac{3 \sqrt{3}}{2 \pi}$$

$$\cos \phi_1 = \cos \left( \varphi + \frac{u}{2} \right)$$

d'où la valeur de  $k'$ :

$$k' = \frac{3 \sqrt{3}}{2 \pi} \cos \left( \alpha + \frac{u}{2} \right)$$

Les puissances actives et réactives peuvent être exprimées en fonction de  $U_c M$  et  $I_c$ .

$$P = U_c M \cdot I_c \cdot \cos \phi_1$$

$$Q = U_c M I_c \sin \phi_1$$



$$\text{d'où : } S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\frac{S^2}{(V_e I_c)^2} = \frac{P^2}{(V_e M I_c)^2} + \frac{Q^2}{(V_c \cos I_c)^2}$$

Dans un système d'axes .  $\left( \frac{P}{U_c M I_c}, \frac{Q}{V_c M I_c} \right)$

$\frac{S^2}{(U_c M I_c)^2}$  est un demi cercle de rayon l'unité .

## II - 5 protection du système convertisseur

### II - 5 - 1 Protection du montage contre les surintensités

Les surintensités ont des causes multiples pouvant être externes ou internes.

#### a - Origine externe :

Les surintensités sont dues à une augmentation excessive du courant redressé provenant généralement d'une surcharge ou d'un court - circuit dans le réseau d'utilisation pour un redresseur. Pour un on duleur, elles proviennent d'une baisse de tension du réseau alternatif ou d'une hausse de la tension fournie par la source continu .

#### b - Origines internes :

Les surintensités résultent d'une avarie survenant à un ou plusieurs thyristors. Elles provoquent une cessation de l'effet redresseur soit par avalanche soit par claquage .

Les perturbations de la commande d'amorçage peuvent être à l'origine des surintensités, surtout dans le cas d'un déblocage intempestif .

#### c - Protection globale .

on emploie des disjoncteurs multipolaires placés du côté alternatif pour assurer la protection contre les perturbations internes et externes .

Dans le cas des basses tensions, un disjoncteur alternatif à coupure rapide peut jouer le rôle équivalent à celui du disjoncteur continu puisqu'on a une répercussion instantané, sur le circuit alternatif, des surcharges continues. Ceci n'est valable que pour un redresseur . Pour un onduleur non autonome, le montage doit être protégé par un disjoncteur continu et un disjoncteur alternatif avec un dispositif permettant l'ouverture du premier avant le deuxième .

d - Protection individuelle :

Elle permet d'atteindre deux buts :

le premier c'est l'interuption d'une surintensité brutale donc elle empêche la destruction des thyristors ; le deuxième c'est l'isolation du thyristor avarié par court-circuit, en utilisant des fusibles ou des disjoncteurs Unipolaires à déclenchement instantané .

II - 5 - 2 Protection contre les surtensions

Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine des surtensions :

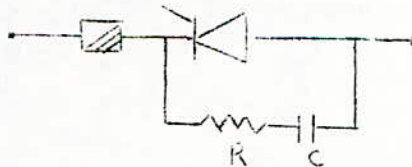
- les regimes transitoires dus aux coupures d'une surcharge inductive, en derivation sur l'alimentation ou du circuit continu inductif avec inductances series dans le circuit alternatif.
- mise sous tension du transformateur d'alimentation
- courants inverses dynamiques dans les thyristors

Protection :

Diverse methodes sont utilisés. Parmi lesquelles on peut citer la protection global qui consiste à la mise des capacités en derivation sur les fils d'arrivée alternative, la protection individuelle par elements non linéaires et la protection individuelle des thyristors par mise en derivation d'un circuit RC sur chaque thyristor. Cette derniere methode est utilisé dans notre cas avec en plus des fusibles pour la protection contre les surintensités

$$R = 22 \Omega$$

$$C \rightarrow 0,5 \mu F$$



II - 6 - Calcul du systeme convertisseur

II - 6 - 1 Choix des thyristors :

a - courant dans une branche

$$\text{Valeur moyenne } \bar{i} = \frac{I_c}{3} = \frac{12,6}{3} = 4,2 \text{ A} \quad \underline{\bar{i} = 4,2 \text{ A}}$$

$$\text{Valeur efficace } i_{ef} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} = \frac{12,6}{\sqrt{3}} = 7,274 \text{ A} \quad \underline{i_{ef} = 7,27 \text{ A}}$$

b - Tensions :

les chutes de tensions sont estimées à 20% de la tension maximale redressée.

$$U_c = U_{cM} - \Delta U \quad \Rightarrow \quad U_c = 0,8 U_{cM}$$

On calcule les valeurs maximales des tensions suivantes:

$$\text{tension redressée : } U_{cm} = \frac{80}{0,8} = 100V \quad U_{cm} = 100V$$

$$\text{tension simple secondaire: } V_m = \frac{U_{cm}}{0,827} = 120,92V \quad V_m = 121V$$

$$\text{tension inverse: } U = V_m \sqrt{3} = 209,44V \quad U_1 = 909,4V$$

c-Choix du thyristor:

Le thyristor choisi est du type T1100/8 selon les normes sovietiques.

II-6-2 Calcul des inductances:

a-inductance de limitation de courant.

$$L_y = \frac{V_m \cdot K_y}{w \cdot I_y} \quad \begin{matrix} I_y: \text{courant de circulation} \\ K_y: \text{coefficient dependant du systeme} \end{matrix}$$

$$I_y = 0,1 I_c = 0,1 \cdot 12,6 = 1,26A \quad I_y = 1,26A$$

$$L_y = \frac{121 \cdot 0,65}{3 \cdot 14 \cdot 1,26} = 0,198H \quad L_y = 0,198H$$

Demi inductance

$$L'_y = \frac{L_y}{2} = 0,0993H \quad L'_y = 0,099H$$

b-inductance de lissage:

inductance de l'inducteur:  $L_a = 4,526H$

inductance reelle de lissage:

$$L_{dr} = L_a + L'_y = 4,526 + 0,0993 = 4,625H \quad L_{dr} = 4,62H$$

inductance necessaire de lissage:

$$L_{dnes} = \frac{0,395 \cdot U_{cm} \cdot \sin \varphi}{0,1 \cdot w \cdot I_c} \quad \begin{matrix} \text{on prend } \varphi = 90^\circ \text{ QUI est le} \\ \text{cas le plus defavorable} \end{matrix}$$

$$L_{dnes} = \frac{0,395 \cdot 100 \cdot 1}{0,1 \cdot 314 \cdot 12,6} = 0,0999H \quad L_{dnes} = 0,1H$$

La comparaison de  $L_{dr}$  et  $L_{dnes}$  nous permet de conclure qu'une inductance supplémentaire de lissage n'est d'aucune utilité

II-6-3-Chutes de tensions:

Le transformateur utilisé appartient à la catégorie TT de la classification soviétique dans laquelle les tensions de court-circuit active ( $U_{acc}$ ) et réactive ( $U_{rcc}$ ) ont pour valeur:

$$U_{acc} = 2,5\% \quad U_{rcc} = 9,5\%$$

a-chute de tension interne des thyristors:

On a un thyristor par branche donc  $U_T = I V$   $\frac{U = I V}{T}$

b-Chute de tension résistive:

$$U_r = R_c I_c \quad \text{avec} \quad R_c = R_T + R'_y$$

$R_T$ : résistance du transformateur ramené au secondaire

$R'_y$ : résistance de la demi bobine de limitation de courant

$$\frac{R'_y = 0,1 \Omega}{-----}$$

$$R_T = \frac{U_{acc} \cdot V_m}{\sqrt{2} I'_2 \cdot 100}$$

$I'_2$ : valeur efficace du courant secondaire d'une branche qui tient compte de la commutation.

$$I'_2 = I, I, 1_{ef} \quad I'_2 = I, I, 7, 27 = 8 \text{ A}$$

$$\frac{I'_2 = 8 \text{ A}}{-----}$$

$$R_T = \frac{2,5 \cdot 121}{\sqrt{2} \cdot 8 \cdot 100} = 0,267 \Omega$$

$$\frac{R_T = 0,267 \Omega}{-----}$$

$$R_c = R_T + R'_y = 0,267 + 0,1 = 0,367 \Omega$$

$$\frac{R_c = 0,367 \Omega}{-----}$$

$$U_r = R_c \cdot I_c = 0,367 \cdot 12,6 = 4,626 \text{ V}$$

$$\frac{U_r = 4,62 \text{ V}}{-----}$$

c-Chute de tension inductive:

$$U_x = \frac{3}{2\pi} \cdot X_c \cdot I_c$$

$$X_c = \frac{U_{rcc} \cdot V}{2 \cdot I'_2 \cdot 100} = \frac{9,5 \cdot 121}{2 \cdot 8 \cdot 100} = 1,015 \Omega$$

$$\frac{X_c = 1 \Omega}{-----}$$

$$U_x = \frac{3}{2\pi} \cdot I \cdot I_2,6 = 6,11 \text{ V}$$

$$U_x = 6,11 \text{ V}$$

d- Chute de tension totale

$$\Delta U = U_r + U_x + U_T$$

$$\Delta U = 11,76 \text{ V}$$

$$\Delta U = 4,69 + 6,11 + 1 = 11,76 \text{ V}$$

$$\left( \frac{\Delta U}{U_{cm}} \right) \% \text{ cal.} = \frac{11,76}{91,76} \cdot 100 = 12,89 \%$$

$$\left( \frac{\Delta U}{U_{cm}} \right) \% \text{ cal.} = 13\%$$

la valeur estimée est égale à 20 %

$$\left( \frac{\Delta U}{U_{cm}} \right) \% \text{ est } - \left( \frac{\Delta U}{U_{cm}} \right) \% \text{ cal.} = (20 - 13)\% = 7\%$$

Cette différence servira à compenser les chutes de tensions supplémentaires (connections...)

Les différentes chutes peuvent s'exprimer par:

$$U = R_e \cdot I_c = \left( R_T + R_y + \frac{3}{2} X_c + \frac{U_T}{I_{cm}} \right) \cdot I_c$$

D'où l'on déduit la variation de  $U_c$  en fonction de  $I_c$  pour différentes valeurs de  $\varphi$

$$U_c = U_{cm} \cos \varphi - R_e I_c$$

$$R_e = (0,267 + 0,1 + 0,48 + 0,079)$$

$$R_e = 0,831 \Omega$$

$$U_c = U_{cm} \cos \varphi - 0,831 I_c$$

(Voir fig. II-16)

II-6-4 Calcul des angles de retard à l'amorçage et de commutation  
 a - Angle de retard à l'amorçage :

En regime nominal , nous aurons :

$$U_{cn} = \frac{U_{cM} + R_e I_{cn}}{U_{cM}} = \frac{80 + 10,476}{100}$$

$$\cos \varphi_n = 0,90476 \quad \varphi_n = 25,22^\circ \quad \varphi_n = \underline{25^\circ 13'}$$

- Angle de retard maximale :

$$\cos \varphi + \cos \delta > \frac{2 U_x}{U_{cM}}$$

$$\cos \varphi > \frac{2 U_x}{U_{cM}} - \cos \delta$$

L'angle de recouvrement des thyristors utilisés dans notre cas est égale à 5°.  
 Nous prenons une marge de securité de 5°

d'où nous deduisons :  $\delta = 5^\circ + 5^\circ = 10^\circ$

$$\cos \varphi > \frac{2 U_x}{U_{cM}} - \cos 10^\circ$$

$$\cos \varphi > 0,122 - 0,9848$$

$$\cos \varphi > -0,86261 = \cos \varphi_{\max}$$

$$\varphi_{\max} = 180 - 30,4 = 149,6^\circ$$

$$\varphi_{\max} = 149^\circ 36'$$

Angle de retard minimale :

( Voir II - 3 - 2 - 2 - c )  $\varphi_0 = 20^\circ 30'$

b - Angle de commutation maximal :

$$\varphi_{\max} + u < 180^\circ - \delta$$

$$u + 149^\circ 36' < 180^\circ - 10^\circ$$

$$u < 180^\circ - 10^\circ - 149^\circ 36' = u_{\max}$$

$$u_{\max} = 20,4^\circ$$

$$u_{\max} = \underline{20^\circ 24'}$$

II - 6 - 5 Dimensionnement du transformateur :

1 - Courants primaire et secondaire

Valeur maximale de L'harmonique fondamentale du courant primaire:

$$I'_1 = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_m}{V'_m} \cdot I_c = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{121}{\sqrt{2} \cdot 80} \cdot 12,6$$

$$I'_1 = 7,429 \text{ A}$$

$$I'_1 = 7,43 \text{ A}$$

Valeur efficace du courant secondaire dans le cas de la commutation instantanée :

$$I_2 = i_{ef} = 7,27 \text{ A}$$

$$\underline{I_2 = 7,27 \text{ A}}$$

Valeur efficace du courant secondaire dans le cas de la commutation retardée :

$$I'_2 = 1,1 I_2 = 1,1 \cdot 7,27$$

$$I'_2 = 8 \text{ A}$$

2 - Puissances

a - Déphasage entre la tension primaire et L'harmonique fondamentale du courant

$$\varphi_1 = \varphi_n + \frac{u_{\max}}{2} = 25,22 + \frac{20,4}{2}$$

$$\varphi_1 = 37,42^\circ$$

$$\varphi_1 = 37,42^\circ$$

b - Facteur de puissance nominale

$$k' = \cos \varphi_1 \cdot k'_f$$

$k'_f$  : facteur de forme du courant primaire

$$k'_f = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0,827$$

$$k' = 0,79 \cdot 0,827 = 0,65$$

c - Puissance active nominale

$$P = \frac{3 V'_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I'_1}{\sqrt{2}} \cos \varphi_1$$

$$P = \frac{3 \sqrt{2} \cdot 80}{\sqrt{2}} \cdot \frac{7,43}{\sqrt{2}} \cdot 0,79 = 996,27 \text{ W}$$

$$\underline{P = 996,27 \text{ W}}$$

d - Puissance reactive nominale

$$Q = \frac{3 V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_1}{\sqrt{2}} \cdot \sin \phi_1$$

$$Q = \frac{3 \cdot 280}{\sqrt{2}} \cdot \frac{7,43}{\sqrt{2}} \cdot 0,607 = 765,489 \text{ VAR}$$

$$\underline{Q = 765,49 \text{ VAR}}$$

e - Puissance apparente nominale

$$S = \frac{P}{k'} = \frac{996,27}{0,65} = 1532,72 \text{ VA}$$

$$\underline{S = 1,53 \text{ K VA}}$$

f - Choix du transformateur :

Le transformateur choisi est du type TT 14

selon la classification soviétique .



IV-0. COMMANDE ET REGULATION.

-IV-0-1 - I : Fonctionnement du système.

- Comme l'indique le schéma de la page suivante, le système considéré est essentiellement constitué:

- Du groupe G-M.

- Du transformateur.

--Du convertisseur composé de deux blocs triphasés simple voiemontés en antiparallèle.

Conformément à l'étude précédente, ce convertisseur est constitué par six thyristors commandés.

L'enroulement inducteur de la génératrice est mis sous la tension recueillie entre le point commun des inductances de limitation de courant de circulation I'Y et le neutre du secondaire du transformateur comme il est également indiqué dans le premier chapitre, la variation de la vitesse du moteur de commande est subordonné à l'importance du flux délivré par l'excitation de la génératrice.

Les conditions de fonctionnement caractérisés par des effets perturbateurs importants nécessitent un réglage par contre-réaction, c'est à dire que la grandeur d'entrée qui est le courant d'excitation de la génératrice doit être reliée à la grandeur de sortie et entre elles, un équilibre conforme au régime voulu, doit toujours être réalisé.

Grâce aux gachettes des thyristors, une telle liaison peut être faite.

Le réglage permanent du courant et de la tension du circuit G.M., permet de corriger toute action perturbatrice agissant sur le couple développé.

Quand la saturation du noyau de l'amplificateur magnétique est atteinte, l'inductance de l'enroulement principal baisse et la tension aux bornes de R1 augmente. Cette tension qui se trouve dans amplifiée est appliquée à la gachette du thyristor, en passant par la résistance de limitation R2.

La soupape SI permet de prévenir l'apparition éventuelle d'un potentiell négatif à l'entrée de la gachette.

La bobine de commande permet donc, dans ce cas de modifier l'instant de saturation du noyau donc la phase de commande du signal appliqué au thyristor, c'est à dire l'angle d'allumage.

L'enroulement de contrôle est formé de deux bobines:

- La bobine ECR qui est parcourue par le courant résultant de la différence  $U_p - U_{\text{contre réaction}}$ .

- La bobine ECI, ou circule un courant proportionnel à celui des induits G-M.

Cette bobine es alimentée par la différence de deux tensions la tension pilote P2 et la tension Ra l'induit.

Il faut noter que les F.M.M résultantes des enroulements ECR et ECI sont opposées: Lorsque ECI est parcouru par un courant, le flux produit par l'inducteur de la génératrice diminue, la tension E baisse donc et de ce fait le courant cesse d'augmenter. Ce même contrôle s'exerce lors du renversement du sens de rotation.

Régulation manuelle

- a) Régulation manuelle.

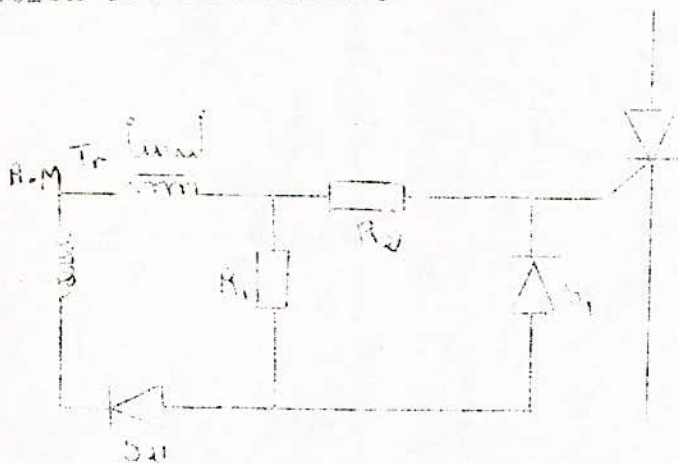
Différentes opérations ( réglage de la vitesse, changement du sens de rotation ) peuvent être obtenues par une intervention directe sur la tension pilote. Lors du changement du sens de rotation, il faut changer les polarités de la tension  $U_p$ .

- La forme de régulation utilisée dans notre cas est indiquée sur le schéma, elle comprend:

- a) - Une contre - réaction tension, dont la valeur de commande est obtenue en comparant la tension d'induit à une tension pilote.

- b) - Une contre réaction pour assurer une limitation du courant dans le circuit d'induit lors d'une surcharge; cette fonction est assurée par un dispositif de deux soupapes qui fonctionnent alternativement.

Le contrôle des thyristors par les gâchettes se fait à l'aide d'un amplificateur magnétique à une alternance, dont le schéma de conception est le suivant:



Le principe de fonctionnement de l'amplificateur magnétique est indiqué en I.

La soupape  $S_2$  assure le passage, seulement dans un sens, du courant dans l'enroulement E.C.

Lorsque la bobine n'est pas saturée, l'inductance de l'enroulement principal est très supérieure à la résistance  $R_1$ , de ce fait la tension aux bornes de cette même résistance  $R_1$  est très petite.

- b) Asservissement de la tension;

La contre-réaction tension, permet respectivement d'obtenir :

- Une rigidité de la caractéristique  $n=f(I)$
- Un freinage électrique .
- Un éventuel forçage de la tension .
- Une limitation de la tension résiduelle.

---Rigidité de la caractéristique  $n=f(I)$ :

Supposons que pour une valeur de  $U_p$  fixé, et une charge constante, la valeur de la tension aux bornes de l'induit diminue, la valeur de la  $d, d, p$  de contre réaction diminue aussi, la différence  $U_p - U_{ert}$  augmente, et le noyau de l'amplificateur magnétique se sature. De ce fait, la tension aux bornes de l'induit va augmenter automatiquement et la vitesse reprend la valeur voulue.

---freinage électrique

Le freinage électrique du système G.M est obtenu en faisant  $u_p=0$ , de cette façon, le retard à l'amorçage étant élevé le courant s'inverse dans l'inducteur de la génératrice il va donc s'opposer au courant préexistant jusqu'à l'annuler. C'est à cet instant que la phase du freinage est terminée.

---Forçage de la tension;

Le forçage de la tension du système G.M dépend uniquement de la valeur de  $U_p$ . Un choix convenable de celle-ci permet aisément d'avoir la valeur de la F.E.M voulue.

---Limitation de la tension résiduelle :

Pour limiter la tension résiduelle de la génératrice il suffit de faire parcourir son circuit inducteur par un courant démagnétisant, c'est à dire qui crée un flux qui

s'oppose au flux rémanent existant.

--Asservissement du courant:

La branche de contre réaction courant , permet comme il a été déjà énoncé, de limiter le courant dans le circuit de couplage G.M.L'utilité de cet asservissement est particulièrement démontré lors des démarrages de la génératrice et des surcharges du moteur .

--Démarrage de la génératrice:

Le démarrage est réalisé en connectant le **potentiometre** , donnant  $U_p$ , à la source continue. La tension  $U_p$ , agissant seule lors des tout premiers instants de démarrage L'excitation de la génératrice est de ce fait beaucoup plus grande que sa valeur nominale. Il s'ensuit des courants d'induits très importants; mais, lorsque ceux-ci atteignent leur valeur limite admissible , la contre réaction courant entre en jeu; et , l'effet démagnétisant de l'enroulement EC2 fait que ces courants d'induits diminuent puis enfin, se stabilisent. ( Voir courbe  $i = f(t)$  au démarrage en régime transitoire).

--Rigidité de la caractéristique.

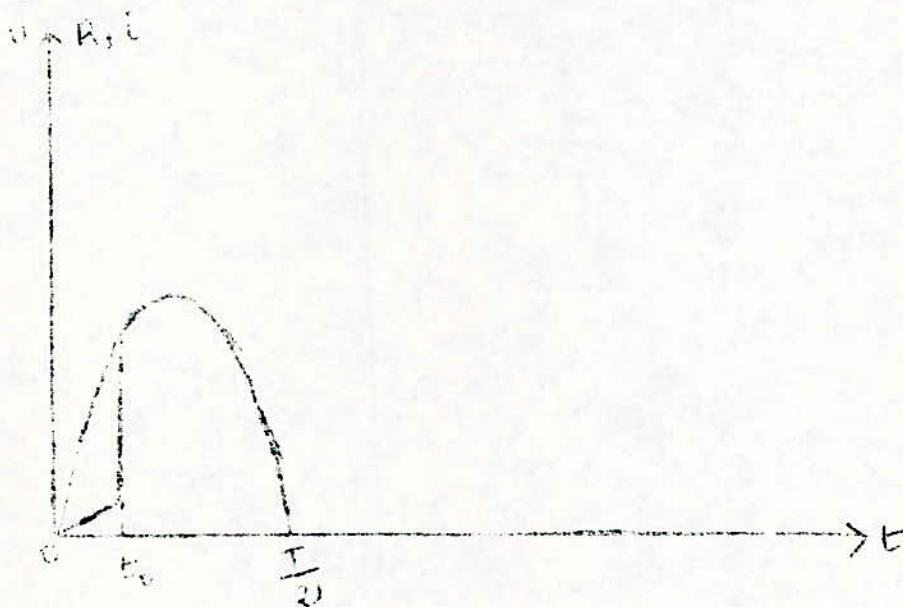
La valeur du courant dans l'induit peut aussi augmenter sous l'action d'une surcharge, lorsque le seuil admissible est dépassé , il s'ensuit comme précédemment , une régulation par la chaîne de retour. du courant .

III O - Forme de l'impulsion actionnant les gâchettes.

Conformément aux considérations précédentes, le fonctionnement du déclencheur est basé sur le fait que

--Au dessous d'une certaine valeur de la tension d'alimentation  $Tr$ , la saturation n'est pas atteinte, dans ce cas le courant à la gâchette peut être considéré comme étant nul.

--Au dessus d'une certaine amplitude de cette tension la saturation est atteinte à un instant  $t_0$  au cours de l'alternance positive, la tension aux bornes de RI est alors grande et, le déclenchement s'effectue.



III Etude de la stabilité du système :

III - 1 Transmittance des différents éléments :

- 2 Excitation de la génératrice ;

Lorsque les bornes de cet enroulement sont soumises à une tension  $U_e$ , il se crée dans celui-ci un courant  $i_e$  qui obéit à la loi suivante :

$$U_e = R_e i_e + L_e \frac{d i_e}{dt} .$$

Soit, en utilisant la forme symbolique :

$$U_e (p) = R_e i_e (p) + l_e p i_e (p) .$$

La transmittance se déduit alors :

$$\frac{i_e}{U_e} = \frac{1}{R_e (1 + T_{ex} p)} \quad \text{avec } T_{ex} = \frac{L_e}{R_e}$$

III - 1 - 2 ) Passage dans l'induit de la génératrice :

L'étude de la stabilité du système suppose un fonctionnement en régime non saturé , d'ailleurs, conformément au principe de A . Liapounov relatif à la stabilité des systèmes, nous pouvons supposer la linéarité de  $E_g = f ( i_e )$

et écrire : 
$$\frac{E_g}{i_e} = K_g$$

III - 1 - 3 ) Circuit d'induit :

L'équation fondamentale du mouvement s'écrit :

$$M_m - M_s = J \frac{dn}{dt}$$

Avec :

$M_m$  : couple moteur.

$M_s$  : couple statique .

$J$  : moment d'inertie des masses tournantes .

$n$  : vitesse de rotation de l'arbre en b/mn./

Le couple moteur  $M_m$  peut s'écrire  $M_m = C_m I_{in}$

D'une façon purement analogique , nous pouvons écrire :

$$M_s = C_m I_s .$$

D'autre part ,  $J \frac{dn}{dt}$  peut aussi s'écrire en fonction du courant  $I_d$ , courant dynamique , rattaché au mouvement .

$$J \frac{dn}{dt} = C_m I_d .$$

Alors  $I_{in} - I_s = I_d$

En tensions correspondantes, cette relation devient :

$$E_g - (R_o + L_o p) I_s = V.$$

V correspondant ainsi à la tension aux bornes du moteur, sans considérer le couple résistant.

III - 1 - 4 ) Moteur :

L'équation électrique du circuit de l'induit, s'écrit :

$$V - e_m = (R_o + L_o p) I_d$$

En régime non saturé, nous pouvons écrire :

$$M_m = C_m I$$

$$e_m = C_e \cdot n$$

$$\text{Soit } V - C_e \cdot n = (R_o + L_o p) I_{in}$$

Compte tenu des justifications données dans le paragraphe suivant, nous pouvons écrire :

$$M_m - o = J p n = C_m I_d$$

Alors :

$$\frac{V}{n} = C_e + \frac{J R_o}{C_m} p + \frac{L_o J}{C_m} p^2$$

$$\frac{n}{V} = \frac{1}{C_e \left( \frac{J L_o}{C_m C_e} p^2 + \frac{J R_o}{C_e C_m} p + 1 \right)} = \frac{K_m}{T_M T_o p^2 + T_M p + 1}$$

$$\text{Avec } T_M = \frac{J R_o}{C_m C_e} \quad \frac{L_o}{R_o} = T_o \quad K_m = \frac{1}{C_e}$$

La transmittance du moteur est donc :

$$\frac{n}{V} = \frac{K_m}{T_M T_o p^2 + T_M p + 1}$$

III - 1 - 5 ) Boucles de retour :

a ) Contrôle du courant :

En vertu des relations précédemment citées :



$$\frac{I_d}{n} = \frac{J}{C_m} p = \frac{J R_o C_e}{R_o C_m C_e} p = \frac{T_M}{R_o K_m} p$$

Soit  $U_d = \frac{T_M R_M}{R_o K_m} p \cdot n$  avec  $R_M$  : résistance de mesure.

Sommateur ( I ) :

Afin d'obtenir complètement le courant débité par la génératrice , il faut ajouter  $( R_M + L_M p ) I_s$  à l'expression précédente .

Comparateur ( I ) :

Ce courant , débité par la génératrice est comparé à  $I_{lim}$  . D'autre part, pour assurer le contrôle du courant résultant à la sortie du comparateur, il suffit d'en recueillir une fraction ; c'est pourquoi qu'il faut multiplier le courant ainsi trouvé par un coefficient , soit  $K_{co}$  .

Le résultat , homogène a une tension est appliqué à la tension pilote .

b ) Contrôle de la tension :

$R_M$  et  $L_M$  , étant la résistance et l'inductance de mesure, nous pouvons écrire :

$$\frac{U_d}{n} = C_e + \frac{R_M J p}{C_m} + \frac{L_M J}{C_m} p^2 = C_e \left( 1 + \frac{R_M J}{C_e C_m} p + \frac{L_M}{R_M} \frac{J R_M}{C_m C_e} p^2 \right).$$

$$\frac{U_d}{n} = C_e ( T_{MM} T_{iM} p^2 + T_{MM} p + 1 )$$

Pour retrouver la tension  $E_g$  , il faut ajouter  $I_s ( T_{iM} p + 1 ) R_M$  à  $n C_e ( T_{MM} T_{iM} p^2 + T_{MM} p + 1 )$  .

Pour contrôler cette tension  $E_g$  , il suffit d'en contrôler une partie prélevée à l'aide d'un potentiomètre .

Il en résulte un coefficient  $K_T$  .

La tension opposée à  $U_p$  sera donc  $K_T E_g$  .

III - 2 ) Valeurs des constantes de temps :

) Inducteur de la génératrice :

$$K = \frac{P \cdot N}{60 \cdot a} = \frac{2 \cdot 744}{60 \times 2} = 12,4$$

Calcul du coefficient  $C_e$  :

$$C_e = \frac{U_n + I_n R_g}{n} = \frac{330 + 348 \times 0,0166}{1000} = 0,336$$

De ce fait :

$$\phi_N = \frac{C_e}{K} = \frac{0,336}{12,4} = 0,027 \text{ Wb}$$

Flux produit par les poles :

$$\phi_{EN} = K_r \phi_N$$

$$\phi_{EN} = 1,2 \times 0,027 = 0,0324 \text{ Wb .}$$

$$\text{Alors } L_{exg} = 2p \ W \ \frac{\phi}{I_n} = \frac{4 \times 440 \cdot x \ 0,0324}{12,6} = 4,526 \text{ H}$$

$$\text{Alors } T_{exg} = \frac{L_{exg}}{R_{exg}} = \frac{4,524}{6,35 \text{ V}} = 0,713 \text{ s.}$$

2) Constante de temps de l'induit de la génératrice :

$$L_{ind \ g} = K \frac{U_n}{2p \ N_n \ I_n} = 10 \frac{330}{4 \times 1000 \times 34 \ g} = 2,37 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$\text{Alors } T_{ing} = \frac{L_{ing}}{R_{ind} + R_{aux}} = 0,143 \text{ s}$$

3) Constante de temps de l'induit du moteur :

$$L_{ind \ m} = K \frac{U_n}{R_p \ N_n \ I_n} = 10 \frac{305}{4 \times 750 \times 360} = 2,824 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$T_{ind \ M} = \frac{L}{R_{ind} + R_{aux}} = 0,144 \text{ s}$$

4) Constante de temps du circuit électrique d'induit :

$$T_0 = \frac{L_0}{R_0} = \frac{(2,37 + 2,824) \cdot 10^{-3}}{0,0362} = 0,1435 \text{ s}$$

5) Constantes de temps mécanique :

$$T_M = \frac{J R}{C_e C_m} = \frac{1 \times 0,0362 \times 1,03}{0,387^2} = 0,25 \text{ s} = 0,25 \text{ s.}$$

$$T_{MM} = \frac{J \times 0,0393 \times 1,03}{0,387^2} = 0,275 \text{ s}$$

6) Constante de temps du système convertisseur :

La constante de temps du système convertisseur est donnée par

$$T_c = \frac{2}{\omega} = \frac{2}{3000} = 0,000667 \text{ s.}$$

III - 3 Calcul des coefficients :

III - 3 - 1 ) Calcul de  $K_g$  :

$$K_g = \frac{U_{gn}}{i_{exn}} = \frac{330}{12,6} = 26,2$$

III - 3 - 2 ) Calcul de  $K_m$  :

$$K_m = \frac{1}{C_e} = 2,6$$

III - 3 - 4 ) Calcul de  $K_P$  :

$K_P$  étant le coefficient lié au potentiomètre, nous pouvons le choisir de façon arbitraire, mais pas très élevée. Nous prendrons  $K_P = 0,04$

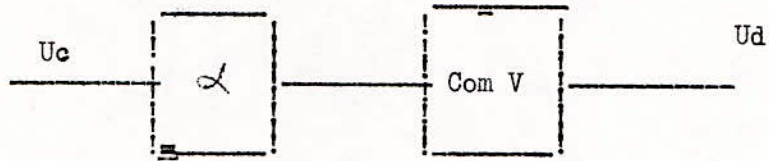
III - 3 - 5) Calcul de  $K_c$  :

La fonction de transfert du convertisseur s'écrit :

$$H_c(p) = \frac{K_c}{T_c p + 1}$$

Avec  $T_c = \frac{2}{\sqrt{V}}$  et  $K_c = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_c}$

Schématiquement :



La valeur, en fonction de  $\alpha$  de  $U_d$  est donnée par l'expression :  $U_d = U_{cM} \cos \alpha - I_{ex} R_e - U_T$

$U_{cM}$  : Tension redressée maximale : 100 V

$I_{ex}$  : courant dans l'enroulement d'excitation. 12,6 A .

$R_e$  : Résistance équivalente du circuit de redressement : 0,831

$U_T$  : chute de tension aux bornes d'un thyristor .

Alors  $U_d = 100 \cos \alpha - 12,6 \times 0,831 - 1$   
 $U_d = 100 \cos \alpha - 10,47 .$

Equation de la courbe de commande :

Nous ferons une approximation linéaire :

Pour  $\alpha = 90^\circ$   $U_c = 0$   
 "  $\alpha = 0^\circ$   $U_c = 6V$

La forme de l'équation est la suivante :

$U_c = a \alpha + b$  ; soit  $U_c = -\frac{6}{90} \alpha + 6$

$U_c = -0,066 \alpha + 6$

Nous ne pouvons calculer qu'approximativement  $K_c$ , cette méthode n'étant qu'expérimentale

$K_c = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_c}$

Par exemple , entre  $18^\circ$  et  $38^\circ$

A  $18^\circ$  :  $U_c = 4,812$  V  $U_d = 84,63$

A  $38^\circ$  :  $U_c = 3,492$   $U_d = 68,33$

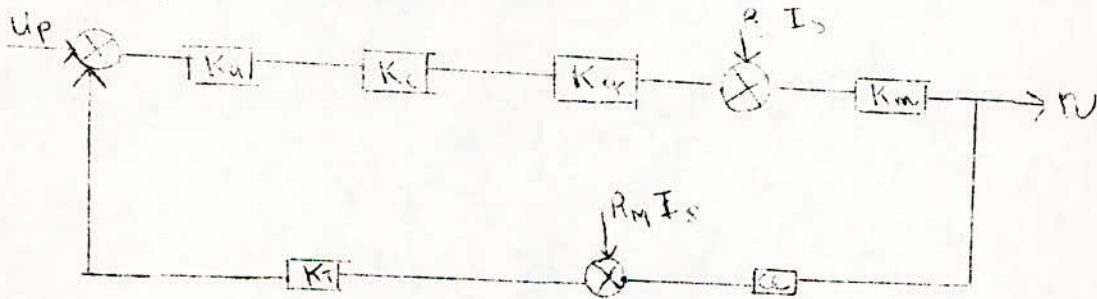
Alors  $K_c = \frac{84,63 - 68,33}{4,812 - 3,492} = \frac{16,33}{1,32} = 12,4$

$K_c = 12,4$

III - 3 - 5 ) Calcul du coefficient d'amplification :

Le gain d'amplification peut être calculé en considérant le régime statique. Celui-ci est obtenu en posant  $p = 0$  dans les expressions des différents transmittances.

Nous obtenons ainsi le schéma fonctionnel suivant :



Calculons la fonction de transfert en boucle fermée correspondante :

$$H(p) = \frac{(U_p - (n C_e + I_s R_M) K_T - I_s R_o / K_a K_c K_g) K_a K_o K_g K_m}{U_p}$$

$$H(p) = \frac{U_p K_a K_c K_g K_m - n C_e K_T K_a K_c K_g K_m - I_s R_M K_a K_c K_g K_m - I_s R_o K_m}{U_p}$$

$$H(p) (1 + C_e K_T K_a K_c K_g K_m) = K_a K_c K_g K_m - \frac{I_s R_M}{U_p} K_a K_c K_g K_m - \frac{I_s R_o K_m}{U_p}$$

$$H(p) = \frac{K_a K_c K_g K_m - \frac{I_S R_m}{U_p} K_a K_c K_g K_m - \frac{I_S R_o K_m}{U_p}}{1 + C_e K_T K_a K_c K_g K_m}$$

Considérons le système ouvert, nous pouvons écrire :

$$n_{SO} = \left( U_p - \frac{I_S R_o}{K_a K_c K_g} \right) K_a K_c K_g K_m$$

$$n_{SO} = U_p K_a K_c K_g K_m - I_S R_o K_m$$

La perturbation  $I_S$  donne l'erreur  $I_S R_o K_m$ , nous pouvons écrire

$$n_{SO} = I_S R_o K_m$$

Numériquement :  $n_{SO} = 360 \times 0,0362 \times 2,6 = 33,88$

$$S0 = \frac{n_{SO}}{N_n} = \frac{33,88}{750} = 0,045 = 4,5 \%$$

Pour le système fermée,  $S_f \%$  est imposé  $S_f \% = 2 \%$

Connaissant ces deux erreurs relatives, nous pouvons écrire :

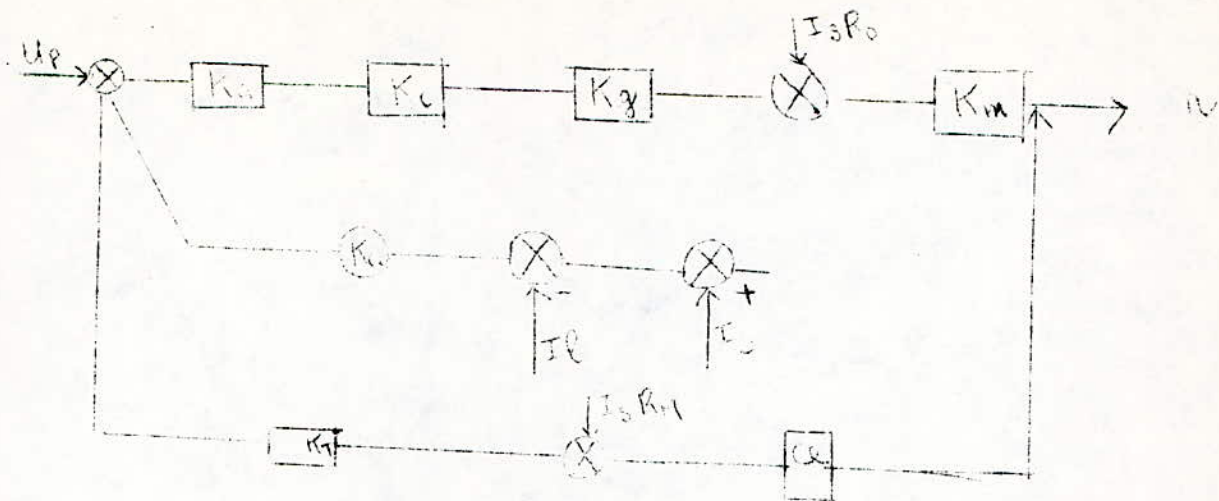
$$C_e K_T K_a K_c K_g K_m = \frac{S0}{S_f} D - 1 \quad \text{avec } D \text{ rapport des vitesses } \frac{N_n}{N_{min}}$$

$$C_e K_T K_a K_c K_g K_m = \frac{4,5}{2} \frac{750}{37,5} - 1 = 44$$

$$\text{Alors } K_a = \frac{44}{0,387 \times 0,04 \times 12,4 \times 26,2 \times 2,6} = 3,36$$

III - 3 - 5) Calcul de  $K_{co}$  ( Gain de la boucle de courant ) .

En régime statique, si nous introduisons la boucle de limitation de courant, nous aurons le schéma fonctionnel suivant :



La fonction de transfert correspondante au système s'écrit :

$$H(p) = \frac{U_p - (nCe + I_S R_M) K_T - K_{Co} (I_S - I_L) - I_S \frac{R_o}{K_a K_c K_g} K_a K_c K_g K_M}{U_p}$$

$$H(p) = K_a K_c K_g K_M - \frac{nCe}{U_p} K_T K_a K_c K_g K_M - K_{Co} K_a K_c K_g K_M \left( \frac{I_S - I_L}{U_p} \right) - \frac{I_S R_o}{U_p} K_M$$

$$\frac{I_S R_M}{U_p} K_a K_c K_g K_M K_T$$

$$H(p) = \frac{K_a K_c K_g K_M - K_{Co} K_a K_c K_g K_M \frac{(I_S - I_L)}{U_p} - \frac{I_S R_o}{U_p} K_M - \frac{I_S R_M}{U_p} K_T K_a K_c K_g K_M}{1 - Ce K_T K_a K_c K_g K_M}$$

Le coefficient  $K_{Co}$  dépend étroitement de la valeur de  $I_S$ , il n'intervient qu'en cas qu'en cas de surcharge anormale :

Ainsi :

Si	$I_S <$	$I_L$	$K_{Co} = 0$
Si	$I_S >$	$I_L$	$K_{Co} \neq 0$

Afin de calculer la valeur de  $K_{Co}$ , nous allons supposer que  $I_S = I_{arr}$ ; alors  $n = 0$ , dans ce cas, nous aurons :

$$U_p K_a K_c K_g K_M - K_{Co} K_a K_c K_g K_M (I_{arr} - I_L) - I_{arr} R_o K_M - I_{arr} R_M K_a K_c K_g K_M K_T = 0$$

$$\text{Soit } K_{co} = \frac{U_p K_a K_c K_g - I_{arr} R_o - I_{arr} R_M K_a K_c K_g K_T}{K_a K_c K_g (I_{arr} - I_l)}$$

Calcul de  $U_p$  :

L'équation de  $H(p)$  , pour  $N = N_n$  ( donc  $K_{co} = 0$  ) et  $I_S = I_N$  donne

$$N_n ( 1 + C_e K_T K_a K_c K_g K_M ) = U_p K_a K_c K_g K_M - I_N R_o K_M - I_N R_M K_a K_c K_g K_M K_T$$

$$\text{Soit } U_p = \frac{N_n ( 1 + C_e K_T K_a K_c K_g K_M ) + I_S R_o K_M + I_N R_M K_a K_c K_g K_M K_T}{K_a K_c K_g K_M}$$

$$U_p = \frac{750(1+44)+360 \times 0,0362 \times 2,6 + 360 \times 0,0398 \times 3,36 \times 12,4 \times 26,2 \times 0, \quad \times 2,6}{3,36 \times 12,4 \times 26,2 \times 2,6}$$

$$U_p = \frac{33750 + 33,88 + 1626,6}{2838,2} = 12,5 \text{ V}$$

Le coefficient  $K_{co}$  vaut alors :

$$K_{co} = \frac{12,5 \times 3,36 \times 12,4 \times 26,2 - 648 \times 0,0362 - 648 \times 0,398 \times 3,36 \times 12,4 \times 26,2 \times 0,04}{3,36 \times 12,4 \times 26,2 ( 648 - 468 )}$$

$$K_{co} = \frac{2863,2 - 23,46 - 1126,1}{196487,4} = 0,0087$$

Avec  $I_l = 1,3$   $I_N = 1,3 \times 360 = 468 \text{ A}$ .

$I_{arr} = 1,8$   $I_N = 1,8 \times 360 = 648 \text{ A}$  .



III - 4 Caractéristique de surcharge :  $N = f ( I_S )$

La caractéristique  $N = f ( I_S )$ , peut être tracée respectivement pour le système en boucle fermée et pour le système en boucle ouverte.

Pour le système en boucle fermée, nous avons :

$$N = \frac{U_p K_a K_c K_g K_M - I_S R_o K_M - I_S R_M K_a K_c K_g K_M - K_{co} K_a K_c K_g K_M ( I_S - I_e )}{1 + C_e K_T K_a K_c K_g K_M}$$

Avec  $K_{co} = 0$  si  $I_S \leq I_1$

$K_{co} = 0,0087$  si  $I_S > I_1$

$$N = \frac{- I_S ( R_o K_M + K_T R_M K_a K_c K_g K_M ) + U_p K_a K_c K_g K_M}{1 + C_e K_T K_a K_c K_g K_M}$$

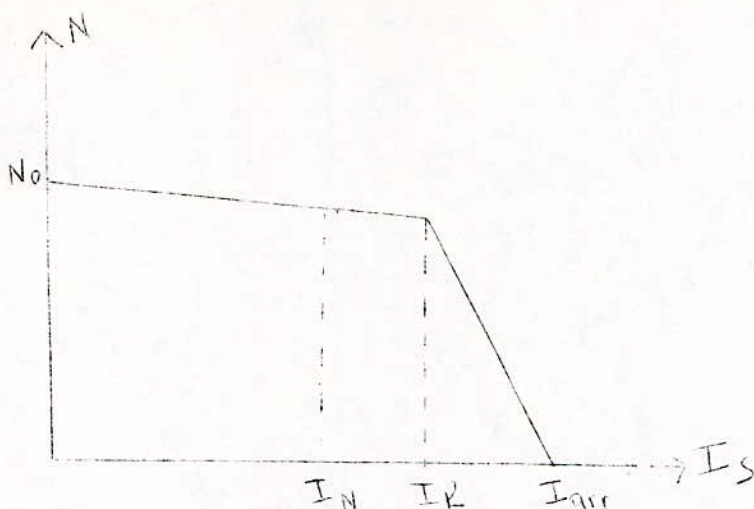
$N = f ( I_S )$  est une droite dans ce cas

$$I_S = 0 \quad N = \frac{U_p K_a K_c K_g K_M}{45} = 788,37 \text{ t/mn}$$

$$I_S = I_n \quad N = 788,37 - \frac{I_n}{45} ( 0,0362 \times 2,6 + 0,0398 \times 3,36 \times 12,4 \times 26,2 - \times 2,6 \times 0,04 )$$

$$N = 788,35 - \frac{360}{45} ( 4,5 + 0,1 ) = 788,35 - 36,8 = 751,55 \text{ t/mn}$$

conformément aux données, la droite s'arrête au point d'abscisse  $I = I_1 = 1,3 I_n$  où se trouve le point de coupure; il y a alors chute très brusque de tension et augmentation du courant, la vitesse s'annule pour  $I_S = I_{arr}$ .



III - 5 ) Etude dynamique :

III - 5 - 1) Fonction de transfert en régime dynamique :

Le schéma fonctionnel de la page , donne la fonction de transfert en régime dynamique du système .

$$H(p) = \frac{U_p - (nF_4 + I_S R_M (T_M P + 1)) K_T - (nF_5 + I_S - I_1) K_{co} - I_S R_o (1 + T_o P)}{U_p - \frac{K_a F_1 F_2}{F_3}}$$

$$H(p) = \frac{1 + F_4 K_a F_1 F_2 F_3 K_T + F_4 K_{co} K_a F_1 F_2 F_3}{1 + F_4 K_a F_1 F_2 F_3 K_T + F_4 K_{co} K_a F_1 F_2 F_3} = \frac{K_a F_1 F_2 F_3 - \frac{I_S R_o}{U_p} (1 + T_o P)}{1 + F_4 K_a F_1 F_2 F_3 K_T + F_4 K_{co} K_a F_1 F_2 F_3}$$

$$- \frac{I_S R_M (T_M P + 1) K_T K_a F_1 F_2 F_3 - \frac{I_S K_{co} K_a F_1 F_2 F_3}{U_p} + \frac{I_1 K_{co} K_a F_1 F_2 F_3}{U_p}$$

$$H(p) = \frac{K_a F_1 F_2 F_3 - \frac{I_S R_o}{U_p} (1 + T_o P) - \frac{I_S R_M (T_M P + 1) K_T K_a F_1 F_2 F_3}{U_p}}{1 + F_4 K_a F_1 F_2 F_3 K_T + F_4 K_{co} K_a F_1 F_2 F_3} + \frac{\frac{I_S K_{co} K_a F_1 F_2 F_3}{U_p}}{1 + F_4 K_a F_1 F_2 F_3 K_T + F_4 K_{co} K_a F_1 F_2 F_3}$$

$$+ \frac{\frac{I_1 K_{co} K_a F_1 F_2 F_3}{U_p}}{1 + F_4 K_a F_1 F_2 F_3 K_T + F_4 K_{co} K_a F_1 F_2 F_3}$$

Avec :

$$F_1 = \frac{Kc}{1 + Tc P}$$

$$F_2 = \frac{Kg}{1 + Tex P}$$

$$F_3 = \frac{Km}{T_M To p^2 + T_M P + 1}$$

$$F_4 = ( T_{MM} T_{iM} \frac{2}{p} + T_{MM} P + 1 ) Ce$$

$$F_5 = \frac{T_M}{Ro Km} P$$

III - 5 - 2 ) Conditions d'étude de la stabilité :

Lors de notre étude de la stabilité , nous nous appuyerons sur les considérations suivantes :

a) Nous ne tiendrons pas compte de la contre - réaction relative à la limitation du courant, car celle - ci tend à stabiliser le système, si la stabilité est assurée sans cette boucle, elle le sera donc d'autant plus avec elle. Donc  $Kc = 0$

b) Nous considérons  $I_g = 0$  ; en effet, ce qui nous intéresse , c'est l'étude de la stabilité du système avec ses propres composantes, les perturbations dues au couple statique, sont atténuées par l'action régulatrice des deux boucles de retour. Alors :

$$H(p) = \frac{Ka F_1 F_2 F_3}{1 + Ka F_1 F_2 F_3 F_4 Ce}$$

$$H(p) = \frac{Ka Kc Kg Km}{(Tc P + 1)(Tex P + 1)(T_M To p^2 + T_M P + 1) + Ka K_T Kc Kg Km Ce(T_{MM} T_{iM} \frac{2}{p} + T_{MM} P + 1)}$$

Soit :

$$H(p) = \frac{Kc Ka Kg Km}{Ap^4 + Bp^3 + Cp^2 + Dp + E}$$

Avec :

$$A = Tc Tex T_M To = 16,37 \cdot 10^{-5}$$

$$B = T_c T_{ex} T_M + (T_c + T_{ex}) T_o T_M = 2580,84 \cdot 10^{-5} + 114,03 \cdot 10^{-5} = 2694,9 \cdot 10^{-5}$$

$$C = T_c T_{ex} + (T_c + T_{ex}) T_M + K_a K_T K_c K_g K_m C_e T_{MM} T_{iM} + T_M T_o = 1,85 \cdot$$

$$D = K_a K_T K_c K_g K_m C_e T_{MM} + (T_c + T_{ex}) + T_M = 13,07 \cdot$$

$$E = K_a K_T K_c K_g K_m C_e + 1 = 45 \cdot$$

III - 5 - 3) Etude de la stabilité d'après le critère de Routh :

Soit l'équation caractéristique  $1 + K G(p) = 0$  d'un système, celle-ci peut s'écrire :

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + a_{n-2} p^{n-2} + \dots + 1 = 0$$

Etablissons le tableau suivant :

1 <sup>er</sup> rang	$p^2$	:	$a_n$	$a_{n-2}$	$a_{n-4}$	....
2 <sup>e</sup> rang	$p^{n-1}$	:	$a_{n-1}$	$a_{n-3}$	$a_{n-5}$	....
3 <sup>e</sup> rang	$p^{n-2}$	:	$X_1$	$X_2$	$X_3$	....
4 <sup>e</sup> "	$p^{n-3}$	:	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	....

où

$$X_1 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-2} - a_n \cdot a_{n-3}}{a_{n-1}} \cdot$$

$$X_2 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-4} - a_n \cdot a_{n-5}}{a_{n-1}} \cdot$$

$$Y_1 = \frac{X_1 a_{n-3} - a_{n-1} X_2}{X_1} \cdot$$

D'après la règle de Routh, un système est stable si tous les termes de la 1<sup>ère</sup> colonne ont le même signe. C'est à dire que tous ces termes doivent être tous positifs, ou tous négatifs.

Le critère de Routh appliqué à notre Système donne :

16,37 . 10 <sup>-5</sup>	1,85	45
2614,92 . 10 <sup>-5</sup>	13,07	0
1,84	45	0
31,48	0	0
45	.	

Le système est donc stable .

III - 5 - 3 - Stabilité d'après le diagramme de Niquist :

L'étude de la stabilité d'après le diagramme de Niquist, utilise la règle de Revers qui s'énonce ainsi :

- Un système linéaire est stable, si en décrivant son lieu de transfert en boucle ouverte, dans le sens des fréquences croissantes, on laisse le point critique(-1;0) à sa gauche .

- Pour appliquer cette règle, il est donc nécessaire de trouver la fonction de transfert en boucle ouverte .

Le schéma fonctionnel donne :

$$K G (p) = \frac{K_c K_g K_m K_a K_T C_e (T_{MM} T_M p^2 + T_M p + 1)}{(T_c P + 1) T_{ex} P + 1)(T_M T_c P^2 + T_M P + 1)} .$$

$$K G (p) = 44 \frac{T_{MM} T_M P^2 + T_M P + 1}{A' p^4 + B' p^3 + C' p^2 + D' p + 1}$$

Avec :

$$A' = T_c T_{ex} T_o T_M = 16,37 \cdot 10^{-5}$$

$$B' = T_c T_{ex} T_M + (T_c + T_{ex}) T_M T_o = 2694,42 \cdot 10^{-5}$$

$$C' = T_M (T_c + T_{ex}) + T_M T_o + T_c T_{ex} = 0,22$$

$$D' = T_m + T_c + T_{ex} = 0,97 .$$

En remplaçant p par j , nous aurons :

$$H(p) = \frac{44(-TMM TMv^2 + j TMMw + 1)}{B'(jw)^3 + A'w^4 - C'w^2 + D'jw + 1}$$

$$H(j) = \frac{44(-0,275 \times 0,144w^2 + j 0,275w + 1)}{(A'w^4 - C'w^2 + 1) + j(D'w - B'w^3)}$$

$$H(j) = \frac{44(-0,275 \times 0,144w^2 + j 0,275w + 1) (A'w^4 - C'w^2 + 1) - j(D'w - B'w^3)}{(A'w^4 - C'w^2 + 1)^2 + (D'w - B'w^3)^2}$$

$$P(j) = \frac{44 (A'w^4 - C'w^2 + 1)(-0,275 \times 0,144w^2 + 1) + 0,275w (D'w - B'w^3)}{(A'w^4 - C'w^2 + 1)^2 + (D'w - B'w^3)^2}$$

$$Q(j) = \frac{44 \cdot 0,275w(A'w^4 - C'w^2 + 1) - (-0,275 \times 0,144w^2 + 1)(D'w - B'w^3)}{(A'w^4 - C'w^2 + 1)^2 + (D'w - B'w^3)^2}$$

Ces deux dernières expressions permettent d'établir le tableau suivant:

w	0	2	5	10	20	30	50
P(w)	44	12,3	4,07	0,65	-0,187	-0,315	-0,346
Q(w)	0	22,33	-12,37	-6,82	-3,57	2,23	-1,15

60	70	100	500
-0,182	-0,346	-0,3	-0,042
-0,7512	-0,82	-0,486	-0,0085

Une simple analyse de ce tableau permet de confirmer la stabilité du système, en effet, la courbe qui en résulte est complètement localisée dans la partie située au dessous de l'axe  $-P(w), +P(w)$ ;  $Q(w)$  étant toujours négatif.

III-5- Correction du système.

Afin d'améliorer les performances du système ,d'assurer de bonnes marges de stabilité ,et d'éviter des régimes pseudo-périodiques ,nous placerons le correcteur souple dont la fonction de transfert est la suivante :

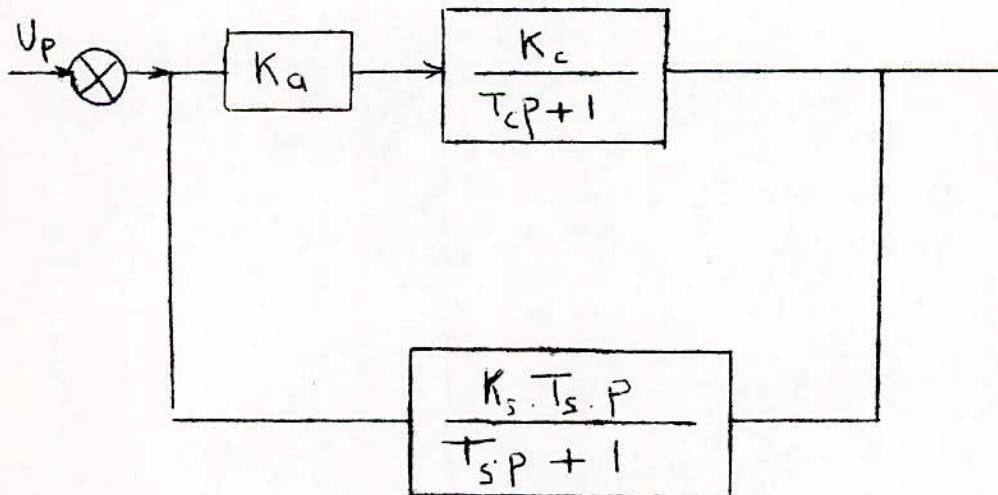
$$H(p) = \frac{K_s \cdot T_s \cdot p}{T_s p + 1}$$

Avec :

$$K_s = 0,03$$

$$T_s = 0,01s$$

Ce correcteur sera placer de façon à apporter une plus régulation de la tension à l'entrée de l'inducteur de la génératrice, il sera donc disposé conformément au schéma :



III-6-Recherche de l'originale de la fonction de sortie n(t) :

La fonction de transfert résultante du schéma fonctionnel figuré à la page 76 est la suivante :

$$H'(p) = \frac{K_a K_c (T_s p + I)}{K_a K_c K_s T_s p + (T_{cp} + I) : (T_{sp} + I)}$$

La fonction de transfert du système corrigé est alors :

$$H''(p) = \frac{K_a K_c K_g K_m (T_s p + I)}{(K_a K_c K_s T_s p (T_s p + I)) (T_{ex} p + I) (T_m T_o p^2 + T_{mp} + I) + K_a K_c (T_{sp} + I) K_m K_g K_t C_e}$$

Expression qui peut s'écrire :

$$H''(p) = \frac{K_a K_c K_g K_m (T_s p + I)}{A'' p^5 + B'' p^4 + C'' p^3 + D'' p^2 + E'' p + F''}$$

Avec :

$$A'' = T_s T_c T_{ex} T_m T_o = 1,637 \cdot 10^{-6}$$

$$B'' = T_s T_c (T_{ex} T_m + T_m T_o) + T_{ex} T_m T_o (K_a K_c K_s T_s + T_s + T_c) = 752,913 \cdot 10^{-6}$$

$$C'' = T_s T_c (T_{ex} + T_m) + (K_a K_c K_s T_s + T_s + T_c) (T_{ex} T_m + T_m T_o) + T_{ex} T_m T_o + K_a K_c K_g K_m K_t C_e (T_g T_m T_{in}) = 4403,153 \cdot 10^{-6}$$

$$D'' = T_s T_c + (K_a K_c K_s T_s + T_s + T_c) (T_{ex} + T_m) + (T_{ex} T_m + T_m T_o) + K_a K_c K_g K_m K_t C_e (T_s T_m + T_m T_{in}) = 210518,9 \cdot 10^{-6}$$

$$E'' = (K_a K_c K_g K_m C_e K_t (T_s + T_m) + K_a K_c K_s T_s + T_s + T_c + T_{ex} + T_m) = 13,531899$$

$$F'' = K_a K_c K_g K_m C_e K_t + I = 45$$



Afin de trouver l'originale en  $t$ , il est nécessaire de composer en un produit de facteurs le dénominateur de l'expression précédente. Pour trouver ses racines, diverses méthodes peuvent être utilisées, mais celle-ci ne donnent qu'un résultat approché; pour notre part, nous prendrons la méthode dite par itérations, après avoir négligé le terme en  $p^5$  dont l'influence sur les solutions du polynôme en  $p^4$  est moindre.

Tout calcul fait, la fonction de transfert  $H''(p)$  s'écrit:

$$H''(p) = \frac{3798336,4(0,01p + 1)}{(p + 3,384)(p + 58,975)(p + 1,759 + i17,216)(p + 1,759 - i17,216)}$$

D'autre part, la décomposition en éléments simples donne

$$H''(p) = \frac{204,48}{p + 3,384} + \frac{7,851857}{p + 58,975} + \frac{-106,4544I - 12,6285}{p + 1,759 + i17,216} + \frac{-106,4544I + 12,6285I9}{p + (1,759 - i17,216)}$$

$$H''(p) = \frac{n(p)}{u(p)}$$

Alors, la vitesse s'écrit:

$$n(p) = \frac{u}{p} \cdot H''(p)$$

et nous aurons ainsi l'expression en  $t$ , qui s'écrit:

$$n(t) = 12,5 (60,425531(I - e^{-3,384t}) + 0,1331387(I - e^{-58,975t})) - 1,552 - 12,306257 e^{-1,759t} \cdot \cos(17,216t - 1,44)$$

Soit:

$$K(t) = 750 - 755,319e^{-3,384t} - 1,66e^{-58,975t} - 153,03e^{-1,759t} \cos(17,216t - 1,44)$$

L'équation du courant peut être obtenue en faisant:

$$i = \frac{T_m}{R_o K_m} \frac{dn}{dt} = \frac{0,25}{2,6.0,00362} \frac{dn}{dt}$$

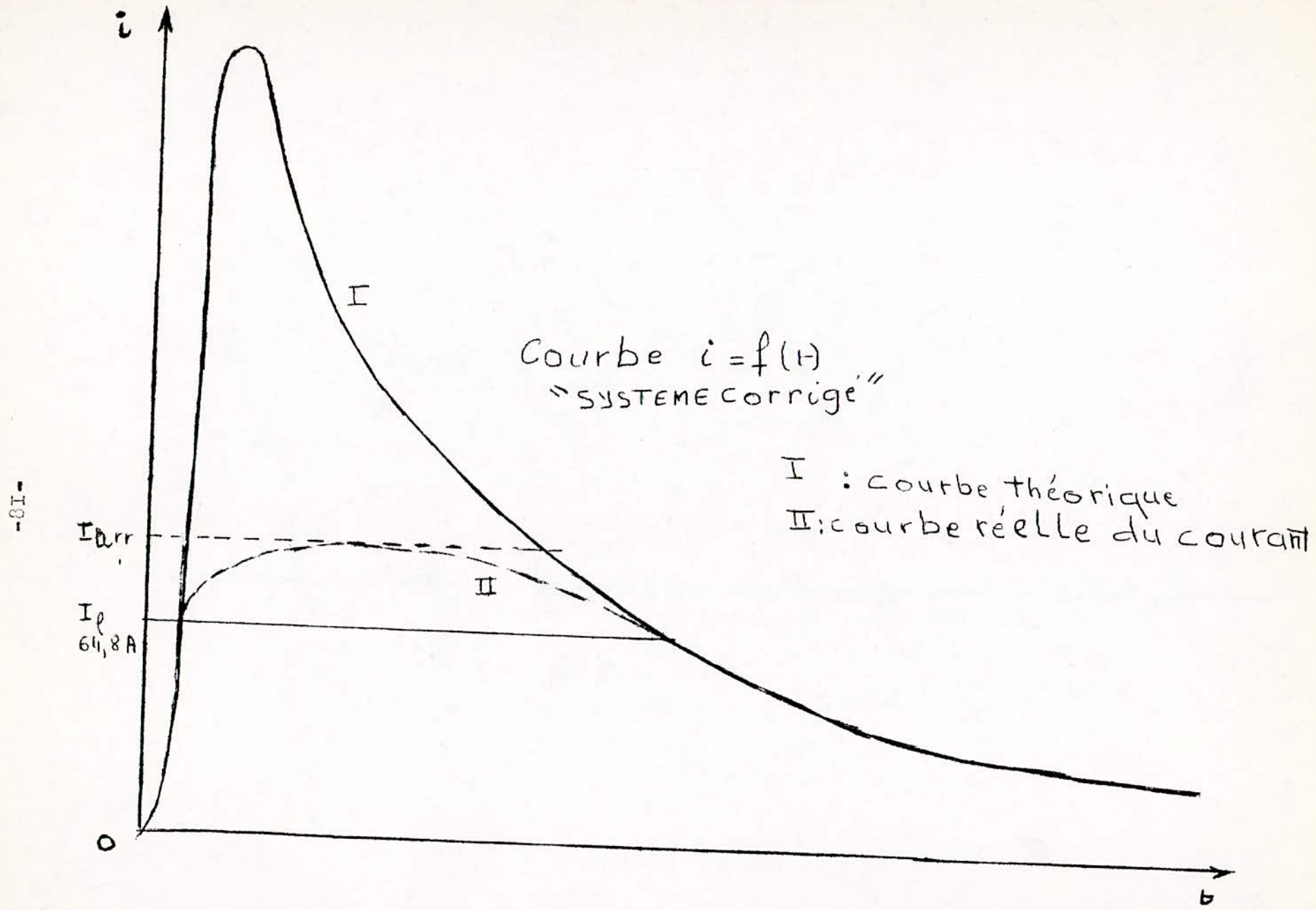
$$\frac{+dn}{dt} = 2555,75e^{-3,384t} + 98e^{-(58,975t)} + 2660,74e^{-1,759t} \cos(17,216t - 2,92)$$

Ainsi:

$$i = 6788,54e^{-3,384t} + 260,3e^{-58,975t} + 706,414e^{-1,759t} \cos(17,216t - 2,913)$$

Les expressions de  $n(t)$  et de  $i(t)$  permettent de dresser le tableau suivant:

t	n(t)	i(t)
0,0836	148	5266,34
0,175	332,329	4077,6058
0,266	444,769	2690,6
0,357	524,92	2010,24
0,4486	584,6	1486,95
0,54	629,35	1056,68
0,63	660,87	801,039
0,813	701,81	433,81
0,9	714,5	319,06
0,996	724,3	230,8
1,087	731,12	169,7
1,178	736,41	122,19
1,27	739,73	92,32
1,36	742,45	67,88
1,45	744,41	50,23
1,54	745,92	36,66



Courbe  $i = f(t)$   
"SYSTEME CORRIGE"

I : courbe théorique  
II : courbe réelle du courant

-81-

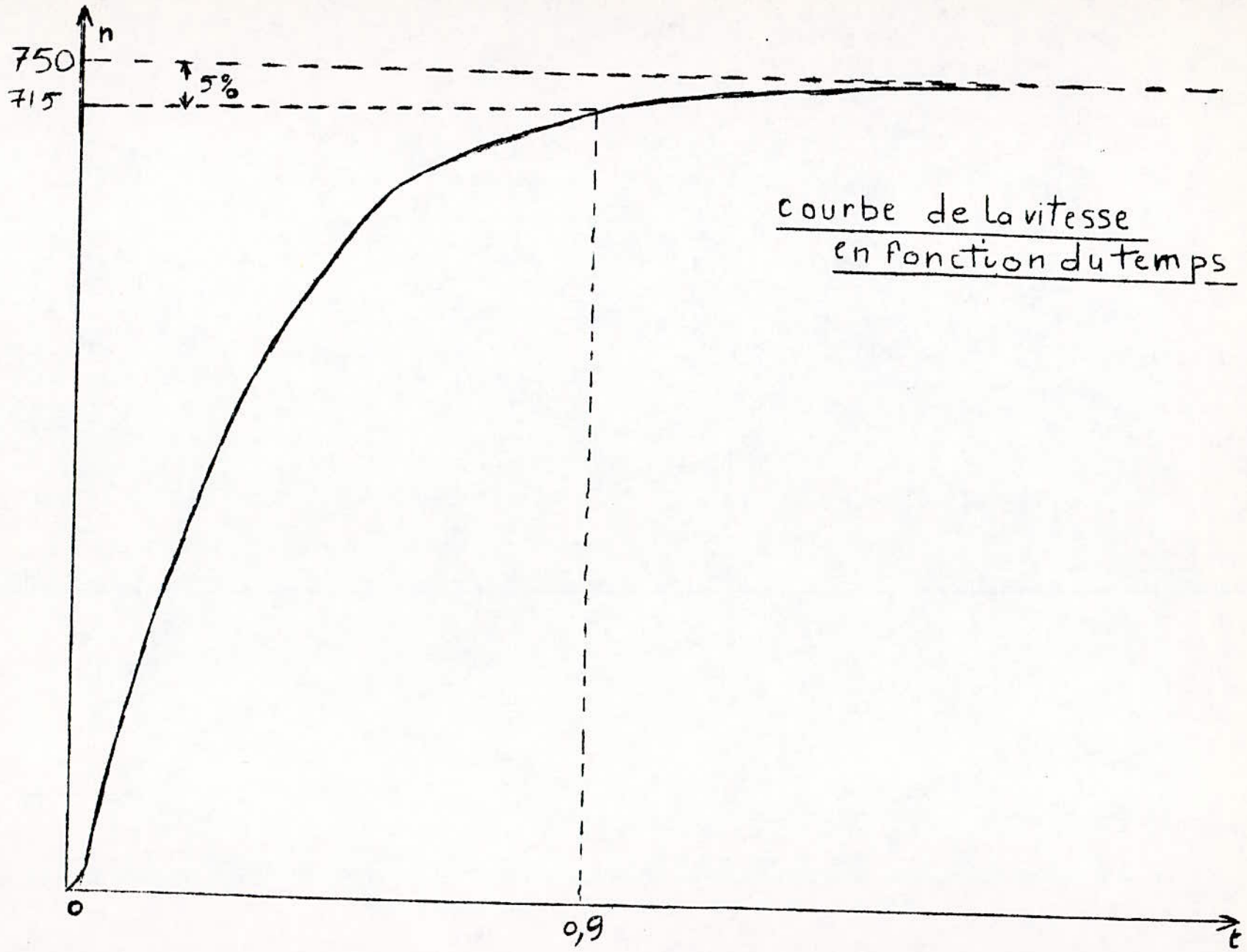
$I_{arr}$

$I_p$   
64,8 A

I

II

t



courbe de la vitesse  
en fonction du temps

82

IV-Regime Transitoire du systeme Generatrice-Moteur;

IV-1) Introduction;

Le regime transitoire est le regime de fonctionnement qui caracterise d'un etat permanent à un autre état pour lequel la vitesse, le couple et le courant varient.

Les régime transitoires naissent par suite d'une variation de la charge ou lors d'une intervention sur le groupe de commande; démarrage, freinage, sens de rotation. La consideration des régimes transitoires est tres importante; C'est sur elle que sont fondés le choix correct du moteur et l'elaboration du schema de controle. Afin de donner un aperçu sur les phénomènes résultant, nous allons étudier les variations du courant et de la vitesse au cours de chacune des intervention citée

IV-2-Processus d'accroissement du courant dans l'excitation;

Si à l'instant t, nous alimentons le circuit inducteur de la generatrice, l'equation  $U_{ex}=f(i)$  s'ecrit;

$$U_{ex} = L_{ex} \frac{di}{dt} + r_{ex} \cdot i \quad \text{Soit}$$

$U_{ex}$  represente un échelon de tension ;  $U_{ex} = R_{ex} I_{exn}$  .

$$R_{ex} I_{exn} = L_{ex} \frac{di}{dt} + r_{ex} i \quad \text{SOIT} \quad T_{ex} \frac{di}{dt} + i = I_{exn}$$

Symboliquement, nous aurons;

$$i p T_{ex} + i = \frac{I_{exn}}{p} \quad , \quad i = \frac{I_{exn}}{T_{ex}} \cdot \frac{1}{p(p + \frac{1}{T_{ex}})}$$

$$i = \frac{I_{exn}}{T_{ex}} \cdot \frac{I/T_{ex}}{p} - \frac{I/T_{ex}}{p + I/T_{ex}} = I_{ex} \left( \frac{I}{p} - \frac{I}{p + I/T_{ex}} \right)$$

Alors:

$$i(t) = I_{exn} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{ex}}} \right)$$

Numériquement :  $i(t) = 12,6 ( 1 - e^{-t/0,713} )$

IV - 3 ) Démarrage du moteur dans le système génératrice - Moteur :

1) Si la génératrice n'est pas saturée , sa f.e.m pour  $N = c \frac{te}{\tau}$  est proportionnelle au courant d'excitation .

$$\frac{e_g}{i_{ex}} = K_g$$

Alors  $e_g = K_g i_{ex} = K_g I_{exn} ( 1 - e^{-t/T_{exc}} )$

Soit  $e_g = E_g ( 1 - e^{-t/T_{exc}} )$  ; ceci si on suppose que la tension finale est la tension nominale .

Dans le circuit d'induit du système, nous pouvons écrire :

$$e_g = E_n ( 1 - e^{-t/T_{exc}} ) = i_{In} R_o + L_o \frac{d i_{In}}{dt} + e$$

Avec  $e$  : F.C.E.M d'moteur .

D'autre part, l'équation fondamentale du mouvement s'écrit pour le moteur :

$$C - C_s = Jt \frac{dN}{dt}$$

Le régime non saturé étant toujours supposé, nous pouvons écrire :

$$e = C_e N$$

$$C = C_m i$$

Résolvons maintenant le système de quatre équations suivant :

$$E_g ( 1 - e^{-t/T_{exc}} ) = i_{in} R_o + e \quad (1)$$

$$C = Jt \frac{dN}{dt} + C_s \quad (2)$$

$$e = C_e N \quad (3)$$

$$C = c_m i \quad (4)$$

Vue la valeur très faible de  $L_0$  relativement à  $L_{ex}$ , nous ne tiendrons pas compte de  $L_0 \frac{di}{dt}$ .

$$(2) \text{ s'écrit } C = cm i = Jt \frac{dN}{dt} + C_s$$

$$\text{Soit } i = \frac{Jt}{cm} \frac{dN}{dt} + \frac{C_s}{cm}$$

En remplaçant dans (1),

$$E_g (1 - e^{-t/T_{ex}}) = \frac{Jt}{cm} \frac{dN}{dt} R_0 + \frac{C_s R_0}{cm} + ce N$$

$$\frac{E_g}{Ce} (1 - e^{-t/T_{ex}}) = \frac{Jt R_0}{cm ce} \frac{dN}{dt} + \frac{C_s R_0}{cm ce} + N$$

$$\text{En posant } \frac{C_s R_0}{cm ce} = N_s \quad \text{et} \quad E_g = Ce N_0$$

Nous pouvons écrire :

$$T_M \frac{dN}{dt} + N = N_0 (1 - e^{-t/T_{ex}}) - N_s$$

$$\text{Soit } \frac{N}{T_M} + \frac{dN}{dt} = \frac{N_0 - N_s}{T_M} - \frac{N_0}{T_M} e^{-t/T_{ex}}$$

Equation dont la solution est :

$$N = \frac{N_0}{T_{ex} - T_M} \left\{ T_{ex} (1 - e^{-t/T_{ex}}) - T_M \left( 1 - \left( \frac{N_0}{N_0 - N_s} \right) \frac{T_{ex} - T_M}{T_M} \cdot e^{-t/T_{ex}} \right) \right\} - N_s$$

$$\text{Avec } N_0 = 788 \text{ t/mm}$$

$$T_{ex} = 0,713 \text{ s}$$

$$T_M = 0,25 \text{ s}$$

$$N_s = \frac{C_s R_0}{ce cm} = \frac{1425 \times 0,0362 \times 1,03}{0,387^2} = 354,76 \text{ t/Mn}$$



2 ) Equation du courant :

Ecrivons l'équation fondamentale du mouvement :

$$C = Jt \frac{dN}{dt} - C_s$$

$$C = c_m i$$

$$i = \frac{Jt}{c_m} \frac{dN}{dt} - \frac{C_s}{c_m} = \frac{Jt}{c_m} \frac{dN}{dt} - I_s$$

L'expression de N permet de calculer  $\frac{dN}{dt}$  .

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_0}{T_{ex} - T_M} e^{-t/T_{ex}} - \frac{N_0}{N_0 - N_s} \frac{T_{ex} - T_M}{T_M} \cdot e^{-t/T_M}$$

Soit :

$$i = \frac{Jt}{c_m} \frac{N_0}{(T_{ex} - T_M)} e^{-t/T_{ex}} - \frac{N_0}{N_0 - N_s} \frac{T_{ex} - T_M}{T_M} \cdot e^{-t/T_M}$$

$$\text{or } T_M = \frac{Jt R_0}{c_e c_m} \text{ et } I_{cc} = \frac{N_0 C_e}{R_0} \text{ alors } \frac{Jt N_0}{c_m (T_{ex} - T_M)} = \frac{T_M I_{cc}}{T_{ex} - T_M}$$

$$i = \frac{T_M I_{cc}}{(T_{ex} - T_M)} e^{-t/T_{ex}} - \frac{N_0}{N_0 - N_s} \left( \frac{T_{ex} - T_M}{T_M} \right) e^{-t/T_M} .$$

IV - 3 - Freinage du Système :

IV - 3 - 1 - Introduction :

Le freinage du moteur se fait lorsque le courant dans l'inducteur de la génératrice change de sens . Le moteur fonctionne alors en générateur, grâce à l'énergie cinétique emmagasiné, tandis que la génératrice fonctionne en moteur. Le moteur auxiliaire passe en régime générateur lors de la diminution du courant d'excitation, il livre ainsi de l'énergie au réseau .

IV - 3 - 2 ) Circuit inducteur :

Lors du freinage, l'équation électrique du circuit de l'inducteur s'écrit :

$$i ( R_{ex} + R_T + R'y ) + ( L_{ex} + L'y ) \frac{d i_{ex}}{dt} = 0$$

$$i ( R_t ) + L_t \frac{d i_{ex}}{dt} = 0$$

$$R_{ex} = 6,35$$

$$L_{ex} = 4,526 \text{ H}$$

$$R_T = 0,267$$

$$L'y = 0,144$$

$$R'y = 0,1$$

$$i(p) + T_{tex} P i(p) - I_{ex} = 0$$

$$i(p) = I_{ex} \times \frac{1}{1 + T_{ex} P} = I_{ex} e^{-t/T_{tex}}$$

IV - 3 - 3 ) Circuit de l'induit :

a) Le régime de non saturation étant supposé, nous pouvons écrire :

$$e_g = K_g i_{ex} = K_g I_{ex} e^{-t/T_{tex}}$$

$$e_g = E_g e^{-t/T_{tex}} .$$

b) De la même façon que précédemment, on obtient la relation  $N = f(t)$  en résolvant le système suivant :

$$E_g e^{-t/T_{tex}} = C_e N - i R_o$$

$$- c_m i = J_t \frac{dN}{dt} + C_s$$

$$- i = + \frac{J_t}{c_m} \frac{dN}{dt} + \frac{C_s}{c_m}$$

$$E_g e^{-t/T_{tex}} = C_e N - \frac{J_t R_o}{c_m} \frac{dN}{dt} - \frac{C_s R_o}{c_m}$$

$$\frac{E_g}{c_e} e^{-t/T_{tex}} = N - T_M \frac{dN}{dt} - \frac{C_s R_o}{c_e c_m}$$

$$\text{Soit } N - T_M \frac{dN}{dt} = N_0 e^{-t/T_{\text{tex}}} + N_s \quad \text{avec } N_0 = \frac{E_g}{c_e}$$

$$\frac{C_s R_o}{c_e c_m} = N_s$$

Equation dont la solution est :

$$N = \frac{N_0}{T_{\text{tex}} - T_M} ( T_{\text{tex}} e^{-t/T_{\text{tex}}} - T_M e^{-t/T_M} ) - N_s .$$

c) courant dans l'induit :

$$- C = Jt \frac{dN}{dt} + C_s$$

$$- C_m i = Jt \frac{dN}{dt} + C_s$$

$$- i = \frac{Jt}{C_m} \frac{dN}{dt} + \frac{C_s}{C_m}$$

$$- i = \frac{Jt}{C_m} \frac{N_0}{T_{\text{tex}} - T_M} ( e^{-t/T_M} - e^{-t/T_{\text{tex}}} ) + I_s$$

$$- i = \frac{Jt R_o C_e N_0}{C_e C_m R_o (T_{\text{tex}} - T_M)} ( e^{-t/T_M} - e^{-t/T_{\text{tex}}} ) + I_s$$

$$- i = \frac{I_{cc} T_M}{T_{\text{tex}} - T_M} ( e^{-t/T_M} - e^{-t/T_{\text{tex}}} ) + I_s \quad I_{cc} = \frac{C_e N_0}{R_o}$$

IV - 4 ) Etude transitoire du changement du sens de rotation :

1) Introduction : Le renversement du sens de rotation du moteur est réalisé par un changement du sens du courant dans l'enroulement inducteur de la génératrice. Ce fait provoque une diminution rapide du courant d'excitation et ensuite, son accroissement en sens inverse.

2) Circuit Inducteur :

Pendant le renversement du sens de rotation, l'équation courant-tension dans le circuit inducteur s'écrit :

$$- U_{\text{ex}} = i_{\text{ex}} R_{\text{ex}} + L_{\text{ex}} \frac{d i_{\text{ex}}}{dt}$$

Sous Forme symbolique, nous aurons:

$$-\frac{U_{ex}}{P} + U_{ex} = i_{ex} R_{ex} (1 + T_{ex} P)$$

$$- I_{ex} \left( \frac{1}{P} - 1 \right) = i_{ex} (1 + T_{ex} P)$$

$$i_{ex} = - I_{ex} \left( \frac{1}{P} \times \frac{1}{1 + T_{ex} P} - \frac{1}{1 + T_{ex} P} \right)$$

$$\boxed{\text{Alors } i_{ex} = - I_{ex} (1 - 2 e^{-t/T_{ex}})}$$

IV - 4 - 3 ) Variation de la vitesse :

De la même façon que précédemment :

$$\frac{e_g}{i_{ex}} = K_g \quad e_g = - K_g I_{ex} (1 - 2 e^{-t/T_{ex}})$$

$$e_g = - E_g (1 - 2 e^{-t/T_{ex}})$$

L'équation donnant la vitesse se calcule à partir de l'équation du mouvement:

$$- C = Jt \frac{dN}{dt} + C_s \quad - C_m i = Jt \frac{dN}{dt} + C_s$$

$$+ i = \frac{Jt}{C_m} \frac{dN}{dt} + \frac{C_s}{C_m} ; C_e N - i R_o = e_g$$

$$- E_g (1 - 2 e^{-t/T_{ex}}) = C_e N - i R_o = C_e N - \frac{Jt R_o}{C_m} \frac{dN}{dt} + \frac{C_s R_o}{C_m}$$

$$N - T_M \frac{dN}{dt} = - N_o (1 - 2 e^{-t/T_{ex}}) - N_s$$

La solution de cette équation différentielle :

$$N = - (N_o + N_s) + \frac{2 N_o}{T_{ex} - T_M} (T_{ex} e^{-t/T_{ex}} - T_M e^{-t/T_M})$$

IV - 4 - 4 ) Courant dans l'inductance :

$$i = \frac{J}{C_m} \frac{dN}{dt} + I_s$$

En dérivant l'équation donnant la vitesse et en remplaçant  $\frac{dN}{dt}$  par sa valeur

$$i = \frac{Jt}{cm} \frac{2No}{Tex-TM} ( e^{-t/TM} - e^{-t/Tex} ) + Is$$

$$\frac{Jt}{cm} \frac{2No}{Tex-TM} = \frac{Jt Ce 2No Ro}{cm Ce Ro (Tex-TM)} = \frac{TM 2 Icc}{Tex - TM}$$

$$\text{Soit : } i = \frac{2 TM Icc}{Tex - TM} ( e^{-t/TM} - e^{-t/Tex} ) + Is$$

IV-5-Equations numeriques et tracés des courbes:

--Courant dans l'induit au moment du démarrage:

$$i(t) = ( e^{-t/0,713} - 1,047e^{-t/0,25} ) 4548,7 + 379$$

--Vitesse au moment du démarrage :

$$N(t) = 1701,94 ( 0,713(1 - e^{-t/0,713}) - 0,25(1 - 1,088e^{-t/0,25}) ) + 35,47$$

--Courant dans l'induit au moment du freinage:

$$i(t) = 4548,7( e^{-t/0,25} - e^{-t/0,695} ) + 379$$

--Vitesse de rotation pendant le freinage:

$$N(t) = 1770,78( 0,695 e^{-t/0,695} - 0,25 e^{-t/0,25} ) - 35,47$$

--Courant dans l'induit au moment du changement du sens de rotation:

$$i(t) = 9097,4 ( e^{-t/0,25} - e^{-t/0,713} ) + 379$$

--Vitesse de rotation au moment du changement du sens de rotation:

$$N(t) = 3403,94 ( 0,713 e^{-t/0,713} - 0,25 e^{-t/0,25} ) - 823,47$$

## CONCLUSION

Les systèmes de commande à contre réaction sont très utilisés et leur principe d'auto-régulation est très apprécié. Les recherches actuelles concernant ce domaine, sont orientées vers une limitation du temps de réponse, donc vers une diminution des constantes de temps des différentes composantes.

Un système formé d'éléments ayant de faibles constantes de temps, présente une fiabilité beaucoup plus grande et permet un travail de haute productivité.

Si on fait une étude comparative des temps de réponse des systèmes à régulation automatique et à régulation manuelle on s'aperçoit que le gain en temps que présentent les premiers par rapport aux seconds est considérable (plus d'une seconde)

Dans le cas de notre commande, l'intervention en cas de rupture de stabilité doit être très rapide, ceci afin d'assurer un positionnement précis et d'éviter certains chocs mécaniques au niveau du godet; c'est pour cela que l'asservissement tension est indispensable.

BIBLIOGRAPHIE

A.KASSATKINE ET M.PEREKALINE

Cours d'electrotechnique Editions MIR

A . FOUILLE

Electrotechnique à l'usage des ingenieurs t.3

J.HENRY BAUDOT

Les machines electrique en automatique appliqué

Edition dunod 1967

P.NASLIN

Technologie et calcul pratique des systèmes asservis

M.DEMONT VIGNER

soupapes electriques redresseurs onduleurs

t.I,2,3. Edition E.S.E.

R.CHAUPRADE

COMMANDE ELECTRIQUE DES MOTEURS A COURANT CONTINU

Edition cyrolles 1975

M.TCHILIMINE:

Cours de commande electriquet t.I,2

Edition Mir

Cours de M. ZEBROW SKI

"Systeme asservis"



TABLE DES MATIERES.

I-Choix et adaptation du systeme de commande.

I-I Introduction.

2 Etude de la partie à commander

2-I Description

2 Caractéristique mécanique

3 Force statique

4 Couple statique

5 RESULTATS numerique

6 conclusion.

3 Etude du service du systeme

I Introduction

2 Presentation du cycle

3 Conclusion

4 choix du systeme

ICritere du choix

2 action par moteur à courant alternatif

a) Synchrones

b) Asynchrones

3 Action par moteur à courant continu

4 Systeme G.M.

a) Principe

b) Excitation par generatrice à trois enroulements.

c) " " amplidyne.

d) " " amplificateur magnétique.

e) " " thyristors;

45 Systeme choisi

6 Choix de la puissance.

7 Etude du couplage G.M.

a) F.E.M de la generatrice pour le systeme

b) Presentation des resistances

8c) caractéristique mecanique du moteur, point de fonctionnement

5 Couple effectif

I Definition

2 calcul du temps de demarrage

3 calcul du temps de freinage

4 Evaluation des durées des différentes phases du cycle

5 " " couples développés lors des différentes phases

6 calcul du couple effectif.

II-Etude du groupe convertisseur

I Generalités

2 Thyristor

3 Systeme convertisseur alternatif-continu.

IChoix du systeme

2 Montage triphasé simple voie équilibré

Tension redressé

Courant redressé

c) Tension et courant dans les thyristors.

d) Etude de la commutation

e) Chutes de tension.

II-4-Transformateur d'alimentation

- 1-Circuit secondaire
- 2-Circuit primaire dans le cas de la commutation instantanée
- 3-Puissances réelle et réactive, cos et facteur de puissance

II-5-Protection

- 1-Protection du montage contre les surintensités
- 2-Protection contre les surtensions

II-6-Calcul du système convertisseur

- 1-Choix des thyristors
- 2-Calcul des inductances
- 3-Chutes de tensions
- 4-Calcul des angles de retard à l'amorçage et de commutation
- 5-Dimensionnement du transformateur

III-0-COMMANDE ET REGULATION DU SYSTEME

- 1-Fonctionnement du système
- 2-Asservissement de la tension
- 3-Boucle de limitation du courant
- 4-Forme de l'impulsion actionnant les gachettes

III-1-Fonction de transfert des différents éléments

- 2-Constantes de temps
- 3-Calcul des coefficients
- 4-Caractéristique de surcharge
- 5-Etude dynamique du système
  - 1-Calcul de  $H(p)$
  - 2-Conditions d'étude de la stabilité
  - 3-Stabilité d'après le critère de Routh
  - 4- " " " " " " Niquist
  - 5-Correction du système
  - 6-Recherche de l'original
  - 7-Trace de la courbe  $n=f(t)$
  - 8- " " " " " "  $i=f(t)$

IV-Etude du régime transitoire d'un système génératrice-moteur

- 1-Introduction
- 2-Etude du démarrage
- 3- " " freinage
- 4- " " renversement du sens de rotation

CONCLUSION