

3/79

U. S. T. A.

Ecole Nationale Polytechnique

2ed

**DEPARTEMENT ELECTRICITE
FILIERE ELECTROTECHNIQUE**

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
Ecole Nationale Polytechnique
BIBLIOTHÈQUE

**COMMANDE ELECTRIQUE DU
MECANISME DE LEVAGE D
CODET D'UN EXCAVATEUR**

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
- المكتبة -
Ecole Nationale Polytechnique
BIBLIOTHÈQUE

Proposé et Dirigé par M.

V. BOUTENKO

Etudié par M.

A. DEROUICHE et M. ABDI

Ministère De L'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique

U.S.TAA

Ecole nationale Polytechnique

Département d'électronique et d'électrotechnique
Filière Electrotechnique

PROJET DE FIN D'ETUDE_S POUR L'Obtention du diplôme d'ingénieur

COMMANDE ELECTRIQUE DU MECANISME DE LEVAGE

DU GODET D'UN EXCAVATEUR.

Proposé et dirigé par:

Mr: V.BOUTENKO.

Etudié par Mrs:

A.DEROUCHE ET M. ABDI

PROMOTION 79.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

سُبْحَانَكَ اللَّهُمَّ لِيَوْمِ آتَيْنَا

لِقَابِكَ يَا اللَّهُمَّ الْعَلِيمُ الْخَبِيرُ

قرآن کریم

مشروع نہایۃ الدرستہ

مِقْوَد، كَهْرَبَائِي، لَا وَإِيَّاهُ رَفَعُ

مِجْرَفَةَ حَفَّارَةَ

A Shiham et donyazad

A toute ma famille ainsi que tous les amis.

Mokhtar ABDI.

A mes parents

A mon frère AHCÈNE

et à tous mes amis.

Abd-El-Hamid Derouiche.

Que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à notre formation générale et à l'élaboration de ce projet, trouvent ici, notre gratitude ainsi que nos sincères remerciements.

Nous remercions plus particulièrement Mr BOUTENKO pour son aide précieuse.

Mokhtar et Abd-El-Hamid .

LES GENERALITES.

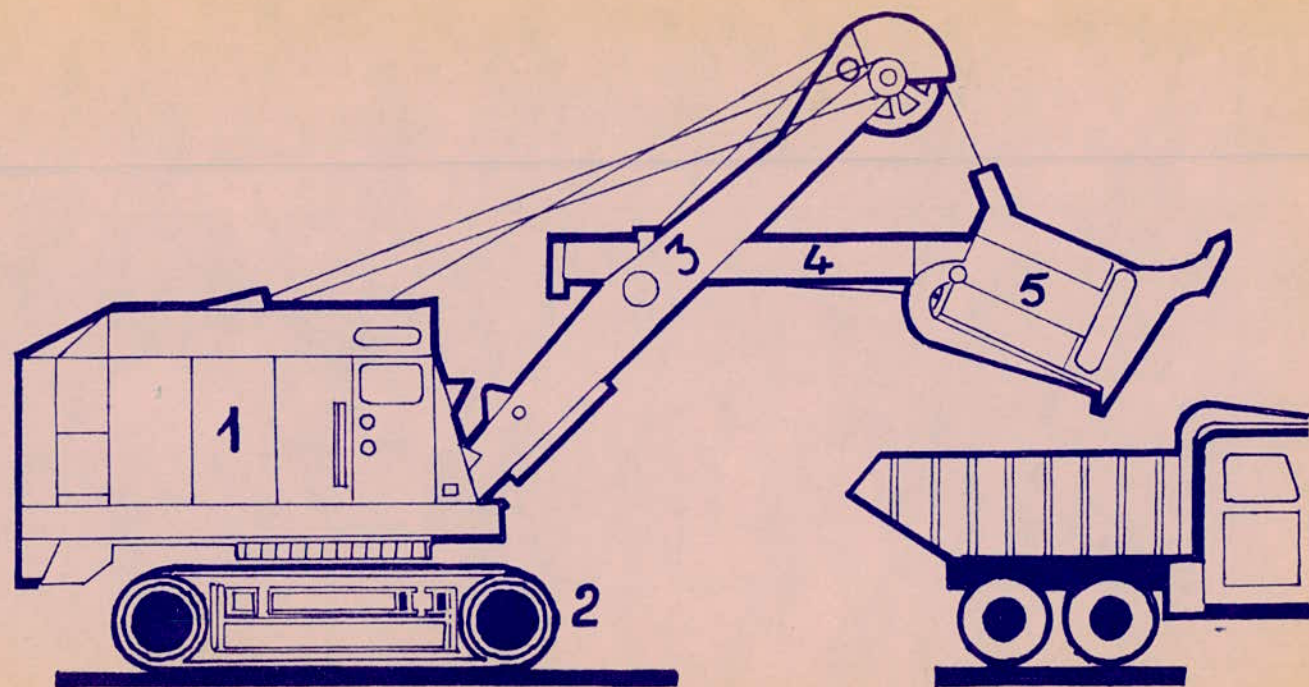
/§I. INTRODUCTION.

L'importance que connaît le domaine des travaux publics, l'exploitation des mines à ciel ouvert ainsi que l'expansion des travaux routiers, est dûe essentiellement à l'introduction des gros engins tels que :

- Les grues.
- Les pelles.
- Les draglines.
- Les roues-pelles.
- Les excavateurs à godets.

Ces derniers ont connu un emploi fort appreciable dans les chantiers plus particulièrement dans les mines à ciel ouvert. L'importance accordée à cet engin est dûe particulièrement à l'emploi progressif de la commande électrique de grande puissance. Outre une adaptation adéquate aux travaux à l'air libre, l'excavateur à la particularité de se soumettre aisément aux lois de l'asservissement .

L'excavateur fonctionne suivant cinq asservissements aussi importants les uns que les autres. Nous avons, pour notre part, étudié le mouvement de rotation du bras du godet autour de son axe de fixation à la flèche.



1_ CABINE DE COMMANDE

2_ CHENILLES

3_ FLECHE

4_ BRAS

5_ GODET

EXCAVATEUR

I-2 DESCRIPTION DE LA PARTIE A COMMANDER.

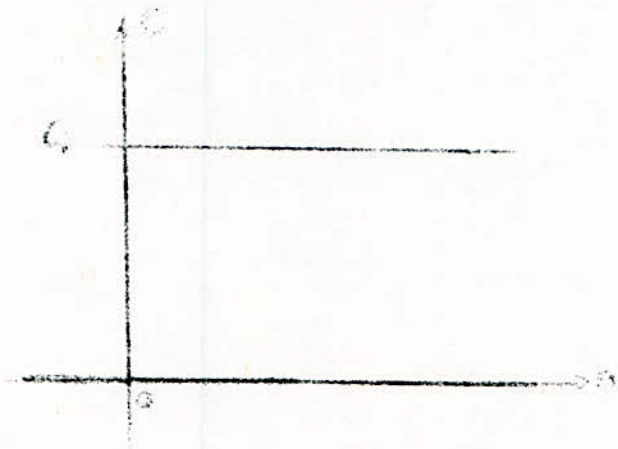
a) Composantes de la machine à commander.

- Godet.
- Bras du godet.
- Tambour avec réducteur.

Le système de commande doit assurer une commande du mouvement bas vers le haut et du mouvement haut vers le bas en un temps minimal pour permettre une exploitation optimale de l'engin.

b) Caractéristiques mécaniques.

Comme beaucoup d'engin l'excavateur présente une caractéristique mécanique constante. C'est ce qui suppose une caractéristique indépendante de la vitesse de rotation du tambour.



c) Cycle d'excavation. (voir chapitre suivant)

la durée du cycle est de 50 s .

I-3 Choix ET ADAPTATION DU SYSTEME DE COMMANDE.

-Le choix du système de commande repose sur des critères conditionnés par la connaissance des caractéristiques de la machine à commander et de plus par les conditions de travail de tout le système.

-Les critères de choix.

-Le système doit être tel que: la fréquence, très élevée pendant le démarrage et le freinage ainsi que dans le changement du sens de rotation n'altère en rien sa constitution.

-Forte capacité de surcharge. Le système sera soumis à des surcharges importantes.

-Grande stabilité mécanique et adaptation adéquate au travail de chantier.

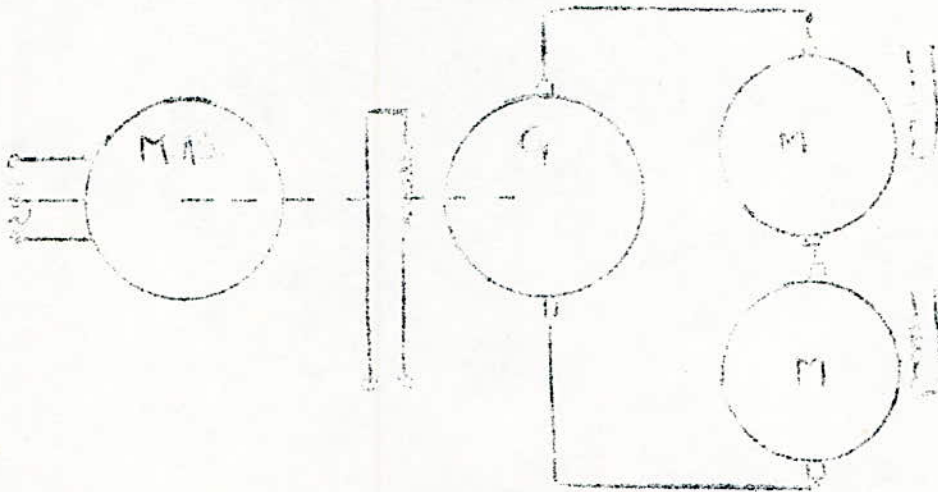
-Une plage de variation de la vitesse importante.

I-4 SYSTEME CHOISI.

a) Presentation du systeme.

Le systeme qui présente assez de qualités requises par le chapitre précédent est le groupe G-M, commandé par un dispositif électronique. Outre les gammes assez étendues de la vitesse, ce systeme présente l'avantage d'avoir un rendement acceptable, une souplesse d'emploi, une précision et facilité de commande. D'un cout relativement bas, le groupe G-M offre la possibilité d'être réversible. Dans notre cas la gamme de vitesse est de l'ordre (1- 50).

b) Description du systeme.



La génératrice est entraînée par un moteur asynchrone à vitesse Cte. Elle alimente directement l'induit du moteur de commande. Le moteur est à excitation indépendante (séparée), ainsi une variation du flux d'excitation de la génératrice ne se répercute pas sur l'induit du moteur. Ce que l'on peut exprimer par les equations suivantes:

soient U, I, R_a : tension, courant, résistance d'induit.
 E' : f.c.e.m, P : puissance; C ; couple; n : vitesse de rotation en trs/mn, Φ flux inducteur par pôle; k : Cte caractéristique du moteur. en unité (S;I) :

$$E' = k \cdot n \cdot \Phi = U - R_a \cdot I = U$$

$$P = E' \cdot I = k \cdot n \cdot \Phi \cdot I = 2\pi \cdot n \cdot C$$

D'autre part, pour un démarrage rapide, un limiteur de courant maintient $I = Cte$.

1) Pour une vitesse donnée à $n = n_0$, le flux $\Phi = Cte$.
 $n = \frac{U}{k\Phi}$ (proportionnel à la tension). De même pour P , tandis que $C = \frac{k}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I$ est constant couple maximal possible.

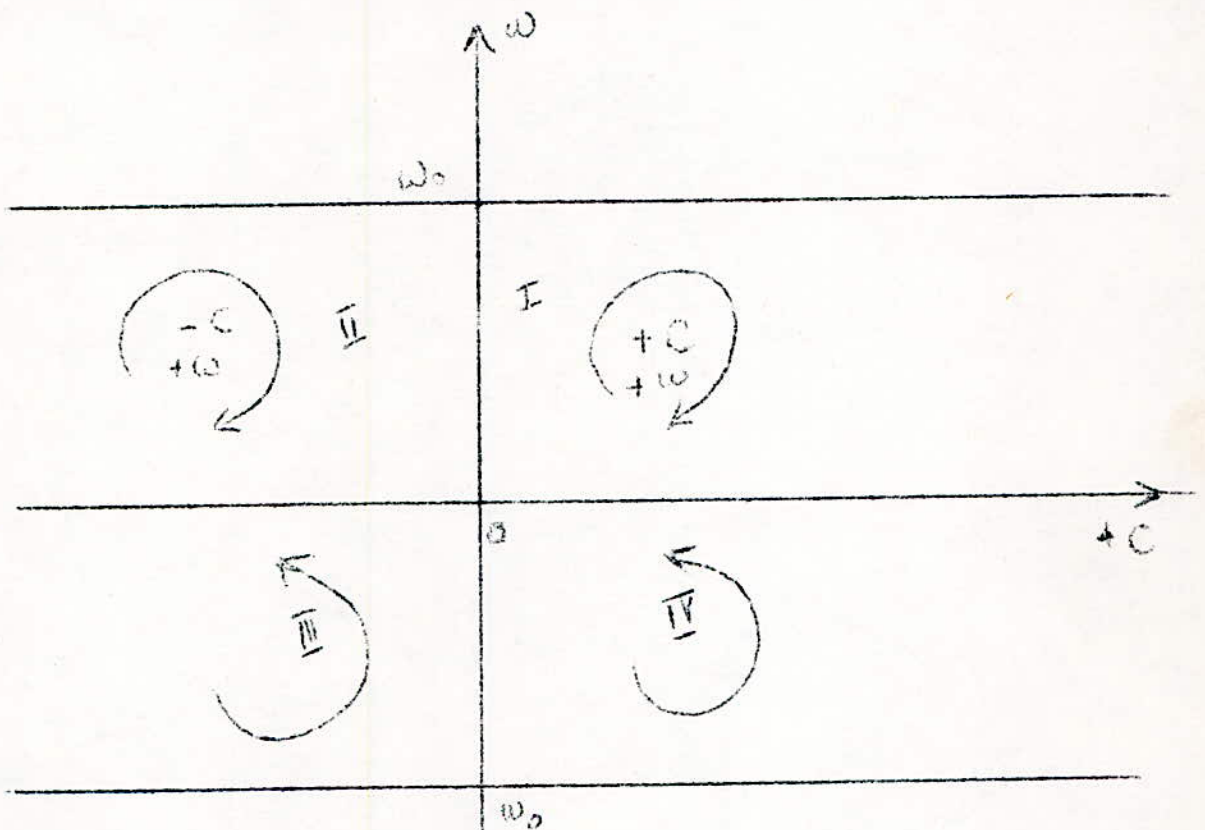
a) à vitesse supérieure à la vitesse nominale
on maintient $u = cte$ et on diminue Φ

$$n = \frac{\omega}{k\Phi} \text{ est inversement proportionnelle à } \Phi.$$

$$C = \frac{k}{2\pi} \Phi \cdot I \text{ est directement proportionnelle à } \Phi.$$

La puissance, quand à elle, reste constante.

c) Diagramme de fonctionnement.



Cadrans I et III : vitesse et couple dans le même sens. (Dans un sens ou dans l'autre). Démarrage dans un sens ou dans l'autre.

Cadrans II et IV : vitesse et couple de sens contraire. (freinage)

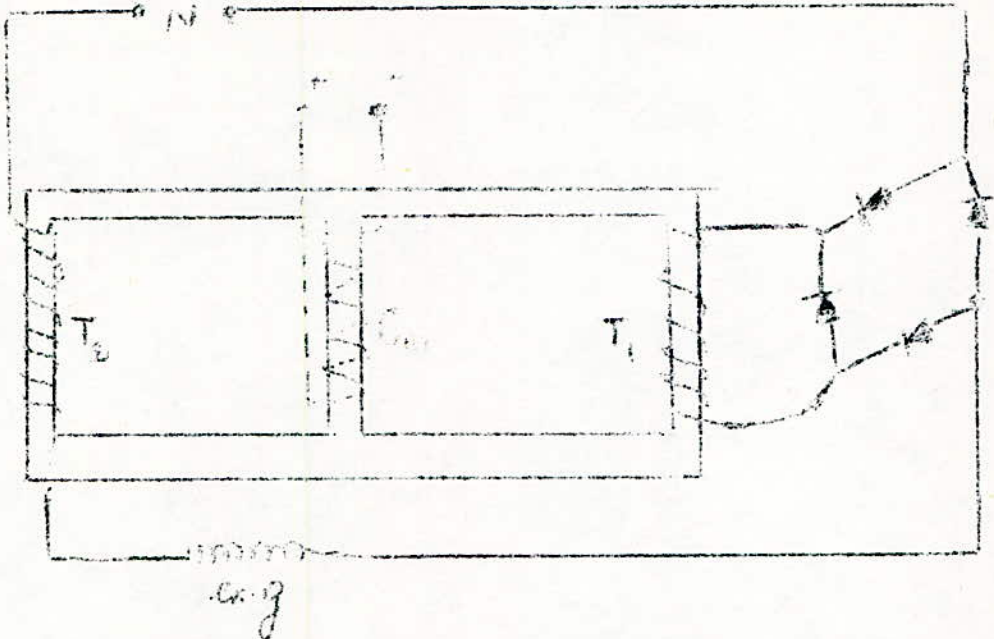
d) CHOIX DE LA PUISSANCE.

Le bon choix de la puissance du système de commande est une condition importante pour un fonctionnement correct de l'ensemble. La puissance du système G-M doit être choisie conformément à la puissance statique et au cycle d'excoavation de travail de la machine à commander.

I-5 PROCEDE DE DECLENCHEMENT.

Ia) Description des appareils.

a) Amplificateur magnetique: (transducteurs + redresseurs secs).



-Un amplificateur magnetique résulte de l'association d'un transducteur et de redresseurs secs.

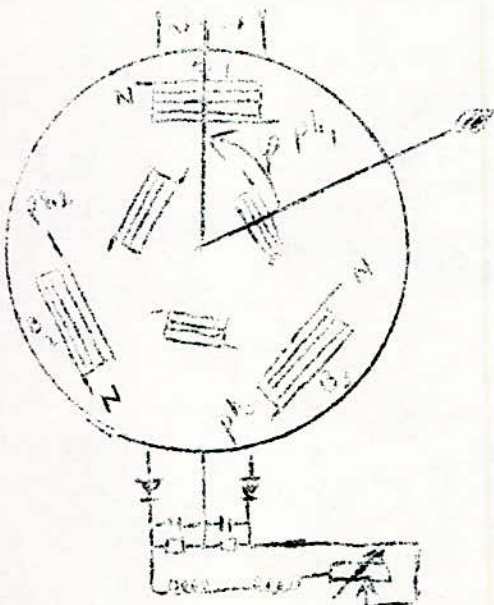
-Composé de trois bobines telles que:

-Cm enroulement de commande (alimenté par une source continue).

-T₁ et T₂ enroulements de puissance (de travail) parcourus par un courant alternatif.

-L'enroulement de commande et les enroulements de puissance n'ont aucun point commun.

b) La synchré-machine (SELSYN).



La Selsyn:

Composée de trois bobines au primaire et trois bobines au secondaire, elle se comporte comme les machines tournantes. La tension de sortie au secondaire (stator) est proportionnelle à l'angle que fait la bobine du primaire avec la bobine du secondaire.

2) Principe de fonctionnement:

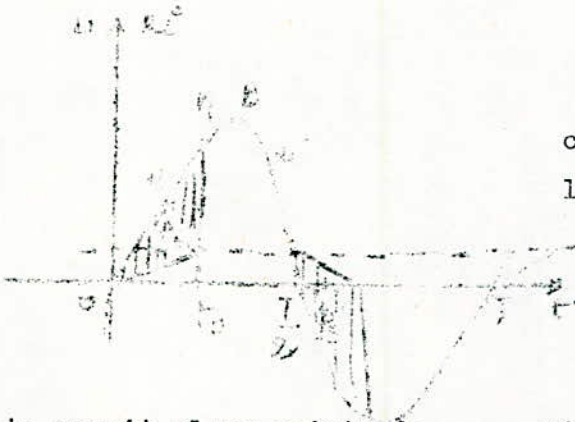
a) Amplificateur magnétique.

Le principe de fonctionnement des amplificateurs ~~ma~~ est basé sur la valeur très grande de l'induction dynamique du circuit de puissance, mais qui diminue avec la saturation.

$$I_{eff} = \frac{U}{Z} ; Z = (R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}$$

avant la saturation $\omega L \gg R$, l'intensité efficace sera alors : $I_{eff} = \frac{U}{\omega L}$

Après saturation $\omega L \ll R \Rightarrow I_{eff} = \frac{U}{R}$

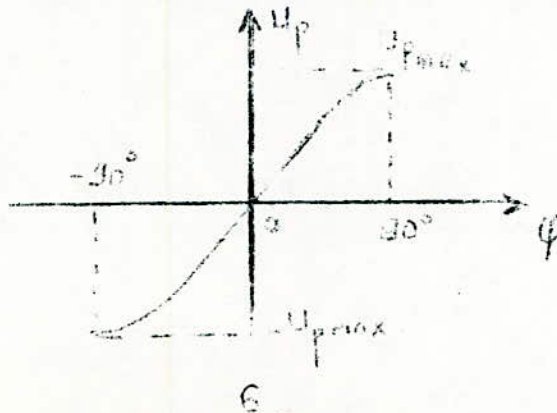


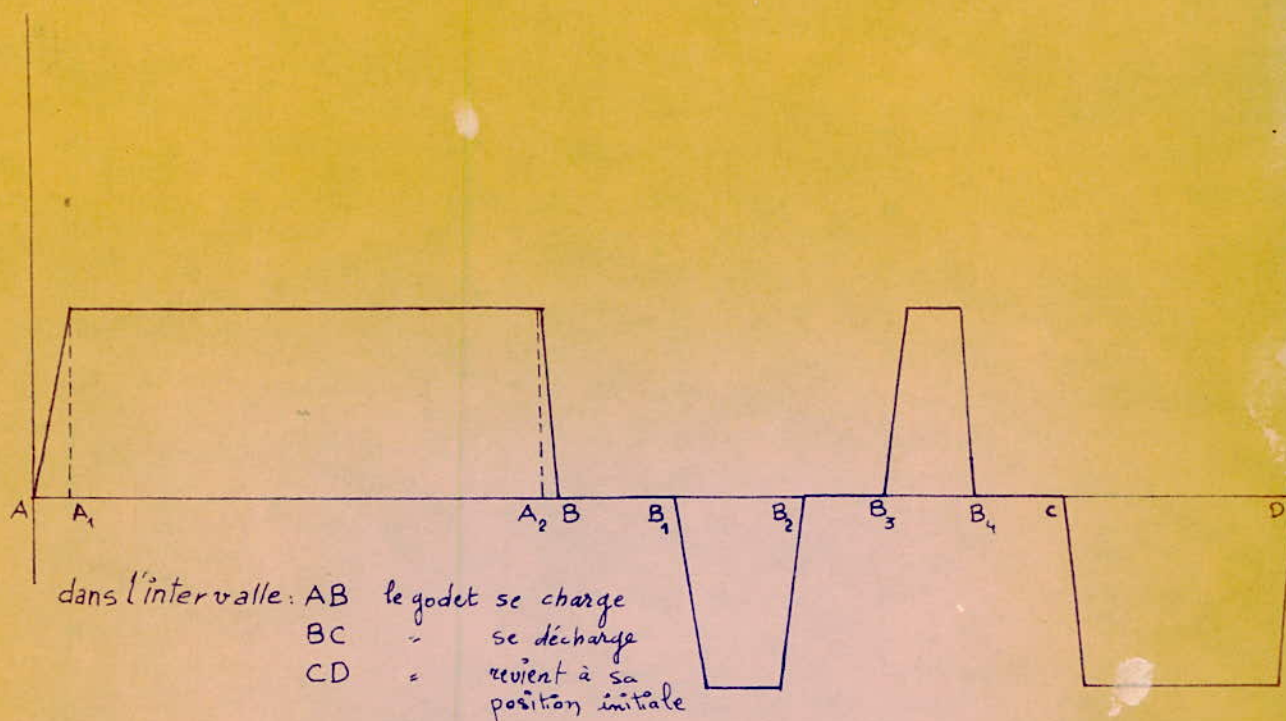
à la sortie de l'amplificateur on a comme impulsion d'impulsion vue sur le graphe ci-dessous. Ce phénomène se produit pendant les premières périodes mais le courant dans la bobine de puissance ne peut pas s'inverser elle finirait par se saturer.

to serait alors voisin de zero. C'est pourquoi la bobine Cm démagnétise le circuit pendant l'alternance négative de u ; L'intensité de courant courant continu commande alors l'époque t_0 de la saturation et du front raide du courant.

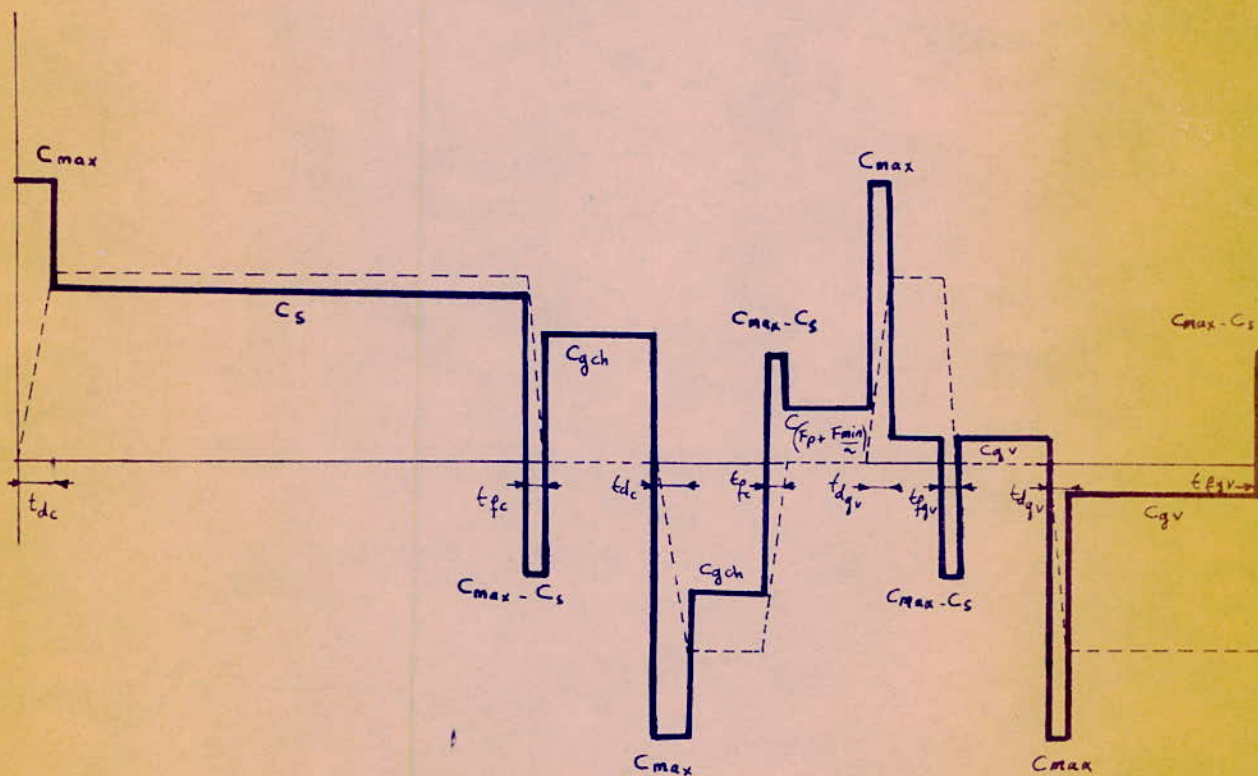
b) La seïsyn.

Le déphasage entre la bobine du rotor et du stator permet d'avoir une courbe de la tension de sortie sous la forme suivante:





CYCLE D'EXCAVATION ET COUPLE CORRESPONDANT



- de: A à A₁ démarrage des 2 moteurs
- A₁ à A₂ fonctionnement nominale
- A₂ à B freinage des 2 moteurs
- B à B₁ Rotation de la cabine [le godet est maintenu en l'air]
- B₁ à B₂ Positionnement du godet au dessus du (Wagen, camion ...)
- B₂ à B₃ Le godet se décharge
- B₃ à B₄ Elevation du godet
- B₄ à c Rotation de la cabine
- c à D descente du godet

CH II. CALCUL DES CARACTERISTIQUES STATIQUES ET CHOIX DE LA PUISSANCE.

II-1. Couple statique.

La force avec laquelle on creuse est donnée par la formule empirique suivantes:

$$F_c = f \frac{V}{K_p \cdot h}$$

où f : résistivité du matériau par unité de surface. $f = (5 \text{ à } 30) \cdot 10^3 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2}$

K_p : coefficient de friabilité $K_p = 1,2$

V : volume du godet $V = 8 \text{ m}^3$

h : hauteur du chantier $h = 20 \text{ m}$

tout calcul fait la force F_c a pour valeur:

$$F_c = 6,333 \cdot 10^3 \text{ Kgf}$$

Soient alors F_p et F_{min} poids respectif du système (godet + bras) et poids du minerai.

$$F_{min} = \frac{Vg}{K_p}$$

V : volume du godet.

g : poids spécifique ; $g = 2 \text{ tonnes-force/m}^3$

tout calcul fait la valeur du minerai du poids de F_{min} est égale à:

$$F_{min} = 13,333 \cdot 10^3 \text{ Kgf}$$

Le couple statique sera déduit de la formule suivante:

$$C_s = \frac{\sum F_i \cdot D_t \cdot \eta}{2j}$$

$$\sum F_i = F_c + F_p + F_{min}$$

D_t : diamètre du tambour; $D_t = 2 \text{ m}$

η : rendement ; $\eta = 0,8$

j : Coefficient de réduction de la vitesse $j = 35$

D'où la valeur du couple statique :

$$C_s = 586,65 \text{ Kgf.m.}$$

II-2 Couple développé par le moteur pour maintenir le godet en l'air.

a) Godet en charge.

Pour maintenir le godet en charge, le moteur doit développer un couple tel que sa valeur sera:

$$C_{gch} = \frac{(F_p + F_{min}) \cdot D_t \cdot \eta}{2j}$$

d'où la valeur de C_{gch} :

$$C_{gch} = 441,897 \text{ Kgf.m ou } 4390,6 \text{ Nm.}$$

b) Godet à vide.

De même que pour le godet en charge, mais nous prenons en considération que le poids du système (Godet, bras).

$$C_{gv} = \frac{F_p \cdot D_t \cdot j}{2j}$$

le calcul nous donne comme valeur du couple du godet à vide:

$$C_{gv} = 137,142 \text{ Kgf.m ou } 1344 \text{ Nm}$$

II-3 Etude du couplage G.M

La puissance, délivrée par la génératrice pour le système, est donnée par l'équation suivante/

$E_g = 2U_{nm} + I_{nm} \cdot R_g$ ou R_g résistance d'induit de la génératrice avec $R_g = R_{ag} + R_{aux} + R_{com}$.

R_{ag} : résistance d'induit.

R_{aux} : résistance auxiliaire

R_{com} : résistance de l'enroulement de compensation.

$$R_g = 0,011 + 0,00142 + 0,00062 + 0,01862 \text{ (}\Omega\text{)}$$

U_{nm} : tension nominale du moteur (270 V)

I_{nm} : Intensité nominale ...//; (760 A)

D'où finalement :

$$E_g = 558 \text{ V .}$$

Les deux moteurs commandant le tambour sont en série .

II-4 Calcul du couple nominal

Le couple nominal se calcule à partir des équations qui caractérisent les machines à courant continu.

Soit alors la f.cem du moteur notée E' , elle est égale à :

$$E' = K \phi \Omega = C_e \Omega \Rightarrow C_e = \frac{E'}{\Omega} = \frac{U_{nm} - I_{nm} R_m}{\Omega}$$

avec $C_n = C_m I_{nm}$ (machine non saturée); comme notre système de commande possède 2 moteurs nous obtenons:

$$C_e = \frac{2(U_{nm} - I_{nm} R_m)}{\Omega}$$

$$R_m = R_{am} + R_{aux} = 0,0036 + 0,0032 + 0,0068 \text{ (}\Omega\text{)}$$

Avec R_{am} : résistance de l'induit du moteur.

R_{aux} : résistance des pôles auxiliaires.

R_m : résistance totale d'induit du moteur.

Ω : Vitesse nominale du moteur (tr/mn)

C_e : caractéristique électrique du moteur.

$$\text{D'où } K_e = \frac{2 \cdot (270 \text{ e } 760; 0,0068)}{740} = 0,71$$

La caractéristique mécanique du moteur est telle que :

$$K_e = 1,03 K_m \Rightarrow K_m = \frac{K_e}{1,03} = 0,69.$$

nous tirons ensuite la valeur du couple nominal :

$$C_n = K_m \cdot I_{nm} = 0,71 \frac{760}{1,03} = 523,88 \text{ Kgf (5139 Nm)}$$

le couple maximal est à 1,8 couple nominal :

$$C_{max} = 1,8 C_n \quad \text{d'où } C_{max} = 9250,2 \text{ Nm}$$

II-5. Calcul du moment de giration des parties tournantes.

Appelé couramment moment d'inertie, nous l'avons calculé à partir de constante du temps du système.

$$\tau = \frac{J R_o}{K_e \cdot K_m}$$

ou R_o : résistance du circuit d'induit ($R_o = R_g + 2 R_m$)

J : moment de giration des parties tournantes.

τ : Constante de temps du système ($\tau = 0,25 \text{ s}$)

$$J = \frac{\tau \cdot K_e \cdot K_m}{R_o} \quad J = 0,95 \frac{(0,71)^2}{1,03 \cdot 0,032} = 5,35$$

Avec $R_o = 0,032$.

II-6. Calcul des temps.

a) Temps de démarrage en charge (t_{dc})

Calculé à partir de la formule suivante :

$$t_{dc} = \frac{J \cdot \omega}{C_{max} - C_s} = \frac{5,35 \cdot 740}{9250,2 \text{ e } 5749,2} = 1,12 \text{ s}$$

b) Temps de freinage en charge (t_{fc}).

de même, le temps de freinage sera calculé à partir de la formule suivante :

$$t_{fc} = \frac{J \cdot \Omega_m}{C_{max} - C_r} = J \cdot \frac{\Omega_m}{C_{max}}$$

Sa valeur numérique sera donc, après avoir remplacé les autres paramètres par leur valeur respective.

$$t_{fc} = 0,42s$$

c) Temps de démarrage godet à vide ($t_{d\ gv}$).

$$t_{d\ gv} = J \frac{\Omega_m}{C_{max} - C_{gv}} ; \text{ alors } t_{d\ gv} = 0,5 \text{ s}$$

d) Temps de freinage godet à vide (t_{fgv}).

$$t_{fgv} = J \frac{\Omega_m}{C_{max} + C_{gv}} = \frac{5,35 \cdot 740}{9250,2 + 1344} = 0,37 \text{ s}$$

II-7 . CALCUL DU COUPLE MOYEN - (EFFECTIF) .

Le couple moyen est donné par la moyenne quadratique:

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

où C_i : couple développé pendant la durée t_i .

T : Durée d'excavation.

alors le couple effectif sera donné par la racine carré du second terme de l'équation ci-dessus et donc:

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

tout calcul fait nous trouvons comme valeur numérique

$$C_{eff} = 4808 \text{ Nm}$$

Nous constatons que le couple effectif est presque égale au couple nominal et que le rapport $\frac{C_n}{C_{eff}} = 1,07$ est suffisamment admissible nous concluons donc que la puissance choisie pour notre système est conforme aux critères demandés (exigés).

II-8. Caractéristique mécanique de notre moteur.

- Pour construire ces caractéristiques, il suffit de prendre 2 points de fonctionnement de la machine. Ces points seront donc :

(N_0 , C_0) couple et vitesse à vide.

(N_n , C_n) couple et vitesse nominale.

A N_0 correspond un couple C_0 nul, vu que le courant d'induit est nul lui aussi. D'après les équations du moteur nous obtenons :

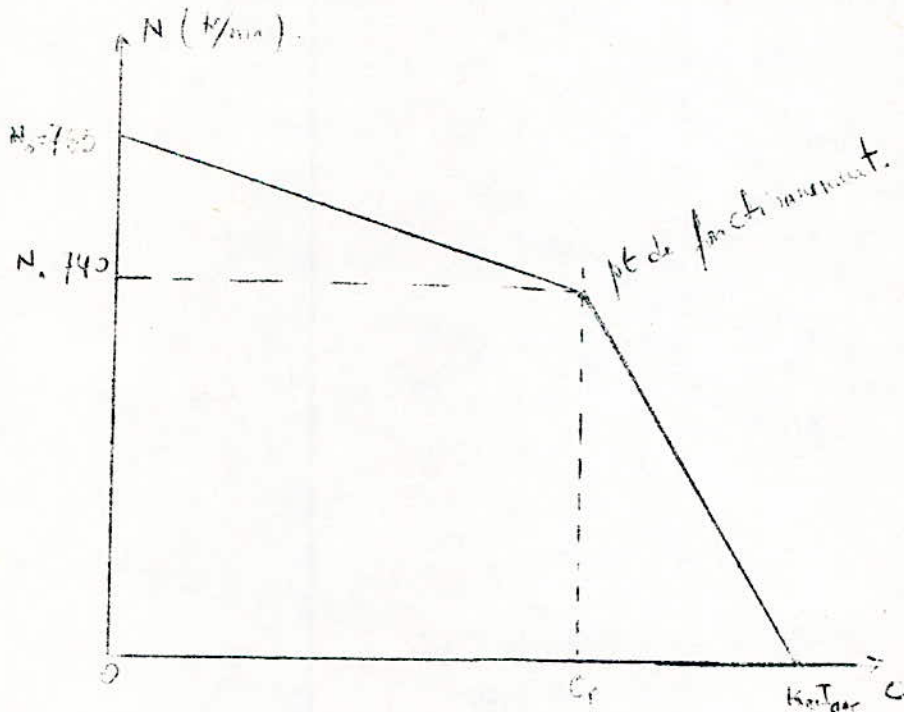
$E_{gn} = C_m \cdot \Omega_n + R I_n$ et $\Omega_n = \frac{E_{gn}}{C_m}$; La machine est non saturée. Nous obtenons ainsi comme valeurs numériques pour la vitesse à vide: $N_0 = 760,5$ trs/mn.

-Plage de variation de la vitesse/

$$\Delta = \frac{\Omega_{max}}{\Omega_{min}} ; \text{ avec } \Omega_{min} = \frac{R I_n}{C_m}$$

Ainsi $\Delta = 21$.

Plage qui est conforme aux exigences du choix du système de commande.



caractéristique mécanique.
(rigide)

II-9. Plagues signalitiques des machines.

a) GENERATRICE.

Type	MI 12_32/5
Pn	KW 450
Un	V 660
Ina	A 682
Nn	tr/mn 1000
Ifn	A 25
2p	6

Résistances des enroulements.

Induit	(Ω) 0,011
Excitation	- " - 4,4
Pôles auxiliaires	- " - 0,00142
Compensation	- " - 0,0062
Anti-compound	0,205

Nombre de spires

Excitation	300
Pôle auxiliaires	5
Anti-compound	18

Nombre de conducteurs.

Induit	I390
Compensation (série avec l'induit)	I4
Surcharge du courant d'induit	A 2 In t=3s.

b) MOTEUR.

Type	II 12 82a
Pn	KW 190
Un	V 270
Ina	A 760
Facteur de marche	% 75
Nn	TR/mn 740
2p	

Résistances des enroulements.

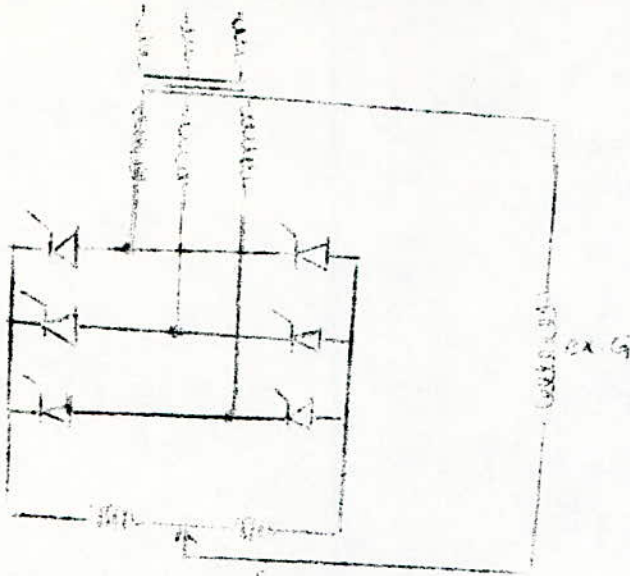
Induit	(Ω) 0,0036
Excitation séparée	- " - 3,5
Pôles auxiliaires	- " - 0,0032
Nombre de groupe	36

Nombre de spires .

Excitation	380
Pôles auxiliaires	8
Ufn	v IIO

III. ETUDE DU SYSTEME ELECTRONIQUE DE COMMANDE.

Notre système de commande électronique est un système triphasé à simple voie antiparallèle (voir figure ci-dessous).



Soient alors $v_1 = V_m \sin \omega t$; $v_2 = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$; $v_3 = V_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$
 Calculons la tension moyenne U_c pour l'angle de retard θ ; Ceci dans le cas le plus simple :

- La charge est une résistance pure.
- La chute de tension dans le thyristor, et éventuellement dans le transformateur, est négligeable devant l'amplitude de la tension d'alimentation. Posons $x = \omega t$ (entre $\frac{\pi}{6} + \theta$, $\frac{\pi}{6} + \theta + 2\pi/3$)

$$U_c = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\frac{\pi}{6} + \theta}^{\frac{\pi}{6} + \theta + 2\pi/3} V_m \sin x \, dx = \frac{3V_m}{2\pi} \left[-\cos x \right]_{\frac{\pi}{6} + \theta}^{\frac{\pi}{6} + \theta + 2\pi/3}$$

remarquons que :

$$\cos\left(\frac{\pi}{6} + \theta\right) = -\cos\left(\frac{\pi}{6} + \theta - \pi\right) = -\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right).$$

Alors :
$$U_c = \frac{3V_m}{2\pi} \left[\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right] = \frac{3V_m}{2\pi} \cdot 2 \cdot \cos\frac{\pi}{6} \cos\theta$$

d'où :
$$U_c = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot V_m \cdot \cos\theta.$$

Pour $\theta = 0$ $U_{c0} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot V_m.$ (Voir fig III-1).

Développons maintenant la tension redressée pour l'angle de retard en série de Fourier. (voir fig III-2)

$$U_c = V_m \cos(\gamma + \theta), \text{ avec comme période } \frac{2\pi}{3}, \text{ soit } x = \gamma + \theta$$

$\Rightarrow u_c = U_c + A_1 \sin p\gamma + B_1 \sin p\gamma + \dots + \dots ; \text{ avec } p = 3.$

Calcul des coefficients A_k et B_k de la série de Fourier.

On utilise l'expression classique d'Euler nous donne :

Calcul des expressions A_k et B_k (coefficient de la série de Fourier)

L'expressions classique d'Euler nous donne:

$$A_k = 2 \frac{I}{2\pi/3} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} U_c \sin k3y \, dy.$$

d'ou la valeur de A_k :

$$A_k = \frac{V_m}{2} \cdot \frac{3}{\pi} \left[\frac{I}{3k+1} \cdot \cos(3ky+y+\theta) + \frac{I}{3k-1} \cdot \cos(3ky-y-\theta) \right]$$

nous développons l'expression entre crochet pour obtenir le coefficient A_k .

$$A_k = (-1)^k \cdot U_{c0} \cdot \frac{2n}{n^2 - 1} \cdot \sin \theta$$

De meme pour le coefficient B_k ; applicant l'expression d'Euler, nous obtenons:

$$B_k = -(-1)^k \cdot U_{c0} \cdot \frac{2}{n^2 - 1} \cdot \cos \theta$$

L'amplitude de $U_{k\theta}$ est égale:

$$U_{k\theta} = \sqrt{\frac{2}{n^2 - 1} \frac{2}{n^2 - 1}} = U_{c0} \frac{2}{n^2 - 1} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}$$

Si on divise les deux membres de l'équation par U_{c0} nous obtenons:

$$\frac{U_{k\theta}}{U_{c0}} = \frac{2}{n^2 - 1} \cos \theta \sqrt{1 + n^2 \operatorname{tg}^2 \theta}$$

Pour le cas du triphasé nous avons $n = 3k$

$$\frac{U_{k\theta}}{U_{c0}} = \frac{2}{9k^2 - 1} \cos \theta \sqrt{1 + 9k^2 \operatorname{tg}^2 \theta}$$

Le terme de rang k est une sinusoïde de fréquence égale à k fois la fréquence de U_c . ($F_0 = 50 \text{ Hz}$).

Alors

$$F_k = 3k F_0 \text{ pour } k=1 \quad F=3F_0 = 150 \text{ Hz.}$$

$$F_k = k; 150 \text{ Hz.}$$

En donnant des valeurs à k nous obtenons le tableau suivant:

k	1	3	5
1	0,25	0,025	0,00893
0	0,75	0,225	0,133
0,9	0,396	0,100	0,0589
0,8	0,493	0,136	0,0660
0,6	0,618	0,180	0,1076
F_k	150	450	750

Les amplitudes relatives aux harmoniques 1,3,5 en fonction de \cos sont données fig III-3.

III-2 Harmoniques irrégulières.

Les calculs précédents supposent que les amplitudes des tensions du secondaire sont de même amplitude (régime équilibré). Il n'est pas souvent le cas, en particulier si notre système est, avec le transformateur, déséquilibré. Alors nous obtenons des composantes U_i, U_d, U_o : Tensions directe, inverse et homopolaire. Nous démontrons que dans ce cas la valeur moyenne et les harmoniques précédents (réguliers) de la tension continue sont obtenues à l'aide des formules précédentes mais appliquées à la composante directe. En outre la composante inverse fournit des harmoniques supplémentaires de rang $n = k \pm 2$ le rapport

($\frac{U_{k\theta}}{U_{co}}$) pour ces harmoniques irréguliers, a les valeurs suivantes:

$$\text{Pour } n=3k+2 \quad k \geq 0 \quad \frac{U_{k\theta}}{U_{co}} = \frac{I}{n-1} \cdot \frac{U_i}{U_d}$$

$$\text{pour } n=3k-2 \quad k \geq 1 \quad \frac{U_{k\theta}}{U_{co}} = \frac{I}{n+1} \cdot \frac{U_i}{U_d}$$

le plus important est l'harmonique d'ordre 2 ; nous avons alors:

$$\frac{U_2}{U_{co}} = \frac{U_i}{U_d}$$

III-3 COURANT CONTINU AVEC COMMUTATION INSTANTANEE.

a) Composante moyenne du courant continu.

son expression est donnée par:

$$I_c = \frac{U_c - E}{R}$$

I_c doit être positif dans tous les cas : nous devons distinguer 2 cas:

$U_c > E$ cas du redresseur .

$|U_c| < |E|$ d'un onduleur .

E : fccm du circuit.

III-3 - b) Composante alternative.

soit alors U_{ca} : composante alternative de la tension continue

$$U_{ca} = U_c \frac{|U_c|}{U_c} = u_c - U_{c0} \cos \theta$$

dans l'intervalle $\theta - \frac{\pi}{3}$ à $\theta + \frac{\pi}{3}$; nous obtenons en prenant la notation habituelle:

$$u_c = V_m \cos x = U_{c0} \frac{\sqrt{3}}{3 \sin \frac{\pi}{3}} \cos x$$

$$\text{alors } U_{ca} = U_{c0} \left(\frac{\frac{\pi}{3 \sin \frac{\pi}{3}} \cos x - \cos \theta \right) = U_{c0} \left(\frac{\frac{\pi}{3\sqrt{3}} \cos x - \cos \theta \right)$$

L'équation différentielle de la composante alternative i_{ca} du courant continu est donc, dans l'intervalle $(\theta - \frac{\pi}{3} ; \theta + \frac{\pi}{3})$:

nous prendrons la résistance de la charge négligeable devant l'inductance de cette même charge.

$$\text{Alors } U_{ca} \hat{=} \omega L_d \frac{di_{ca}}{dx} = U_{c0} \left(\frac{\frac{\pi}{3\sqrt{3}} \cdot \cos x - \cos \theta \right)$$

$$\text{d'où } i_{ca} = \frac{U_{c0}}{\omega L_d} \left(\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \cdot \sin x - x \cos \theta \right) + A$$

+

La constante A est déterminée en exprimant que la valeur moyenne de i_{ca} est nulle sur l'intervalle $(\theta - \frac{\pi}{3} ; \theta + \frac{\pi}{3})$ ou sur la période $\frac{2\pi}{3}$

$$\bar{i}_{ca} = \frac{3}{2\pi} \int_{\theta - \pi/3}^{\theta + \pi/3} i_{ca} \cdot dx = 0$$

d'où

$$A = \frac{U_{c0}}{\omega L_d} \cdot (\theta \cos \theta - \sin \theta).$$

la forme finale de la composante alternative est donc:

$$i_{ca} = \frac{U_{c0}}{\omega L_d} \cdot \left(\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \sin x + (\theta - x) \cos \theta - \sin \theta \right)$$

Cherchons maintenant les extrémités de i_{ca} (i_{caM} ; i_{caM}).

Le maximum et le minimum sont obtenus en annulant la dérivée de i_{ca} ou bien en annulant U_{ca} . La courbe $u_{ca} = f(x)$ présente deux possibilités

1°) θ est nul, ou faible, u_{ca} s'annule en 2pts. Le premier correspond au minimum négatif i_{caM} , le second au maximum positif i_{caM} .

2°) lorsque θ est différent de zéro et suffisamment grand, $u_{ca} = 0$

uniquement pour un point correspondant à ~~des points anguleux~~
 au maximum. Les minimas des courants se produisent à des points anguleux
 Ceux ci proviennent des discontinuités de tensions qui donnent une
 variation brusque de $\frac{d i_{ca}}{d x}$. (voir fig III-4)

Lz cas limite se fait pour:

$\theta = \theta_0$ alors U_{ca} s'annule pour $x = \theta_0 - \frac{\pi}{3}$, nous arrivons
 ainsi au résultat suivant:

$$\text{tg } \theta_0 = \frac{3}{\sqrt{3}} - \frac{I}{\text{tg } \frac{\pi}{3}} = \frac{3}{\pi} - \frac{I}{3} \Rightarrow \theta_0 = 20^\circ 30'$$

donc si $\theta < \theta_0 \Rightarrow$ c'est le cas de la figure a.

si $\theta > \theta_0 \Rightarrow$ b.

b) I_V leur maximale.

Dans tous les cas l'abscisse X_M du maximum est tel que $X_M \in (0, \frac{\pi}{2})$
 est donnée par :

$$\cos X_M = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \cos \theta$$

$$i_{caM} = \frac{U_{co}}{\omega Ld} \cdot \left(\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \sin X_M + (\theta - X_M) \cos \theta - \sin \theta \right).$$

b)ii : l'abscisse X_m du minimum est donnée par:

pour : $\theta < \theta_0$

$$\Rightarrow X_m = -X_M$$

$\theta > \theta_0$

$$\Rightarrow X_m = \theta - \frac{\pi}{3}$$

i)
$$i_{caM} = - \frac{U_{co}}{Ld} \left(\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \sin X_M - (\theta + X_M) \cos \theta + \sin \theta \right).$$

d'où ii)

$$i_{caM} = \frac{U_{co}}{\omega Ld} \left(\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \sin X_M - \frac{\pi}{3} \cos \theta - \sin \theta \right).$$

i_{caM} sera donc égale à :

$$i_{caM} = - \frac{U_{co}}{\omega Ld} \sin \left(\theta - \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \right).$$

Le cournat instantané continu est la somme des composantes alternatives
 et continue. La variation de I_c (action sur U_c ou Sur R) entraîne une
 translation par rapport à l'axe des ordonnées. Ceci suppose que i_{ca}

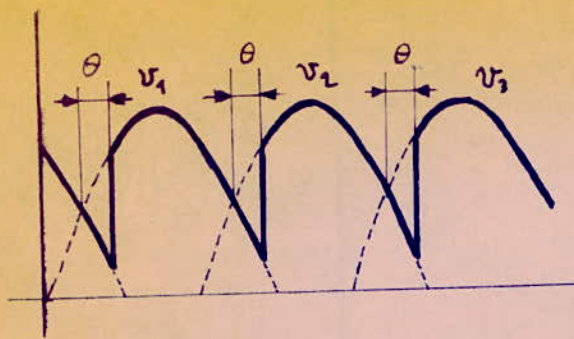


Fig III.1

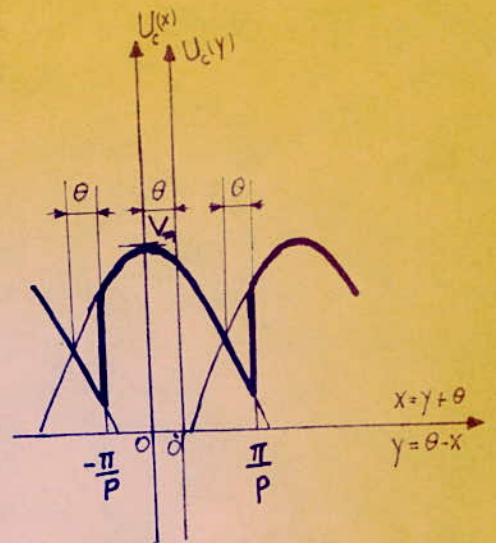


Fig III.2

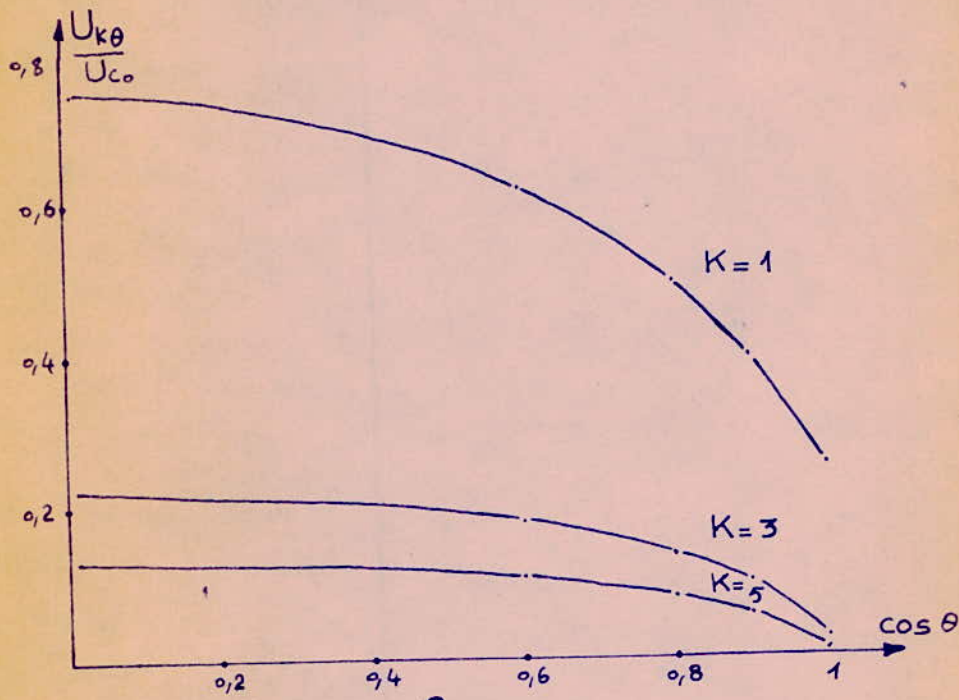
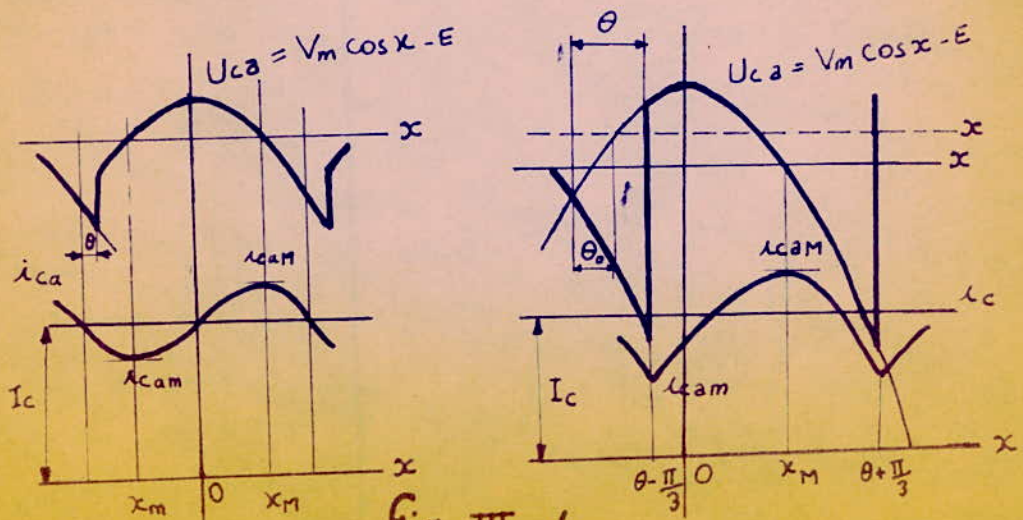


Fig III.3



(a) $\theta < \theta_0$

Fig III.4

(b) $\theta > \theta_0$

la inductance L_d est constante (sans fer).

Le régime de fonctionnement est défini par la valeur I_c :

si $I_c > I_{ck}$; avec $I_{ck} = - i_{cam}$ (valeur critique du courant) alors le régime est dit, avec commutation.

$I_c < I_{ck}$, régime sans commutation.

III-4 Coefficient d'ondulation.

On appelle coefficient d'ondulation négative du courant continu le rapport $-\frac{i_{cam}}{I_c}$.

Ce rapport étant toujours supérieur à l'unité quand on a une commutation, sinon égale à 1 et dans ce dernier cas le régime est sans commutation.

Pour :

$$a) \quad \theta < \theta_0 \quad \text{alors} \quad -\frac{i_{cam}}{I_c} = \frac{U_{co}}{\omega \cdot L_d \cdot I_c} (\operatorname{tg} X_M - X_M)$$

$$\text{avec } \cos X_M = \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} .$$

$$b) \quad \theta > \theta_0 \quad \text{alors} \quad -\frac{i_{cam}}{I_c} = \frac{U_{co}}{\omega \cdot L_d \cdot I_c} \left(I - \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \right) \sin \theta .$$

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

$$L_d = \frac{U_{co}}{\omega \cdot I_c \left(-\frac{i_{cam}}{I_c} \right)} \left(I - \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \right) \sin \theta .$$

Pour notre exemple c'est une commutation avec un angle de retard $\theta > \theta_0$.

III-5. Tensions et courants dans les thyristors.

I) Valeur moyenne du courant.

La valeur moyenne se calcule à partir du courant moyen redressé:

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

ii) Valeur efficace.

$$\text{Pour notre cas: } i_{\text{eff}} = \frac{i_{\text{ceff}}}{\sqrt{3}} .$$

$$\text{d'où} \quad 2\pi i_{\text{ef}}^2 = \int_0^{\frac{2\pi}{3}} (i_c)^2 dx = \frac{2\pi}{3} i_{\text{cef}}^2 \Rightarrow i_{\text{ef}} = \frac{i_{\text{cef}}}{\sqrt{3}} .$$

la valeur efficace pour la pleine charge a une ondulation réduite de $\pm 20\%$; pratiquement (pour notre cas) nous avons pris:

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

La valeur de crête :

$$\hat{i} = i_c$$

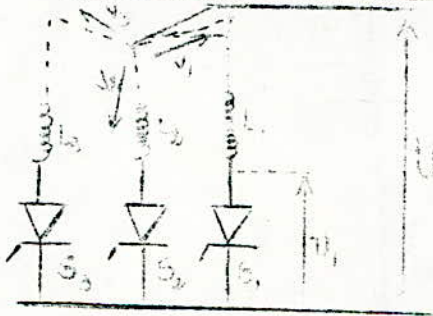
La soupape doit supporter une valeur crête limite lors d'un court-circuit continu.

$\hat{i} = I_{cc}$; pendant la durée de déclenchement des dispositifs de sécurité.

-Ld influence peu la valeur crête.

- Les formules relatives aux courants moyens, ainsi qu'aux courants de crête en régime permanent restent valables pour une commutation non instantannée (notre cas). Celles relatives aux courants efficaces restent suffisamment approchées tant que l'angle de commutation binomiale conserve les valeurs relatives aux charges normales .

3) Tensions aux bornes des thyristors.



Le thyristor S_1 débite seul ou en commutation avec un autre, la tension u_1 entre cathode et anode est égale à sa chute de tension interne

η et on obtient:

$$u_1 - \eta = 0$$

Lorsque le thyristor S_1 est bloqué sa tension anodique est v_1 et sa tension cathodique est donnée par le ou les thyristors en débit.

a) Si le thyristor S_2 est amorcé, le potentiel cathodique du thyristor S_1 est $v_2 - \eta$, d'où la tension aux borne de S_1 :

$$u_1 = v_1 - (v_2 - \eta).$$

ou
$$u_1 - \eta = v_1 - v_2.$$

Si le thyristor S débite en même temps que le thyristor S alors son potentiel de cathode sera:

$$\frac{v_2 + v_1}{2} - \eta.$$

C'est également le potentiel de S_1 , d'où tension aux bornes de S_1 :

$$u_1 = v_1 - \frac{v_2 + v_3}{2} + \eta$$

ou

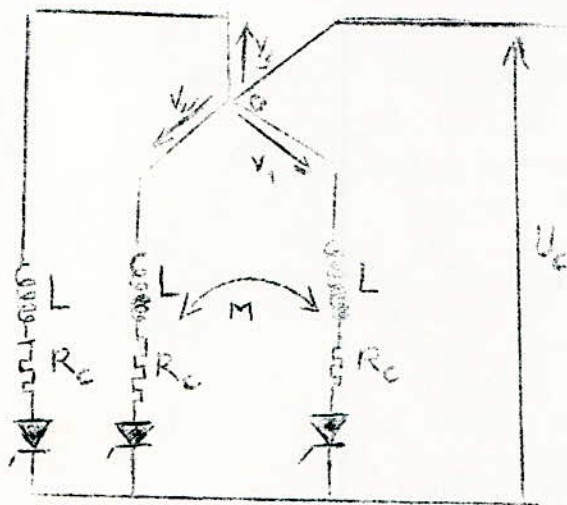
$$u_1 - \eta = v_1 = \frac{v_2 + v_3}{2} = \frac{2v_1 - (v_2 + v_3)}{2}$$

Alors

$$u_1 - \eta = \frac{(v_1 - v_2) + (v_1 - v_3)}{2}$$

Les valeurs crêtes des tensions sont données fig III- (5 et 6).

III-6. Etude de la commutation.



Pour la commutation instantannée, nous n'avons pas tenu compte des différentes inductances et résistances du système redresseur-ondu. Ces inductances et résistances donnent une commutation avec $\alpha = \omega t$. Soient L, R_c inductance et résistance somme de toutes les parties du circuit. Soient alors les équations de la commutation I-2:

$$v_1 = L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + \eta + U_c + R_c i_1$$

$$v_2 = M \frac{di_1}{dt} + L \frac{di_2}{dt} + \eta + U_c + R_c i_2$$

Le courant pendant la commutation reste constant:

$$i = i_1 + i_2$$

a) Tension continue pendant la commutation.

Nous ajoutons membre à membre les équations vues précédemment /

$$v_1 + v_2 = (L + M) \frac{di_1}{dt} + (L + M) \frac{di_2}{dt} + 2\eta + 2U_c + R_c(i_1 + i_2).$$

D'où
$$u_c = \frac{v_1 + v_2}{2} - \left(\frac{L + M}{2} \right) \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) - \eta = R_c \frac{i_1 + i_2}{2}.$$

Comme $i_1 + i_2$ est une constante, sa dérivée est nulle alors u_c sera:

$$u_c = \frac{v_1 + v_2}{2} - \eta = R_c \frac{i_1 + i_2}{2}$$

d'où

$$u_c + \eta = \frac{v_1 + v_2}{2} - \frac{R_c I_c}{2}.$$

Pour l'allure de la courbe: voir III- (5 & 6).

b) Détermination du temps de commutation.

En négligeant la résistance R_c , le début de la commutation est pris comme nouvelle origine :

Soit alors
$$v_2 - v_1 = V_m \sin(\omega t + \theta) = U \sin(x + \theta).$$

$$U \int_0^{\alpha} \sin(\omega t + \theta) dt = 2(L - M) I_c.$$

$$-\frac{U}{\omega} \left[\cos(\omega t + \theta) \right]_0^{\alpha} = \frac{U}{\omega} (\cos \theta - \cos(\omega t + \theta)).$$

$$\frac{U}{\omega} (\cos \theta - \cos(\omega t + \theta)) = 2(L - M) I_c.$$

Posons alors $\alpha = \omega t$; angle de commutation nous aurons donc:

$$\cos \theta - \cos(\alpha + \theta) = \frac{2\omega(L - M)I_c}{\sqrt{3} V_{in}} = \frac{3 X_c I_c}{\bar{A} V_c}$$

Cette formule nous permet le calcul de la durée de la commutation, car θ est donné puisqu'on est maître de l'instant d'amorçage, α est donné immédiatement par l'équation.

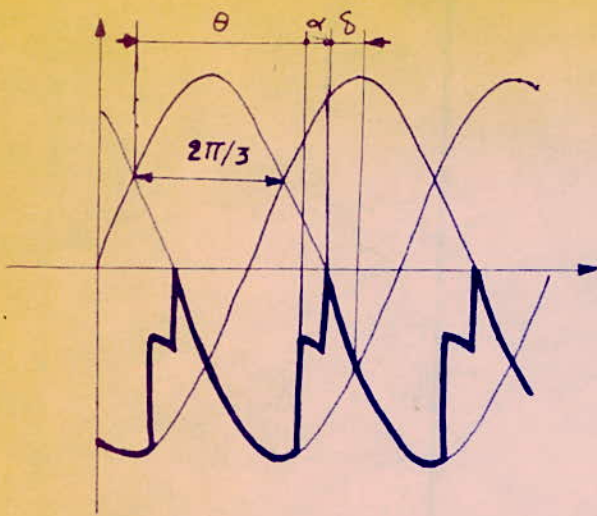


Fig IV.7

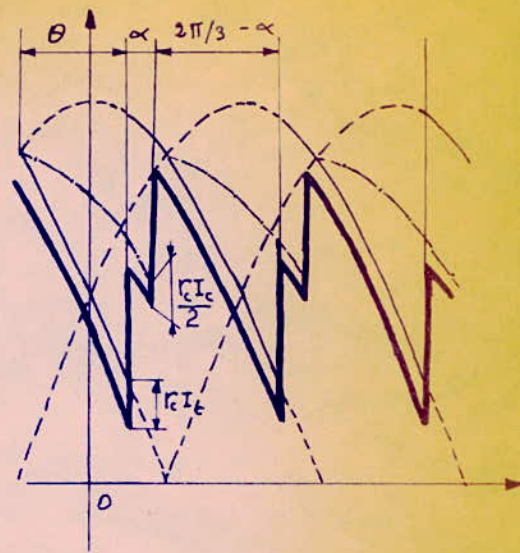


Fig IV.8

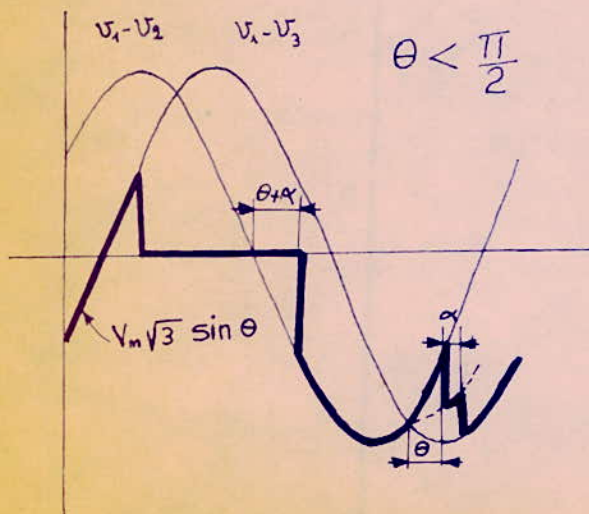


Fig IV.5

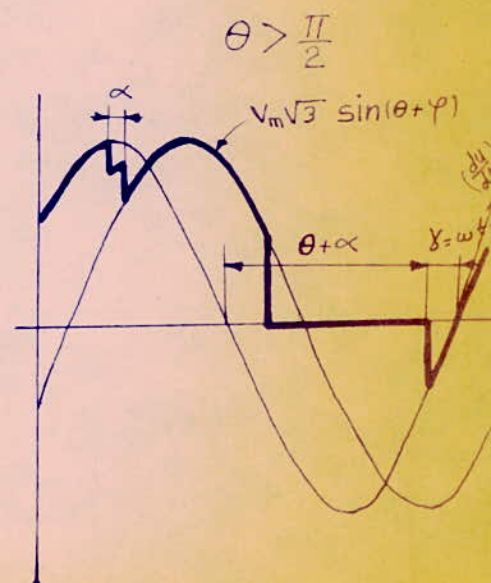


Fig IV.6

c) Condition de stabilité des onduleurs non autonomes.

Soit $\lambda = \omega t_r$ où t_r est le temps de repos de la soupape.

pour avoir la stabilité nous devons avoir $\theta + \alpha < \pi - \lambda$

Alors $\cos(\theta + \alpha) > -\cos \lambda$

d'autre part nous avons:

$$\cos \theta - \cos(\theta + \alpha) = \frac{\omega L I_c}{V \sin \frac{\pi}{3}} = \frac{2 U_x}{U_{co}}$$

$$\Rightarrow \cos \theta + \cos \lambda > \frac{2 U_x}{U_{co}}$$

En fonctionnement onduleur (voir fig III-7).

III-7. Chutes de tensions.

Dans le système convertisseur on a trois formes de chutes de tensions :

a) Chutes de tension internes des soupapes.

Ces chutes sont données par le constructeur U_t (I à 1,5 V).

b) Chutes de tension résistives:

Dûes aux différentes pertes par effet Joule dans le système (Transformateur - / redresseur - onduleur /) mais que nous avons ramené du côté continu, elles se calculent comme suite:

$$V_r = R_c I_c .$$

c) Chutes inductives.

Elles sont données par l'équation suivante/

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

La caractéristique du montage en tenant compte des chutes de tension est donnée fig III-8.

IV TRANSFORMATEUR DE COUPLAGE.

IV-I: Le secondaire .

Le secondaire est en étoile, ce qui permet d'avoir un même courant pour les enroulements et les soupapes.

d'où $I_c = I_{cmax}$.

IV-2 Le primaire dans la commutation instantannée.

Dans le cas où les pertes sont négligeables dans le transformateur et les bobines médiatrices, la puissance instantannée, absorbée ou fournie par le transformateur, est identique à celle fournie ou absorbée par le continu.

$$P = I_c V_{\text{eff}}.$$

Soient alors i_1, i_2, i_3 ; $V_m \sin(x - \frac{2\pi}{3})$; $V_m \sin(x - \frac{4\pi}{3})$; $V_m \sin x$; Les tensions et courants instantanés de phase. Le déphasage ou angle de couplage entre tension d'une phase du réseau et celle de la phase résultante en débit, dépend du transformateur.

Le courant i_c est débité par la tension secondaire $V_m \sin(x - \delta)$ dans l'intervalle de phase s'étend de :

$$x - \delta = \theta - \frac{\pi}{3} \quad \text{à} \quad x - \delta = \theta + \frac{\pi}{3}$$

$$\text{d'où} \quad x = \theta - \frac{\pi}{3} + \delta, \quad x = \theta + \frac{\pi}{3} + \delta$$

δ ici est le déphasage entre la tension de la phase résultante en débit et celle de la phase I du réseau.

Egalons maintenant les puissances :

$$V_m i_1 \sin x + V_m i_2 \sin(x - \frac{2\pi}{3}) + V_m i_3 \sin(x - \frac{4\pi}{3}) = V_m i_c \sin(x - \delta).$$

Cette relation est satisfaite quelque soit la variable x . Nous pouvons donc égaliser les coefficients en sinus et en cosinus.

Nous obtenons donc :

$$i_1 + i_2 \sin \frac{2\pi}{3} + i_3 \sin \frac{4\pi}{3} = \frac{V_m}{V_m} i_c \sin \delta$$

$$i_2 \cos \frac{2\pi}{3} + i_3 \cos \frac{4\pi}{3} = -\frac{V_m}{V_m} i_c \cos \delta$$

D'autre part nous avons :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (\text{étoile équilibré}).$$

Nous parvenons ainsi au résultat suivant :

$$\Rightarrow \begin{aligned} i_1 &= \frac{2}{3} \frac{V}{V_m} i_c \sin \delta, \quad i_2 = \frac{2}{3} \frac{V}{V_m} i_c \sin(\delta - \frac{2\pi}{3}) \\ i_3 &= \frac{2}{3} \frac{V}{V_m} i_c \sin(\delta - \frac{4\pi}{3}). \end{aligned} \quad \text{Pour } \theta - \frac{\pi}{3} + \delta < x < \theta + \frac{\pi}{3} + \delta$$

Le courant i_1' est obtenu en multipliant le courant i_c par $\frac{2 V_m}{3 V'_m}$ et par une fonction qui prend pendant la période $\frac{2\pi}{3}$, les valeurs suivantes : $\sin \delta$; $\sin(\delta + \frac{\pi}{3})$; $\sin(\delta + \frac{2\pi}{3})$; ; $\sin(\delta + \frac{5\pi}{3})$. Si la commutation n'est pas instantanée, nous avons une variation légère des courants primaires et secondaires, les discontinuités sont alors remplacées par des variations graduelles.

Pendant la commutation 3-2 nous avons :

$$i_c = i_2 + i_3 \quad \text{dans l'intervalle } \theta - \frac{2\pi}{6} + \delta + \alpha < x < \theta + \frac{2\pi}{6} + \delta + \alpha$$

par un calcul analogue au précédent nous avons obtenu :

$$i_1' = \frac{2}{3} \frac{V_m}{V'_m} i_c \left\{ \sin(\delta - \frac{\pi}{3}) + \left[\sin \delta - \sin(\delta - \frac{\pi}{3}) \right] \frac{i_3}{i_c} \right\}$$

Posons alors $F = \sin(\delta - \frac{\pi}{3}) + \Delta F \frac{i_3}{i_c}$; $\Delta F = \sin \delta - \sin(\delta - \frac{\pi}{3})$. voir fig IV-I.

Pour le graphe des courants alternatifs avec commutation instantanée et retardée voir fig IV-II.

IV-3—Puissance réelle et réactive, $\cos \delta_1$, et facteur de puissance.

- Au secondaire $V_m = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} U_{co}$

- Si la tension en ligne est sinusoïdale, c'est généralement le cas, seul le terme fondamentale du courant intervient dans le calcul des puissances.

$P = 3 \cdot \frac{V'_m}{\sqrt{2}} \frac{I_1'}{\sqrt{2}} \cos \delta_1$, avec δ_1 déphasage entre le terme fondamentale et la tension simple du primaire.

$$i_1' = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_m}{V'_m} \cdot I_c$$

Nous avons alors $\text{tg} \delta_1 = I/2 \frac{2\alpha + \sin 2\theta + (-\sin 2(\theta + \alpha))}{\cos^2 \theta - \cos^2(\theta + \alpha)}$.

Dans le cas de la commutation naturelle $\theta = 0$ et pour α très petit

δ_1 tend vers la limite $\delta_1 = \frac{2}{3} \alpha$

Dans le cas d'une commutation retardée nous aurons :

$$\delta_1 = \theta + \frac{\alpha}{2} \quad (\text{voir graphe IV-III}).$$

Au déphasage δ_1 , il faut ajouter un déphasage dû à l'ondulation du courant continu. En général il est négligeable, mais son rôle est important.

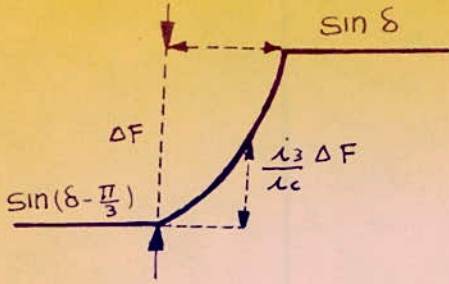


Fig IV.1

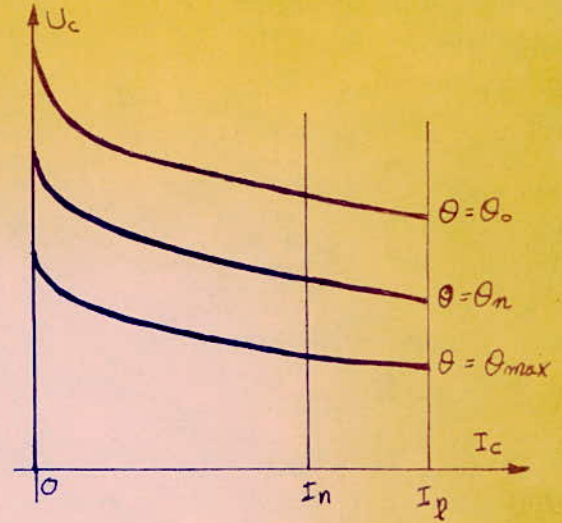
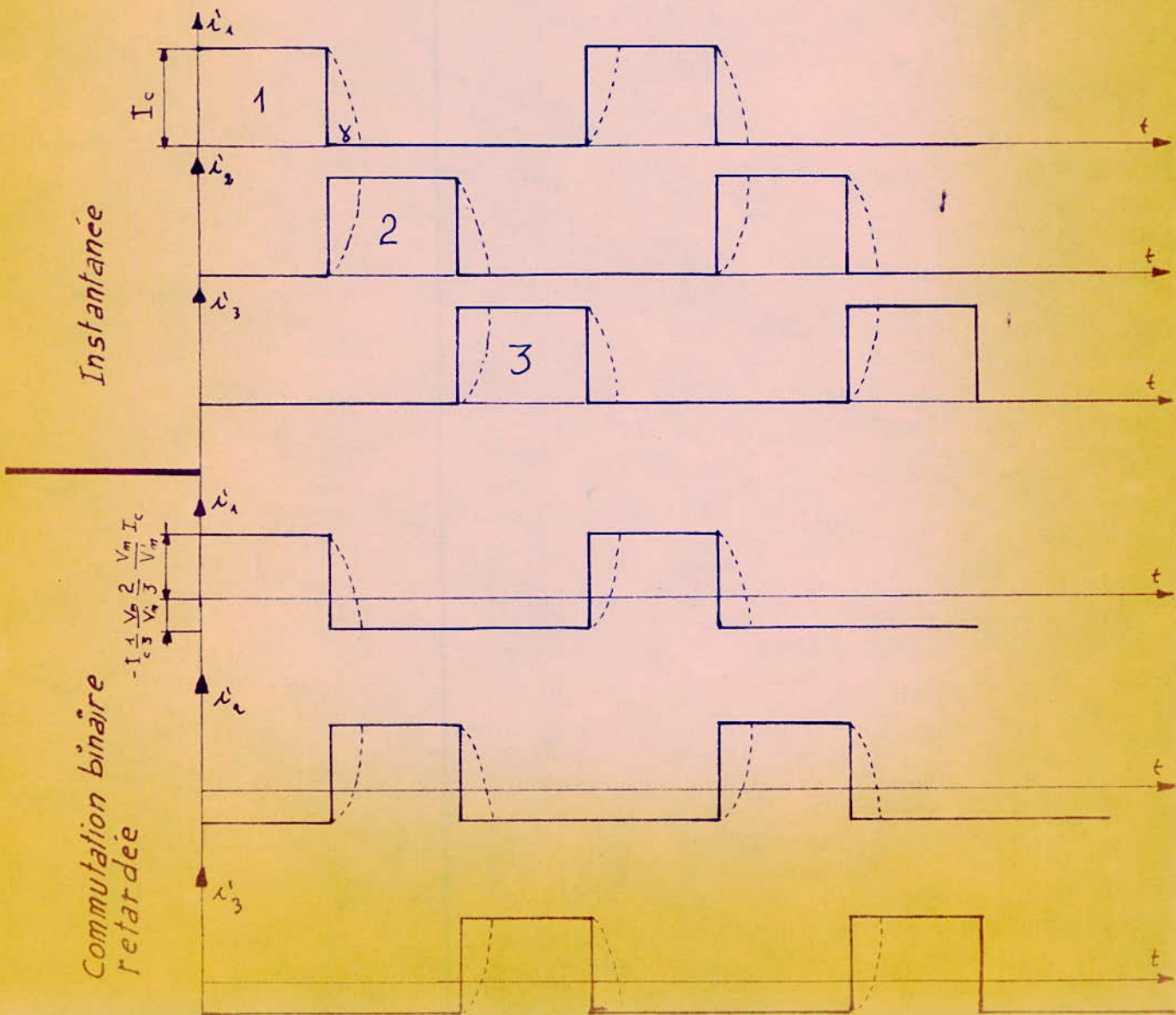


Fig IV.3

Fig IV.2

Graphes des courants alternatifs avec commutation
Instantanée ET retardée



ξ_1 est compris entre $0 < \xi_1 < \pi$, en fonctionnement onduleur ou redresseur, il est toujours positif ($\sin \xi_1 > 0$) alors le système le convertisseur consomme de l'énergie réactive du réseau.

- La puissance apparente détermine le dimensionnement du transformateur:

$$S = \frac{3 V_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \cdot I'_{\text{ef}} = \frac{P}{f_t}$$

$$\text{d'où } I'_{\text{ef}} = 2/3 \cdot V_m/V'_m ; I_c/\sqrt{2} \qquad f_t = \frac{P \sqrt{2}}{3 V'_m I'_{\text{ef}}} = \frac{I'_m \cdot \cos \xi_1}{\sqrt{2} I'_{\text{ef}}}$$

Le facteur de puissance $f_t = \frac{\text{Puissance active}}{\text{Puissance apparente}}$.

$$\text{Soit alors } f = \frac{I'_m}{\sqrt{2} I'_{\text{ef}}} \quad (\text{facteur de forme du courant primaire.})$$

La valeur efficace de la fondamentale du courant primaire :

$$i'_1 = (2/3) \cdot (3/\sqrt{2}) \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cdot (V_m/V'_m) \cdot I_c.$$

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

le facteur de puissance est donné donc en fonction du facteur de forme et on obtient comme expression:

$$f_t = f \cos \xi_1.$$

$$\text{avec } f = \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} ; \quad \cos \xi_1 = \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right)$$

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

Les puissances actives et réactives peuvent être exprimées en fonction de la puissance du continu.

$$P = U_c I_c \cos \xi_1$$

$$Q = U_c I_c \sin \xi_1$$

la puissance apparente est obtenue des équations ci-dessus :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Nous obtenons:

$$\frac{S^2}{(U_c I_c)^2} = \frac{P^2}{(U_c I_c)^2} + \frac{Q^2}{(U_c I_c)^2} = 1$$

Dans un système d'axes $(P/(U_c I_c), Q/(U_c I_c))$

$\frac{s^2}{(U_{co}I_c)^2}$ est un demi-cercle de rayon égal à l'unité. (R=I).

V. CHOIX DES THYRISTORS. ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR.

a) Courants de branche.

i) Valeur moyenne.

$$I = \frac{I_c}{3} \quad ; \quad I = \frac{25}{3} = 8,3 \text{ A.}$$

ii) Valeur efficace.

$$I_{ef} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad ; \quad I = \frac{25}{\sqrt{3}} = 14,5 \text{ A.}$$

b) Chutes de tension.

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

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

d'où en valeur numérique :

$$U_{co} = \frac{U_c}{0,8} \Rightarrow U_{co} = 110/0,8 = 137,5 \text{ V.}$$

-tension simple du secondaire :

$$V_m = \frac{U_{co}}{0,827} \quad V_m = 166 \text{ V.}$$

-Tension inverse :

$$\bar{U} = V_m \sqrt{3} \quad \bar{U} = 287 \text{ V.}$$

Les thyristors choisis devront supporter la tension inverse 287 V et doivent être surdimensionnés afin de supporter les surcharges. Nous avons pris comme thyristors les thyristors du type T₆ 6 25 - IV selon les normes soviétiques.

c) Calcul des inductances.

i) Inductances de limitation de courant.

$$L_y = \frac{V_m \cdot K_y}{\omega \cdot I_y} \quad ; \quad \text{avec } K_y : \text{coefficient dépendant du système ; } K_y = 0,65.$$

$$I_y = 0,1 I_c = 2,35 \text{ A.}$$

d'où $L_y = 0,14 \text{ H.}$ et $L'y = L_y/2 = 0,0687 \text{ H.}$

ii) Inductance d'excitation de la génératrice.

$$K = N \frac{\Phi_u}{I} = \frac{E}{\omega} \Rightarrow \Phi_u = K \frac{2\pi}{N} = 0,0300.$$

Φ_u étant le flux utile, comme l'inductance se calcule à partir du flux total, on doit tenir compte du coefficient d'Hopkinson ($KH=1,32$)
 d'où le flux total $\Phi_t = 1,2\Phi_u$; $\Phi_t = 3,6; 10^{62}$ H;

$$L_{ex} = 2p W_{ex} \frac{\Phi_t}{I_c} \quad \text{avec } W_{ex}=300 \text{ nbre de spires.}$$

$$L_{ex}=1,67 \text{ H.}$$

Inductance réelle de lissage $L_{dr} = L_{ex} + L'y = 1,74 \text{ H.}$

Inductance de calcul de lissage supplémentaire:

$$L_{ds} = \frac{U_{co}}{I_c \left(-\frac{I_{cam}}{I_c} \right)} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \right) \cdot \sin^2 \theta$$

à $\theta = 90^\circ$ $L_{ds} = 0,07 \text{ H.}$

on voit que l'inductance de lissage supplémentaire n'est pas nécessaire vu que le rapport $L_{ds}/L_{dr} = 4 \%$.

d) Chutes de tension.

i) Dans les thyristors.

$$U_t = 1,5 \text{ V} \cdot R'y = 0,1 (\Omega)$$

ii) Résistives:

$$U_r = R_c I_c \text{ avec } R_c = R_t + R'y = 0,183 + 0,1 = 0,283 \Omega$$

Comme $U_{acc}=2,5 \%$ V_m alors.

$$R_t = \frac{U_{acc} V_m}{\sqrt{2} I'_x \cdot 100} = \frac{2,5 \cdot 166}{\sqrt{2} \cdot 15,95 \cdot 100} = 0,183 \Omega$$

$$I'_x = 1,1 \text{ Ief} \quad I'_x = 1,1 \cdot 14,5 = 15,95 \text{ A}$$

$$U_r = 0,283 \cdot 25 = 7 \text{ V}$$

iii) Chutes inductives:

$$U_x = \frac{3}{2\pi} X_c I_c \quad ; \quad X_c = \frac{U_{rcc} V_m}{\sqrt{2} I'_x \cdot 100} (\Omega)$$

Comme $U_{rcc}=9,5 \%$ V_m alors:

$$X_c = 0,696 (\Omega)$$

D'où $U_x = 8,3 \text{ V.}$

4) Chute de tension totale:

$$\Delta U = U_r + U_x + U_t = 16,8 \text{ V.}$$

en valeur relative:

$\left\{ \frac{\Delta U}{U_{co}} \right\}^x \cdot 100 = 12\%$; la valeur estimée est de 20%; nous obtenons donc une différence de 8%; cette différence servira à compenser les pertes supplémentaires (connexions, etc ...).

$$\left\{ \frac{\Delta U}{U_{co}} \right\}_{est} - \left\{ \frac{\Delta U}{U_{co}} \right\}_{cal} = (20 - 12)\% = 8\%$$

Les différentes chutes peuvent s'exprimer par:

$$U_{eq} = R_{eq} \cdot I_c = (R_t + R'y + 2/3 \cdot X_c + U_t / I_{cn}) \cdot I_c$$

D'où l'on déduit U_{eq} en fonction du courant I_c et de l'angle d'amorçage .

$$U = U_{co} \cos \delta - R_{eq} I_c ; \quad R_{eq} = 0,675 \cdot (2)$$

$$U = 137,5 \cos \delta - 0,675 \cdot 25.$$

Pour le calcul de R_t et X_t on utilise les chutes relatives du transformateur ramenées au secondaire.

$$\left. \begin{array}{l} U_{acc} = 2,5\% \\ U_{rcc} = 9,5\% \end{array} \right\} \text{ voir calcul précédent. Ceci est valable pour les transformateurs du type (TT) }$$

selon les normes soviétiques?

e) Calcul des angles de retard à l'amorçage et de la commutation:

i) Angle de retard à l'amorçage:

$$\cos \theta_n = \frac{U_c + R_{eq} I_{cn}}{U_{co}} = \frac{110 + 24}{137,5} = 0,922.$$

$$\theta_n = 22^\circ \text{ et } I'$$

ii) Angle de retard maximal:

$$\cos \theta + \cos \delta > \frac{2 U_x}{U_{co}} \Rightarrow \cos \theta > \frac{2 \cdot 110}{137,5} - \cos \delta$$

Si nous prenons $\delta = 15^\circ$ (angle de repos) alors :

$$\cos \theta_{max} = 0,10 - 0,965 = -0,844 \quad \theta_{max} = 148^\circ.$$

iii) Angle de retard minimum:

$$\theta_{min} = 20^\circ 30'.$$

4) Angle de commutation maximale:

$$\theta_{max} + \alpha < \pi - \delta ; \alpha = -148^\circ + 180^\circ - 15^\circ + 17^\circ.$$

$$\alpha_{max} = 17^\circ.$$

f) Choix du transformateur.

a) Courant primaire et secondaire:

i) Valeur de l'harmonique fondamentale du primaire:

$$I_1' = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_m}{\sqrt{m}} \cdot I_c \Rightarrow I_1' = 14,7 \text{ A.}$$

ii) Valeur efficace du secondaire cas de la commutation instantannée :

$$I_2 = I_{ef} = 14,5 \text{ A.}$$

cas de la commutation non instantannée:

$$I_2' = 1,1 I_2 \Rightarrow I_2' = 15,95 \text{ A.}$$

b) Puissance:

i) Déphasage entre tension primaire et secondaire:

$$\delta_1 = \theta_n + \frac{x_{max}}{2} = 30^\circ \quad 3I_1'.$$

ii) Facteur de puissance:

$$f_t = f \cos \delta_1 \quad ; \quad f = 0,827.$$

$$\Rightarrow f_t = 0,712.$$

iii) Puissance active nominale:

$$P_n = \frac{3}{2} \cdot I_1' \cdot V_m \cos \delta_1 \Rightarrow P_n = 2953 \text{ W.}$$

4) Puissance réactive nominale:

$$Q_n = \frac{3}{2} \cdot I_1' \cdot V_m \sin \delta_1 \Rightarrow Q_n = 1741,46 \text{ VAR}$$

5) Puissance apparente nominale:

$$S = P / f_t \Rightarrow S = 4148 \text{ VA.}$$

c) Choix du transformateur:

Le transformateur choisi est du type TT.6 selon les normes soviétiques.

VI, PROTECTION DU SYSTEME CONVERTISSEUR.

VI-I Protection contre les surintensités:

a) Origines externes des défauts.

Les surintensités sont dûes à une augmentation brusque et excessive du courant redressé provenant généralement d'un défaut de l'alimentation du montage redresseur.

Pour le montage onduleur, elles proviennent d'une baisse de la tension d'alimentation des soupapes ou d'une hausse de la tension fournie par la source continue.

b) Origines internes:

Les surtensions résultent d'une avarie d'un ou de plusieurs thyristors. Ces défauts provoquent alors l'arrêt de fonctionnement des soupapes par blocage ou par claquage.

les perturbations de la commande d'amorçage peuvent être à l'origine des susintensités, plus particulièrement dans le cas d'un déblocage intempestif.

c) Protection globale:

La protection contre les surintensités provenant du réseau continu se fait à l'aide des disjoncteurs, disjoncteurs--contacteurs.

La protection contre les surintensités côté alternatif se fait grâce à des disjoncteurs multipôlaire. Dans le cas de la basse tension, il est possible de réaliser une protection à disjoncteurs ultra-rapides dans la partie alternative. Pour l'onduleur non autonome la protection doit être telle que nous aurions un disjoncteur continu et un autre alternatif, mais temporisés l'un par rapport à l'autre.

VI-II Protection contre les surtensions.

Plusieurs phénomènes sont à l'origine des surtensions. Ces phénomènes peuvent être d'origines externes ou internes.

a) Origines internes.

Les tensions répétitives qui sont habituellement des fonctionnaires du circuit. Elles accroissent la puissance dissipée dans le dispositif.

b) Origines externes.

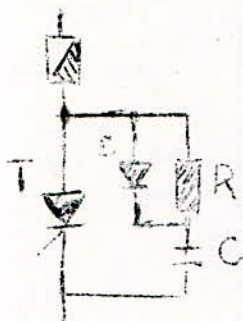
Les tensions transitoires non répétitives dues habituellement au circuit extérieur au dispositif redresseur-onduleur et dont l'effet a complètement disparu avant l'arrivée de la tension du réseau transitoire suivante. Les causes extérieures (foudre , rupture du synchronisme, etc ...) produisent des surtensions de grandes énergies.

Pour ce faire, nous avons divers méthodes à utiliser. Pour notre cas nous prendrons la protection la mieux adaptée à notre système.

a) Surdimensionnement des appareils.

les thyristors utilisés ainsi que les transformateurs sont surdimensionnés.

b) Dispositifs écréteurs.



L'emploi d'une résistance en série avec un condensateur en dérivation avec le thyristor permet l'absorption de l'énergie lors d'une surtension. La résistance R limite le courant de décharge de C lors de l'amorçage du thyristor. Pour notre cas $R=30$

$$C = 0,5$$

$$\tau = RC = 15 \text{ s}$$

La diode D court-circuite R dans le cas d'une tension d'anode positive ce qui permet une meilleure protection par le condensateur.

VI-III Protection individuelle.

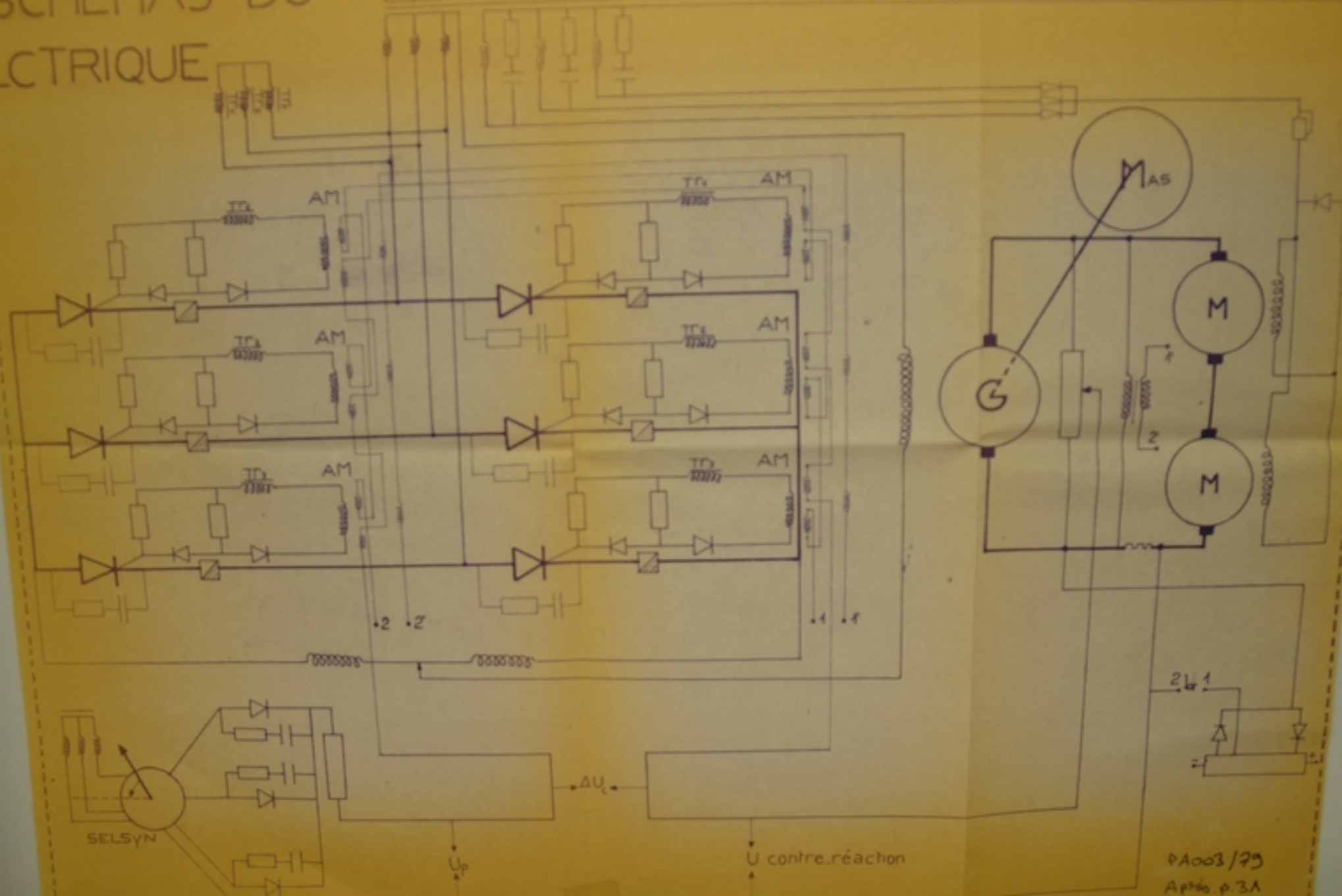
La protection individuelle doit être telle que chaque soupape est protégée contre deux défauts majeurs.

a) Interrompre une surintensité brutale et donc éviter la destruction de la soupape.

b) Isoler la soupape avariée par un court-circuit en utilisant des fusibles ou disjoncteurs unipôlaire à déclenchement ultra-rapide.

SCHEMAS DU ELECTRIQUE

SYSTEME DE LA COMMANDE ELE



PA003/79
Après p. 3A

VII.-COMMANDE ET REGULATION.

VII-I. Fonctionnement du système .

Notre système est constitué de:

- Groupe G-M.
- Transformateur.
- Convertisseur composé de deux blocs triphasé simple voie antiparallèle.

Le bloc convertisseur est composé de 6 thyristors commandés. Notre système variateur électronique de la vitesse est basé sur la variation de l'excitation de la génératrice, par conséquent sur le courant induit des moteurs, qui travaillent. Les phénomènes de fonctionnement caractérisés par des effets perturbateurs nécessitent forcément un réglage par contre-réaction. Ceci est réalisable grâce aux gachettes de commande qui relient courant d'excitation à la valeur de sortie (vitesse).

b) Dans notre cas la régulation est manuelle. Le dispositif de commande est composé d'une synchro-machine (Selsyn) reliée électriquement à des amplificateurs magnétiques; ainsi la tension pilote U_p sera délivrée par la Selsyn (de l'ordre de 10 à 50 V), et amplifiée au niveau des gachettes par les amplificateurs magnétiques.

c) La régulation proprement dite:

Elle comprend deux contre-réactions:

- Contre-réaction tension
- Contre-réaction courant.

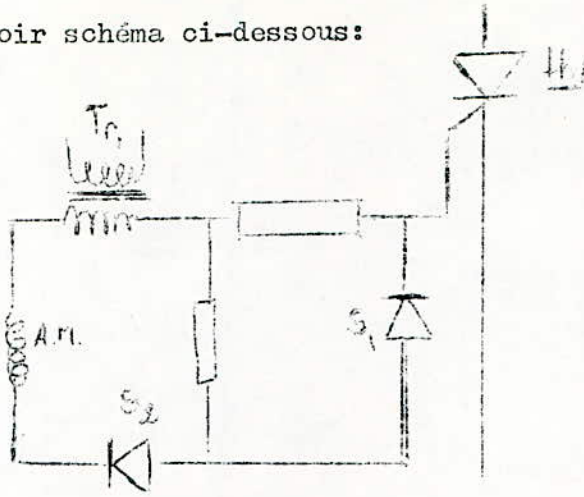
1) Contre-réaction tension:

On préleve une partie de la tension d'induit du moteur que l'on compare à la tension pilote. Nous obtenons ainsi une tension de commande des gachettes.

2) Contre-réaction courant:

Pour limiter le courant d'induit lors d'une surcharge nous avons utilisé une contre-réaction courant. Cette fonction est assurée par un dispositif de deux soupapes qui fonctionnent alternativement.

Voir schéma ci-dessous:



d) Asservissement de la tension:

La contre-réaction tension assure respectivement:

- La rigidité de la caractéristique $n = f(I)$.
- Un freinage électrique (par récupération d'énergie électrique).
- Un éventuel forçage de la tension.
- Une limitation de la f.e.m rémanente.

e) Asservissement du courant:

La contre-réaction en courant assure quand à elle:

- Une limitation de courant dans le circuit de couplage G-M, en agissant sur la tension de commande Δu . L'utilité de cet asservissement est particulièrement important lors des démarrages de la génératrice et lors des surcharges du moteur.
- Une rigidité de la caractéristique $n = f(I)$. I augmente lors d'une surcharge; lorsque le seuil admissible est dépassé, il s'ensuit une régulation par contre-réaction courant.

VII-II ETUDE DE LA STABILITE DU SYSTEME.

VII-III-I Transmittance de la résistance génératrice:

L'enroulement de l'inducteur de la génératrice soumis à une tension U_c va induire un courant i_e tel que:

$$U_c = R_e i_e + l_e \frac{di_e}{dt}$$

soit sous forme symbolique:

$$U_c = R_e i_e + p L_e i_e = (R_e + p L_e) . i_e$$

La transmittance se déduit directement à partir de l'expression précédente:

$$\frac{i_e}{U_c} = \frac{I}{R_{ex}(I + T_{exp})}$$

avec $T_{ex} = \frac{l_{ex} + l'y}{R_{ex} + r'y}$

b) Induit de la génératrice:

Conformément au principe de (Liapounov, A.) relatif au principe de la stabilité des systèmes, on peut supposer que l'on travail dans la partie linéaire de la caractéristique $E_g = f(i)$.

$$E_g = K_g i_e \quad \text{alors} \quad \frac{E_g}{i_e} = K_g$$

d'autre part :

$$\frac{i_e}{U_c} = \frac{I}{R_{ex}(I + T_{exp})}$$

d'où $K_g = \frac{U_{gn} + R_{in} I_n}{R_{ex} I_{cn}} ; K_g = 6,11$

$R_{in} = 0,01862 (\Omega); U_{gn} = 660 \text{ V}; R_{ex} = 4,4 (\Omega); I_{cn} = 25 \text{ A.}$

L'équation fondamentale du mouvement s'écrit:

$$C_m - C_s = J \frac{dn}{dt}$$

Avec:

C_m = couple moteur

C_s : couple statique.

j : moment d'inertie des masses tournantes.

n : vitesse de rotation en tr/mn.

Le couple moteur C_m peut s'écrire $C_m = k_m I_n$

D'une façon analogue nous écrivons $C_s = k_m I_s$

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

$$J \frac{dn}{dt} = k_m I_d \Rightarrow I_a - I_s = I_d$$

En tensions correspondantes, cette relation devient:

$E_g - (R_o + L_{op}) = U$ où U : tension aux bornes des moteur sans considérer le couple résistant.

c) Etude du moteur;

L'équation électrique du circuit induit s'écrit:

$$V - E'm = (R\phi + L\phi p) Id$$

En régime non saturé, nous écrirons les relations suivantes:

$$Cm = km I$$

$$E'm = ke n$$

Soit alors:

$$(V - E'm) = (R\phi + L\phi p) \cdot Id$$

d'où en remplaçant par les valeurs prises instamment; nous obtenons

$$Cm - Cs = Jpn = km Id$$

ou

$$V / n = ke + (R\phi + L\phi p) Id / n = ke + JR\phi p / km + JL\phi p^2 / km \cdot$$

$$\Rightarrow n/V = \frac{I}{ke + JR\phi p / km + JL\phi p^2 / km}$$

soit :

$$n/V = \frac{I/ke}{I + JR\phi p / ke km + JL\phi p^2 / ke km} \cdot$$

Posons :

$$JR\phi / ke km = T_i ;$$

$$JL\phi / ke km = T_o T_i^+ , \quad T_o = L\phi / R\phi \cdot$$

La transmittance devient alors:

$$n/V = \frac{K'}{I + T_i p + T_i T_o p^2} ; \quad K' = I/ke \cdot$$

d) Boucle de retour:

i) Contrôle de la tension.

Soit alors r_m et L_m résistance et inductance de mesure nous écrirons:

$$V_d / n = ke + r_m Jp / km + L_m Jp^2 / km \cdot$$

D'où :

$$U_d = 2 V_d = 2n (I + T_{im} P + T_{im} T_{2m} P^2)$$

Soit , si on prend le sommateur I :

Pour avoir la tension E_g , nous devons ajouter à U_d un facteur $(T_{mp} + L_{mp}) T_m$. Donc pour contrôler la tension E_g , nous préleverons une partie de cette tension à l'aide d'un potentiomètre. Il en résulte alors une tension $\int_t E_g$ qui va être comparée à la tension pilote U_p .

$$\text{Finalement } U_{comp} = \int_t E_g \quad ; \quad 0 < \int_t < 1$$

e) Boucle de retour courant :

En vertu des relations précédemment citées nous pouvons écrire :

$$I_d/n = J_p/k_m$$

Multiplions en haut et en bas par $R_o k_e$; nous obtenons ainsi l'équation suivante :

$$I_d/n = \frac{J R_o k_e}{R_o k_e k_m} p .$$

Par ailleurs nous avons ~~va-que~~ posé comme équations :

$$J R_o / k_e k_m = T_i \quad \text{et} \quad k_e = I / K' /$$

Alors :

$$I_d = \frac{T_i}{k_e k_m} . p . n$$

mais nous savons par ailleurs que $U_d = r_m . I_d$.

Comparateur (I) :

$$U_d = \frac{T_i r_m}{K' . R_o} . p . n$$

Afin d'avoir intégralement le courant débité par la génératrice, il faut ajouter à U_d .

Ce courant est comparé à I_{lim} . D'autre part pour assurer le contrôle du courant résultant à la sortie du comparateur, il nous a suffi d'en recueillir une fraction; c'est pourquoi il faut multiplier le courant ainsi trouvé par un coefficient \int_c .

Le résultat homogène à une tension est appliqué à U_p .

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

$$T_{Linm} = \frac{L_{inm}}{R_{in} + R_{aux}} \cdot K_{ig}$$

$$L_{inm} = K_{im} \frac{U_{im}}{2pNnIn}$$

d'où :

$$T_{im} = \text{XXXXXX} = 0,0583 \text{ s}$$

Avec $K_{ig} = 8$ et $K_{ig} = 5$.

4) Constante du circuit G-M:

$$T_{\sigma} = \frac{L_{ig} + L_{im}}{R_{\sigma}}$$

$$T_{\sigma} = 0,0675 \text{ s}$$

5) Constante de temps mécanique:

$$\begin{aligned} T_i &= J R_o / k_e k_m & T_i &= 0,349 \text{ s} \\ T_{im} &= J R / k_e k_m & T_{im} &= 0,404 \text{ s} \end{aligned}$$

6) Constante de temps du système convertisseur:

La constante de temps du système convertisseur est proportionnelle à la fréquence du réseau, elle est donnée par :

$$T_c = \frac{2}{W} \quad ; \quad T_c = \frac{2}{314} = 0,0064 \text{ s}$$

g) Calcul des coefficients:

i) $K_g = 6,11$

ii) $K_k = 1/K_e \quad K' = 1,4$

iii) calcul de τ est lié au potentiomètre, nous avons choisi de façon arbitraire, mais que la valeur prise soit convenable, c'est à dire que son influence est négligeable, $\tau = 0,04$.

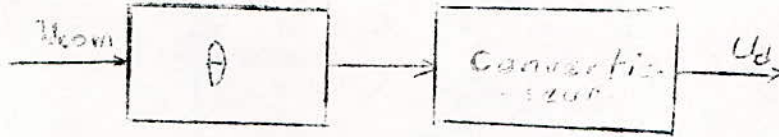
h) Calcul du coefficient K_c :

La fonction de transfert du convertisseur est donnée par l'équation suivante:

$$H_c(p) = \frac{K_c}{T_{cp} + I}$$

$$K_c = \Delta U_d / \Delta U_c$$

Schématiquement nous avons:



La valeur, en fonction de $\cos \theta$ et de U_{c0} , est donnée par l'expression:

$$U_d = U_{c0} \cos \theta - R_{\theta} I_c - U_t$$

avec :

U_{c0} : tension redressée maximale : 137,5 V

I_c : Courant dans l'enroulement de l'excitation (= 25 A).

R_{θ} : résistance équivalente du circuit redresseur. (=0,885)

U_t : Chute de tension aux bornes du thyristor.

Alors :

$$U_d = 137,5 \cos \theta - 0,885 \cdot 25 - 1,5$$

d'où

$$U_d = 137,5 \cos \theta - 23,625$$

Equation de la courbe de commande:

$$\text{pour } \theta = 0^\circ \quad U_{com} = 10 \text{ V}$$

$$\theta = 90^\circ \quad U_{com} = 0 \text{ V}$$

Nous faisons une approximation linéaire et sera donc:

$$U_{com} = a \theta + b \quad ; \quad b=10$$

$$a = - \frac{b}{90} = - 0,11$$

$$\text{Donc } U_{com} = - 0,11 \theta + 10$$

De façon toute à fait empirique nous calculons K_c :

$$K_c = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_{com}}$$

Pour deux valeurs quelconques de θ ; nous aurons deux valeurs respectives pour U_d et U_{com} .

Pour $\theta = 30^\circ$ $U_d = 95,454$
 $U_{com} = 6,7$

$\theta = 60^\circ$ $U_d = 45,125$
 $U_{com} = 3,4$

d'où $K_c = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_{com}} = \frac{50,325}{3,3} = 15,25.$

VII-III: Calcul du coefficient d'amplification et le coefficient de la boucle de courant.

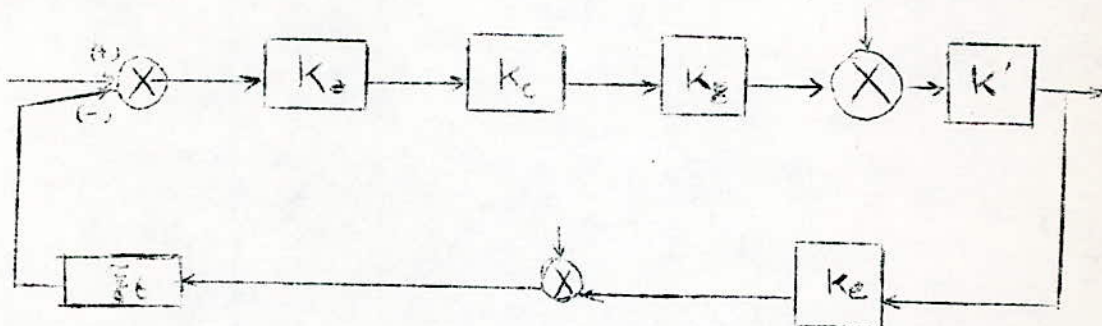
Reprenons le schéma synoptique du paragraphe précédent, nous avons alors:

$K_g = 6,11$
 $K_c = 15,25$
 $K' = 1,40$
 $T_t = 0,04$

Nous aurons à calculer donc K_c ; K_a ; U_p .

a) Determination du coefficient K_a :

Nous calculons le gain d'amplification en ne considérant uniquement que le régime statique, pour ce faire on pose $p=0$ dans les expressions des différentes transmittances. Nous obtenons ainsi le schéma suivant:



Calculons la fonction de transfert ~~en~~ en boucle fermée correspondante:

$$H(p) = \frac{Up(nke + rmIs) \int t - IsRo/KaKcKg}{Up} \times KaKcKgK'$$

$$H(p) = \frac{KaKcKgK' - (KaKcKgK' \int t rmIs/Up) - RoK'Is/Up}{I + KaKcKgK' ce \int t}$$

Considérons alors H(p) en boucle ouverte (So):

$$ce = \int t = 0$$

$$\text{alors } Ho = KaKcKgK' - RoK'Is/Up$$

$$nso = KaKcKgK' Up - RoK'Is$$

L'erreur introduite par la perturbation Is est égale au terme RoK'Is:

$$InRoK' = 760.0,032.I,4 \approx 34$$

$$\epsilon_{so} = \frac{InRoK'}{Nn} = \frac{34}{740} = 4,59 \%$$

En boucle fermée ϵ_{sf} nous est imposée ($\epsilon_{sf} = 2\%$).

Connaissant ϵ_{so} et ϵ_{sf} , nous pouvons calculer Ka:

soit alors:

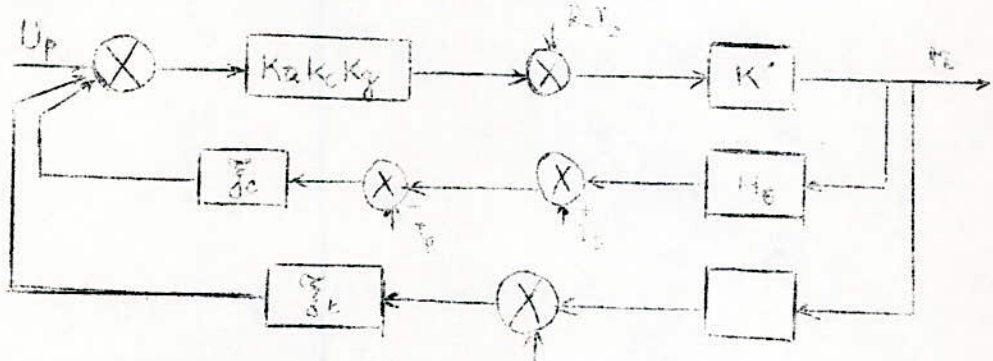
$$KaKcKg \int t = \frac{\epsilon_{so}}{\epsilon_{sf}} \cdot \frac{Nn}{Nmin} - I = 47,138.$$

d'où

$$Ka = \frac{47,138}{KcKg \int t} = \frac{47,138}{16;25.6,11.0,04} = 12,64$$

b) Calcul de Up et de c.

Soit le schéma fonctionnel suivant:



La fonction de transfert est alors:

$$H(p) = \frac{Up - (nke + Isrm) \int t - \int c(Is - Ilim) \int KaKcKgK' - IsRoK'}{Up}$$

Effectuons les calculs, nous obtenons ainsi :

$$H(p) = \frac{K_a K_c K_g K' - n(p) / U(p) \cdot K_a K_c K_g \xi t - (I_s - I_1) / U_p \cdot K_a K_c K_g K' \xi t - I_s / U_p}{-I_s / U_p \cdot R_o K' - I_s / U_p \cdot r_m K_a K_c K_g K' \xi t}$$

$$\text{Donc: } H(p) = \frac{K_a K_c K_g K' - (I_s - I_1) / U_p \cdot K_a K_c K_g K' c - I_s / U_p \cdot r_m K_a K_c K_g K' \xi t + I_s K_c K_g K' / U_p}{I + K_a K_c K_g \xi t}$$

Le coefficient c ne nous intéresse qu'en cas de surcharge anormale

$$\text{Si } I_s < I_1 \Rightarrow \xi c \text{ n'intervient : } \xi c = 0$$

$$I_s > I_1 \Rightarrow \xi c \text{ intervient : } \xi c > 0$$

$$\text{pour } I_s = I_{arr} \Rightarrow n = 0$$

$$\text{alors } U_p K_a K_c K_g K' - c K_a K_c K_g K' (I_{arr} - I_1) - I_{arr} R_o K' - I_{arr} r_m K_a K_c K_g K' \xi t = 0$$

$$\xi c = \frac{K_a K_c K_g U_p - I_{arr} R_o - I_{arr} \cdot r_m K_a K_c K_g \xi t}{K_a K_c K_g (I_{arr} - I_1)}$$

i) Calcul de U_p :

Pour $N = N_n$, $\xi c = 0$; $I_s = I_n$; la fonction de transfert devient :

$$N_n = \frac{K_a K_c K_g K' U_p - I_n r_m K_a K_c K_g K' \xi t - I_n R_o K'}{I + K_a K_c K_g \xi t}$$

Nous déduisons de cette équation la valeur littérale de U_p :

$$U_p = \frac{(I + K_a K_c K_g \xi t) N_n + I_n K' (r_m K_a K_c K_g \xi t - R_o)}{K_a K_c K_g K'}$$

Application numérique :

$$U_p = \frac{(I + 47,138) 740 + 760 \cdot I,4 (0,037 \cdot 47,138 - 0,032)}{47,138 \cdot I,4 / 0,04}$$

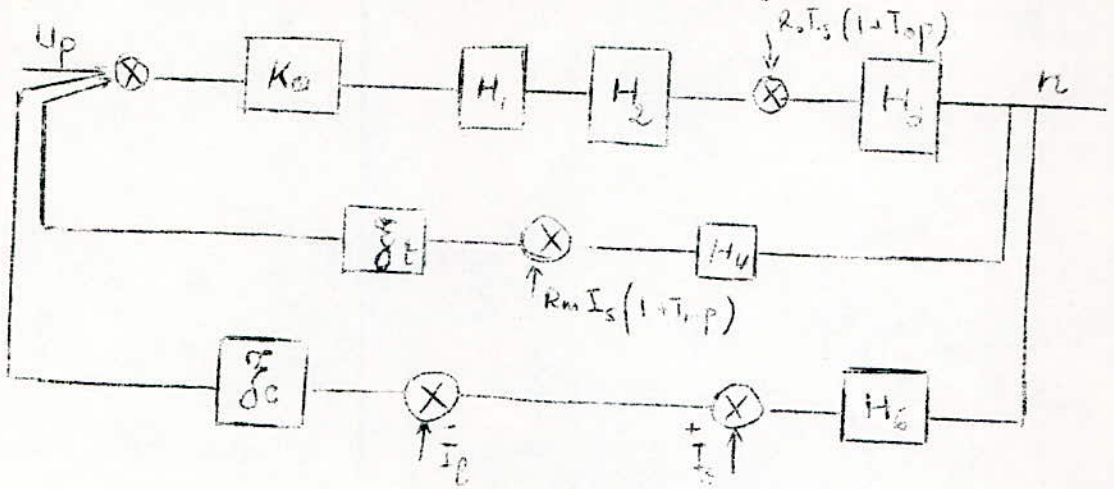
$$U_p = 22,7 \text{ V.}$$

ii) Calcul de c :

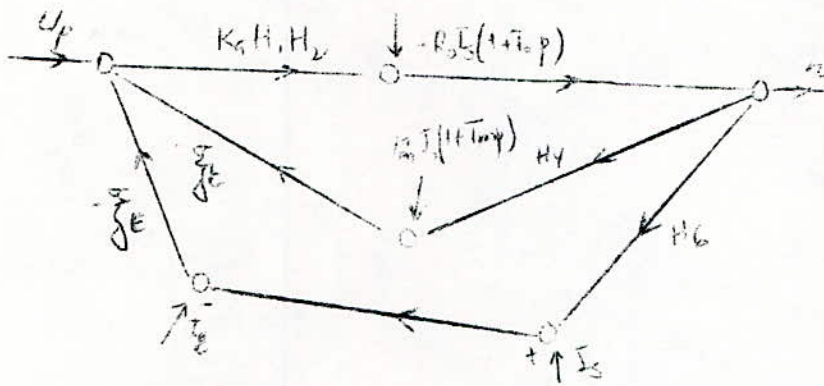
$$\xi c = 0,068. \text{ après avoir remplacé dans la formule littérale par les valeurs numériques.}$$

VII-IV Etude dynamique du système /

Reprenons le schéma synoptique du système:



Le graphe de fluence correspondant est alors le suivant:



Pour Chercher la transmittance du système, nous appliquons la formule

de Masson. $H(p) = N/Up$

$$\text{Soit } \frac{X_j}{X_i} = \frac{I}{\Delta} \sum_{k=1}^n P_k \Delta_k$$

n : nombre de canaux.

Δ : determinant principal du graphe

P_k : Transmittance du k ème canal ($X_i \rightarrow X_j$)

Δ_k : determinant partiel relatif au canal K (donné par la même relation que Δ)

$$\Delta = I + Ka \sum_{t=1}^3 H_1 H_2 H_3 H_4 + Ka \sum_{c=1}^3 H_1 H_2 H_3 H_6$$

d'où :

$$N(p) = \frac{Ka H_1 H_2 H_3 Up - R_0 I s (I + T_0 p) H_3 - R_m I s (I + T_1 p) Ka \sum_{t=1}^3 H_1 H_2 H_3 H_4 + (I - I s) \sum_{c=1}^3 H_1 H_2 H_3 H_6}{I + Ka \sum_{t=1}^3 H_1 H_2 H_3 H_4 + Ka \sum_{c=1}^3 H_1 H_2 H_3 H_6}$$

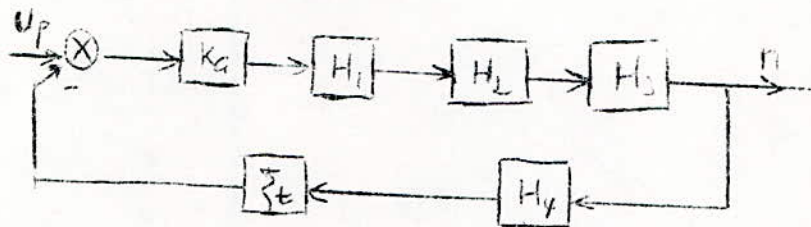
$$H(p) = \frac{K_a H_1 H_2 H_3}{I + K_a \sum_{i=1}^4 T_i H_i H_2 H_3 H_4 + K_a \sum_{i=1}^6 c_i H_1 H_2 H_3 H_6}$$

Condition d'étude de stabilité:

a) Nous ne tenons pas compte de la contre réaction relative à la limitation du courant, car celle-ci tend à stabiliser un système déjà stable. donc $\sum c=0$

b) Les perturbations dues au couple résistant (statique) sont atténuées par l'action régulatrice des deux boucles de retour. Nous considérons $I_s=0$ et l'étude de la stabilité se fait uniquement avec les propres composantes du système.

Alors:



$$H(p) = \frac{K_a H_1 H_2 H_3}{I + K_a \sum_{i=1}^4 T_i H_i H_2 H_3 H_4}$$

avec :

$$H_1 = \frac{K_c}{I + T_c p} \quad ; \quad H_2 = \frac{K_g}{I + T_{ex} p}$$

$$H_3 = \frac{K'}{I + T_i p + T_i T_{op} p^2} \quad ; \quad H_4 = k_e (I + T_{imp} + T_{im} T_{2m} p^2)$$

$$H(p) = \frac{K_a K_c K_g K'}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$$

Avec:

$$a_0 = I + K_c K_g K_a \sum_{i=1}^4 T_i = I + \beta = 48,138$$

$$a_1 = T_i + T_c + T_{ex} + \beta T_{im} = 10,8267$$

$$\begin{aligned}
 a_2 &= T_{ex}T_c + T_i(T_{ex} + T_c) + T_iT_o + \sqrt{\frac{1}{2}} T_{im}T_{2m} = 1,3027 \\
 a_3 &= T_iT_{ex}T_c + T_iT_o(T_{ex} + T_c) = 0,0183 \\
 a_4 &= T_oT_iT_cT_{ex} = 0,000546
 \end{aligned}$$

Etude de la stabilité d'après le critère de ROUTH:

$I + KG(p) = 0$ équation caractéristique.

$$I + KG(p) = a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0$$

p^4	a_4	a_2	a_0
p^3	a_3	a_1	a
p^2	b_0	b_1	0
p^1	b_2	0	
p^0	b_3	0	

$$b_0 = \frac{a_2 a_3 - a_1 a_4}{a_3} = 0,7111 ; \quad b_1 = a_0 = 48,138$$

$$b_2 = \frac{a_1 b_0 - b_1 a_3}{b_0} = 18,587 ; \quad b_3 = b_1 = 48,138$$

D'après le critère de ROUTH, un système est stable si tous les termes de la première colonne ont même signe (tous positifs ou tous négatifs)

Le critère appliqué à notre système:

p^4	$5,46 \cdot 10^{-4}$	$1,03$	$48,138$
p^3	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$19,826$	0
p^2	$0,71$	$48,138$	0
p^1	$18,587$	0	0
p^0	$48,138$	0	0

Comme tous les termes de la première colonne sont (+) ; nous concluons que notre système est stable.

Réponse du système/

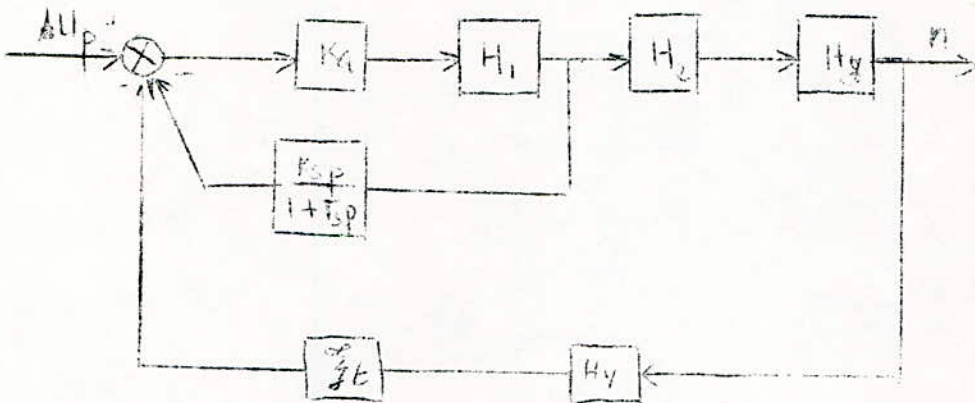
$$H(p) = \frac{1648,86904}{5,46 \cdot 10^{-4} p^4 + 1,83 \cdot 10^{-2} p^3 + 1,303 p^2 + 19,8267 p + 48,138}$$

L'influence du terme p^4 est très faible, de même pour le terme p^3 .
 Nous approximations ainsi notre système à un système du second ordre; nous constatons, en examinant ce dernier, que la réponse est apériodique d'où la nécessité d'amélioration des performances du système.

VII-V: Amélioration des performances:

Pour améliorer les performances du système, nous introduisons un correcteur de la forme $\frac{K_{sp}}{I + T_{sp}}$ (avec $K_s=0,55$ et $T_s=0,055$)

Ceci afin de régulariser la tension d'entrée de l'inducteur de la génératrice. Il sera disposé conformément au schéma suivant:



Les fonctions de transferts de chaque bloc seront alors:

$$H'_I(p) = \frac{K_a H_I}{I + \frac{K_a H_I K_{sp}}{I + T_{sp}}}$$

d'où :

$$H(p) = \frac{H'_I H_2 H_3}{I + \frac{K_a H_I K_{sp}}{I + T_{sp}} H_2 H_3}$$

où les fonctions H sont données au paragraphe précédent.

Après avoir effectué nous obtenons comme fonction de transfert du système total, la fonction suivante:

$$H(p) = \frac{KaKcKgK' (I + Tsp)}{A_5 p^5 + A_4 p^4 + A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0}$$

$$A_0 = 48,138$$

$$A_1 = 57,759$$

$$A_2 = 30,1$$

$$A_3 = 5,985$$

$$A_4 = 0,3384$$

$$A_5 = 2,7 \cdot 10^{-6}$$

Pour étudier cette fonction, de la forme $A(p)/B(p)$, nous devons décomposer le dénominateur et le numérateur en produit de facteurs.

En outre le régime transitoire défini par les racines au dénominateur nécessite la connaissance de ces dernières. Parmi les méthodes proposées nous retiendrons la méthode dite de Lin-Bairston.

Soit alors notre polynôme:

$$0,3384 p^4 + 5,985 p^3 + 30,1 p^2 + 57,759 p + 48,138 = 0$$

Remarquons que le terme en p^5 a été négligé devant le reste ~~des~~ Donc son influence est très faible sur la réponse du système.

Après avoir décomposé en produit de facteurs nous obtenons:

$$H(p) = 4872,54 \frac{(I + 0,05)}{(p^2 + 2,7625p + 3,195)(p^2 + 14,9275p + 44,517)}$$

Comme $H(p) = n(p)/Up(p)$; nous aurons comme expression de la vitesse

$$n(p) = H(p) \cdot Up(p)$$

Alors:

$$n(p) = 4872,54 \cdot Up \frac{3,6 \cdot 10^{-6} = 1,275 \cdot 10^{-2} p}{p(p^2 + 2,7625p + 3,195)} \frac{-19,13 \cdot 10^{-2} + 1,275 \cdot 10^6}{p(p^2 + 14,927p + 44,5)}$$

Cherchons maintenant les réponses temporelles:

pour le terme I, il est de la forme:

$I + ap$
 sa réponse sera donc sous la forme:
 $p(I + 2zP/w_n + P^2/w_n^2)$

$$I + \frac{I}{\sqrt{I - z^2}} (I - 2azw_n + a^2 w_n^2)^{1/2} e^{-z w_n t} \sin(w_n \sqrt{I - z^2} t + \psi)$$

avec:

$$\psi = \arctg \frac{a w_n \sqrt{I - z^2}}{I - a z w_n} - \arctg \frac{\sqrt{I - z^2}}{-z}$$

le second terme est de la forme:

$$\frac{I + ap}{p(pT_I + I)(pT_2 + I)} \quad \text{alors sa réponse est } I + \frac{T_1 - a}{T_2 - T_1} e^{-t/T_I} - \frac{T_2 - a}{T_2 - T_1} e^{-t/T_2}$$

En effectuons tous les calculs on obtiens finalement pour la v
 vitesse et le courant:

$$n(t) = 746 - 1234,68 e^{-1,376t} \sin(1,125t + 1,3587) - 486,6 e^{-10,8t} + 947,5 e^{-4,10t}$$

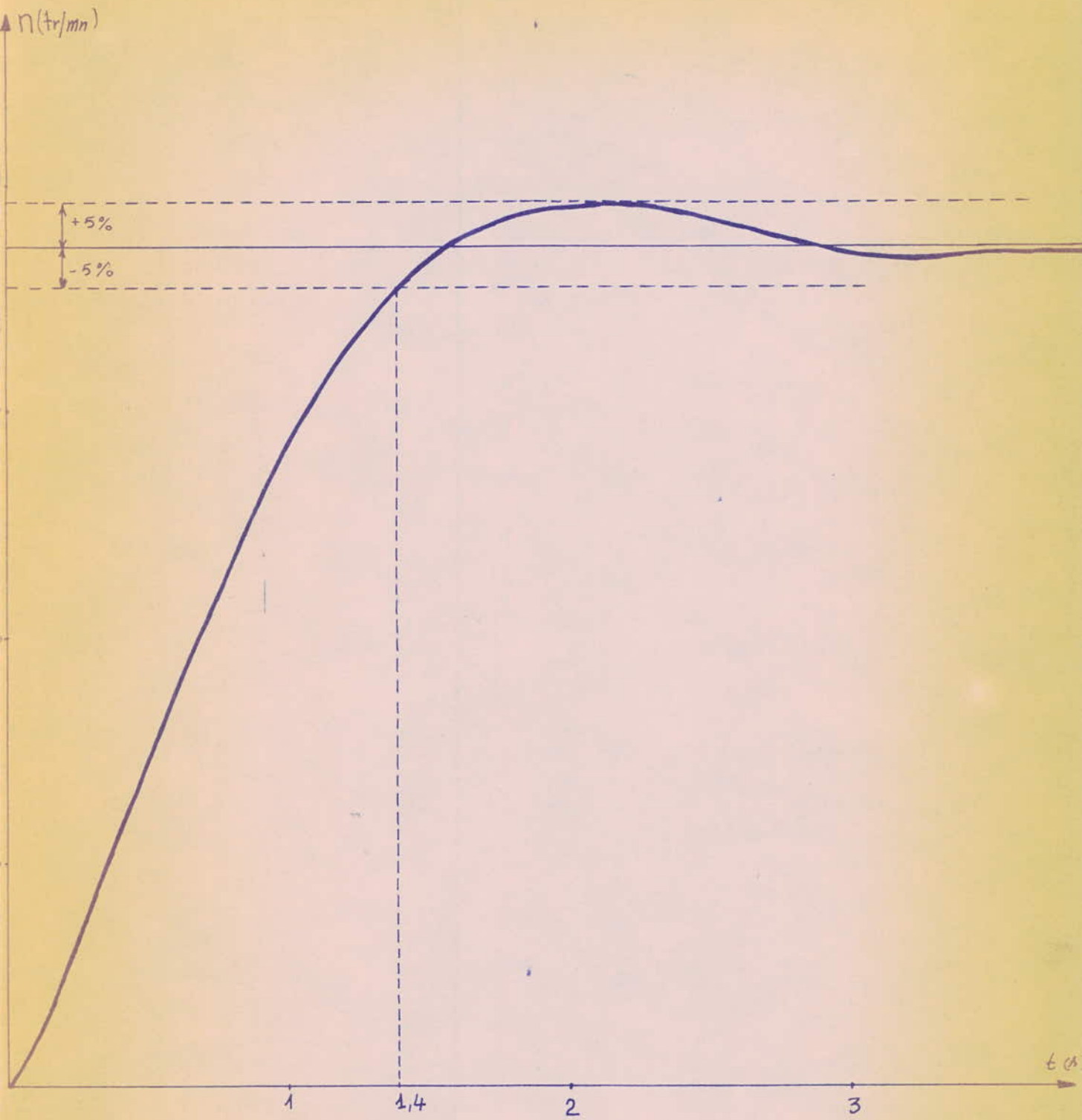
Comme $i(t) = \frac{Ti}{Ro \text{ km}} \frac{dn}{dt}$, nous obtenons pour la vitesse l'équation suivante:

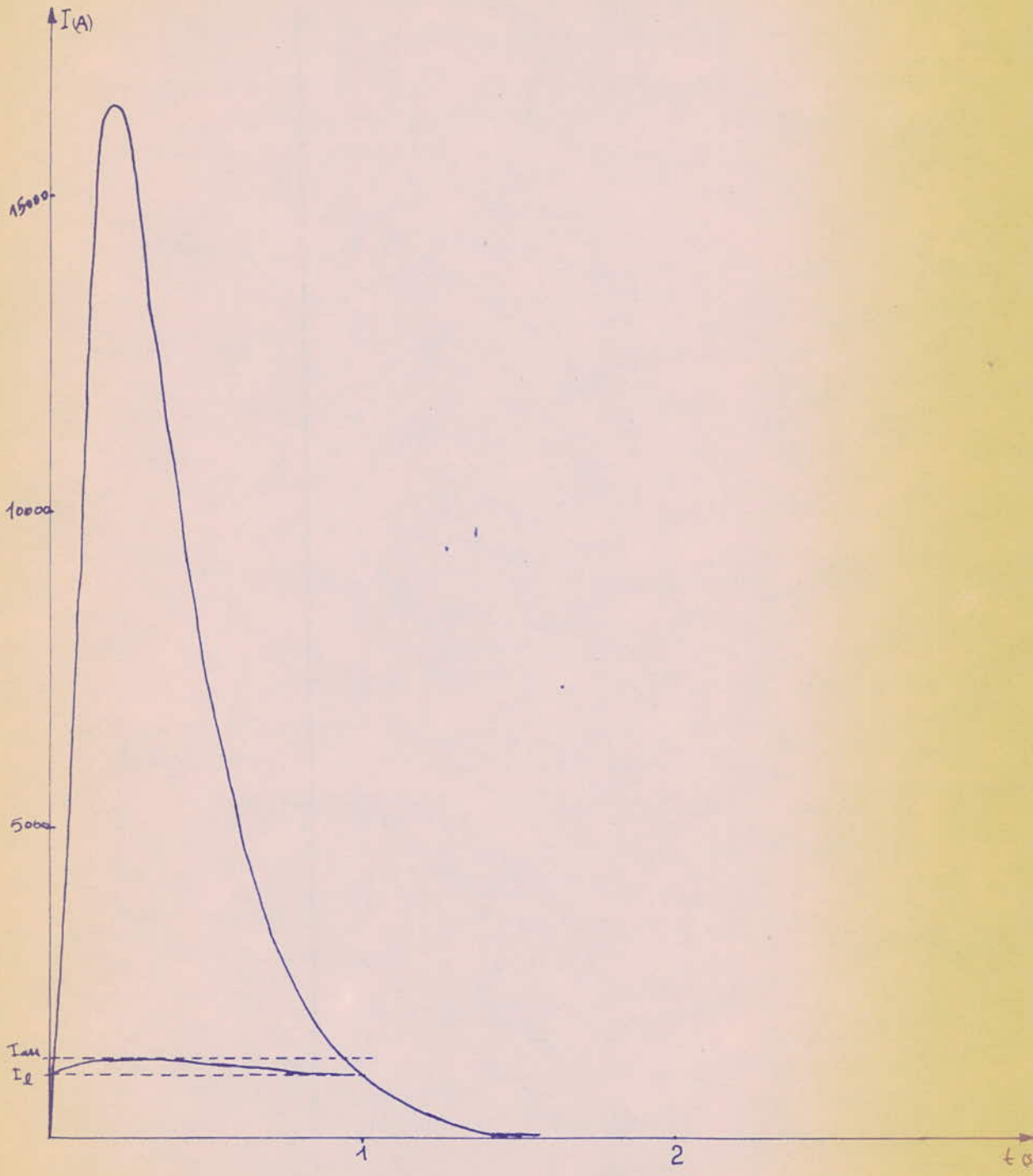
$$i(t) = -4811,929 e^{-1,376t} \sin(1,125t + 0,6916) - 6150,45 e^{-4,10t} + 3217,2164 e^{-10,8t}$$

Lorsque t tend vers l'infini la vitesse tend vers la valeur de 740 ou vitesse normale; Mais le courant tend par contre vers zéro.

pour $t=0$, la vitesse est nulle de même que le courant qui atteint lui son maximum à $t = 0,186 \text{ s}$. ~~On a alors un dépassement de 8 % (pour $n(t)$).~~

pour les courbes voir graphes à côtés.





VIII-REGIME TRANSITOIRE.

VIII-I: Définition:

Le régime transitoire d'une commande électrique caractérise le passage d'un état permanent à un autre pour lequel la vitesse, le couple et courant varient. Ils apparaissent par suite d'une variation de la charge liée au processus de production ou lors d'une intervention sur le groupe de commande (démarrage, freinage, changement de sens de rotation des moteurs etc...). Ils peuvent aussi prendre naissance par suite d'une perturbation intérieure ou extérieure au processus (avarie d'une machine, perte de synchronisme dans le réseau etc...).

Le choix correct de la puissance des moteurs, l'élaboration des schémas de contrôle et la diminution de la dépense en énergie sont astreints à la connaissance parfaite des régimes transitoires.

VIII-II-Démarrage.

i) Processus d'accroissement du courant inducteur.

si à l'instant t nous alimentons le circuit inducteur de la génératrice, nous obtenons:

pour $U_{ex} = f(i)$, l'équation suivante: $U_{ex} = L_{ex} \frac{di}{dt} + R_{ex} i$

où U_{ex} représente un échelon de tension: $U_{ex} = R_{ex} I_c$

d'où

$$R_{ex} I_c = L_{ex} \frac{di}{dt} + R_{ex} i$$

appliquons le calcul symbolique:

$$R_{ex} I_c / p = L_{ex} p i + R_{ex} i, \text{ soit } i = \frac{I_c}{T_{ex}} \cdot \frac{I}{p(p + I/T_{ex})}$$

en développant en termes du premier ordre nous obtenons:

$$i = I_c \left[\frac{I}{p} - \frac{I}{(p + I/T_{ex})} \right]$$

d'où finalement :

$$i_{ex} = I_{ex} \left(I - e^{-t/T_{ex}} \right).$$

$$\text{Avec } T_{\text{ex}} = \frac{L_{\text{ex}} + L'y}{R_{\text{ex}} + R'y} = 0,371 \text{ s.}$$

$$I_c = 25 \text{ A.}$$

d'où, en remplaçant par les valeurs numériques:

$$i_{\text{ex}} = 25 (1 - e^{-t/0,371}).$$

ii) Démarrage du moteur (G-M).

Si la génératrice n'est pas saturée sa f.e.m pour $N=Ct\omega$ est proportionnelle au courant d'excitation.

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

$$\text{Alors } e_g = K_g i_{\text{ex}} = K_g I_c (1 - e^{-t/0,371})$$

Soit finalement:

$$e_g = E_g (1 - e^{-t/0,371})$$

Ceci si nous supposons que la tension finale est la tension nominale.

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

$$e_g = E_m (1 - e^{-t/T_{\text{ex}}}) = i_a R_o + L_o \frac{di_a}{dt} + e$$

avec $e = \text{f.c.e.m}$ du moteur .

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

$$C - C_s = J \frac{dn}{dt} ?$$

Nous supposons toujours que nous sommes en régime non saturé, alors:

$$e = K_e N$$

$$C = k_m i$$

Résolvons maintenant le système de ces quatre équations:

$$(i) \quad E_g (1 - e^{-t/T_{\text{ex}}}) = i_a R_o + e \quad \text{Lo est négligeable devant } R_o \text{ et } L_{\text{ex}}.$$

$$(ii) \quad C = J \frac{dn}{dt} + C_s$$

$$(iii) \quad e = k_e N$$

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

(2) et (4) donnent l'équation suivante:

$$(I) \quad i = \frac{J}{km} \frac{dn}{dt} + \frac{Cs}{km}$$

I' dans I donne :

$$Egn (I - e^{-t/T_{ex}}) = keN + \frac{RoJ}{km} \frac{dn}{dt} + \frac{RoCs}{km}$$

d'où :

$$n + \frac{RoJ}{KeKm} \frac{dn}{dt} + \frac{RoJ}{KeKm} = \frac{Egn}{Ke} (I - e^{-t/T_{ex}}).$$

Comme $T_i = RoJ/kekm$, nous avons ainsi:

$$n + T_i \frac{dn}{dt} = A_I (I - e^{-t/T_{ex}}) - B_I$$

Avec $A_I = Egn/ke$ et $B_I = RoCs/kekm$.

Après transformation requises, en passant par le calcul symbolique, nous obtenons finalement:

$$n = A_I' \sqrt{\quad} (I - e^{t/T_{ex}}) \cdot T_{ex} - T_i (I - e^{-t/T_i}) \cdot \frac{B_I'}{\sqrt{\quad}}$$

$$\text{Avec } A_I' = \frac{A_I}{T_{ex} - T_i} \quad ; \quad B_I' = I + \frac{B_I}{A_I} \left(\frac{T_{ex} - T_i}{T_i} \right)$$

Variation du courant d'induit:

$$C - Cs = J \frac{dn}{dt} + Cs$$

$$\text{d'où } i = \frac{J}{km} \frac{dn}{dt} + \frac{Cs}{km}$$

Dérivons maintenant l'équation de la vitesse:

$$\frac{dn}{dt} = A_I' \sqrt{\quad} e^{-t/T_{ex}} - B_I' e^{-t/T_i} \sqrt{\quad} + \frac{Cs}{J}$$

notons alors par I_s le facteur Cs/km on a ainsi:

$$i = \frac{A_I' J}{km} \left[e^{-t/T_{ex}} - B_I' e^{-t/T_{ex}} \right] + \left(\frac{Cs}{km} = I_s \right)$$

VIII-III- Freinage /

a) Circuit inducteur:

$$R_{tex} \cdot i_{ex} + L_{tex} \cdot di_{ex}/dt = 0$$

ou sous forme symbolique:

$$i + T_{ex} p i = 0 \Rightarrow i = I_c e^{-t/T_{ex}}$$

b) Circuit induit /

Comme nous travaillons dans la partie linéaire des caractéristiques nous aurons:

$$e_g = K_g i_{ex} = I_c K_g e^{-t/T_{ex}}$$

Equation de la vitesse:

$$-C - C_s = J dn/dt \quad -C = J dn/dt + C_s$$

donc:

$$-k_m i = J dn/dt + C_s \Rightarrow -i = \frac{J}{k_m} dn/dt + C_s/k_m$$

D'autre part nous avons:

$$e_g = E_g n e^{-t/T_{ex}} = k_e n + \frac{J R_o}{k_m} dn/dt + \frac{R_o C_s}{k_m}$$

Après passage au calcul symbolique, nous obtenons:

$$n(t) = A_I \left[T_{ex} e^{-t/T_{ex}} - T_i e^{-t/T_i} \right] + B_I$$

où :

$$A_I = \frac{k_e R_o}{k_m k_e (T_{ex} - T_i)} ; \quad B_I = \frac{C_s R_o}{k_e k_m}$$

Variation du courant:

$$-i = \frac{J}{k_m} dn/dt + \frac{C_s}{K_m}$$

En dérivant l'équation de la vitesse et après transformations nous aboutissons à:

$$-i = I_{cc} \frac{T_i}{T_{ex} - T_i} (e^{-t/T_i} - e^{-t/T_{ex}}) + I_s$$

$$\text{avec } I_{cc} = \frac{E_g n}{R_o} ; \quad I_s = \frac{D_s}{k_m}$$

Courants maximums au démarrage et au freinage:

Pour avoir les maximums, il suffit de dériver les équations des courants, d'annuler ensuite ces dernières.

a) Démarrage:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} \left(B_I e^{-t/T_i} / T_i - e^{-t/T_{ex}} / T_{ex} \right) = 0$$

$$\Rightarrow t = \frac{T_{ex} T_i}{T_{ex} - T_i} \ln \left(B_I \cdot \frac{T_{ex}}{T_i} \right).$$

numériquement:

$$t = \frac{0,349 \cdot 0,371}{0,371 - 0,349} \cdot \ln \left[\left(1 + \frac{0,022 \cdot 586,65 (0,022 \cdot 0,371)}{660 (0,349 - 0,349) \cdot 0,71} \right) \right]$$

d'où ;

$$t = 0,34 \text{ s} \Rightarrow i = 6782 \text{ A}$$

b) Freinage:

$$di/dt = -I/T_{ex} e^{-t/T_{ex}} + I/T_i e^{t/T_i} = 0$$

$$t = \frac{T_{ex} \cdot T_i}{T_{ex} - T_i} \ln T_{ex}/T_i$$

numériquement:

$$t = \left[(0,349 \cdot 0,371) / 0,022 \right] \ln 0,371 / 0,349 = 0,223 \text{ s}$$

d'où:

$$i = -5819,26 \text{ A}$$

VIII-IV-Étude transitoire du changement du sens de rotation/

Le renversement du sens de rotation du moteur est réalisé par un changement de polarité du courant inducteur de la génératrice. Ce fait provoque ainsi une diminution rapide du courant d'excitation et ensuite son accroissement dans le sens inverse.

a) Circuit d'excitation:

Pendant le changement du sens de rotation, l'équation tension-courant dans le circuit inducteur s'écrit:

$$U_{ex} = -R_{ex} i_{ex} + L_{ex} di/dt$$

Passons maintenant à la transformée de Laplace:

$$\frac{U_{ex}}{p} - I_{ex} I_c = - R_{ex} (i_{ex} + T_{ex} p i_{ex})$$

alors:

$$I_c (I/p - T_{ex}) = - i_{ex} (I + T_{ex} p) .$$

d'où:

$$-i_{ex} = I_c \frac{I/p - T_{ex}}{I + T_{ex} p}$$

et finalement en passant à l'équation temporelle :

$$i_{ex} = - I_c (I - 2 e^{-t/T_{ex}}) .$$

i) Variation de la vitesse:

Toujours dans le régime de non-saturation, nous posons comme équations :

$$e_g = K_g i_{ex} = - K_g I_c (I - 2 e^{-t/T_{ex}}) .$$

D'autre part, en résolvant l'équation d'équilibre des f.e.m pour le circuit d'induit et l'équation du mouvement du système de commande par rapport à n , nous obtenons:

$$n(t) = - (A_I - B_I) + \frac{2 A_I}{T_{ex} - T_i} (T_{ex} e^{-t/T_{ex}} - T_i e^{-t/T_i}) .$$

ii) Variation du courant d'induit:

$$+i = \frac{J R_o}{k_m} \frac{dn}{dt} + \frac{C_s}{k_m}$$

Dérivons l'équation de la vitesse:

$$\frac{dn}{dt} = - \frac{2 A_I}{T_{ex} - T_i} (e^{-t/T_{ex}} - e^{-t/T_i}) .$$

Soit alors l'équation du courant:

$$i = - I_{cc} \frac{K_g T_i}{T_{ex} - T_i} (e^{-t/T_{ex}} - e^{-t/T_i}) + I_s$$

avec:

$$I_{cc} = \frac{E_g n}{R_o} ; I_s = C_s / k_e .$$

Courant maximum pendant le changement du sens de rotation:

dérivons l'équation du courant d'induit:

$$di/dt = + I_{cc} \frac{T_i}{T_{ex} - T_i} \left(e^{-t/T_{ex}} / T_{ex} - I/T_i \times e^{-t/T_i} \right) = 0$$

Alors:

$$t = \frac{T_{ex} T_i}{T_{ex} - T_i} \ln T_{ex}/T_i \Rightarrow t = 0,223 \text{ A.}$$

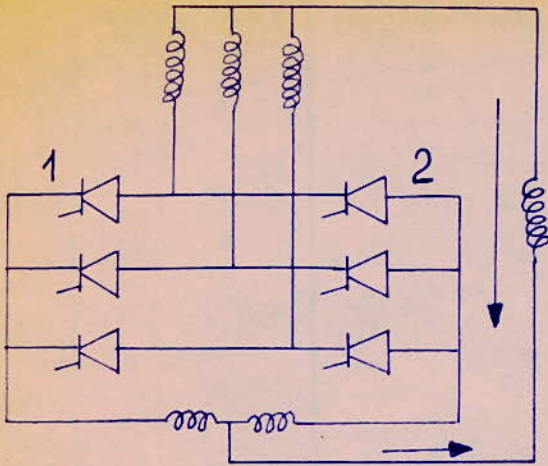
En reportant cette valeur dans la primitive du courant nous obtenons i_{max} et donc:

$$i_{max} = 5819,26 \text{ A.}$$

Tableaux et courbes des courants et tensions:

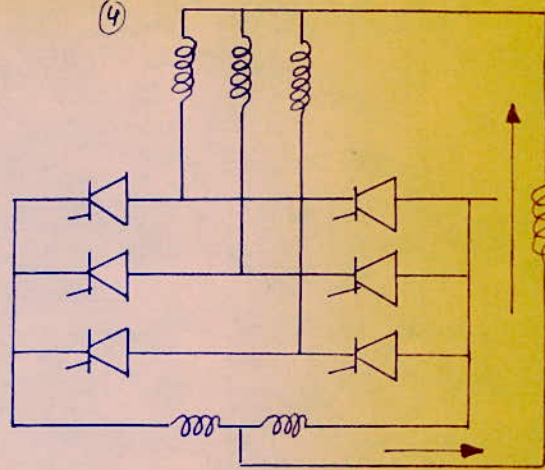
Pour les graphes voir graphes sur le chapitre VIII.

①



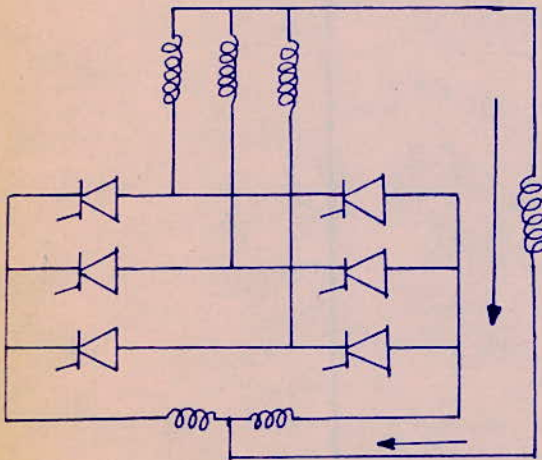
(1) RDRESSEUR
EXCITATION (+)

④



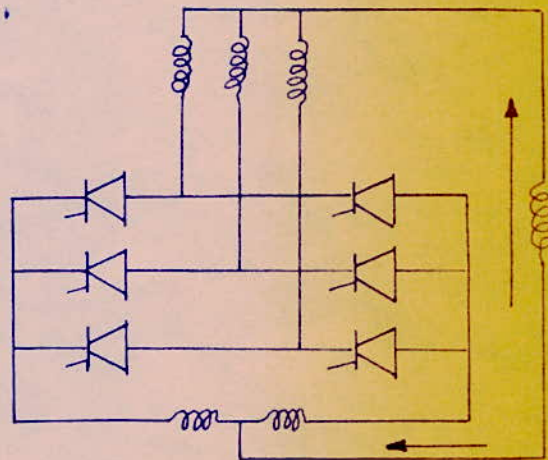
(1) ONDULEUR
DESEXCITATION
" freinage "

②

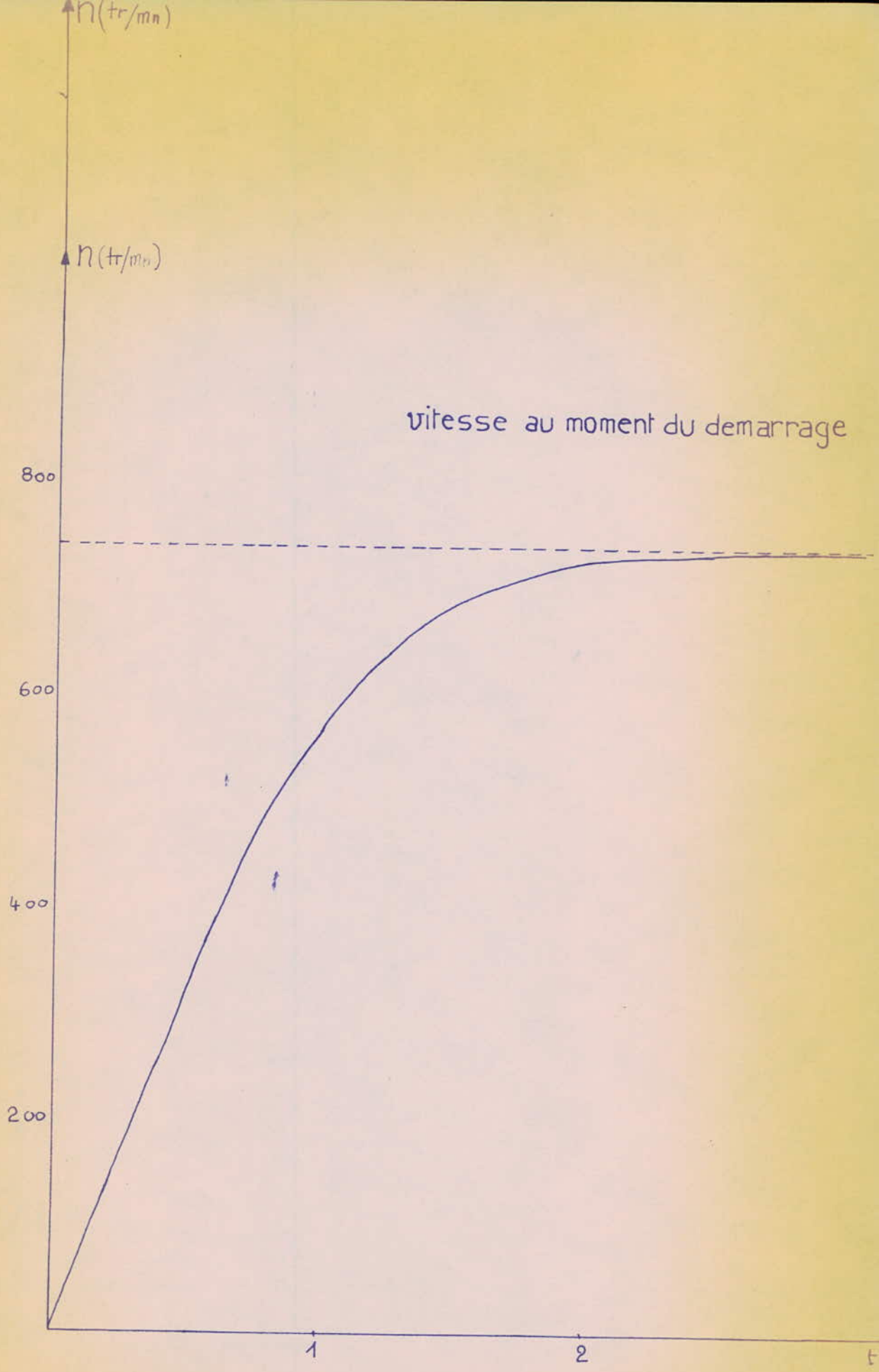


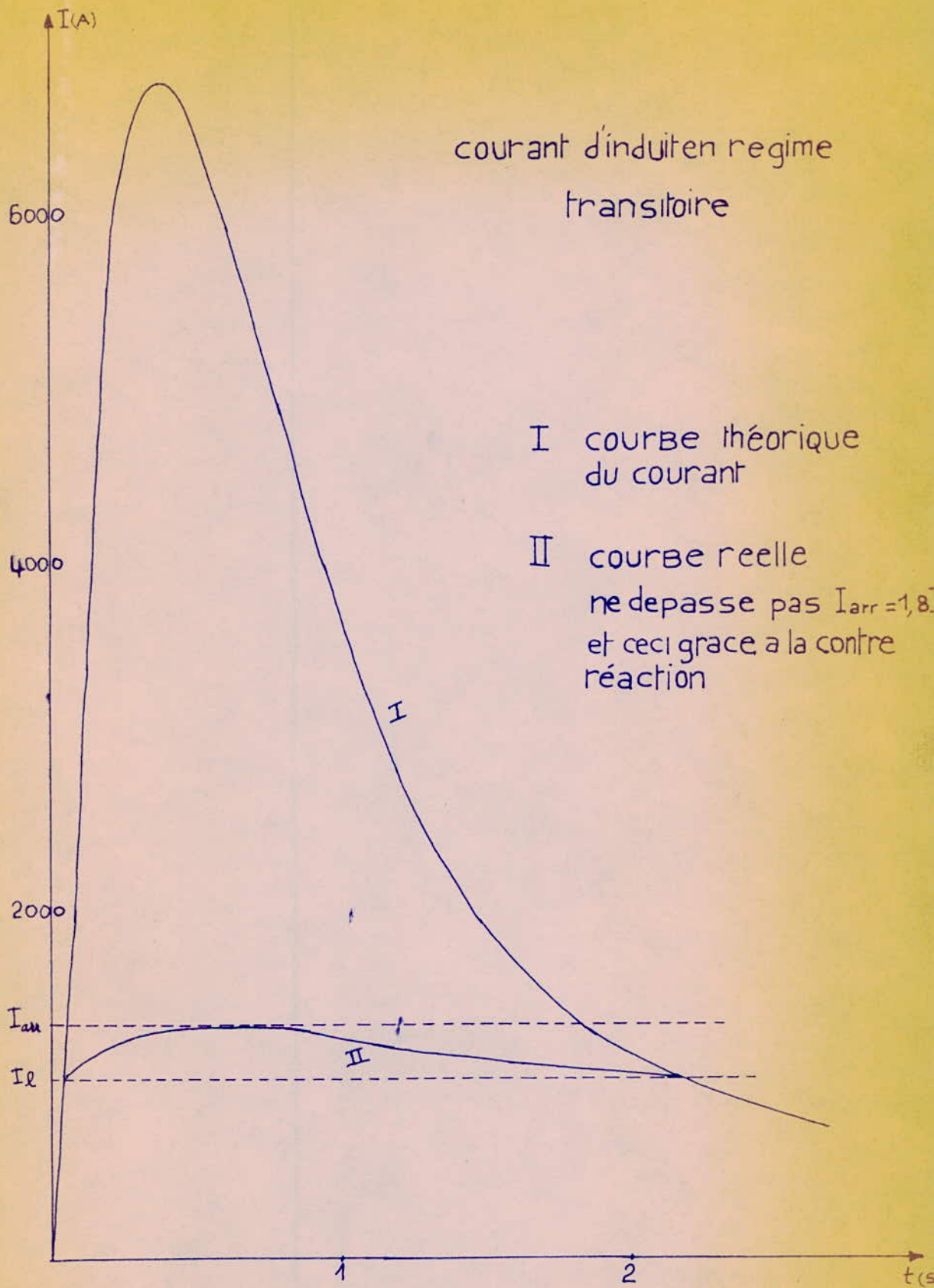
(2) ONDULEUR
DESEXCITATION
" freinage "

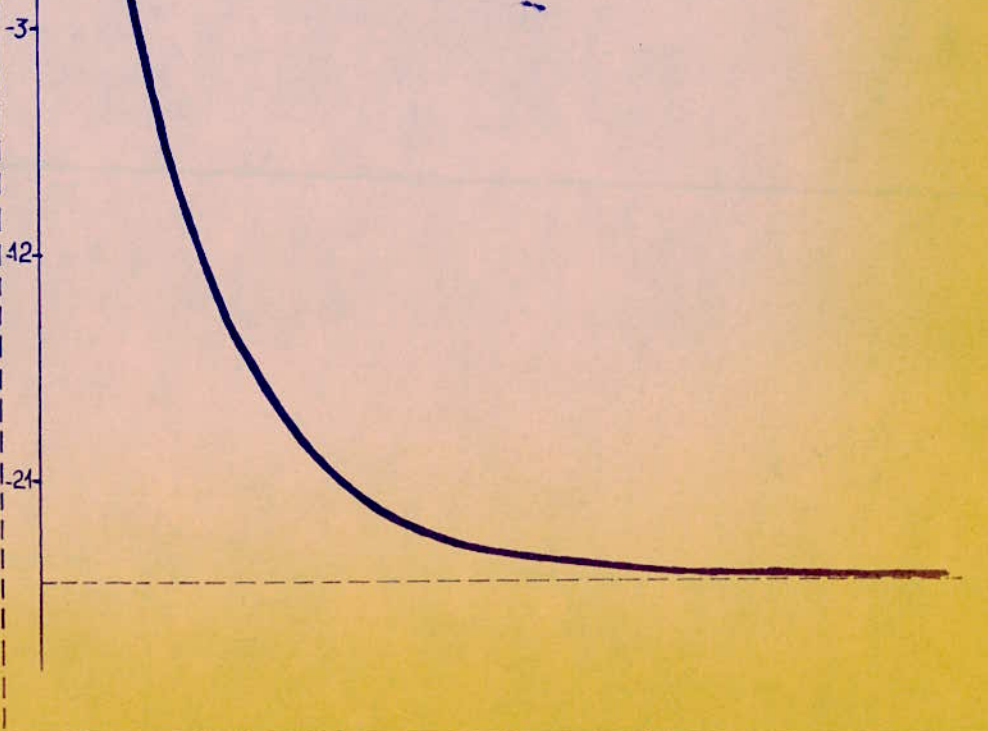
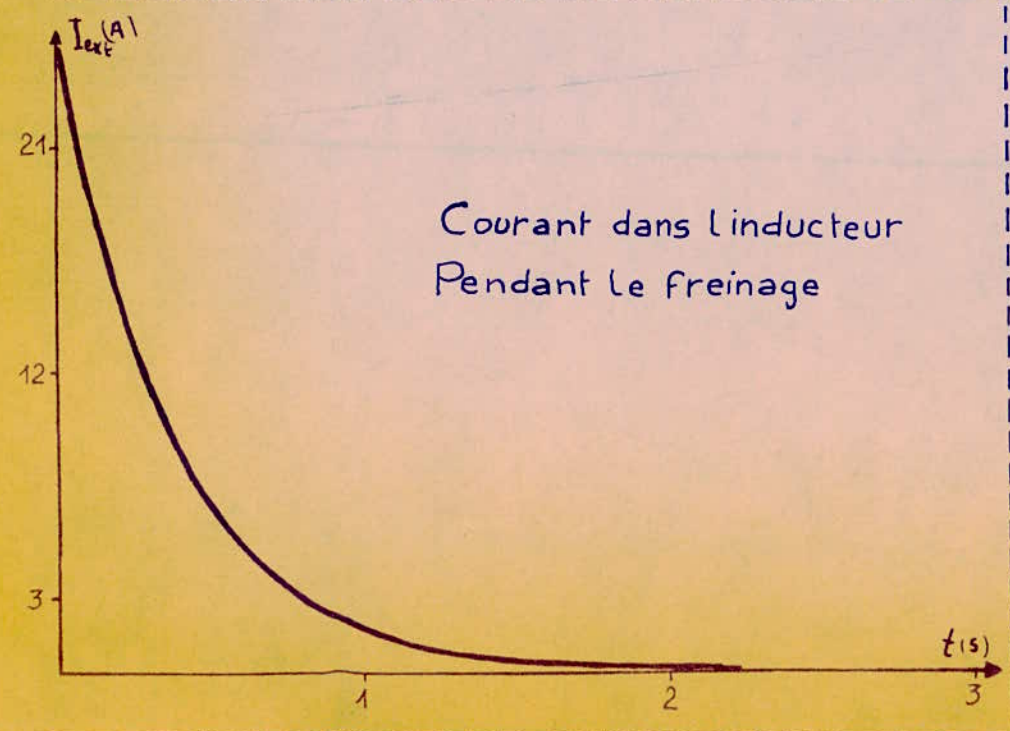
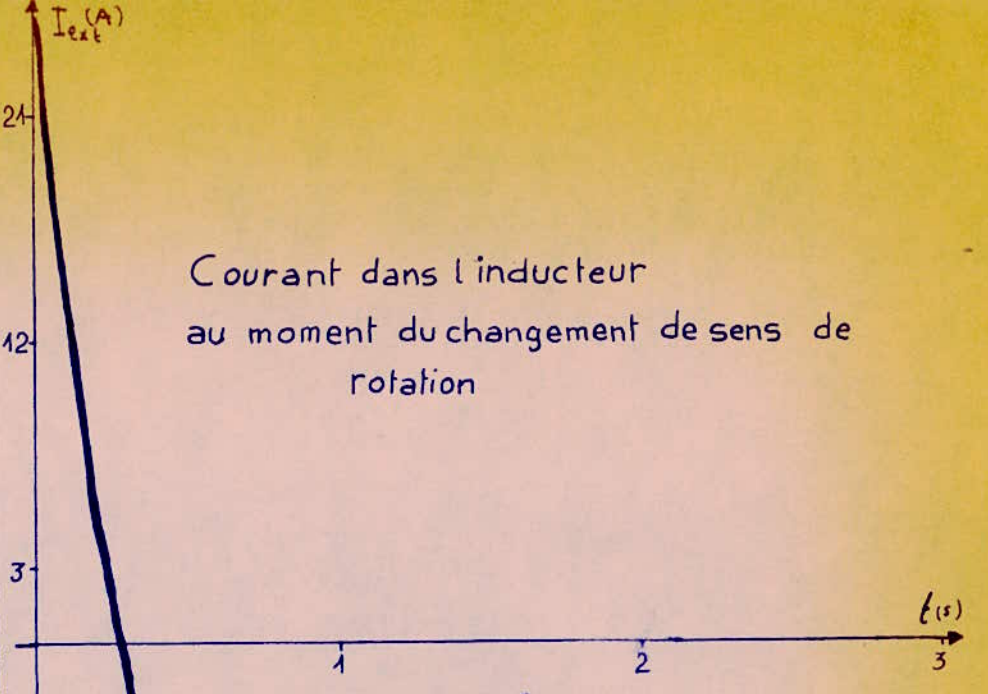
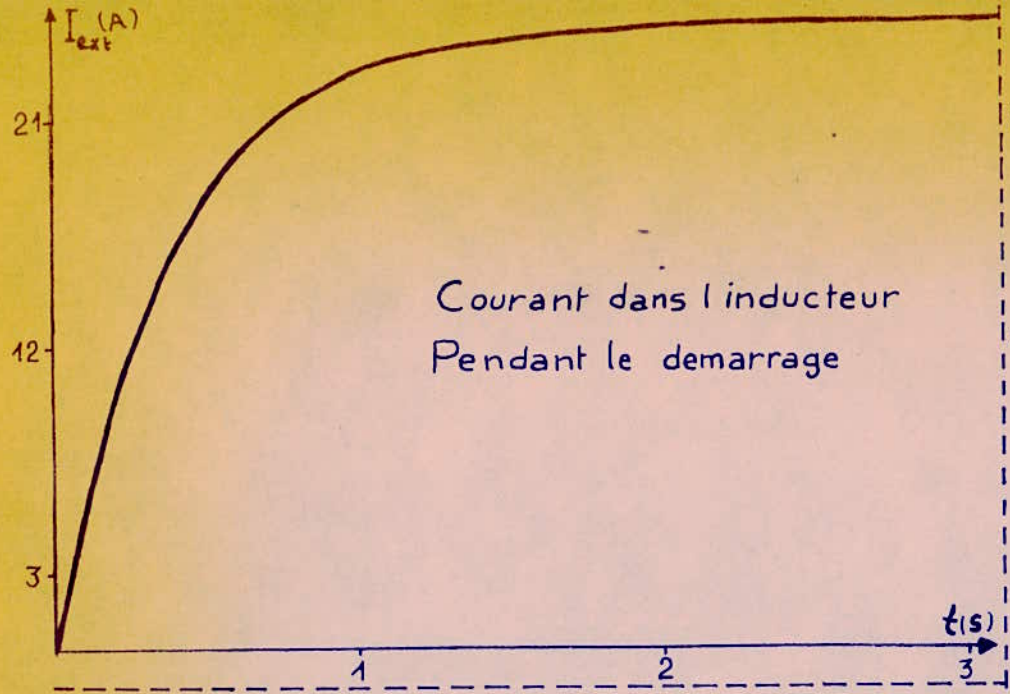
③



(2) RDRESSEUR
EXCITATION (-)







CONCLUSION

La commande à contre réaction est très utilisée et son principe d'auto-régulation est très apprécié. Actuellement, on tend à orienter les recherches dans le domaine vers un gain en temps de réponse, donc vers les constantes de temps des différentes composantes. Un système qui présente de faibles constantes de temps a une fiabilité plus grande et permet ainsi d'avoir une productivité importante.

Une étude comparative des temps de réponses des systèmes à régulation automatique et autres, montre que le gain en temps pour le premier cas est considérable (de l'ordre d'une seconde environ).

Notre cas à une réponse globale de 1,5 s ^{ce qui est} est important on voit que les puissances mises en jeu sont considérables. ~~Avec~~ l'asservissement tension, que nous avons introduit dans le processus de la commande permet d'éviter la rupture de la stabilité et de même amoindrir les chocs mécaniques pour le godet.

Ainsi la commande par groupe G-M outre les quelques avantages cités au chapitre choix du système de commande, permet en plus un travail de chantier de haute productivité.

TABLE DES MATIERES.

I. GENERALITE

- I: Introduction.
- 2: Description de la partie à commander.
- 3: Choix et adaptation du système de commande.
- 4: Système choisi.
- 5: Procédé de déclenchement.

II. CARACTERISTIQUES STATIQUES ET CHOIX DE LA PUISSANCE.

- I Couple statique.
- 2 COUPL^E développé par le moteur. (Godet en l'air).
- 3 Couplage G-M .
- 4 Couple nominal.
- 5 Moment de giration.
- 6 Calcul des temps.
- 7 Couple effectif
- 8 Caractéristique mécanique.
- 9 Plaques signalitiques.

III ETUDE DU SYSTEME CONVERTISSEUR.

- I Calcul de la tension redressée .
- 2 Harmoniques irréguliers.
- 3 Courant continu.
- 4 Coefficient d'ondulation.
- 5 Tension aux bornes des thyristors.
- 6 Etude de la commutation.
- 7 Chutes de tensions.

IV TRANSFORMATEUR DEM COUPLAGE.

- I Primaire
- 2 Secondaire
- 3 Puissances réelle et réactive.

V CHOIX DES THYRISTORS ET DU TRANSFORMATEUR.

- I Courant de branche.
- 2 Chutes de tensions.
- 3 Calcul des inductances.
- 4 Choix des thyristors.
- 5 Calcul des angles de retard à l'amorçage et de la commutation.

6 Choix du transformateur.

VI PROTECTION DU SYSTEME.

I Protection contre les surintensités.

2 Protection contre les surtensions.

3 Protection individuelle.

VII COMMANDE ET REGULATION.

I Fonctionnement du système.

2 Etude de la stabilité.

3 Coefficient d'amplification et coefficient de la boucle de courant.

4 Régime dynamique.

VIII REGIME TRANSITOIRE.

I Définition.

2 Démarrage.

3 Freinage.

4 Changement de sens de rotation.

CONCLUSION.

§ BIBLIOGRAPHIE. §

M .TCHILIKINE :

Cours de commande électrique T I et 2.

F.MILSANT:

Asservissements Linéaires.

P.NASLIN :

Technologie et calcul pratique des systèmes asservis.

J.H.BAUDOT :

Les machines Electriques en automatique appliquée.

M.DEMONTVIGNIER:

Soupapes Electriques (redresseurs onduleurs)

T I & 3

P.BARRET :

Régimes transitoires.

M.MOUNIC:

Semi-conducteurs Tomes I et 2.

R -CHAUPRADE:

Commandes électriques des moteurs à courant continu.

. Cours de Mr ZAALANE:

Controle industriel.

RevueS soviétiques:

Machino-Export Moskva V-330.

M.PELEGRIIN:

Théorie et calcul des asservissements linéaires.

A.

free but my suitcases
et mes deux valises passés ensemble.

Mokhtar.