

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

20x



PROJET DE FIN D'ETUDE

CONTRIBUTION A L'ETUDE ET A LA SIMULATION DES MACHINES SYNCHRONES : ETUDE DE LA STABILITE

Proposé et suivi par M. RAJAGOPALAN

Soutenu par M. GUENANE M.

Président du jury M. STRYAPAN

Membres du jury MM. DE FORNEL

LE DOEUFF

RAJAGOPALAN

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'EL-HARRACH

PROJET

CONTRIBUTION A L'ETUDE ET A LA SIMULATION DES MACHINES SYNCHRONES

ETUDE DE LA STABILITE

Proposé et suivi par M^r RAJAGOPALAN

Soutenu par M^r M. GUENANE

Président du jury M^r STRYAPAN

Membres du jury MM ~~LE~~ FOMEL

LE DOEUFF

RAJAGOPALAN

Années scolaires 1968- 1973.

Qu'il me soit permis de remercier M^{er} STRYAPAN président du jury ainsi que MM DE FORNEL , LE DOEUFF ,RAJAGOPALAN membres du jury pour avoir bien voulu suivre avec attention ce exposé.

Je remercie aussi tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je tins tout particulièrement à remercier M^r RAJAGOPALAN pour ses idées, ses critiques,ses suggestions,ses encouragements et pour m'avoir suivi de près tout le long de ce projet .

A ma femme ,

A ma famille qui a contribué matériellement de près ou de loin à ma formation ,

A mes chers parents qui, malgré analphabètes, se sont privés durant des périodes souvent difficiles pour pouvoir assurer la continuation de mes études .

M. GUENANE



SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1
DESCRIPTION, NOTATIONS, CONVENTIONS DE SIGNES.....	2
EQUATIONS DE FONCTIONNEMENT LIANT LES TENSIONS AUX COURANTS	4
REGIME PERMANENT SYNCHRONE, LIMITS DE STABILITE STATIQUE	6
ANALYSE SIMPLIFIEE DE LA STABILITE DYNAMIQUE EN NEGLIGEANT L'AMORTISSEMENT, PERTURBATION DE GRANDE AMPLITUDE	10
ANALYSE APPROFONDIE DE LA STABILITE A FREQUENCE VARIABLE A L'AIDE DE LA SIMULATION DYNAMIQUE SUR L'ORDINATEUR DIGITAL EN TENANT COMPTE DES ENROULEMENTS AMORTISSEURS	13
CONCLUSION	22
BIBLIOGRAPHIE	30

INTRODUCTION

L'apparition des convertisseurs statiques font contrôler pratiquement la vitesse d'une machine asynchrone ou synchrone.

Par la commande de la fréquence des tensions appliquées, une grande gamme de vitesses ont été successivement mises en oeuvre en utilisant les machines d'induction(1) et les machines synchrones à réluctance variable(2). Cependant, il a été montré que durant le fonctionnement à fréquence basse des deux procédés le système électromécanique est légèrement amorti et dans le cas de la machine synchrone à réluctance variable le système peut même devenir instable (2).

Dans toutes les applications où la vitesse peut être précisément contrôlée ou bien où le système électromécanique peut répondre rapidement aux variations du couple de charge, il est souhaitable d'employer la machine synchrone. En outre depuis que la machine synchrone peut être commandée convenablement par unité de facteur de puissance, le problème de commutation et la décroissance découlant du rendement est atténuée. Par conséquent, dans les applications futures où les milieux de fonctionnement défavorables ne sont pas rencontrés, la machine synchrone peut prendre une importance croissante.

Pour étudier la machine synchrone et le procédé de la/variation de vitesse, il est important d'établir une série d'équations (Equations de PARK), qui permettront l'analyse de la stabilité d'une machine synchrone quelque soit sa vitesse.

Bien que les études de l'oscillation libre ou de l'instabilité d'une machine synchrone ont été déjà effectuées, les approximations faites dans ces études ne sont pas valables aux basses fréquences(3)

L'analyse de la stabilité de la machine synchrone est établie en employant le critère de stabilité de NYQUIST(4). Cette méthode a permis d'établir les zones d'instabilité et de stabilité d'une machine synchrone: c'est à dire est-ce qu'un point de fonctionnement soumis à une perturbation est stable ou instable ?

Tandis que la méthode utilisée par les auteurs(4) n'est applicable que pour les perturbations de petites amplitudes, le calcul du régime transitoire étant fait sur un calculateur analogique; l'étude que nous nous proposons au cours de ce projet est de calculer non seulement le régime transitoire lors d'une perturbation (soit de petite amplitude ou d'un échelon plus important) mais aussi d'établir les zones d'instabilité et de stabilité (à l'aide d'un calculateur digital) en utilisant un critère qui dépend de l'évolution du couple électromagnétique suivant la perturbation. D'ailleurs ce critère est bien connu et est utilisé dans le calcul de la stabilité des réseaux électriques(5).

Ceci nous conduit à établir les équations de fonctionnement de la machine synchrone en tenant compte des notations et conventions de signes préalablement adoptées. Le calcul du fonctionnement de la machine synchrone en régime établi étant fait sur un ordinateur digital, nous permet d'en déduire la limite de stabilité statique quelque soit la fréquence.

Un rappel sur l'analyse simplifiée de la stabilité dynamique en négligeant les enroulements amortisseurs suit(6).

L'analyse approfondie de la stabilité est accomplie en simulant le couple électromagnétique développé, pendant le régime transitoire.

L'effet de la tension d'excitation et de la tension appliquée est développé en détail.

I: DESCRIPTION, NOTATIONS, CONVENTIONS DE SIGNES

1.1: DESCRIPTION

Nous considérons une machine synchrone bipolaire à induit fixe et inducteur tournant. Une telle machine (fig.1.1) comporte une seule paire de pôles pourvue d'un enroulement inducteur; les grandeurs relatives à l'inducteur seront affectées de l'indice f. L'axe polaire, orienté de gauche à droite, est appelé axe direct O_d ; l'axe à 90° en arrière dans le sens trigonométrique est appelé axe en quadrature O_q .

La vitesse angulaire de rotation ω_r de l'inducteur est comptée positivement dans le sens trigonométrique. Sur l'induit (stator) sont bobinés 3 enroulements d'axes O_a, O_b, O_c ; la position de ces axes sera repérée par rapport au rotor de la machine (axe O_d), considérée comme origine des angles et les angles géométriques seront comptés positivement dans le sens trigonométrique.

Les axes des phases occupent donc les positions angulaires:

$$\theta_a = \theta_r ; \theta_b = \theta_r + \frac{2\pi}{3} ; \theta_c = \theta_r + 4\pi/3$$

L'ordre naturel des phases est a, b, c.

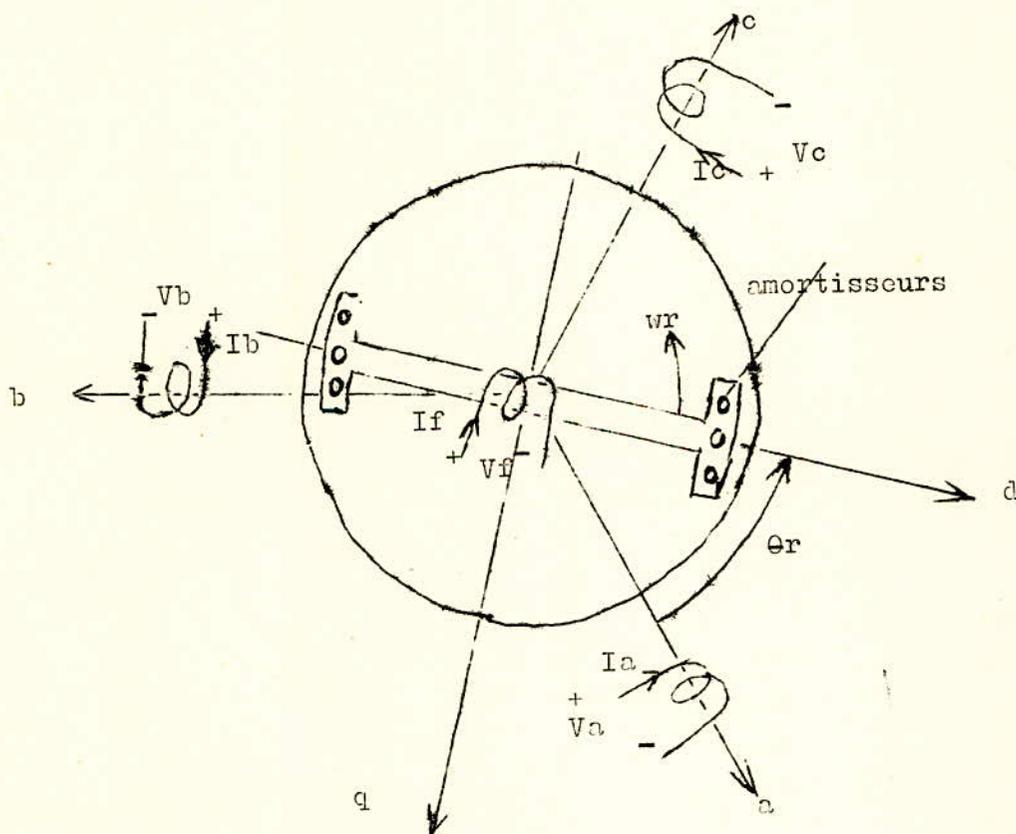
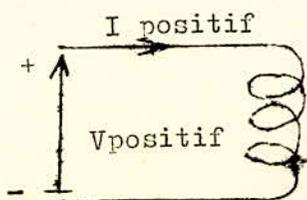


Fig.1.1: MACHINE SYNCHRONE

1.2: CONVENTIONS DE SIGNES



un courant positif crée un flux positif

I.3: NOTATIONS

d, q	Axes direct et quadrature de la machine synchrone
Φ_{ds}, Φ_{qs}	Flux totaux embrassés suivant les axes d et q relatifs aux enroulements statoriques, (pu)
Φ_{kd}, Φ_{kq}	Flux totaux embrassés suivant les axes d et q relatifs aux enroulements amortisseurs, (pu).
Φ_{fd}	Flux total embrassé suivant l'axe d relatif à l'enroulement rotorique (inducteur), (pu).
V_{fd}, I_{fd}	Tension et courant suivant l'axe d relatif à l'enroulement rotorique, (pu).
$V_{kd} = V_{kq} = 0$	Amortisseurs en court circuit
I_{kd}, I_{kq}	Courants suivant les axes d et q relatifs aux enroulements amortisseurs.
$E_i = \frac{V_{fd} X_{ad}}{R_{fd}}$	Tension d'excitation, (pu).
V	Tension appliquée, (pu).
$X_{ls}, X_{lfd}, X_{lkd}, X_{lkq}$	Inductances de fuite suivant les axes d et q relatifs aux enroulements statoriques, rotoriques et amortisseurs, (pu).
X_{ad}, X_{aq}	Inductances mutuelles sur les axes d et q, (pu).
$R_s, R_{fd}, R_{kd}, R_{kq}$	Résistances relatives aux enroulements statorique, inducteur, amortisseurs équivalentes suivant les axes d et q.
ω_r	Fréquence angulaire électrique instantanée, (rad/s).
$\omega_e = 376,8$	Constante choisie convenablement pour calculer les réactances en pu, (rad/s).
δ	Angle de charge entre la tension appliquée et l'axe de l'inducteur (axe d).
P_n	Puissance nominale par paire de pôles.
H	Constante d'inertie en KWs/KVA = $\frac{J(\frac{2}{n})}{P_n}$
T_e	Couple électromagnétique instantané développé sur l'arbre de la machine, (pu).
t	Temps en secondes
p	Opérateur différentiel, d/dt.

I.4: HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

a) Chaque enroulement du stator est réparti de telle façon à produire une F.M.M. sinusoïdale le long de l'entrefer.

b) Les rainures du stator produisent des variations négligeables dans les inductances du rotor.

c) La saturation du circuit magnétique et les courants de FOUCAULT sont négligés: cette hypothèse entraîne que les flux sont toujours proportionnels aux F.M.M. qui les produisent et qu'il est possible de considérer un flux résultant comme la somme des flux produits séparément par plusieurs F.M.M.

d) Les circuits amortisseurs, liés à l'inducteur, présentent une constitution symétrique par rapport à l'axe direct et par rapport à l'axe en quadrature, par suite de l'indépendance du point de vue magnétique entre ces 2 axes, on décompose le circuit amortisseur en 2 circuits, en court circuit l'un et l'autre, l'un sur l'axe direct (indice kd), l'autre sur l'axe en quadrature (indice kq).

2.1: EQUATIONS DE PARK

Dans la série des 4 équations de Park, les courants et les tensions statoriques sont ramenés à une référence fixée au rotor de la machine. En somme pour trouver les paramètres des enroulements statoriques il est de coutume de se référer aux paramètres des enroulements rotoriques multipliés par une constante proportionnelle au rapport de rotation.

Compte tenue des notations, conventions de signes et des hypothèses simplificatrices adoptées nous aboutissons aux équations de fonctionnement de la machine synchrone:

$$V_{qs} = \frac{1}{\omega_c} (p \dot{\Phi}_{qs} + \dot{\delta} \psi_{qr}) + R_s I_{qs} \quad (1)$$

$$V_{ds} = \frac{1}{\omega_c} (p \dot{\Phi}_{ds} - \dot{\delta} \psi_{qr}) + R_s I_{ds} \quad (2)$$

$$V_{fd} = \frac{p}{\omega_c} \dot{\Phi}_{fd} + R_{fd} I_{fd} \quad (3)$$

$$0 = \frac{p}{\omega_c} \dot{\Phi}_{kd} + R_{kd} I_{kd} \quad (4)$$

$$0 = \frac{p}{\omega_c} \dot{\Phi}_{kq} + R_{kq} I_{kq} \quad (5)$$

Où:

$$\dot{\Phi}_{qs} = X_{qs} I_{qs} + X_{kq} I_{kq} \quad (6)$$

$$\dot{\Phi}_{ds} = X_{ds} I_{ds} + X_{kd} (I_{fd} + I_{kd}) \quad (7)$$

$$\dot{\Phi}_{fd} = X_{fd} I_{fd} + X_{kd} (I_{ds} + I_{kd}) \quad (8)$$

$$\dot{\Phi}_{kd} = X_{kd} I_{kd} + X_{kd} (I_{ds} + I_{fd}) \quad (9)$$

$$\dot{\Phi}_{kq} = X_{kq} I_{kq} + X_{kq} I_{kq} \quad (10)$$

Avec:

$$X_{qs} = X_{ls} + X_{kq}$$

$$X_{ds} = X_{ls} + X_{kd}$$

$$X_{fd} = X_{lfd} + X_{kd}$$

$$X_{kd} = X_{lkd} + X_{kd}$$

$$X_{kq} = X_{lkq} + X_{kq}$$

Ces relations peuvent être aussi prises comme une série d'équations en valeurs réduites (pu) si les équations en tension initiales sont divisées par une tension de base choisie convenablement.

Les équations (1)-(10) nous suggère le circuit équivalent de la Fig. 2.1, ainsi que de figurer la machine synchrone par la machine équivalente de la Fig. 2.2, dans laquelle les bobinages d et q sont des bobinages fictifs tournant à la vitesse $\omega_r = p \omega_r$.

L'expression du couple électromagnétique instantané est obtenu en employant le principe du déplacement arbitraire.

Le couple en pu peut être exprimé comme suit:

$$T_e = \dot{\Phi}_{ds} I_{qs} - \dot{\Phi}_{qs} I_{ds} \quad (11)$$

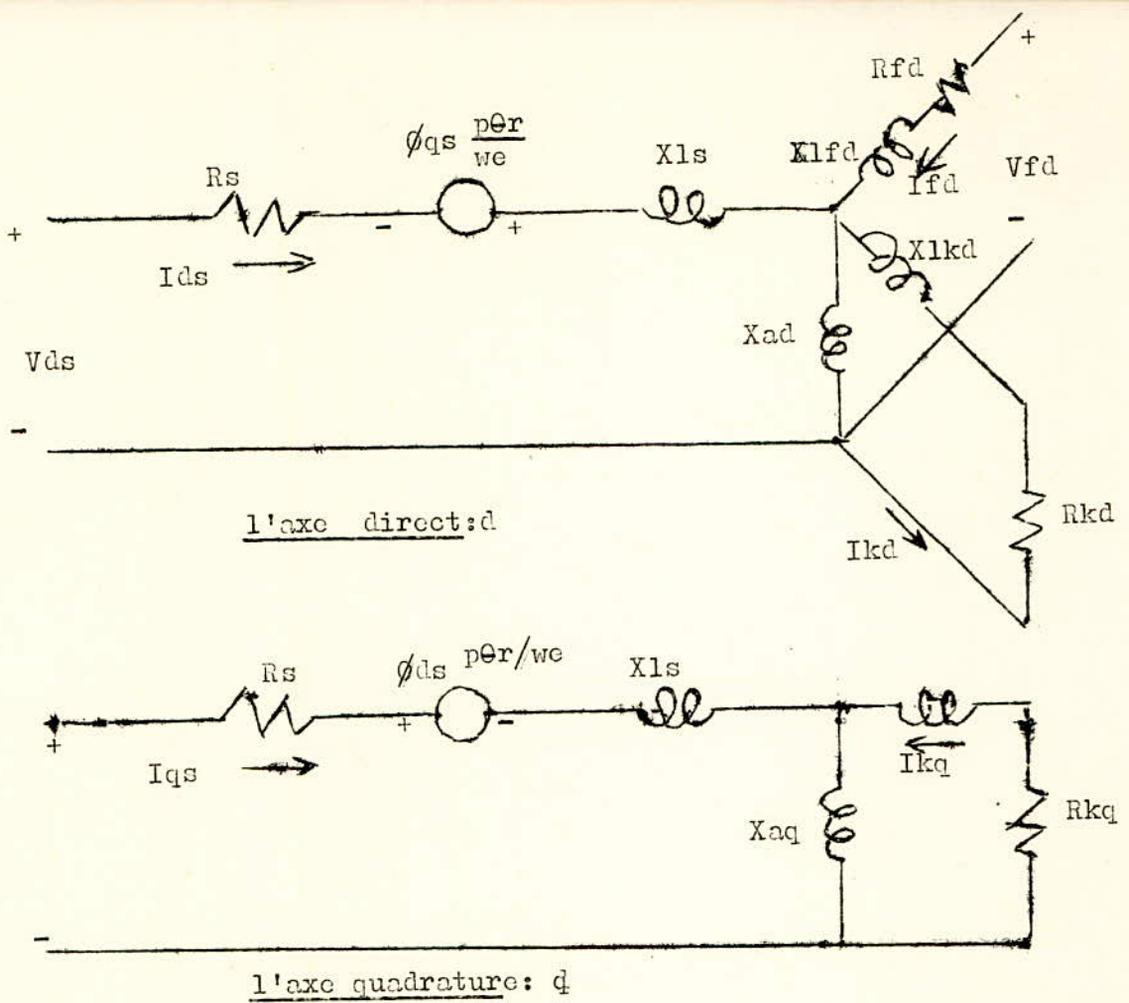


FIGURE 2.1: CIRCUITS EQUIVALENTS DES AXES d et q D'UNE MACHINE SYNCHRONNE, LA REFERENCE (l'axe) ETANT FIXEE AU ROTOR

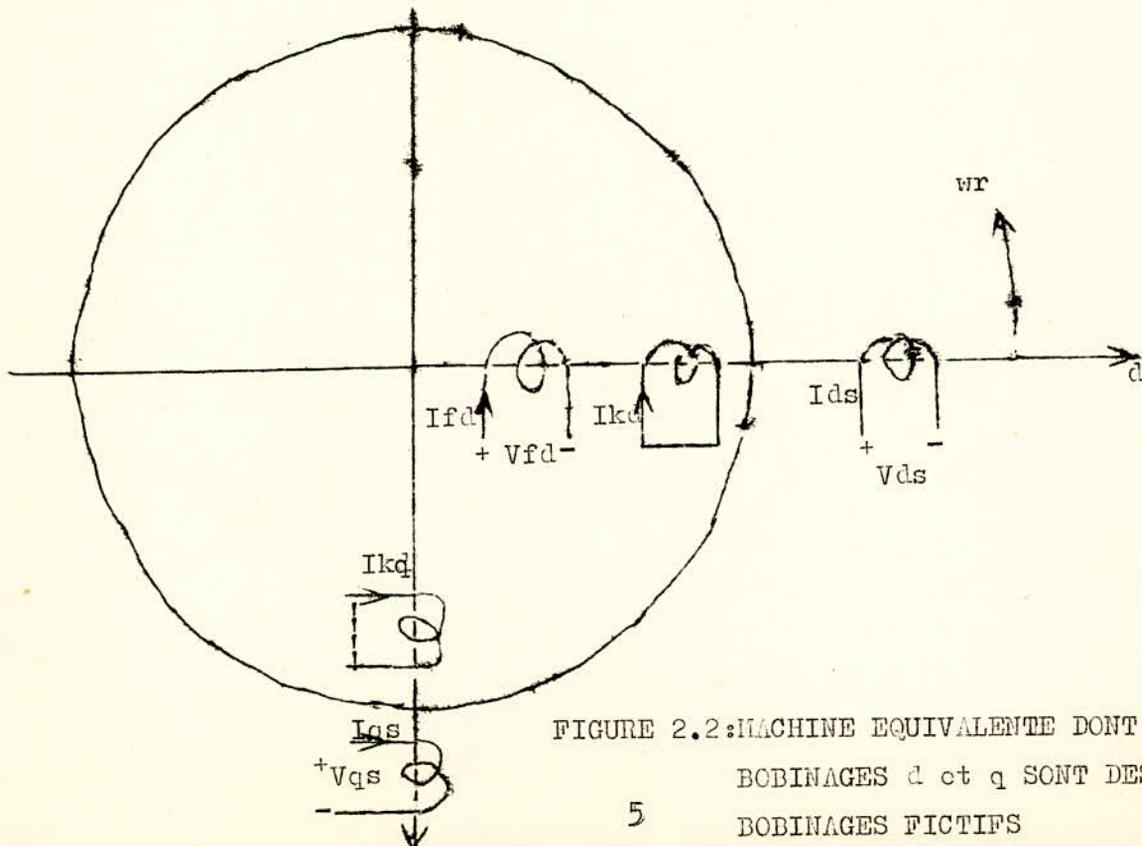


FIGURE 2.2: MACHINE EQUIVALENTE DONT LES BOBINAGES d et q SONT DES BOBINAGES FICTIFS

2.2: EQUATIONS DE FONCTIONNEMENT LIANT LES TENSIONS AUX COURANTS

Pour cela il suffit d'éliminer le flux dans les équations (1)-(5)
Les équations en tension peuvent être mises sous la forme matricielle (12)

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ 0 \\ V_{ds} \\ V_{fd} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_e} X_{aq} & \frac{p}{\omega_e} X_{aq} & \frac{W_r}{\omega_e} X_{ds} & \frac{W_r}{\omega_e} X_{ad} & \frac{W_r}{\omega_e} X_{ad} \\ \frac{p}{\omega_e} X_{aq} & R_{kq} + \frac{p}{\omega_e} X_{kq} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{W_r}{\omega_e} X_{qs} & -\frac{W_r}{\omega_e} X_{aq} & R_s + \frac{p}{\omega_e} X_{ds} & \frac{p}{\omega_e} X_{ad} & \frac{p}{\omega_e} X_{ad} \\ 0 & 0 & \frac{p}{\omega_e} X_{ad} & R_{fd} + \frac{p}{\omega_e} X_{fd} & \frac{p}{\omega_e} X_{ad} \\ 0 & 0 & \frac{p}{\omega_e} X_{ad} & \frac{p}{\omega_e} X_{ad} & R_{kd} + \frac{p}{\omega_e} X_{kd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{kq} \\ I_{ds} \\ I_{fd} \\ I_{kd} \end{bmatrix}$$

III REGIME PERMANENT SYNCHRONE , LIMITE DE LA STABILITE STATIQUE

3.1: EQUATIONS DE FONCTIONNEMENT

En régime permanent, les amortisseurs immobiles par rapport au champ tournant ne sont parcourus par aucun courant.

Les grandeurs électriques étant de pulsation ω_r , les quantités $V_{ds}, V_{qs}, I_{ds}, I_{qs}, I_{fd}, I_{kd}$ sont des constantes. Il en résulte que tous les termes en p disparaissent, à l'exception de $p\theta$ qui devient ω_r .

D'où les équations de fonctionnement en régime établi:

$$V_{qso} = V \cos(\delta_o) = Fr(X_{ds} I_{dso} + X_{ad} I_{fdo}) + R_s I_{qso} \quad (13)$$

$$V_{dso} = V \sin(\delta_o) = -Fr X_{qs} I_{qso} + R_s I_{dso} \quad (14)$$

$$V_{fdo} = R_{fd} I_{fdo} \quad (15)$$

$$T_{eo} = (X_{ds} - X_{qs}) I_{dso} I_{qso} + X_{ad} I_{fdo} I_{qso} \quad (16)$$

L'indice (o) caractérise le régime de fonctionnement permanent. Pendant ce régime l'angle de charge (décalage du rotor) δ_o et le rapport de fréquence Fr sont définis, comme suit:

Rappelant que θ_r représente la position angulaire de l'inducteur par rapport à l'axe de la phase (a), immobile dans l'espace. Quelle que soit la loi de variation de θ_r avec le temps, on peut toujours écrire:

$$\theta_r = \omega_r t + f(t)$$

$f(t)$ étant une fonction du temps, constante dans le cas particulier du régime permanent.

Dans ce cas particulier cette constante est justement égale à δ_o .

$$\delta_o = \theta_r - \omega_r t \quad (17)$$

$$Fr = \omega_r / \omega_e \quad (18)$$

Le couple électromagnétique développé sur l'arbre étant supposé positif en fonctionnement moteur implique que l'angle rotorique δ_o est négatif dans ce fonctionnement. La vitesse angulaire électrique de base ω_e est une constante choisie convenablement pour calculer les réactances en 'pu'. Dans cette étude $\omega_e = 376,8 \text{ rad/s}$ qui correspond à la fréquence 60Hz.

Il est évident que le rapport de fréquence Fr dépend non seulement de la valeur de la vitesse angulaire électrique mais aussi de la tension appliquée au stator et que Fr devient l'unité lorsque cette vitesse est égale à ω_e .

3.2: LIMITE DE STABILITE STATIQUE

3.2.1: Expression du couple en régime permanent en fonction de δ_0 :

L'amplitude de la tension appliquée est supposée variable et est une fonction linéaire de la fréquence.

$$V = FrVm \quad (19)$$

E_i est défini comme la tension d'excitation en 'pu' et est exprimée comme:

$$E_i = Vf_{do} X_{ad} / R_{fd} \quad (20)$$

Compte tenu de (15) nous aurons:

$$I_{fdo} = E_i / X_{ad} \quad (21)$$

En remplaçant I_{fdo} et V par leur valeur dans les équations (13) et (14) nous aurons :

$$I_{qso} = \frac{(V \cos \delta_0 - E_i) R_s / Fr - V m X_{ds} \sin \delta_0}{\det qd} \quad (22)$$

$$I_{dso} = \frac{Fr V m \sin \delta_0 + Fr X_{qs} ((V \cos \delta_0 - E_i) R_s / Fr - V m X_{ds} \sin \delta_0) / \det qd}{R_s} \quad (23)$$

Avec : $\det qd = (R_s / Fr)^2 + X_{ds} X_{qs}$

Pour trouver l'expression du couple T_{eo} en fonction de δ_0 , il suffit de remplacer I_{fdo} , I_{dso} , I_{qso} par leur valeur dans l'expression du couple

$$T_{eo} = (X_{ds} - X_{qs}) I_{dso} I_{qso} + X_{ad} I_{fdo} I_{qso} \quad (24)$$

La condition de stabilité statique naturelle est connue (7). En respectant les conventions de signes adoptées, elle s'écrit:

$$\frac{dT_{eo}}{d\delta_0} < 0$$

Lorsque δ_{sol} est supérieur à la limite δ_{or} correspondant au maximum de couple que l'on peut avoir pour Fr donnée, le fonctionnement est naturellement instable.

Exemple de calcul du fonctionnement en régime permanent $T_{eo}(\delta_0)$

Nous reprenons la même machine que (4) ceci pour vérifier les résultats, c'est à dire nous considérons une machine synchrone à 2 pôles, 3 phases dont les paramètres en 'pu' correspondants sont :

$R_s = 0,09$	$X_{ls} = 0,14$	$X_{aq} = 0,71$	$E_i = 1,0$
$R_{kd} = 0,10$	$X_{lkq} = 0,10$	$X_{ad} = 1,50$	$V_m = 1,0$
$R_{kq} = 0,05$	$X_{lkq} = 0,05$	$H = 1,0$	
$R_{fd} = 0,01$	$X_{lfd} = 0,40$		

3.2.2: Organigramme de calcul (Annexe A)

3.2.3: Programme (Annexe B)

Le couple en régime établi en fonction de l'angle rotorique δ_0 pour Fr donnée est représenté sur la Fig(3.1)

$$0,5 \leq Fr \leq 1,0$$

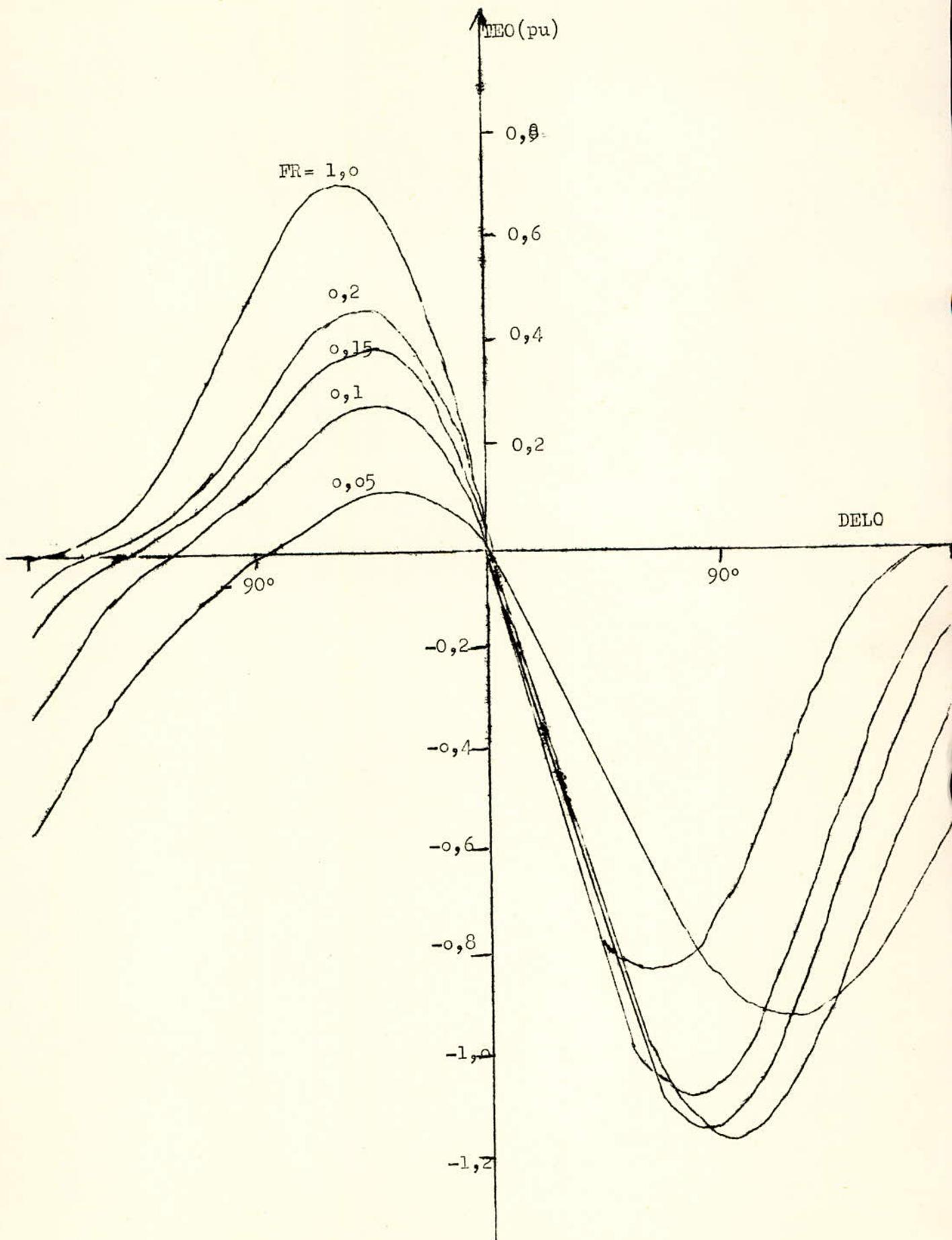


FIGURE 3.1: CARACTERISTIQUES DU COUPLE TEQ (DELO) : REGIME PERMANENT

Nous relevons le couple maximum pour Fr donnée avec les valeurs correspondantes de l'angle de charge dans le tableau suivant:

Fr	fonctionnement moteur		fonctionnement alternateur	
	de α (°)	Te α (pu)	de α (°)	Te α (pu)
0,05	-40	0,105	110	-0,933
0,10	-40	0,276	90	-1,173
0,15	-50	0,389	80	-1,142
0,20	-50	0,466	80	-1,084
0,25	-50	0,517	70	-1,033
0,30	-50	0,554	70	-0,998
0,35	-50	0,581	70	-0,970
0,40	-50	0,602	70	-0,946
0,45	-50	0,618	70	-0,927
0,50	-60	0,632	70	-0,912
0,55	-60	0,645	70	-0,898
0,60	-60	0,655	70	-0,887
0,65	-60	0,664	70	-0,877
0,70	-60	0,672	70	-0,869
0,75	-60	0,679	70	-0,862
0,80	-60	0,685	60	-0,856
0,85	-60	0,690	60	-0,851
0,90	-60	0,695	60	-0,847
0,95	-60	0,699	60	-0,844
1,00	-60	0,702	60	-0,840

Ces valeurs de couple maximum correspondent à la limite de stabilité statique naturelle représentée par la courbe en pointillé de la Fig. (5.2).

IV : ANALYSE SIMPLIFIEE DE LA STABILITE DYNAMIQUE EN NEGLIGEANT L'AMORTISSEMENT : PERTURBATION DE GRANDE AMPLITUDE

Le problème peut se schématiser de la façon suivante : la machine synchrone est dans un régime permanent une perturbation brusque, dont nous donnerons deux exemples, étant appliquée à un instant donné, l'angle δ va se mettre à varier. Ce régime est oscillatoire, mais si l'angle δ dépasse une certaine valeur, le synchronisme est perdu. Cette possibilité résulte de la loi périodique qui caractérise le couple de rappel $T_e(\delta)$.

L'équation simplifiée du mouvement en négligeant l'amortissement dû aux frottements et aux enroulements amortisseurs s'écrit donc :

$$Tl = -\frac{2H}{We} p^2 \delta + T_e(\delta) \quad (4.1)$$

$T_e(\delta)$ est obtenu en remplaçant δ_0 par δ dans l'expression du couple (24)

$$H = J \frac{2\pi n^2}{60}$$

4.1 : PREMIER EXEMPLE DE PERTURBATION: SURCHARGE BRUSQUE DE LA MACHINE

La machine synchrone est, dans un régime permanent, raccordée à une source de tension d'amplitude et de fréquence invariable. Nous supposons que pour une raison quelconque la puissance sur l'arbre de la machine augmente brusquement. Nous prendrons comme exemple le cas d'un moteur, mais le cas d'un alternateur se traiterait de façon analogue. Le régime de départ est caractérisé par l'intersection de l'horizontale T_{l01} avec la courbe $T_e(\delta)$ Fig. (4.1), d'où l'angle δ_{01} sur la partie stable de la caractéristique. Le régime initial est donc caractérisé par l'égalité : $T_{l01} = T_e(\delta_{01})$

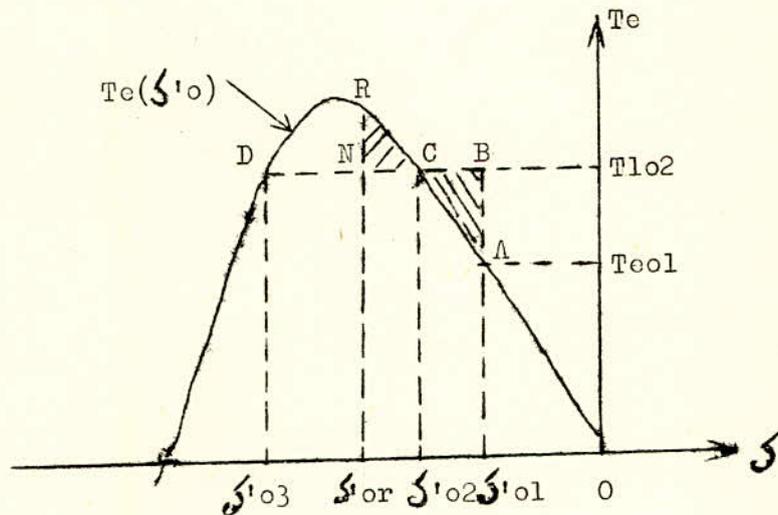


FIG:4.1 $T_e(\delta)$

Si à l'instant initial le couple résistant prend brusquement la valeur $T_{l02} > T_{l01}$, l'angle δ_0 ne pouvant varier instantanément, il y a excès du couple résistant sur le couple moteur, qui est toujours $T_e(\delta_{01})$. Cet excès est caractérisé par le segment \overline{AB} , et est justement d'après (4.1) égal au couple d'inertie $-\frac{2H}{We} p^2 \delta_0$. La machine tend à se déaccélérer, la dérivée $p\delta_0$ commencera à décroître à partir de la valeur zéro.

L'angle $\delta'o$ diminuant, on voit sur le graphique que l'écart entre les courbes $Tlo2$ (horizontale du couple résistant) et $Te(\delta'o)$ du couple moteur diminue et tend à s'annuler au point C correspondant à l'angle $\delta'o2$. En C, les deux couples sont égaux, donc d'après (4.1) l'accélération est nulle: $p\delta'o$ passe alors par un minimum, et par conséquent $\delta'o$ continue à décroître. Mais alors le couple moteur $Te(\delta'o)$ devient supérieur à $Tlo2$, l'accélération devient positive, $p\delta'o$ se met à croître.

D'où le critère de stabilité :

Si $p\delta'o$ a pu atteindre la valeur nulle avant le point D, par exemple si elle s'annule en R correspondant à l'angle $\delta'or$, l'accélération étant toujours positive, $\delta'o$ après avoir passé par le minimum $\delta'or$ croît et le mouvement est pendulaire. L'oscillation se fait autour du nouveau point d'équilibre C et s'amortit grâce à l'amortissement que nous avons négligé. $\delta'o$ atteint la valeur $\delta'o2$. Par contre, si $p\delta'o$ est encore négative (bien-que croissante) lorsque on atteint le point D, le point D est dépassé et l'accélération redevient négative: $p\delta'o$ ne peut plus s'annuler et $\delta'o$ décroît indéfiniment, lesynchronisme est perdu.

La limite de stabilité correspond au cas où, par suite de l'augmentation brusque du couple à la valeur $Teo2$, l'angle rotorique $\delta'o$ atteint au bout de la première demi-oscillation la valeur $\delta'o3$, abscisse de l'intersection de l'horizontale $Tlo2$ avec la partie montante de $Te(\delta'o)$.

Recherchons l'intégrale première du mouvement, qui nous fournira une expression mathématique du critère de stabilité.

L'équation du mouvement s'écrit d'après (4.1)

$$p^2\delta'o = (Te(\delta'o) - Tlo2) We / 2H$$

Multiplicant les deux membres par $p\delta'o$, on peut alors intégrer entre l'instant $t = to$, où $\delta'o$ a la valeur $\delta'o1$ et l'instant t , où $\delta'o$ a la valeur $\delta'o$.

$$\left[\frac{1}{2} (p\delta'o)^2 \right]_{to}^t = \frac{We}{2H} \int_{\delta'o1}^{\delta'o} (Te(\delta'o) - Tlo2) d\delta'o \quad (4.2)$$

Le deuxième membre figure l'aire algébrique comprise entre les courbes $Tlo2 = Cte$ et $Te(\delta'o)$, et les verticales $\delta'o1$ et $\delta'o$.

L'abscisse maximale $\delta'or$ est atteinte au temps tr telle que $p\delta'o$ soit à nouveau nulle, ce qui correspond à l'annulation du premier membre (4.2), $p\delta'o$ étant nulle à l'instant $t = to$. L'angle $\delta'or$ atteint au bout de la première oscillation est donc donné par l'équation :

$$\frac{We}{2H} \int_{\delta'o1}^{\delta'or} (Te(\delta'o) - Tlo2) d\delta'o = 0$$

L'angle $\delta'or$ est donc tel que l'aire algébrique CBACNRC soit nulle, donc que les aires arithmétiques ABC et CNR soient égales (aires hachurées sur la Fig. 4.1). Il y a retour au synchronisme si $\delta'or$ est au plus égal à $\delta'o3$. Par conséquent, $Tlo2$ ne peut dépasser la valeur donnée par l'équation où cette fois $Tlo2$ est l'inconnue :

$$\frac{We}{2H} \int_{\delta'o1}^{\delta'o3} (Te(\delta'o) - Tlo2) d\delta'o = 0$$

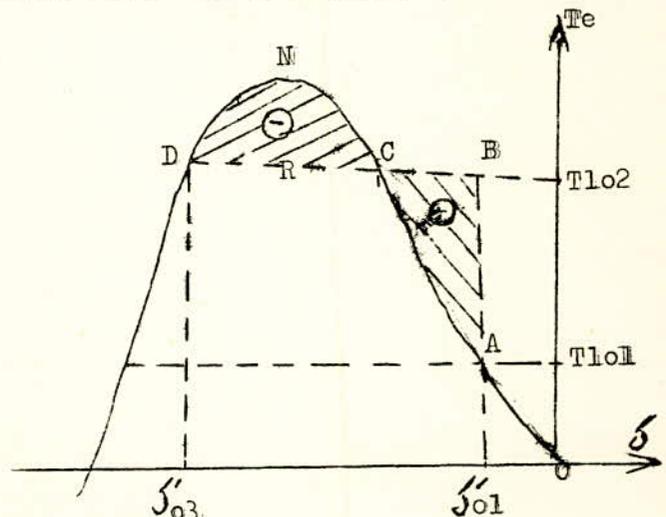


FIG. 4.2

Graphiquement, on est amené à déterminer l'horizontale $(Tlo2)_{lim.}$ qui entraîne l'égalité des aires arithmétiques ABC et CNR Fig(4.2). $(Tlo2)_{lim.}$ dépend de $\delta'o$ donc de $Tlo1$ ce qui est assez évident.

4.2 : DEUXIEME EXEMPLE DE PERTURBATION: DIMINUTION BRUSQUE DE LA FREQUENCE

L'état initial (toujours dans le cas d'un moteur) est caractérisé de la même manière qu'en (4.1), par l'intersection de l'horizontale T_{l01} avec la courbe $T_{e1}(\delta'_{o1})$ déterminée à partir des conditions électriques initiales à la fréquence Fr_1 : Après une brusque diminution de la fréquence d'alimentation $T_e(\delta'_{o1})$ devient $T_{e2}(\delta'_{o1})$ à la fréquence Fr_2 . La tension appliquée étant $V=FrV_m$

Nous aurons: $V_1=Fr_1V_m$ $V_2=Fr_2V_m$

Comme Fr_2 est inférieur à Fr_1 , V_2 est aussi inférieur à V_1 et $T_{e2}(\delta'_{o1})$ est inférieur à $T_{e1}(\delta'_{o1})$.

Loi du mouvement après la perturbation est donnée par:

$$T_{l01} = - \frac{2H}{\omega_e} p^2 \delta'_{o1} + T_{e2}(\delta'_{o1})$$

Nous sommes ramenés presque identiquement au problème précédent. A l'instant initial, l'angle, ne pouvant varier instantanément, a la valeur δ'_{o1} , il y a excès du couple résistant T_{l01} sur le couple moteur $T_{e2}(\delta'_{o1})$, cet excès étant caractérisé par le segment \overline{BA} , proportionnel d'après (4.1) à l'accélération angulaire, et à tout instant ultérieur l'accélération sera mesurée par l'écart T_{l01} et la courbe $T_{e2}(\delta'_{o1})$.

La conclusion est la même que précédemment: le régime sera pendulaire amorti, avec retour en régime permanent correspondant à l'équilibre $T_{l01}=T_{e2}(\delta'_{o1})$ (point C), à condition que l'aire CRDNC soit au plus égale à l'aire BAC.

Dans le cas de la Fig. (4.3), l'angle minimal atteint au cours de la première oscillation est δ'_{or} tel que les aires ABC et CKL soient arithmétiquement égales; le régime est stable, puisque l'aire ABC=aire CKL qui est inférieure à l'aire CRDNC.

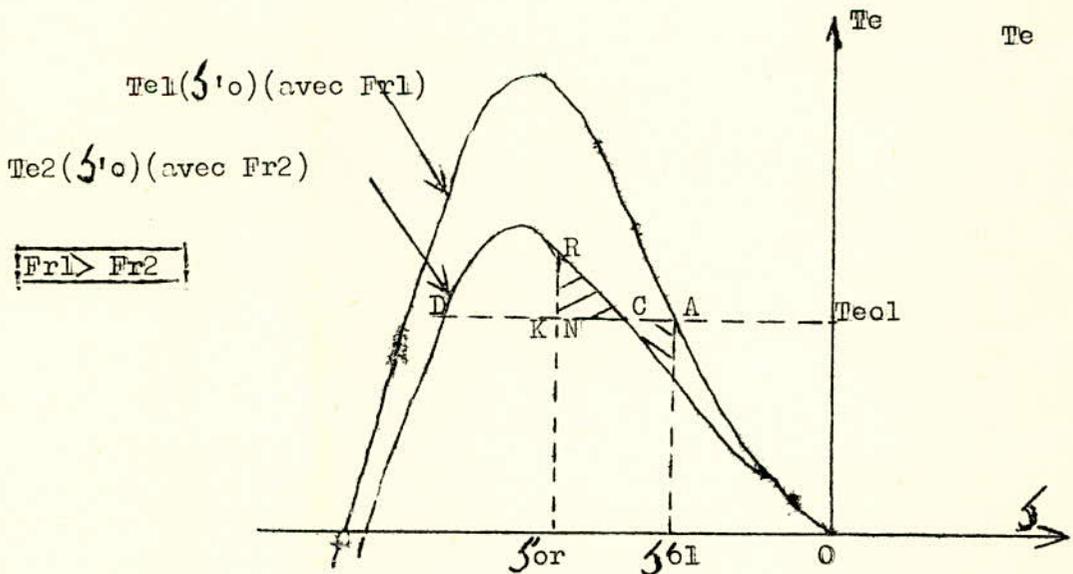


FIG.4.3: VARIATION BRUSQUE DE LA FREQUENCE

V: ANALYSE APPROFONDIE DE LA STABILITE A FREQUENCE VARIABLE A L'AIDE DE LA SIMULATION DYNAMIQUE SUR L'ORDINATEUR DIGITAL EN TENANT COMPTE DES ENROULEMENTS AMORTISSEURS

Dans l'analyse précédente nous avons supposé qu'en régime transitoire:
 -l'angle de charge varie sans que la vitesse varie notablement.
 -les flux ne varient pas rapidement d'où la négligeance des termes $p\Phi$ devant $\dot{\Phi}$.
 -l'amortissement qui pendant les régimes transitoires a une influence telle qu'il est impossible de le négliger.

L'étude que nous nous proposons est de ne tenir compte d'aucune des suppositions ci-dessus.

La machine synchrone est dans un régime permanent, on lui applique une perturbation: le couple électromagnétique instantané ainsi que l'angle de charge varient. En simulant ce régime et en calculant numériquement les solutions, il est possible de relever les caractéristiques du couple et de l'angle de charge en fonction du temps. La stabilité ou l'instabilité de la machine dépend de l'évolution du couple: le régime est stable si le couple converge et instable dans le cas contraire.

5.1: EQUATIONS DIFFERENTIELLES EN COURANT

Pour cela il suffit de reprendre les équations générales de fonctionnement de la machine sous la forme matricielle (12) et d'en déduire les équations différentielles en courant (pI_{qs}, pI_{kq}, \dots) correspondantes.

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ 0 \\ V_{ds} \\ V_{fd} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{qs}/\omega_e & X_{aq}/\omega_e & 0 & 0 & 0 \\ X_{aq}/\omega_e & X_{kq}/\omega_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{ds}/\omega_e & X_{ad}/\omega_e & X_{ad}/\omega_e \\ 0 & 0 & X_{ad}/\omega_e & X_{fd}/\omega_e & X_{ad}/\omega_e \\ 0 & 0 & X_{ad}/\omega_e & X_{ad}/\omega_e & X_{kd}/\omega_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} pI_{qs} \\ pI_{kq} \\ pI_{ds} \\ pI_{fd} \\ pI_{kd} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} R_s & 0 & \omega_r X_{ds}/\omega_e & X_{ad}\omega_r/\omega_e & X_{ad}\omega_r/\omega_e \\ 0 & R_{kq} & 0 & 0 & 0 \\ X_{qs}\omega_r/\omega_e & -X_{aq}\omega_r/\omega_e & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{kq} \\ I_{ds} \\ I_{fd} \\ I_{kd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} pIqs \\ pIkq \\ pIds \\ pIfd \\ pIkd \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xqs/We & Xaq/We & 0 & 0 & 0 \\ Xaq/We & Xkq/We & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Xds/We & Xad/We & Xad/We \\ 0 & 0 & Xad/We & Xfd/We & Xad/We \\ 0 & 0 & Xad/We & Xad/We & Xkd/We \end{bmatrix} -1$$

$$\begin{bmatrix} Vqs - RsIqs - (XdsIds + XadIfd + XadIkd)Wr/We \\ -RkqIkq \\ Vds - RsIds + (XqsIqs + XaqIkq)Wr/We \\ Vfd - RfdIfd \\ - RkdIkd \end{bmatrix}$$

On pose:

$$Q = 1/We \begin{bmatrix} Xqs & Xaq \\ Xaq & Xkq \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad D = 1/We \begin{bmatrix} Xds & Xad & Xad \\ Xad & Xfd & Xad \\ Xad & Xad & Xkd \end{bmatrix}$$

La matrice à inverser est donc:

$$\begin{bmatrix} [Q] & [0] \\ [0] & [D] \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} [Q]^{-1} & [0] \\ [0] & [D]^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y11 & Y12 & 0 & 0 & 0 \\ Y21 & Y22 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y33 & Y34 & Y35 \\ 0 & 0 & Y43 & Y44 & Y45 \\ 0 & 0 & Y53 & Y54 & Y55 \end{bmatrix}$$

En appelant $\det q$ et $\det d$ les déterminants des matrices respectives D et Q

$$\det q = \frac{XqsXkq - Xaq^2}{We} \quad \det d = \frac{XdsXfdXkd - (Xds + Xfd + Xkd - 2Xad)Xad^2}{We}$$

Nous trouvons:

$$\begin{aligned} Y11 &= Xkq/\det q & ; & & Y12 &= -Xaq/\det q & ; & & Y21 &= Y12 & ; & & Y22 &= Xqs/\det q \\ Y33 &= (XfdXkd - Xad^2)/\det d & ; & & Y43 &= Y34 & ; & & Y55 &= (XdsXfd - Xad^2)/\det d \\ Y34 &= (Xad^2 - XadXad)/\det d & ; & & Y44 &= (XdsXkd - Xad^2)/\det d & ; & & Y53 &= Y35 \\ Y35 &= (Xad^2 - XfdXad)/\det d & ; & & Y45 &= (Xad^2 - XdsXad)/\det d & ; & & Y54 &= Y45 \end{aligned}$$

D'autre part en posant:

$$V_{11} = V_{qs} - \frac{W_r}{W_c} (X_{ds}I_{ds} + X_{ad}I_{fd} + X_{kd}I_{kd}) - R_s I_{qs}$$

$$V_{21} = - R_{kq} I_{kq}$$

$$V_{31} = V_{ds} + \frac{W_r}{W_c} (X_{qs}I_{qs} + X_{aq}I_{kq}) - R_s I_{ds}$$

$$V_{41} = V_{fd} - R_{fd} I_{fd}$$

$$V_{51} = - R_{kd} I_{kd}$$

Nous aboutissons à la matrice des équations différentielles en courant:

$$\begin{bmatrix} pI_{qs} \\ pI_{kq} \\ pI_{ds} \\ pI_{fd} \\ pI_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ 0 & 0 & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ 0 & 0 & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \\ V_{31} \\ V_{41} \\ V_{51} \end{bmatrix}$$

D'où les équations complètes de fonctionnement de la machine synchrone en régime transitoire:

$$pI_{qs} = Y_{11}V_{11} + Y_{12}V_{21}$$

$$pI_{kq} = Y_{21}V_{11} + Y_{22}V_{21}$$

$$pI_{ds} = Y_{33}V_{31} + Y_{34}V_{41} + Y_{35}V_{51}$$

$$pI_{fd} = Y_{43}V_{31} + Y_{44}V_{41} + Y_{45}V_{51}$$

$$pI_{kd} = Y_{53}V_{31} + Y_{54}V_{41} + Y_{55}V_{51}$$

$$pW_r = W_r - W_{ro} \quad \text{CNS}$$

$$pW_r = (T_e - T_1)W_r/2H$$

$$T_e = I_{ds} ((X_{ds} - X_{qs})I_{qs} - X_{aq}I_{kq}) + X_{ad}I_{qs}(I_{fd} + I_{kd})$$

5.2.4 METHODE DE RESOLUTION DES EQUATIONS DIFFERENTIELLES

Elles peuvent être résolues soit par la méthode de Runge-Kutta (4^e ordre) soit par la méthode de Newton (tangente améliorée). La méthode que nous avons employé est celle de Newton.

Les conditions initiales sont caractérisées par l'indice (1).

Exemple de calcul pour I_{qs} :

$$t_1 \quad I_{qs1}, I_{kq1}, I_{ds1}, I_{fd1}, I_{kd1}, \int_1, T_{e1} \quad \text{Temps Conditions initiales}$$

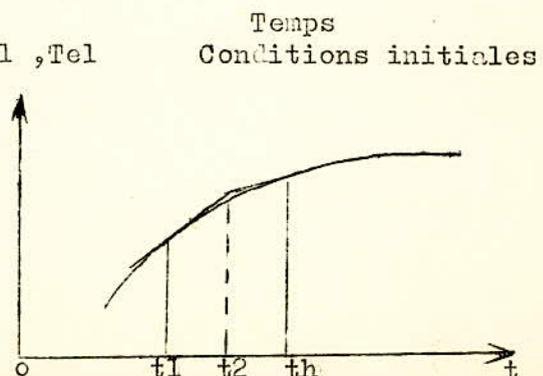
$$pI_{qs1} = f(I_{qs1}, I_{kq1}, \dots, W_{r1})$$

$$I_{qs2} = I_{qs1} + pI_{qs1} \Delta t/2$$

$$t_2 = t_1 + \Delta t/2$$

$$pI_{qs2} = f(I_{qs2}, I_{kq2}, \dots, W_{r2})$$

$$I_{qsh} = I_{qs1} + pI_{qs2} \Delta t$$



5.3: CRITERE DE STABILITE

La machine fonctionne initialement en régime permanent avec un couple développé Te_0 , nous lui appliquons une perturbation ($Te_0 - T_1$) telle que T_1 est supérieur à Te_0 .

Le couple en fonction du temps est oscillatoire
 Le régime est STABLE si le couple est OSCILLATOIRE AMORTI Fig.(5.1)
 Le régime est INSTABLE si le couple est OSCILLATOIRE NON AMORTI Fig.(5.1)

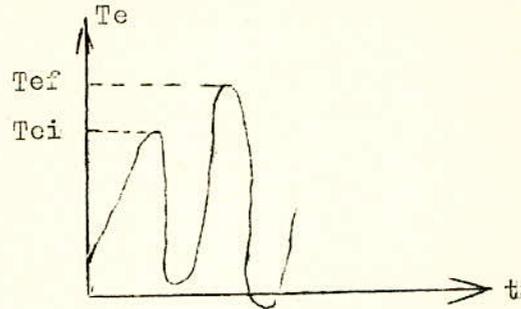
Le critère employé est donc de comparer les deux premiers maximums

Le régime est stable si:

$$T_{ef} - T_{ei} < 0$$

Le régime est instable si:

$$T_{ef} - T_{ei} \geq 0$$



5.4: ORGANIGRAMME DE CALCUL (Annexe C)

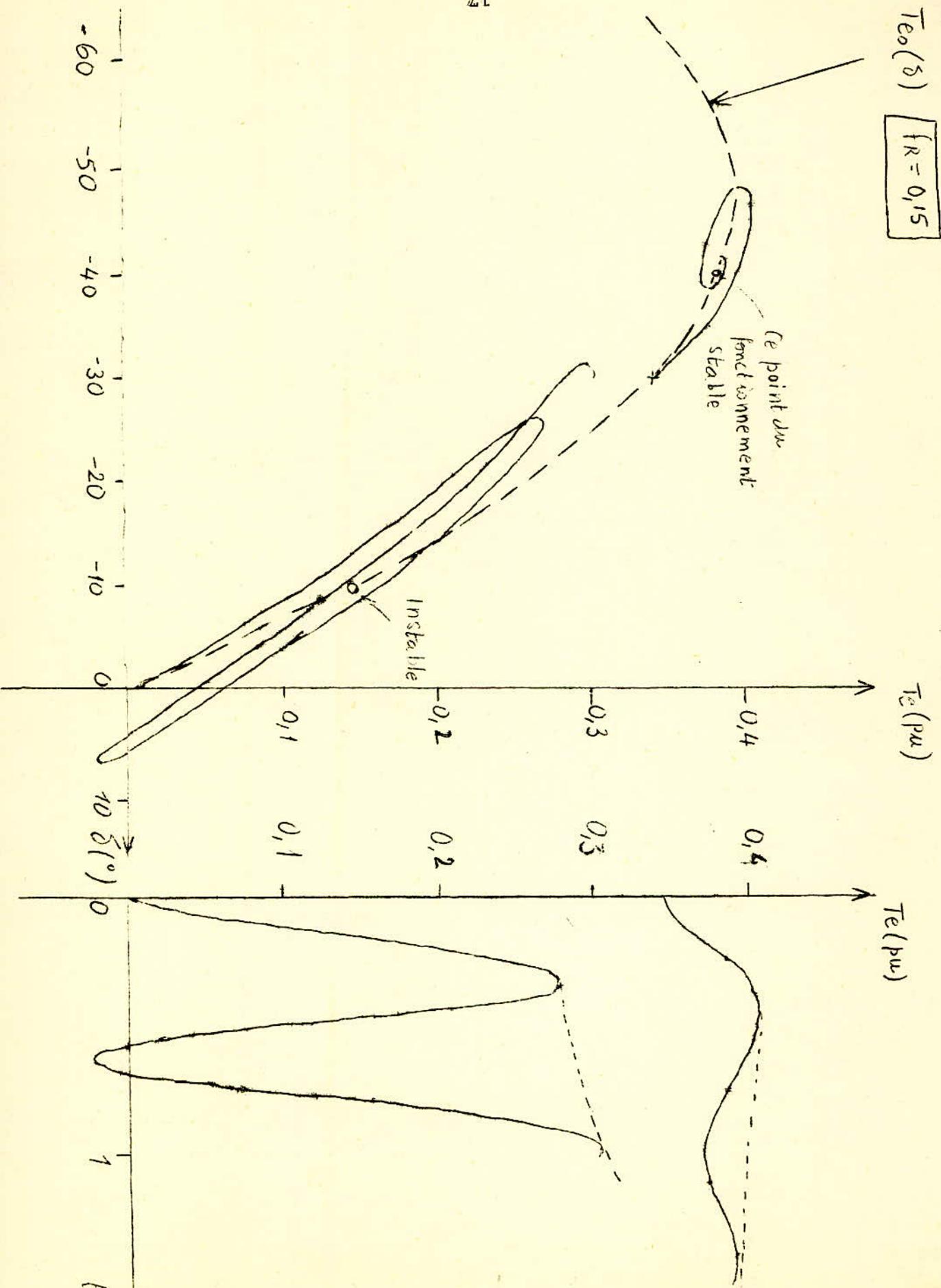
5.5: PROGRAMME (Annexe D)

5.5.1: Premier essai

La zone de stabilité/instabilité est représentée sur la Fig.(5.2)
 Les résultats correspondants sont sous la forme du tableau suivant:
 avec $E_i = 1,0$ et $V_m = 1,0$

Fr	β_0	Te_0	β_1	T_1	régime	Fr	β_0	Te_0	β_1	T_1	régime
0,05	0	0	-10	0,052	I	0,15	-30	0,342	-40	0,383	S
	5	-0,033	0	0	S		-20	0,264	-30	0,342	S
	10	-0,070	5	-0,033	S		-10	0,148	-20	0,264	I
0,075	-10	0,088	-20	0,145	I	0	0	-10	0,148	I	
	0	0	-10	0,088	S	5	-0,084	0	0	I	
	5	-0,053	0	0	I	10	-0,174	5	-0,084	I	
	10	0,112	-0,053	0,053	S	15	-0,267	10	-0,174	S	
0,1	-10	0,115	-20	0,200	I	0,125	-30	0,372	-40	0,421	S
	0	0	-10	0,115	S		-20	0,284	-30	0,372	S
	5	-0,068	0	0	I		-10	0,158	-20	0,284	I
	10	-0,142	5	-0,068	I		0	0	-10	0,158	I
	15	-0,221	10	-0,142	S		5	-0,089	0	0	S
0,125	-30	0,304	-40	0,336	I	0,2	-30	0,395	-40	0,450	S
	-20	0,237	-30	0,304	I		-20	0,300	-30	0,395	S
	-10	0,134	-20	0,237	S		-10	0,166	-20	0,300	S
	0	0	-10	0,134	I		0	0	-10	0,166	S
	5	-0,078	0	0	I						
	10	-0,161	5	-0,078	S						

$$T_{e0}(\delta) \quad \boxed{f_R = 0,15}$$



0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
-0,6

$E_i=1,0$
 $V_m=1,0$

LIMITE DE STABILITE STATIQUE

- o instable
- + stable
- ⊕ stable ?

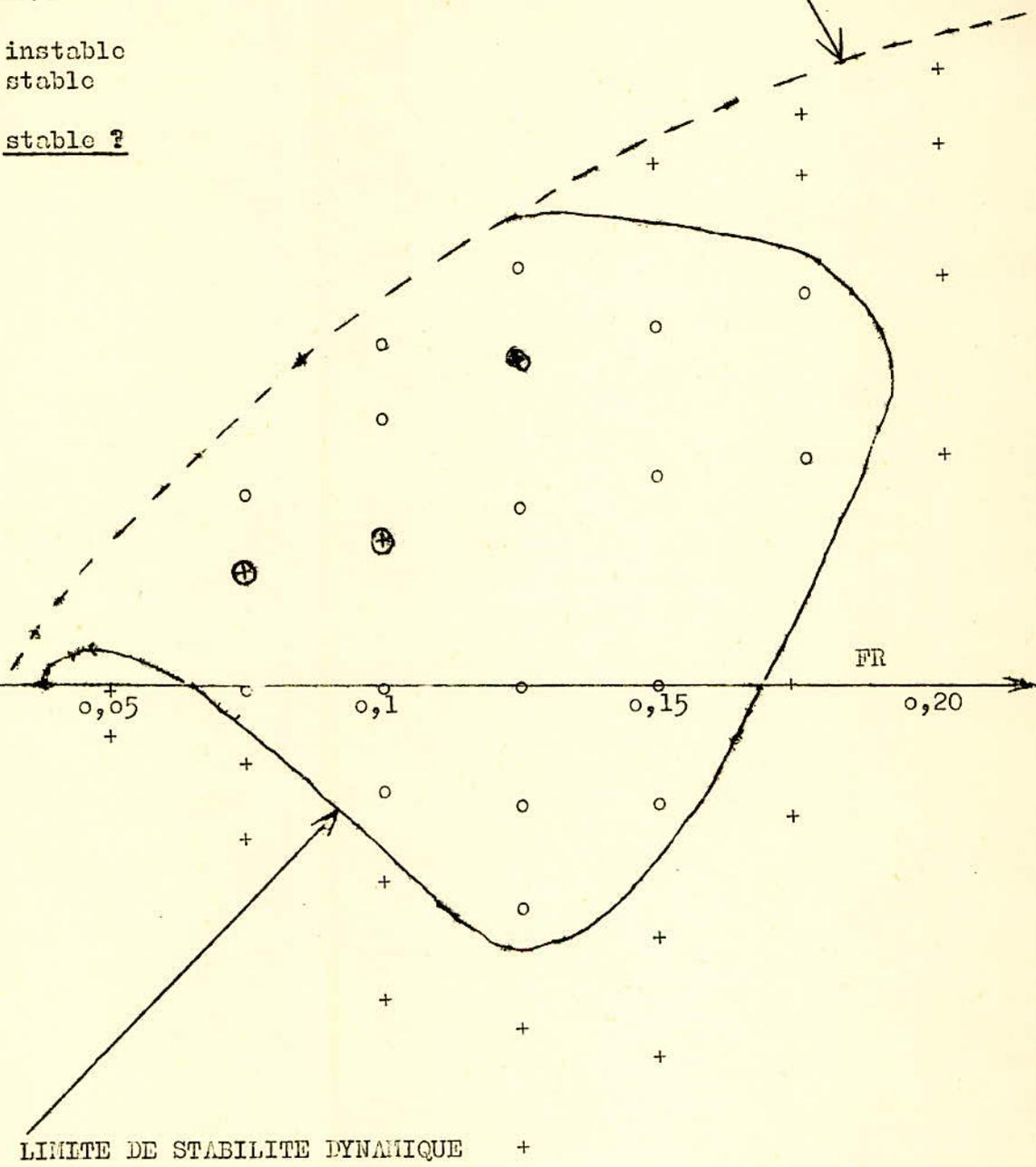


FIGURE 5.2: ZONE DE STABILITE/INSTABILITE

5.5.2: Deuxième essai

La zone de stabilité/instabilité est représentée sur la Fig.(5.3)
 Les résultats correspondants sont sous la forme du tableau suivant:
 avec $Ei = 1,25$ et $Vm = 1,0$

Fr	ζ_0	Teo	ζ_1	Tl	régime	Fr	ζ_0	Teo	ζ_1	Tl	régime
0,05	-20	0	-30	0,028	I	0,15	-30	0,183	-40	0,387	I
	-10	-0,048	-20	0	I		-20	0,221	-30	0,183	S
	-5	-0,080	-10	-0,048	S		-10	0,078	-20	0,221	S
	0	-0,117	-5	-0,080	I		0	-0,098	-10	0,078	I
	5	-0,160	0	-0,117	S		5	-0,197	0	-0,098	I
0,075	-30	0,125	-40	0,153	I	10	-0,302	5	-0,197	I	
	-20	0,070	-30	0,125	I	15	-0,410	10	-0,302	I	
	-10	-0,013	-20	0,070	I	20	-0,520	15	-0,410	S	
	-5	-0,066	-10	-0,013	S	0,175	-30	0,364	-40	0,435	S
	0	-0,126	-5	-0,066	I		-20	0,251	-30	0,364	I
	5	-0,192	0	-0,126	I		-10	0,098	-20	0,251	I
	10	-0,264	5	-0,192	S		0	-0,089	-10	0,098	I
					10		-0,300	0	-0,089	I	
0,100	-30	0,209	-40	0,251	I	20	-0,524	10	-0,300	S	
	-20	0,133	-30	0,209	I	0,200	-30	0,395	-40	0,473	S
	-10	0,023	-20	0,133	I		-20	0,275	-30	0,395	I
	0	-0,119	-10	0,023	S		-10	0,115	-20	0,275	I
	5	-0,202	0	-0,119	I		0	-0,080	-10	0,115	I
	10	-0,290	5	-0,202	I		10	-0,297	0	-0,080	S
	15	-0,384	10	-0,290	S	20	-0,522	10	-0,297	S	
0,125	-20	0,183	-30	0,274	I	0,250	-40	0,529	-50	0,571	S
	-10	0,054	-20	0,183	S		-30	0,441	-40	0,529	S
	0	-0,109	-10	0,054	S		-20	0,309	-30	0,441	S
	5	-0,202	0	-0,109	I		-10	0,136	-20	0,309	S
	10	-0,300	5	-0,202	I		0	-0,067	-10	0,136	S
	15	-0,403	10	-0,300	I	10	-0,290	0	-0,067	S	
	20	-0,509	15	-0,403	S	0,225	-30	0,421	-40	0,503	S
							-20	0,293	-30	0,421	S
					-10		0,126	-20	0,293	S	
					0		-0,073	-10	0,126	S	
					10		-0,294	0	-0,073	S	
					20	-0,522	10	-0,294	S		

6

Ei=1,25
Vm=1,00

- o instable
- + stable
- ⊕ stable ?

4

2

-0,2

-0,4

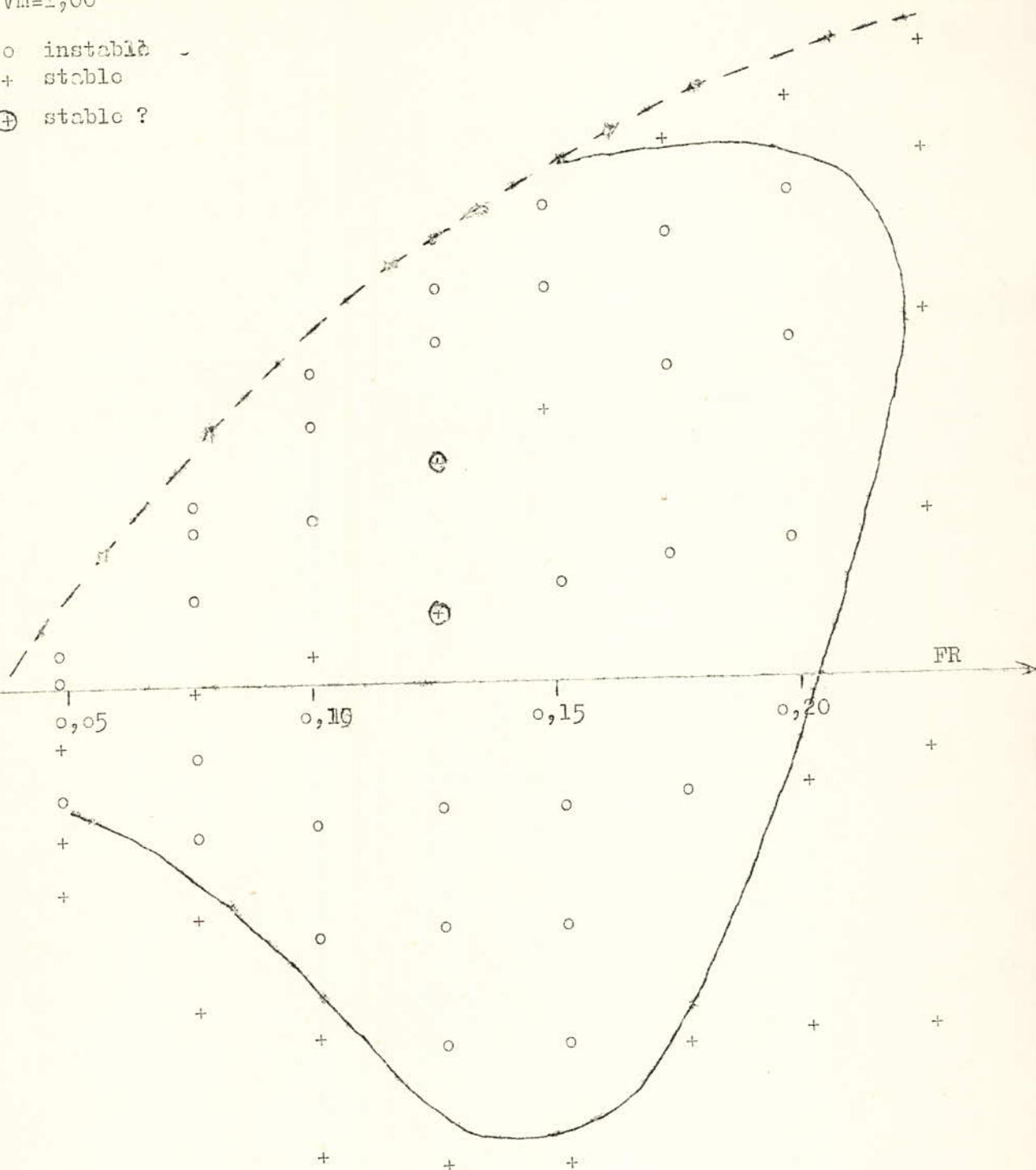


FIGURE 5.3 ZONE DE STABILITE/INSTABILITE

-0,6

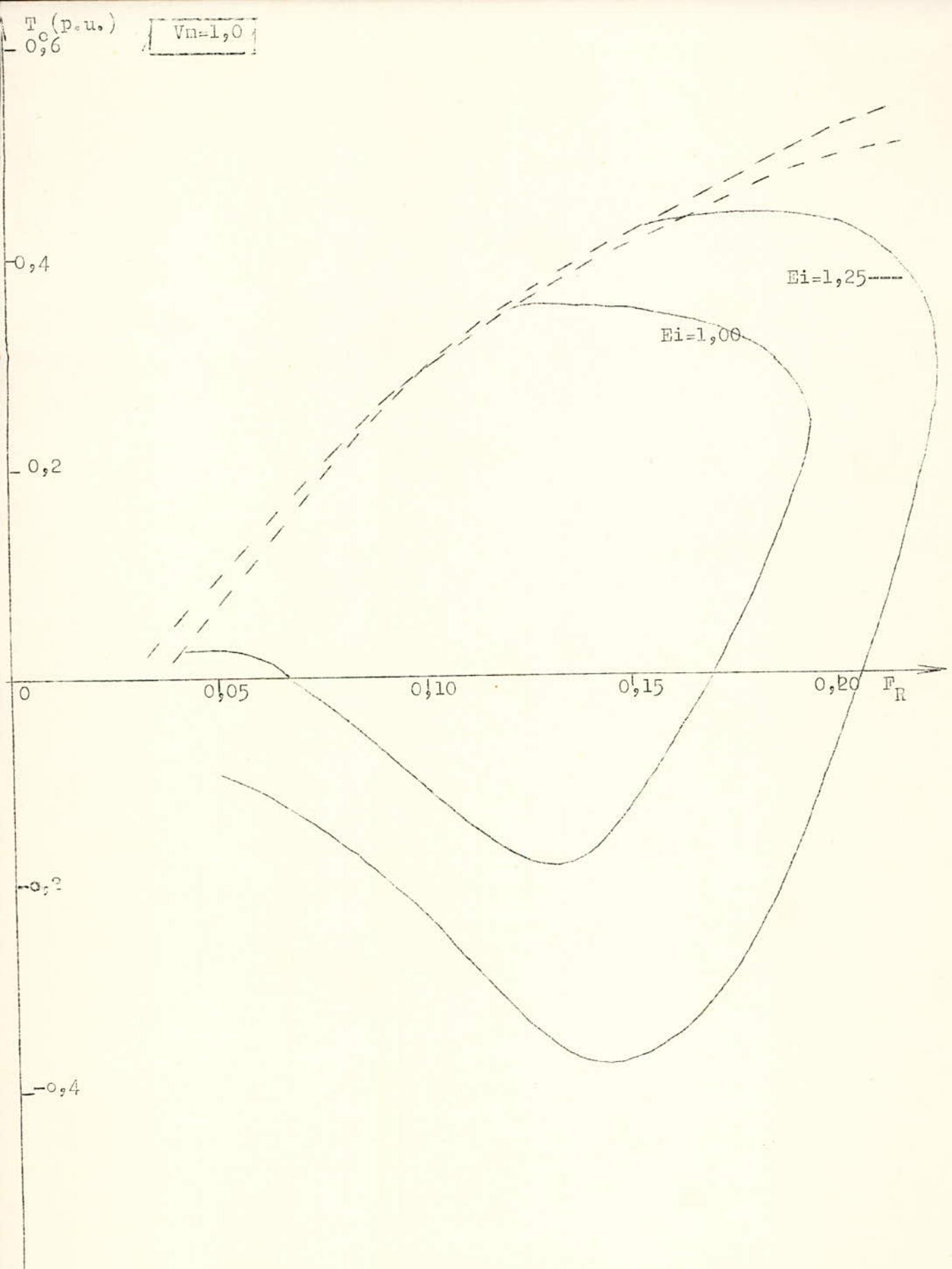


FIGURE:5.4 : INFLUENCE DE LA TENSION D'EXCITATION SUR LA ZONE DE STABILITE

CONCLUSION

au cours de ce travail nous avons cherché à apporter une contribution à l'étude d'une machine synchrone tant qu'en régime permanent qu'en régime transitoire.

Cette étude révèle qu'une machine synchrone peut être instable aux vitesses basses.

L'instabilité de la machine synchrone Fig.(5.4) augmente avec la tension d'excitation tandis qu'elle diminue avec la tension appliquée au stator puisque V décroît linéairement avec Fr , ($V=FrV_n$). Il est à noter que l'augmentation de la tension appliquée sert à stabiliser la machine lorsque la tension d'excitation tend à rendre la machine moins stable.

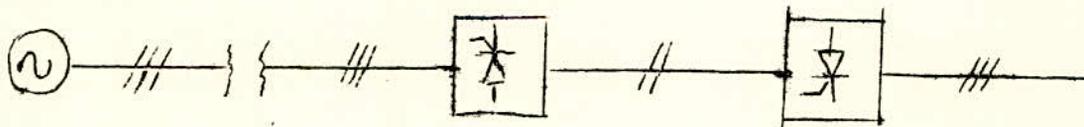
Avec le programme que nous avons développé au cours de ce projet sur l'ordinateur en langage Fortran IV il est possible de calculer l'influence des paramètres (E_i, V, X_{ad}, \dots) de la machine sur la stabilité tant qu'en fonctionnement moteur que générateur.

Les résultats obtenus correspondent à ceux obtenus par les auteurs (4). Cependant un point particulier est à signaler: nous remarquons un point stable (+) entre deux points instables (o) pour le rapport de fréquence $Fr \leq 0,15$. C'est à dire que si l'on applique une perturbation à un point de fonctionnement instable on peut aboutir à un point de fonctionnement stable: ce qui est impossible.

Aussi l'on peut se demander si après un certain temps de calcul le système peut s'avérer instable puisque l'on arrête les calculs après le test des deux premiers maximums.

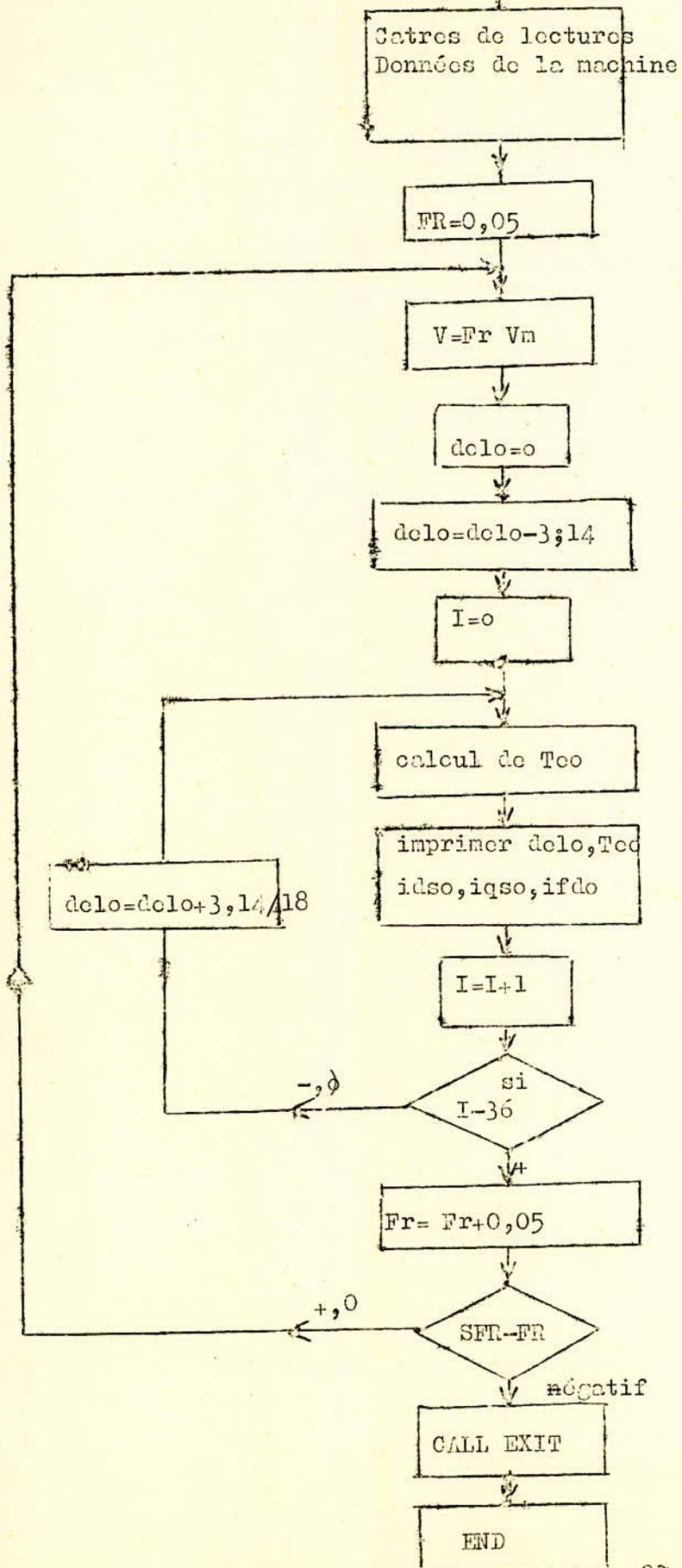
Ou bien alors pour certaines fréquences et pour certains points particuliers les oscillations du couple devenant très grandes les équations différentielles deviennent non linéaires ce qui empêche toute analyse rigoureuse avec les hypothèses simplificatrices que nous avons adoptées.

Le modèle que nous avons utilisé, en partant des équations de PARK, pourrait être également utile pour le calcul d'une machine synchrone fonctionnant en alternateur alimentant une ligne de transmission d'énergie à courant continu par l'intermédiaire d'un redresseur.



L'étude du groupe; machine synchrone -redresseur -ligne à CC - onduleur-réseau alternatif et en particulier l'étude de la stabilité du fonctionnement de ce système est un problème très important à envisager. Il serait intéressant de faire une extension de ce projet .

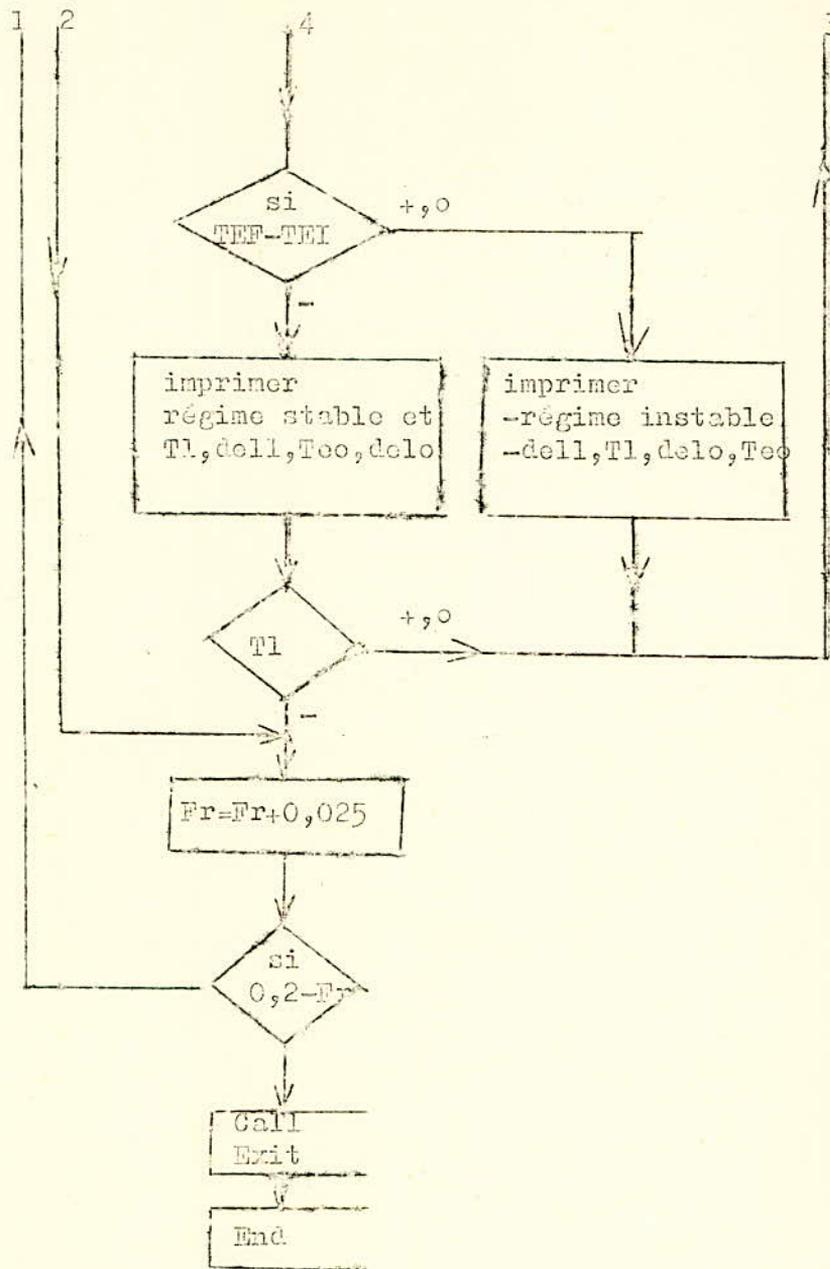
CARTES COMMENTAIRES : EXPLICATION DES NOTATIONS



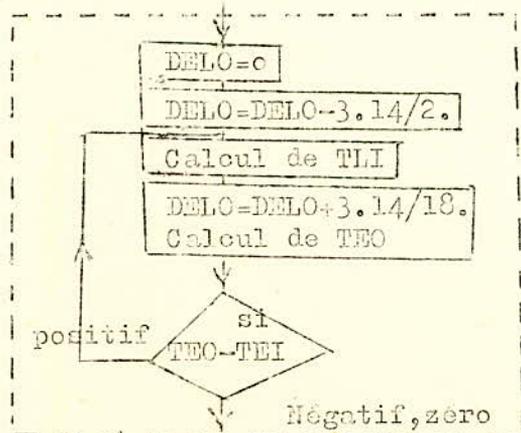
ANNEXE B: 3.2.3. PROGRAMME EN FORTRAN IV (IBM 1130) POUR LE CALCUL DU REGIME PERMANENT

```
// FOR
$IOCS(CARD,1132 PRINTER)
$ONE WORD INTEGERS
$LIST ALL
C CALCUL DU FONCTIONNEMENT EN REGIME PERMANENT
C REACTANCES EN PER UNIT
C QUADRATURE XAQ,XLS,XLKQ,DIRECT XAD,XLS,XLFD,XLKD
C TENSION DE PARK VQSO,VDSO,VFDO,VM,EI
C GRANDEURS RELATIVES MECANIQUES MOMENT D'INERTIE H EN SECONDS
C FREQUENCE RELATIVE FR
C ANGLE DE CHARGE DELO
C COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DEVELOPPE TEO
  READ(2,10)XAQ,XLS,XLKQ,XAD,XFD,XLFD,XLKD
  READ(2,20)RS,RKQ,RFD,RKD
  READ(2,30)VM,EI,SFR,WE
10  FORMAT(6F5.2)
20  FORMAT(4F5.2)
30  FORMAT(4F7.2)
40  FORMAT(1H1,3HEI=,F3.1,4X,3HFR=,F5.2,4X,2HV=,F5.2,/)
50  FORMAT(1H1,5HDELO,9X,4HCDSO,9X,4HCFDO,9X,6HCOUPLE)
60  FORMAT(1H,5(F7.3,5X)
  XQS=XLS+XAQ
  XKQ=XLKQ+XAQ
  XDS=XLS+XAD
  XFD=XLFD+XAD
  XKD=XLKD+XAD
  FR=0.05
1  V=FR$VM
  WRITE(3,40)EI,FR,V
  WRITE(3,50)
  DELO=0.
  DELO=DELO-3.14
  I=0
C CALCUL DE TEO(DELO)EN FONCTIONNEMENT MOTEUR ET GENERATEUR FR FIXEE
  DETQD=(RS/FR)$2+XDS$XQS
2  CQSO=(VM$COS5DELO)-EI)$RS/FR-VM$XDS$SIN(DELO)/DETQD
  CDSC=FR$(VM$SIN(DELO)+XQS$CQSO)/RS
  CFDO=EI/XAD
  TEO=CQSO((XDS-XQS)$CDSC+XAD$CFDO)
  WRITE(3,60)DELO,CQSO,CDSC,CFDO,TEO
  I=I+1
  IF(I-36)3,3,4
3  DELO=DELO+3.14/18.
  GO TO 2
4  FR=FR+0.05
  IF(SFR-FR)6,5,5
5  GO TO 1
  CALL EXIT
  END
```

```
// XEQ
+0.71+0.14+0.05+1.50+0.40=0.10
+0.09+0.05+0.01+0.10
+001.00+001.00+001.00+376.80
CORE REQUIREMENTS FOR
COMMON O VARIABLES 60 PROGRAM 340 TEMPS DU CALCUL 15mn.
```

Recherche du couple maximum TEO en régime permanent sur la partie stable stable de la courbe.



initialisation: I=0, IMP=0, WR1=WR0; DEL1=DELO, CQS1=CQSO; CDS1=CDSO;
TEL=TEO; CKD1=0. ; CFD1=CFDO; CKQ1=0.,

Listing du Programme en langage FORTRAN-IV-IBM1130 pour le calcul du fonctionnement d'une machine synchrone triphasée

```

// FOR
$IOCS(CARD,1132 PRINTER)
$ONE WORD INTEGERS
$LIST ALL
C GUENANE PROJET THESE DE FIN D'ETUDES
C MACHINE SYNCHRONE TRIPHASEE 2POLES
C REACTANCES EN PER UNIT
C QUADRATURE XAQ,XLS,XLKQ
C DIRECT XAD,XLS,XLFD,XLKD
C RESISTANCES EN PER UNIT RS,RFD,RKQ,RKD
C TENSION DE PARK VQSO,VDSO,VM,VFDO,EI
C GRANDEUR MECANIQUE RELATIVE H EN SECONDES MOMENT D'INERTIE
C FREQUENCE RELATIVE FR=WRO/WE
C ANGLE DE CHARGE DELO
C COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DEVELOPPE EN REGIME PERMANENT =TEO
  READ(2,10)XAQ,XLS,XLKQ,XAD,XLFD,XLKD
  READ(2,20)RS,RKQ,RFD,RKD
  READ(2,30)VM,EI,WE
10  FORMAT(6F5.2)
20  FORMAT(4F5.2)
30  FORMAT(3F7.2)
40  FORMAT(1H , 'TH',9X, 'WRH',9X, 'DELTH',9X, 'TEH',9X, 'FR',9X, 'DELT2',9X
1  , 'TEO',9X, 'DELT1',9X, 'TL',/)
50  FORMAT(1H ,27X,13HREGIME STABLE,/)
60  FORMAT(1H ,27X,15HREGIME INSTABLE,/)
70  FORMAT(1H ,F6.3,5X,F8.3,3X,F8.3,5X,F6.3,6X,F5.3,6X,F8.3,4X,F6.3,6X
1  ,F8.3,6X,F6.3,/)
80  FORMAT(1H ,4HXQS=,F4.2,5X,4HKKQ=,F4.2,5X,4HXDS=,F4.2,5X,4HXFD=,F4.
1  2,5X,4HXKD=,F4.2,5X,4HXAQ=,F4.2,5X,4HXAD=,F4.2,/)
90  FORMAT(1H ,3HRS=,F4.2,6X,4HRKQ=,F4.2,5X,4HRFD=,F6.3,5X,4HRKD=,F4.2
1  ,/)
100 FORMAT(1H ,3HVM=,F4.2,6X, . . . . .3HEI=,F4.2,6X,3HWE=,F6.2,/)
110 FORMAT(1H ,4(F8.3,4X),/)
120 FORMAT(1H ,2HTH,10X,3HWRH,9X,5HDELTH,7X,6COUPLE,/)
  XQS=XLS+XAQ
  XKQ=XLKQ+XAQ
  XDS=XLS+XAD
  XFD=XLFD+XAD
  XKD=XLKD+XAD
  WRITE(3,80)XQS,XKQ,XDS,XFD,XKD,XAQ,XAD
  WRITE(3,90)RS,RKQ,RFD,RKD
  WRITE(3,100)VM,EI,WE
  FR=0.050
  CFDO=EI/XAD
1  DELO=0.
  DETQD=(RS/FR)$2+XDS$XQS
  DELO=DELO-3.14/2.
2  CQSO=((VM$COS(DELO)-EI)$RS/FR-VM$XDS$SIN(DELO))/DETQD
  CDSO=FR$(VM$SIN(DELO)+XQS$CQSO)/RS
  TLI=CQSO$((XDS-XQS)$CDSO+XAD$CFDO)
  DELO=DELO+3.14/18.
  CQSO=((VM$COS(DELO)-EI)$RS/FR-VM$XDS$SIN(DELO))/DETQD
  CDSO=FR$(VM$SIN(DELO)+XQS$CQSO)/RS
  TLC=CQSO$((XDS-XQS)$CDSO+XAD$CFDO)
  DELT2=DELO$180./3.14
  IF(TEO-TLI)4,4,3
3  GO TO 2
4  TL=TEO
  WRITE(3,120)
  DELT1=DELT2
  IF(TL),5,5,6
5  DELO=DELO+3.14/36.
  GO TO 7

```

6 DELO=DELO+3.14/18.
 7 CQSO=((VM\$COS(DELO)-EI)\$RS/FR-VM\$XDS\$SIN(DELO))/DETQD
 CDSO=FR\$(VM\$SIN(DELO)+XQS\$CQSO)/RS
 TEO=CQSO\$((XDS-XQS)\$CDSO+XAD\$CFDO)
 DELT2=DELO\$180./3.14
 IF(TL-TEO)22,22,8

C REGIME TRANSITOIRE:ETUDE DE LA STABILITE

8 WRO=FR\$WE
 PA=0.0005
 H=1.
 WR1=WRO
 DEL1=DELO
 CQS1=CQSO
 CDS1=CDSO
 CFD1=CFDO
 CKQ1=0.
 CKD1=0.
 TEL=TEO
 TO=0.
 T1=TO
 I=0
 IMP=0

C CALCUL DU DETERMINANT DES AXES Q ET D

DETQ=(XQS\$XKQ-XAQ\$\$2)/WE
 DETD=(XDS\$XFD\$XKD-XAD\$\$2\$(XDS+XFD+XKD-2.\$XAD))/WE
 Y11=XKQ/DETQ
 Y12=-XAQ/DETQ
 Y21=Y12
 Y22=XQS/DETQ
 Y33=(XFD\$XKD-XAD\$\$2)/DETD
 Y34=(XAD\$\$2-XKD\$XAD)/DETD
 Y35=(XAD\$\$2-XFD\$XAD)/DETD
 Y43=Y34
 Y44=(XDS\$XKD-XAD\$\$2)/DETD
 Y45=(XAD\$\$2-XDS\$XAD)/DETD
 Y53=Y35
 Y54=Y45
 Y55=(XDS\$XFD-XAD\$\$2)/DETD

9 VQS1=FR\$VM\$COS(DEL1)
 VDS1=FR\$VM\$SIN(DEL1)
 VFD1=EI\$RFD/XAD
 V11=VQS1-WR1\$(XDS\$CDS1+XAD\$(CFD1+CKD1))/WE-RS\$CQS1
 V21=-RKQ\$CKQ1
 V31=VDS1+WR1\$(XQS\$CQS1+XAQ\$CKQ1)/WE-RS\$CDS1
 V41=VFD1-RFD\$CFD1
 V51=-RKD\$CKD1
 DCQS1=Y11\$V11+Y12\$V21
 DCKQ1=Y21\$V11+Y22\$V21
 DCDS1=Y33\$V31+Y34\$V41+Y35\$V51
 DCFD1=Y43\$V31+Y44\$V41+Y45\$V51
 DCKD1=Y53\$V31+Y54\$V41+Y55\$V51
 DDEL1=WR1-WRO
 DWR1=(TEL-TL)\$WE/(2.\$H)
 CQS2=CQS1+DCQS1\$PA/2.
 CKQ2=CKQ1+DCKQ1\$PA/2.
 CDS2=CDS1+DCDS1\$PA/2.
 CFD2=CFD1+DCFD1\$PA/2.
 CKD2=CKD1+DCKD1\$PA/2.
 DEL2=DEL1+DDEL1\$PA/2.
 WR2=WR1+DWR1\$PA/2.
 TE2=CDS2\$((XDS-XQS)\$CQS2-XAQ\$CKQ2)+XAD\$CQS2\$(CFD2+CKD2)
 T2=T1+PA/2.
 VQS2=FR\$VM\$COS(DEL2)
 VDS2=FR\$VM\$SIN(DEL2)

```

V12=VQS2-WR2*(XDS+CDS2+XAD*(CFD2+CKD2))/WE-RS*CQS2
V22=-RKQ*CKQ2
V32=VDS2+WR2*(XQS+CQS2+XAQ*CKQ2)/WE-RS*CDS2
V42=VFD1-RFD*CFD2
V52=VSD1-RSD*CKD2
DCQS2=Y11*V12+Y12*V22
DCKQ2=Y21*V12+Y22*V22
DCDS2=Y33*V32+Y34*V42+Y35*V52
DCFD2=Y43*V32+Y44*V42+Y45*V52
DDEL2=WR2-WRO
DCKD2=Y53*V32+Y54*V42+Y55*V52
DWR2=(TE2-TL)*WE/(2.*SH)
CQSH=CQS1+DCQS2*PA
CKQH=CKQ1+DCKQ2*PA
CDSH=CDS1+DCDS2*PA
CFDH=CFD1+DCFD2*PA
CKDH=CKD1+DCKD2*PA
DELH=DEL1+DDEL2*PA
WRH=WR1+DWR2*PA
TEH=CDSH*((XDS-XQS)*CQSH-XAQ*CKQH)+XAD*CQSH*(CFDH+CKDH)
TH=T2+PA/2.
DELTH=DELH*180./3.14
IMP=IMP+1

```

```

26 WRITE(3,110)TH,WRH,DELTH,TEH
IMP=0
27 IF(I-1)11,13,15
11 IF(TEH-TE1)12,12,16
12 I=I+1
TE1=TEH
GO TO 16
13 IF(TEH-TE1)16,14,14
14 I=I+1
GO TO 16
15 IF(TEH-TE1)17,17,16
16 CQS1=CQSH
CKQ1=CKQH
CDS1=CDSH
CKD1=CKDH
CFD1=CFDH
DEL1=DELH
WR1=WRH
T1=TH
TE1=TEH
GO TO 9
17 TEF=TE1
IF(TEF-TE1)18,21,21
18 WRITE(3,50)
WRITE(3,40)
WRITE(3,70)TH,WRH,DELTH,TEH,FR,DELT2,TEO,DELT1,TL
IF(TL+0.1)22,19,19
19 GO TO 4
21 WRITE(3,60)
WRITE(3,40)
WRITE(3,70)TH,WRH,DELTH,TEH,FR,DELT2,TEQ,DELT1,TL
GO TO 4
22 FR=FR+0.025
IF(0.250-FR)24,23,23
23 GO TO 1
24 CALL EXIT
END

```

<p>COMMON O VARIABLES 222 PROGRAMME 1804 temps de calcul 1^{er} Essai : 3h 10' ; 2^{ème} Essai : 4h 30'</p>
--

```

// XEQ
+0.71+0.14+0.05+1.50+0.20+0.10
+0.09+0.05+0.01+0.10
+001.00+001.00+376.80 (1er essai) ; +001.00+001.25+376.80 (2ième essai)

```

BIBLIOGRAPHIE

- (1) G.J. Rogers "Linearesed analysis of induction-motor transients"1965
- (2) T.A. Lipo and P.C. Krouse "stability analysis of a reluctance - synchronous machine" 1967
- (3) J.C. Prescott and J.E. Richardson, "the inherent instability of synchronous machinery"1934
- (4) T.A. Lipo and P.C. Krouse, "Stability analysis for variable frequency operation of synchronous machines", 1968
- (5) E.W. Kimbark, Power system stability, 1956
- (6) P. Barret - electrotechnique général régimes transitoires
des machines tournantes 1967
- (7) M. Cahen, tome IV, p. 147