

12/91
L. ex

وزارة الجامعات
Ministère aux Universités

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE LA STABILITE TRANSITOIRE
D'UN RESEAU ELECTRIQUE H.T

Proposé par :

A.BENSENOUCI
M.MOUDJAHED

Etudié par :

K.MEKHNACHE
K.KHATI

Dirigé par :

A.BENSENOUCI
M.MOUDJAHED

PROMOTION

Juin 91

وزارة الجامعات
Ministère aux Universités

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE LA STABILITE TRANSITOIRE
D'UN RESEAU ELECTRIQUE H.T.

Proposé par :

A.BENSENOUCI
M.MOUDJAHED

Etudié par :

K.MEKHINACHE
K.KHATI

Dirigé par :

A.BENSENOUCI
M.MOUDJAHED

PROMOTION

Juin 91

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dedie ce modeste travail à

mes parents.

mes grands parents.

mes frères.

mes soeurs.

à toute la famille.

à tous mes amis.

à tous les democrates.

Kamel

à ma famille,

à mes amis.

Karim

REMERCIEMENTS

Nous tenons, à remercier les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos remerciements vont aussi au personnel de SONELGAZ en particulier M^{lle} BERKOUN, M^{lle} BENMILOUD, M^r REDJAH et particulièrement M^r GHEZAILI pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée au long de notre travail.

Nous remercions vivement Messieurs A. BENSENOUCI et H. MOUDJAHED pour nous avoir suivis et orientés.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Résumé :

La simulation, par ordinateur numérique, d'un défaut électrique dans un réseau est d'une importance capitale au personnel d'exploitation et de distribution de l'énergie électrique.

Le but de notre étude est de déterminer, par simulation, le temps critique d'élimination d'un défaut triphasé sur une ligne d'un réseau afin de maintenir la stabilité du système. Ceci permet de déterminer la temporisation à afficher au niveau des protections dans le but de maintenir la sécurité de fonctionnement du réseau.

SOMMAIRE.



INTRODUCTION GENERALE.....	4
CHAPITRE I ETUDE THEORIQUE DU PROBLEME DE STABILITE.	
I.1. Introduction.....	6
I.2. Définition de la stabilité.....	6
I.2.1 Stabilité statique.....	9
I.2.2 Stabilité transitoire.....	9
I.3. Etude simplifiée.....	10
I.3.1 Coefficient de la puissance synchronisante.....	12
I.3.2 Loi des aires.....	15
I.3.3 Application de la loi des aires.....	17
a Cas d'ouverture d'une ligne.....	17
b Cas d'un court-circuit.....	18
I.4 Influence des systèmes de régulation.....	21
I.4.1 Influence de la régulation de vitesse.....	21
I.4.2 Influence de la régulation de tension.....	22
I.5 Forme de perte de stabilité.....	23
I.6 Réseau multimachine.....	24
I.7 Conclusion.....	25
CHAPITRE II MODELISATION DES RESEAUX D'ENERGIE ELECTRIQUE.	
II.1 Introduction.....	26
II.2 Modélisation de la machine synchrone.....	27
II.2.1 Principe de la transformation de Park.....	27

II.2.2 Equations mécaniques.....	32
II.2.3 Modèle à deux axes.....	35
II.2.3.1 Détermination des paramètres de la machine.....	35
II.2.3.2 Expression de la tension terminale.....	37
II.2.3.3 Equation dynamique de la machine.....	39
a Variation de la f.e.m transitoire d'axe transversal.....	39
b Variation de la f.e.m d'axe direct.....	39
II.2.4 Modèle à un axe.....	40
II.2.5 Modèle de second ordre.....	42
II.3. Organes de régulation de la machine.....	44
II.3.1 Structure du régulateur de tension.....	45
II.3.2 Structure du régulateur de vitesse.....	47
II.4 Modélisation des lignes de transmissions.....	48
II.4.1 Equations du réseau.....	48
II.4.2 Représentation des charges.....	49
II.5 Modélisation des défauts.....	50
II.5.1 Déclenchement triphasé d'une ligne i-j.....	50
II.5.2 Court-circuit au nœud i.....	50
II.6 Changement de repère.....	50
II.6.1 Expression des équations du réseau dans le repère (d,q).....	52
II.7 Solution du problème de stabilité.....	55
II.8 Conclusion.....	59

CHAPITRE III RESEAU ETUDIE.

III.1 Schéma du réseau étudié.....	60
III.2 Données du réseau.....	61
III.2.1 Caractéristiques des lignes.....	61
III.2.2 Caractéristiques des machines.....	61
III.2.3 Caractéristiques des régulateurs de tension.....	62

III.2.4 Caracteristiques des regulateurs de vitesse... 62

III.3 Resultats obtenus de la simulation.....62

III.4 Resultats obtenus par le modèle TRANSTAB de SONELGAZ.....65

CONCLUSION GENERALE.....66

BIBLIOGRAPHIE.....67

ANNEXE.....69

INTRODUCTION GENERALE.

Actuellement, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique (R.E.E) ont pris une importance considérable. Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter, les réseaux électriques ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Cette complexité de structure a de très nombreuses conséquences. L'affaiblissement des capacités du réseau à retrouver un état de marche synchrone , suite à une perturbation, est l'une des plus importante car elle affecte directement la continuité du service.

La détermination de la temporisation à afficher au niveau des protections pour permettre l'élimination rapide du défaut sans entraîner l'écroulement du réseau est une tâche fondamentale.

Les études de stabilité transitoire portent généralement sur les défauts les plus probables et les plus contraignants (court-circuit, report de charges, pertes de lignes, etc...). Elles sont pratiquées par intégration numérique du modèle régissant la dynamique du système. Ce modèle présente essentiellement une forte non-linéarité et une dimension généralement importante. Il existe d'autres méthodes d'évaluation de la stabilité telles que les méthodes directes de LIAPUNOV et la méthode par reconnaissance des formes.[1]

La tension et la fréquence sont les principaux facteurs déterminant la qualité de l'énergie électrique distribuée aux consommateurs. Des perturbations de grande amplitude entraînent des variations de ces deux grandeurs qui doivent être maintenues dans les limites correspondant aux besoins des consommateurs et au bon fonctionnement des réseaux . Il est donc nécessaire de prendre en compte au niveau de la modélisation du comportement transitoire des machines, les moyens de réglage qui assurent à chaque instant la tenue de la tension et de la fréquence.[1]

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail présenté dans ce mémoire, qui est structuré en trois chapitres :

* Dans le premier chapitre, nous présentons une étude théorique du problème de stabilité du réseau d'énergie électrique, et l'influence des systèmes de régulation dans le cas d'une machine reliée à un réseau puissant.

* Dans le deuxième chapitre, nous présentons une modélisation du réseau, en adaptant à l'étude des régimes transitoires des machines la modélisation de Park avec la prise en compte des régulateurs de tension et de vitesse.

* Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats obtenus par intégration numérique des équations du modèle adopté, qu'on compare à ceux obtenus par le modèle TRANSTAB de la société nationale d'électricité et du gaz d'ALGERIE (SONELGAZ). La méthode d'intégration utilisée est celle de RUNGE KUTTA du 4^{ème} ordre

CHAPITRE I : ÉTUDE THEORIQUE DU PROBLEME DE LA STABILITE.

I.1 INTRODUCTION :

Un réseau n'est jamais en régime établi, il y a toujours des modifications aléatoires de charges auxquelles répondent les ajustements de production. En plus de ces variations stochastiques, des défauts peuvent se produire. Ces derniers sont éventuellement accompagnés de mises hors circuit de machines ou d'ouvrages conduisant ainsi en cas d'échec des procédures de réenclenchement à des modifications de la topologie du réseau [2]. Il en résulte, soit des phénomènes qui varient lentement et qui sont considérés comme dans un régime établi et par conséquent ils sont analysés en étudiant la stabilité statique, soit des phénomènes électromécaniques transitoires qui nécessitent une étude détaillée de la stabilité car les perturbations dans le réseau peuvent engendrer une perte de synchronisme.

I.2 DEFINITION DE LA STABILITE :

L'état d'un système quelconque (mécanique ou électromécanique) peut être caractérisé par n variables d'état formant le vecteur $[X_1, \dots, X_n]$. Dans les réseaux ces variables pourraient être les angles rotoriques, les vitesses angulaires, les flux des machines, etc... Les systèmes auxquels nous nous intéressons sont descriptibles par un système non-linéaire de n équations différentielles du premier ordre :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = x_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dot{X}_2 = x_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ \dot{X}_n = x_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (I.1)$$

Un point d'équilibre du système (I.1) est défini par :

$$\dot{X}_1 = 0, \dot{X}_2 = 0, \dots, \dot{X}_n = 0$$

et par conséquent, il est donné par les racines du système (I.2) :

$$\left[\begin{array}{l} X_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ X_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ X_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{array} \right. \quad (I.2)$$

Il existe plusieurs solutions $[x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]$ qui satisfont le système (I.2), donc le système (I.1) possède plusieurs points d'équilibres. Rien ne prouve toutefois que le système se trouvant dans l'état d'équilibre $[x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]$ y revient si une cause extérieure vient à perturber momentanément une des variables d'état. Cette perturbation accidentelle peut être grande (idée intervenant dans la stabilité transitoire des réseaux électriques) ou petite (idée intervenant dans la stabilité statique). Cette perturbation peut porter sur les variables d'états telles que par exemple le flux d'une machine ou sur l'état du réseau (ouverture de ligne, perte d'ouvrages, etc...).

La stabilité peut être de divers types. Pour en donner l'image géométrique, représentons l'espace euclidien à n dimensions des n variables d'état par un plan et, par une simple translation, faisons coïncider l'origine avec un des points d'équilibres $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$. Si à un instant donné le système est amené au point $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$, plusieurs évolutions sont possibles (voir figures I.1)

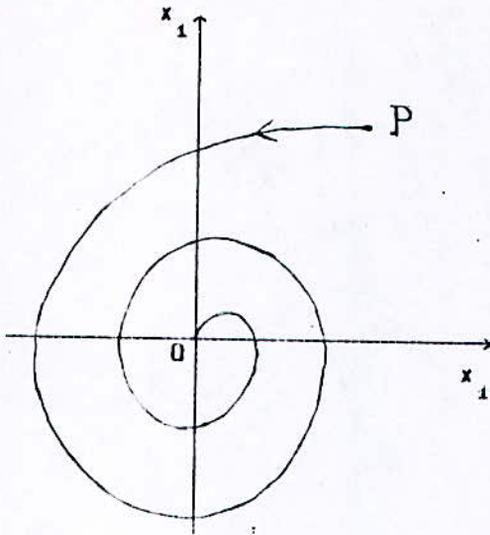


figure I.1.a : Mouvement asymptotique stable d'allure oscillatoire.

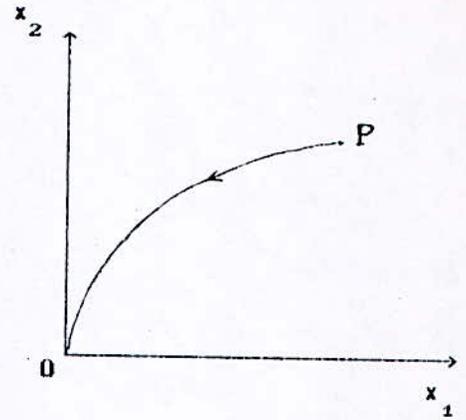


figure I.1.b : Mouvement asymptotiquement stable.

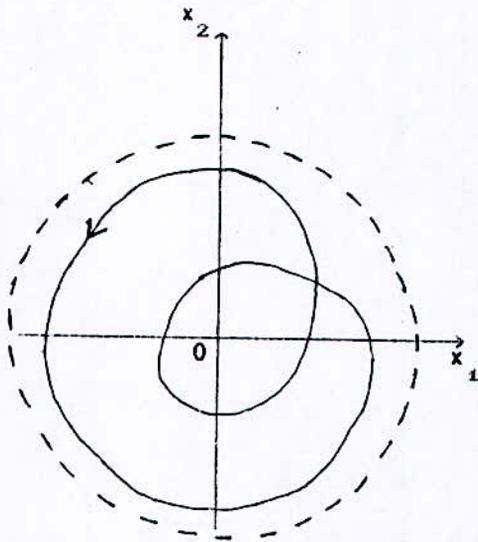


figure I.1.c : mouvement stable.

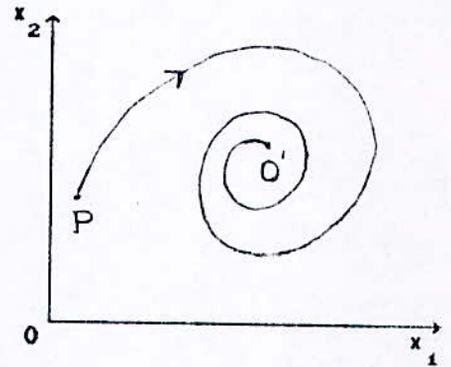


figure I.1.d : Passage vers un point d'équilibre O' distinct du point d'équilibre initial o.

figures I.1

* Le système tend d'une manière oscillatoire ou non (respectivement figure I.1.a et I.1.b) à revenir à l'origine, on dit que l'origine est dans ce cas asymptotiquement stable.

* Le système, tout en ne revenant pas à l'origine, reste à l'intérieur d'un domaine, on dit que l'origine est stable (figure I.1.c).

* Dans les autres cas le système est instable, soit qu'il tende vers un nouvel état d'équilibre O' distinct de l'état O (figure I.1.d), soit qu'il ne tende vers aucun état d'équilibre.

Pour les réseaux d'énergie électrique, deux types de stabilité sont généralement connues : la stabilité statique et la stabilité transitoire. [3]

I.2.1 STABILITE STATIQUE :

On dit qu'un réseau électrique est en régime de stabilité statique, si à la suite d'une perturbation infiniment petite il retrouve un état de régime permanent de marche synchrone. Il s'agit donc ici de phénomènes de faibles amplitudes. Son maintien est une condition nécessaire à l'exploitation du réseau. [4]

I.2.2 STABILITE TRANSITOIRE :

Le réseau d'énergie électrique est dit en régime de stabilité transitoire, si à la suite d'une perturbation importante (qui peut ressembler soit d'une perte soudaine d'un générateur, ou d'une ligne, ou plus fréquemment d'un court-circuit) il retrouve un état de régime permanent de marche synchrone. [4]

Elle est donc liée à la notion de risque, et l'exploitant doit associer aux conséquences de cet événement sa probabilité d'apparition.

L'étude de la stabilité transitoire consiste à évaluer les capacités du réseau à retrouver un état de fonctionnement normal ou synchrone après élimination du défaut. Notons ici que l'étude de la stabilité

transitoire n'est abordée que si la stabilité statique du réseau est assurée.

I.3 ETUDE SIMPLIFIEE :

L'équation de mouvement du rotor des machines synchrones est basée sur l'évolution du couple d'accélération lié au moment d'inertie de la machine par la relation (I.3) ci dessous :

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_\alpha = T_m - T_e \quad [\text{N.m}] \quad (I.3)$$

Avec :

J : moment d'inertie des masses tournantes en $[\text{kg.m}^2]$.

δ_m : déplacement angulaire du rotor.

T_m : couple mécanique d'entraînement fourni par la turbine en $[\text{N.m}]$.

T_e : couple électromagnétique fourni par la machine en $[\text{N.m}]$.

T_α : couple d'accélération en $[\text{N.m}]$.

En régime stable T_m est égale à T_e donc T_α est nul et la machine fonctionne au synchronisme. Elle persiste dans cet état tant que cette relation reste vérifiée. Il n'y aura donc ni accélération ni décélération des masses tournantes. Si un déséquilibre se produit entre les couples mécanique et électrique alors le synchronisme est perdu provoquant ainsi une instabilité du système. [5]

Le réseau d'énergie électrique comporte en général un grand nombre de générateurs synchrones interconnectés (réseau multimachine).

Une perturbation survenant en un point quelconque du réseau affecte l'ensemble des machines. L'étude rigoureuse du processus nécessite en principe la prise en compte des régimes transitoires de toutes les machines, c'est ainsi que sont établis les programmes numériques d'étude de la stabilité du réseau.

Avant d'aborder le cas multimachine, nous nous intéresserons pour la clarté de l'exposé au cas monomachine représenté par le schéma de la figure (I.2) : [6]

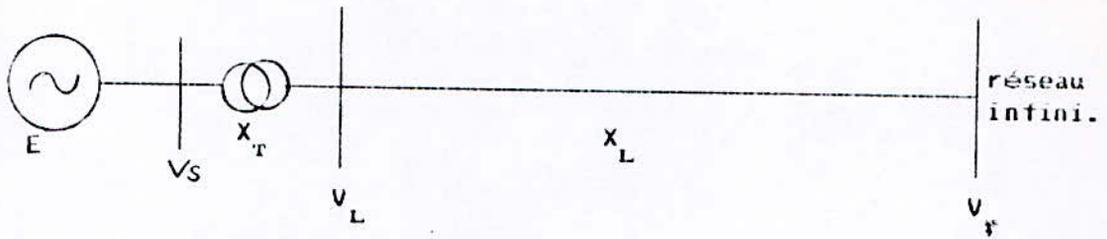


figure 1.2 schéma unifilaire de raccordement d'une machine à un réseau infini.

Soit $X_{\sigma} = X_T + X_L$

Le diagramme des tensions de la machine est :

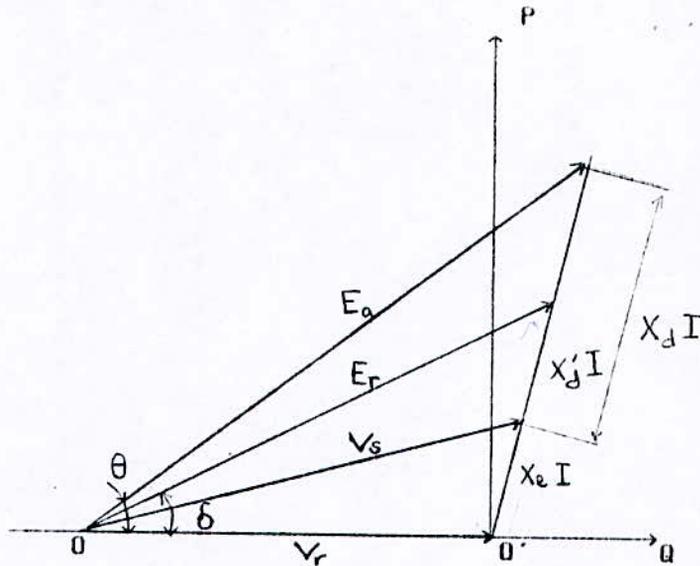


figure 1.3

Avec :

- E_a : f.e.m apparente aux bornes de la machine.
- E_r : f.e.m résultante.
- V_s : tension aux bornes du stator.
- V_r : tension du réseau infini.
- X_d : réactance synchrone de la machine.
- X'_d : réactance transitoire de la machine.

Pour un fonctionnement à excitation constante, l'expression de la puissance électrique active fournie par la machine s'écrit (pour les

machines à pôles lisses) :

$$P_e = 3 \frac{E_r V_r}{X_e + X_d'} \sin \delta \quad (1.4)$$

$$P_e = P_{\max} \sin \delta$$

La puissance électrique est une fonction sinusoïdale de l'angle δ .
 V_r et E_r étant constantes . [4]

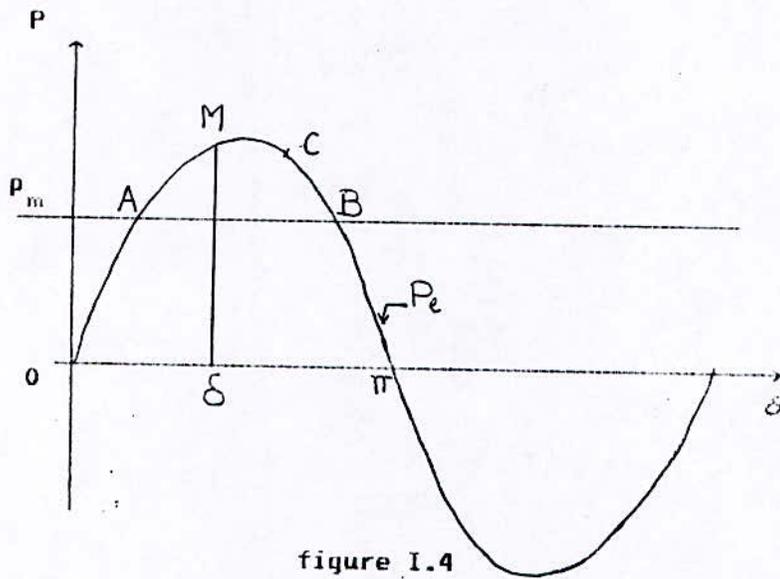


figure I.4

I.3.1 COEFFICIENT DE LA PUISSANCE SYNCHRONISANTE :

L'intersection de P_m avec la courbe $P_e(\delta)$ (voir figure I.4) donne deux points de fonctionnements A et B , si l'on considère le cas d'une légère variation de l'angle interne du rotor qui passerait :

$$\text{de } \delta_0 \text{ à } \delta_0 + \Delta\delta \quad (1.5)$$

donc la puissance électrique passe de P_e à $P_e + \Delta P$ (voir figure I.5)

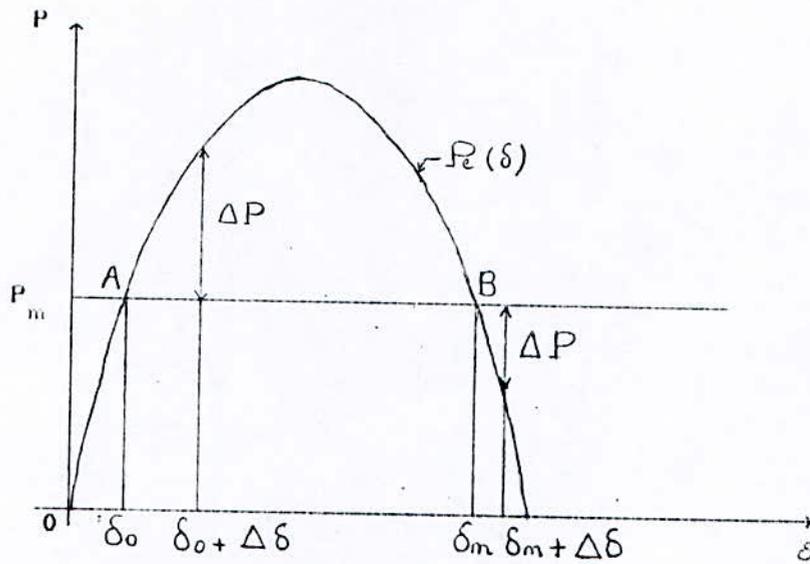


figure 1.5

On obtient alors un déséquilibre entre les puissances mécanique et électrique.

* Si la machine est au point A, ceci se traduit par l'inégalité :

$$P_e > P_m, \quad \text{c'est à dire : } \frac{d^2\delta}{dt^2} < 0.$$

La réponse de la machine à cette variation serait une décélération du rotor tendant à ramener δ à sa valeur initiale.

Le point A est dit point d'équilibre statique stable.

* Si par contre la machine est au point B, on aurait passage de δ_m à $\delta_m + \Delta\delta$, donc P_e passe à $P_e - \Delta P$ ceci se traduit par :

$$P_m > P_e \quad \text{et} \quad \left[\frac{d^2\delta}{dt^2} > 0 \right].$$

dans ces conditions l'angle interne du rotor aurait tendance à augmenter au delà de δ_m d'où accélération jusqu'au décrochage (perte du synchronisme).

Le point B est dit point d'équilibre instable.

A partir de l'équation (I.4) on tire :

$$P_e + \Delta P = P_{\max} \sin(\delta_0 + \Delta\delta) \quad (I.6)$$

$$\sin(\delta_0 + \Delta\delta) = \sin \delta_0 \cos \Delta\delta + \sin \Delta\delta \cos \delta_0$$

Comme $\Delta\delta$ est très petit alors :

$$\cos \Delta\delta = 1$$

$$\sin \Delta\delta = \Delta\delta$$

$$\text{Donc } P_e + \Delta P = P_{\max} \sin \delta_0 + P_{\max} \Delta\delta \cos \delta_0 \quad (I.7)$$

à l'état initial :

$$P_m = P_{\max} \sin \delta_0 \quad (I.8)$$

$$P_m - (P_e + \Delta P) = -P_{\max} \Delta\delta \cos \delta_0 \quad (I.9)$$

En faisant la substitution nécessaire dans l'équation du mouvement des masses tournantes de la machine, nous aboutissons à la relation :

$$J \omega_s \frac{d^2(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt^2} = P_m - (P_e + \Delta P) \quad (I.10)$$

δ_0 étant une constante donc :

$$J \omega_s \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} = -P_{\max} \cos \delta_0 \Delta\delta \quad (I.11)$$

On définit le coefficient de la puissance synchronisante comme étant le terme $P_{\max} \cos \delta_0$ de l'équation (I.11). [7]

Ce coefficient s'exprime par la relation suivante :

$$P_s = \left[\frac{dP_e}{d\delta} \right]_{\delta = \delta_0} \quad (I.12)$$

La condition de stabilité en régime permanent s'écrit alors :

$$P_s = \left[\frac{dP_\omega}{d\delta} > 0 \right] \quad (I.13)$$

1.3.2 LOI DES AIRES :

Supposons qu' à la suite d'une perturbation, le point de fonctionnement passe en M_1 (voir figure I.6) avec une vitesse relative par rapport à la vitesse synchrone $\frac{d\delta}{dt}$ positive.

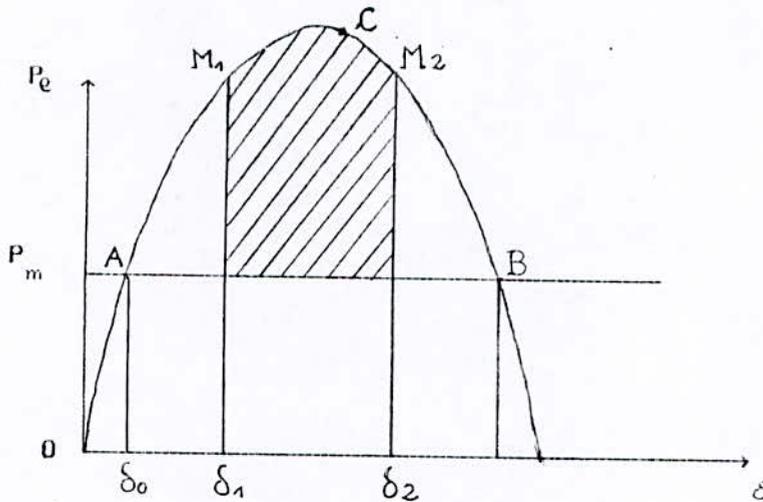


figure I.6

La puissance P_m reste constante, l'angle δ croit et P_e devient supérieure à P_m donc l'accélération angulaire est négative : le rotor décélère. Deux cas peuvent se présenter :

1.^{er} cas : Si la vitesse s'annule en un point C situé avant le point B où l'accélération s'annule pour devenir positive ($P_m > P_e$), l'angle δ va diminuer et on se stabilisera en A. Le régime est stable.

2.^{ème} Cas : Si, au contraire, la vitesse ne s'annule pas avant B, la vitesse va de nouveau augmenter, la stabilité sera perdue.

On peut évaluer l'énergie cinétique emmagasinée dans les masses tournantes de la machine lorsque le point de fonctionnement est en $M(\delta, \frac{d\delta}{dt})$ par la différence entre l'énergie cinétique absolue en M et celle correspondante à la vitesse de synchronisme Ω_s ; Nous appelons cette énergie : énergie cinétique différentielle.

L'énergie cinétique absolue W_c emmagasinée dans les masses tournantes en $M(\delta, \frac{d\delta}{dt})$ est :

$$W_c = \frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} J \left(\Omega_s + \frac{d\delta}{dt} \right)^2$$

$$W_c = \frac{1}{2} J \left\{ \Omega_s^2 + \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 + 2 \Omega_s \frac{d\delta}{dt} \right\} \quad (I.14)$$

A la vitesse de synchronisme :

$$W_c = \frac{1}{2} J \Omega_s^2 \quad (I.15)$$

L'énergie cinétique différentielle W_{cd} en M est :

$$W_{cd} = \frac{1}{2} J \left\{ \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 + 2 \Omega_s \frac{d\delta}{dt} \right\} \quad (I.16)$$

W_{cd} est une fonction de la vitesse relative $\frac{d\delta}{dt}$ qui s'annule avec elle. L'équation du mouvement des masses tournantes s'écrit :

$$\frac{2.H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Avec :

$$J = \frac{2.H}{\omega_s}$$

Soit :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2.H} (P_m - P_e) \quad (I.17)$$

En multipliant les deux membres de l'équation (I.17) par $\frac{d\delta}{dt}$ et en intégrant entre deux points $M_1(\delta_1, \frac{d\delta_1}{dt})$ et $M_2(\delta_2, \frac{d\delta_2}{dt})$ on obtient :

$$\left[\frac{d\delta}{dt} \right]_{M_2}^2 - \left[\frac{d\delta}{dt} \right]_{M_1}^2 = \frac{\omega_s}{H} \int_{\delta_2}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta$$

Le second membre représente l'aire comprise entre les courbes $P_m(\delta)$ et $P_e(\delta)$ et les droites $\delta = \delta_1$, $\delta = \delta_2$ (aire hachurée de la figure I.6). Cette aire est fonction de la variation de la vitesse relative $\frac{d\delta}{dt}$ entre M_1 et M_2 .

La variation d'énergie cinétique différentielle entre les deux points M_1 et M_2 est une fonction de l'aire hachurée et s'annule avec elle.

I.3.3 APPLICATION DE LA LOI DES AIRES :

A. CAS D'OUVERTURE D'UNE LIGNE :

Supposons que la machine soit connectée au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur, et de deux lignes en parallèles, et que l'une de ces deux lignes déclenche. [3]

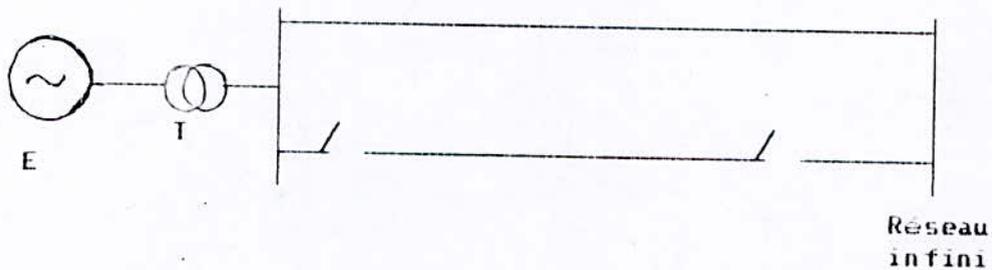


figure I.7

A l'instant initial, la réactance de liaison X_{ω} ayant la valeur $X_{\omega 1}$ correspondante à l'ensemble du transformateur et des deux lignes en parallèles.

Si une des deux lignes déclenche, l'impédance X_{ω} prend la valeur $X_{\omega 2}$ ($X_{\omega 2} > X_{\omega 1}$) correspondante à l'ensemble du transformateur et d'une ligne. Le point de fonctionnement passe brutalement en A' sur la courbe donnant la puissance électrique P_{ω} en fonction de δ pour la nouvelle valeur de l'impédance $X_{\omega 2}$ (voir figure I.8) :

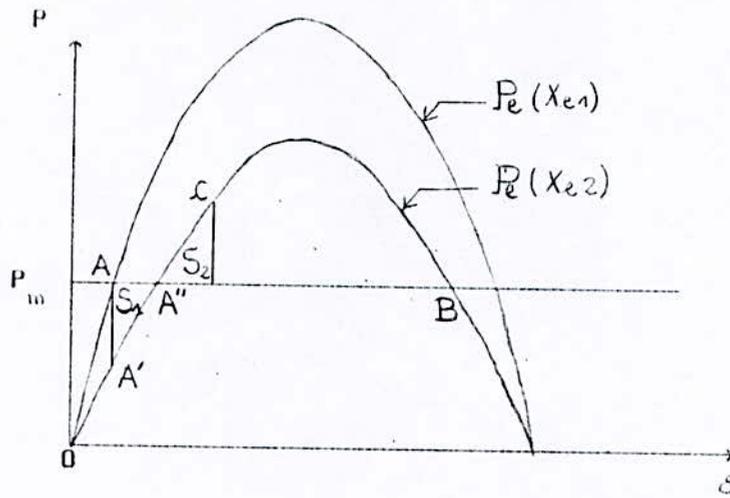


figure 1.8

L'accélération en A' est positive. le système accélère et accumule de l'énergie cinétique différentielle jusqu'au point A'' où la vitesse est $(\frac{d\delta}{dt})_{A''}$, le mouvement continue et l'accélération devient négative. Le mouvement s'arrête en C lorsque $\frac{d\delta}{dt} = 0$.

D'après la loi des aires, le point C est tel que l'énergie cinétique différentielle accumulée entre A et A'' est restituée entre A'' et C, donc la variation totale est nulle. Il y a égalité des aires S_1 et S_2 . On retrouve un point de fonctionnement stable en régime établi, si S_2 est inférieure à l'aire A''CB comprise entre $P_e(x_{e2})$ et P_m . Ce point correspond à $P_m = P_e(x_{e2})$, c'est à dire, au point A'. [4]

B- CAS D'UN COURT-CIRCUIT :

Considérons un défaut tel que celui indiqué sur la figure (1.9): [3]

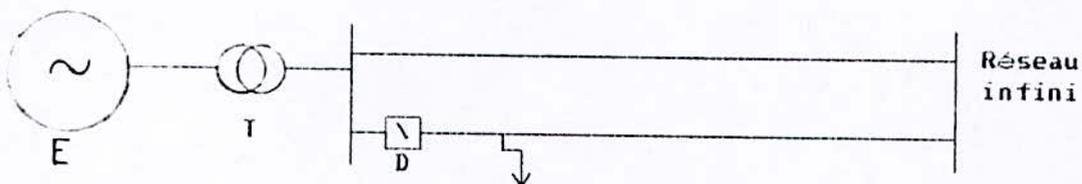


figure 1.9

Soit A le point de fonctionnement initial. Lorsque le court-circuit apparaît au temps t_0 , la tension donc la puissance électrique s'annule. Le point de fonctionnement vient en A_0 (voir figure I.10)

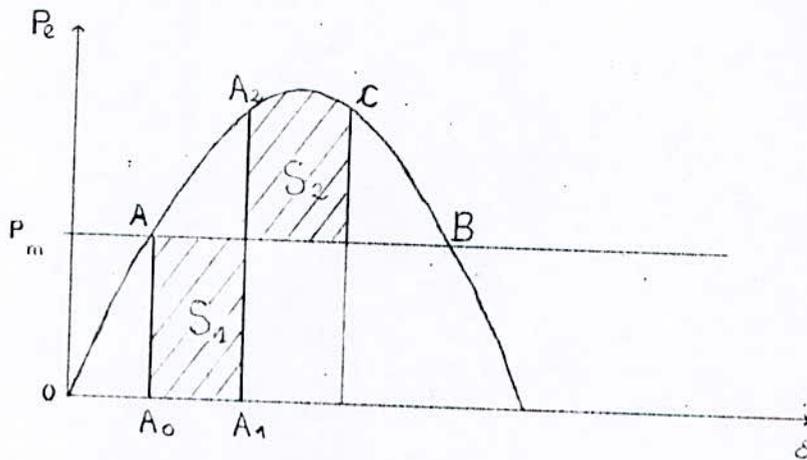


Figure I.10

L'accélération est positive, l'angle δ croît. Au temps t_1 le défaut est éliminé par ouverture du disjoncteur D, le point de fonctionnement est en A_1 . On retrouve brutalement la puissance électrique P , le point de fonctionnement vient en A_2 où la vitesse est $(\frac{d\delta}{dt})_{A_2}$. L'angle δ continue de croître mais l'accélération est devenue négative, la vitesse $\frac{d\delta}{dt}$ diminue et s'annule au un point C.

D'après la loi des aires, le point C est tel que l'énergie cinétique différentielle accumulée entre A et A_2 soit restituée entre A_2 et C, c'est à dire, la variation globale de l'énergie cinétique différentielle donc l'aire correspondante soit nulle : $S_1 = S_2$.

On constate que lorsque la durée d'application du défaut croît, S_1 croît et C se rapproche de B (point limite de la stabilité).

Il existe donc un temps limite t_{cr} d'élimination du défaut correspondant à l'apparition de l'instabilité. Pour ce temps t_{cr} , le point C est confondu avec le point critique B (voir figure : I.11). [4]

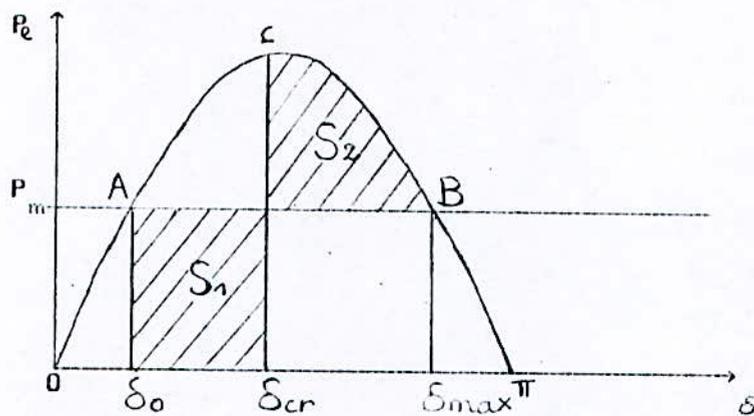


figure 1.11

D'après la loi des aires on doit avoir $S_1 = S_2$, autrement dit :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{e_{max}} \sin\delta - P_m) d\delta$$

$$P_m (\delta_{cr} - \delta_0) = P_{e_{max}} (\cos\delta_{cr} - \cos\delta_{max}) - P_m (\delta_{max} - \delta_{cr})$$

$$\text{d'où : } \cos\delta_{cr} = \frac{P_m}{P_{e_{max}}} (\delta_{max} - \delta_0) + \cos\delta_{max} \quad (\text{I.18})$$

$$\text{or : } \begin{cases} \delta_{max} = \pi - \delta_0 \end{cases} \quad (\text{I.19})$$

$$\begin{cases} P_m = P_{e_{max}} \sin\delta_0 \end{cases} \quad (\text{point statique}). \quad (\text{I.20})$$

Remplaçons (I.20) et (I.19) dans (I.18), on aura :

$$\delta_{cr} = \text{Arccos} \left\{ (\pi - 2\delta_0) \sin\delta_0 - \cos\delta_0 \right\}$$

or dans l'intervalle $[\delta_0, \delta_{cr}]$, la puissance électrique est nulle, donc l'équation mécanique se réduit à : [7]

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (\text{I.21})$$

En intégrant cette expression, on obtient :

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s}{4 H} P_m t_{cr}^2 + \delta_0$$

$$\text{d'où : } t_{cr} = \sqrt{\frac{4 H (\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}}$$

1.4. INFLUENCE DES SYSTEMES DE REGULATION :

1.4.1 INFLUENCE DE LA REGULATION DE VITESSE :

La variation de vitesse, due à la discordance entre le couple moteur et le couple résistant d'un générateur, qui caractérise un régime instable indique clairement que les actions correctrices sur l'un de ces deux couples peuvent être très bénéfiques pour le maintien de la stabilité. Par exemple, une action sur le couple moteur par l'intermédiaire de la régulation de vitesse du groupe est généralement très efficace.

Dans le cas d'un défaut, d'après la loi des aires, l'énergie cinétique différentielle accumulée pendant la période d'accélération est d'autant plus faible et surtout celle qui peut être restituée pendant la période de décélération d'autant plus grande, que P_m décroît vite en fonction de δ . Une réduction rapide de cette puissance par fermeture des soupapes lorsque la vitesse dépasse la vitesse de synchronisme améliore considérablement les conditions de stabilité (voir figure I.12). La fermeture des organes d'admission du fluide moteur est obtenue par l'action du régulateur de vitesse de la machine. [4]

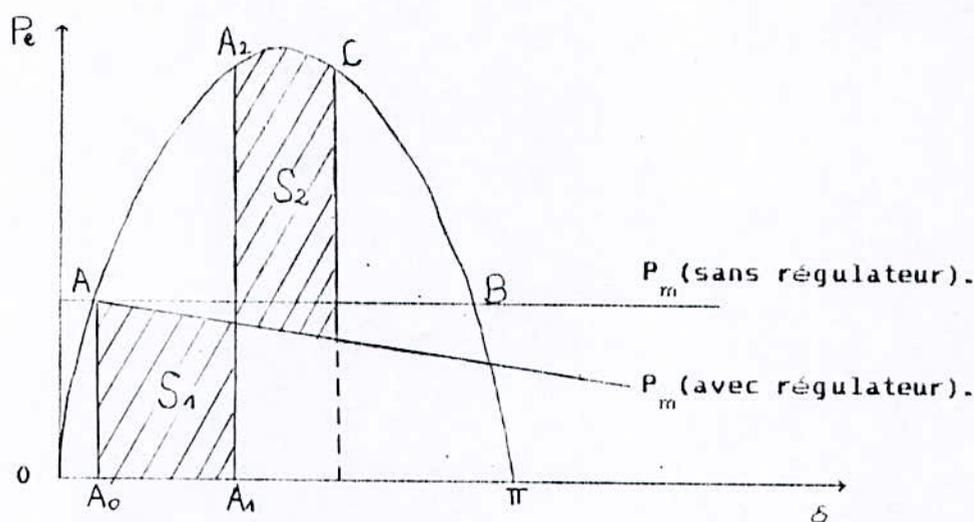


figure I.12

I.4.2 INFLUENCE DE LA REGULATION DE TENSION :

Les alternateurs sont munis d'un régulateur de tension qui a pour rôle la compensation partielle de la chute de tension interne de la machine, en essayant de maintenir la tension aux bornes de celle-ci égale à la tension de référence. C'est en définitive sur lui que va reposer la limite de puissance transportée en régime normal, c'est à dire, la limite de stabilité statique.

On a vu dans l'étude simplifiée que pour un fonctionnement à excitation constante, la puissance active débitée par la machine est une fonction sinusoïdale de l'angle interne δ , qui est donnée par :

$$P_{e1} = 3 \frac{E_r V_r}{X_e + X_d} \sin \delta \quad \text{avec } (X_e = X_T + X_L).$$

L'expression de celle-ci devient pour un fonctionnement à tension aux bornes constante (régulation de tension rapide) :

$$P_{e2} = 3 \frac{V_s V_r}{X_e} \sin \delta_1$$

$$\delta_1 = \widehat{(V_r, E_r)}.$$

Le diagramme de fonctionnement de la machine synchrone est représenté sur la figure (I.13). C'est un demi-cercle centré sur l'axe des puissances réactives. [8]

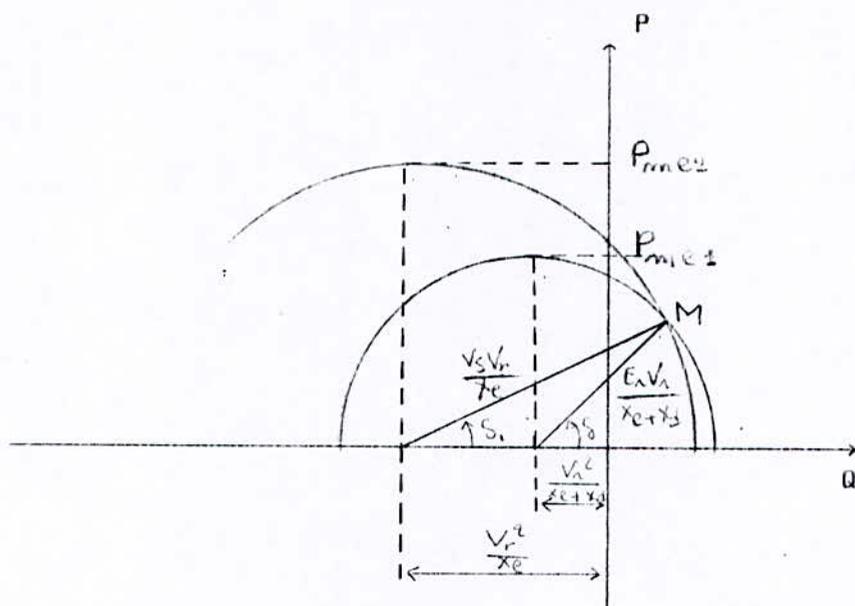


figure I.13 : Diagramme de fonctionnement d'une machine synchrone reliée à un réseau puissant.

Dans la période suivant l'élimination du défaut, pendant laquelle la machine cherche à retrouver l'équilibre, le régulateur de tension peut jouer un rôle déterminant en favorisant l'amortissement des oscillations. Son action est d'autant plus efficace que la stabilité statique du régime final est mise en cause. [9]

I.5 FORMES DE PERTE DE STABILITE :

Nous avons vu que dans le cas de l'apparition suivie de l'élimination d'un défaut, le point de fonctionnement pouvait franchir le point limite de stabilité B. La machine fait au moins un tour électrique (glissement de pas polaire). Il y a augmentation de l'angle δ , le rotor tourne à une vitesse supérieure à celle de synchronisme, on dit que la machine a perdu la stabilité en survitesse.

Supposons que le point de fonctionnement M s'arrête avant le point limite de stabilité B et reparte vers le point A. Il peut arriver que le freinage provoqué par le couple résistant électrique soit renforcé

par la réduction du couple moteur sous l'action du régulateur de vitesse, qu'on dépasse le point O, l'angle δ continue de décroître, la machine peut alors faire des tours électriques à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme, on dit que la machine a perdu le synchronisme en sous-vitesse [4] (voir figure I.12). Cette forme d'instabilité est moins fréquente que la précédente.

I.6 RESEAU MULTIMACHINE :

Nous avons considéré précédemment le cas très simple d'une machine reliée par une ligne à un réseau puissant. En fait les réseaux renferment plusieurs machines. Lors d'une perturbation, les machines sont soumises à une perturbation initiale et par ailleurs la perturbation, se propage à l'intérieur du réseau.

Au moment de l'apparition de la perturbation en un point du réseau, toutes les machines ne réagissent pas de la même manière puisque celles-ci n'ont pas les mêmes caractéristiques, et elles ne sont pas sollicitées de la même manière, compte tenu de la distance électrique qui les sépare de la perturbation.

Le couple électrique subit une variation de la forme :

$$\Delta C_e = \frac{E \Delta V}{X} \sin \delta$$

ΔV : Variation de la tension à l'endroit de la perturbation (point d'application).

Pour les machines, les variations du couple électrique sont différentes et liées aux distances électriques qui séparent les machines du lieu de défaut (réactance X).

On observe alors sur le réseau une fréquence moyenne à laquelle se superposent pendant le régime transitoire, les variations de fréquences dues aux réactions individuelles des machines. [4]

1.7 CONCLUSION :

Pour un réseau multimachine la loi des aires ne peut s'appliquer à cause de l'influence mutuelle entre les différentes machines [10]. L'apport de la simulation par ordinateur devient nécessaire pour tenir compte des interactions existantes dans le réseau, une modélisation de ce dernier est nécessaire.

CHAPITRE II : MODELISATION DES RESEAUX D'ENERGIE ELECTRIQUE.

II.1. INTRODUCTION :

Le but de ce chapitre, est de modéliser le réseau d'énergie électrique pour l'évaluation de la stabilité transitoire.

Dans une première partie, nous présentons succinctement la transformation de Park. Cette transformation conduit à un système d'équations électriques qui décrit le fonctionnement de la machine synchrone pendant le régime transitoire.

Le rotor de la machine comporte un enroulement dit enroulement inducteur et des amortisseurs. L'ensemble des amortisseurs peut être représenté de deux manières : soit par deux enroulements court-circuités en quadrature, l'un dit amortisseur d'axe direct, l'autre amortisseur d'axe en quadrature, soit par un seul enroulement en court-circuit dit amortisseur d'axe en quadrature. On peut à partir de là distinguer deux modèles pour décrire le fonctionnement de la machine. Ces deux représentations conduisent au modèle de Park [1].

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à la seconde représentation. Elle conduit au modèle à "deux axes", ce modèle permet de passer facilement à deux modèles du second ordre moyennant certaines approximations.[1]

La tension et la fréquence sont deux des principaux facteurs qui déterminent la qualité de l'énergie électrique distribuée aux consommateurs. Ces deux grandeurs apparaissent comme les paramètres fondamentaux de tout système d'énergie électrique. Il est donc important de prendre en compte au niveau de la modélisation du comportement dynamique des machines synchrones, les moyens de réglage qui assurent à chaque instant la tenue de la tension et de la fréquence.

Pour la tension, le réglage s'effectue par action sur la tension d'excitation commandant le courant dans l'enroulement inducteur. Cette

variation tient compte des seuils de surexitation et de sous-excitation. Nous considérons les structures les plus importantes des systèmes de régulations pour le réglage de la tension et de la vitesse avec la prise en compte des limites sur la puissance mécanique [11].

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation de tous les éléments composants le réseau multimachine. En considérant le modèle à deux axes avec régulation de tension et de vitesse pour chaque machine, une représentation dans l'espace d'état est obtenue.

II.2 MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHROME :

II.2.1 PRINCIPE DE LA TRANSFORMATION DE PARK :

La machine synchrone triphasée comporte d'une part, au stator trois enroulements de phases notés a, b et c, d'autre part, au rotor un enroulement d'excitation noté f dont l'axe magnétique est l'axe direct noté d. Elle comporte également un certain nombre de barres d'amortisseurs formant des circuits symétriques par rapport aux deux axes. Ces derniers peuvent être représentés avec une bonne approximation par deux circuits équivalents notés D et Q suivant les axes direct et quadratique. La figure (II.1) donne une représentation schématique de la machine .[1], [6], [12]

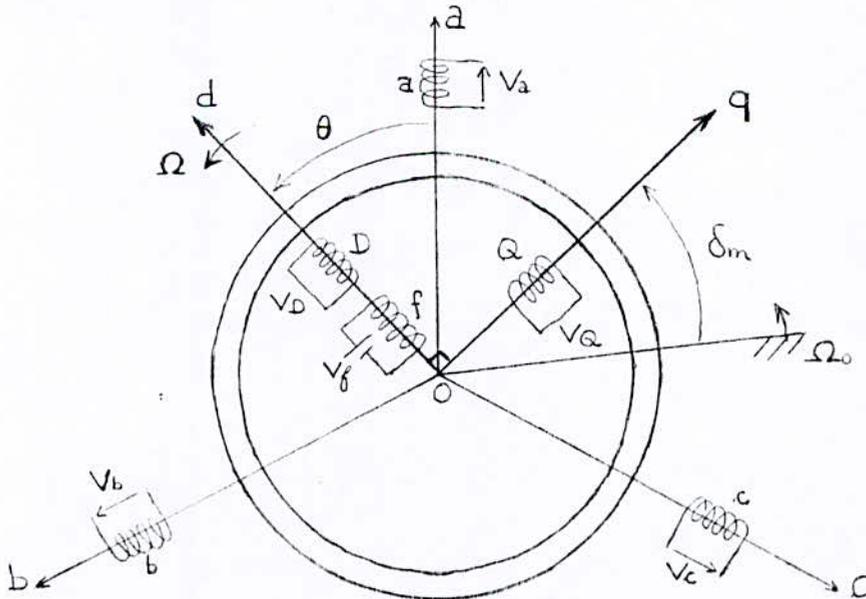


figure II.1 Représentation de la machine synchrone.

Considérons les trois phases du stator comme génératrices de courant et l'enroulement inducteur comme récepteur. Lorsque la saturation des circuits magnétiques est négligée, l'application de la loi d'Ohm à chacun des six enroulements de la figure (II.1) conduit aux équations suivantes :

Pour les trois phases du stator :

$$V_a = - R_a I_a - \frac{d\phi_a}{dt} \quad (II.1)$$

$$V_b = - R_b I_b - \frac{d\phi_b}{dt} \quad (II.2)$$

$$V_c = - R_c I_c - \frac{d\phi_c}{dt} \quad (II.3)$$

Pour les circuits rotor :

$$V_f = R_f I_f + \frac{d\phi_f}{dt} \quad (II.4)$$

$$0 = R_D I_D + \frac{d\phi_D}{dt} \quad (II.5)$$

$$0 = R_a I_a + \frac{d\phi_a}{dt} \quad (II.6)$$

avec :

V_k : la tension aux bornes de l'enroulement k.

ϕ_k : le flux dans l'enroulement k.

I_k : le courant dans l'enroulement k.

R_k : la résistance de l'enroulement k.

k = a, b, c, f, D et Q .

La transformation de Park (décomposition selon les deux axes d et q) peut s'interpréter comme la substitution aux trois enroulements de phase (a, b, c), immobiles par rapport au stator, de deux enroulements d et q tournant à la même vitesse que le rotor, ayant pour axes magnétiques respectivement l'axe direct d et l'axe en quadrature q (voir figure II.2).

La matrice de transformation de Park s'écrit [1] :

$$P = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

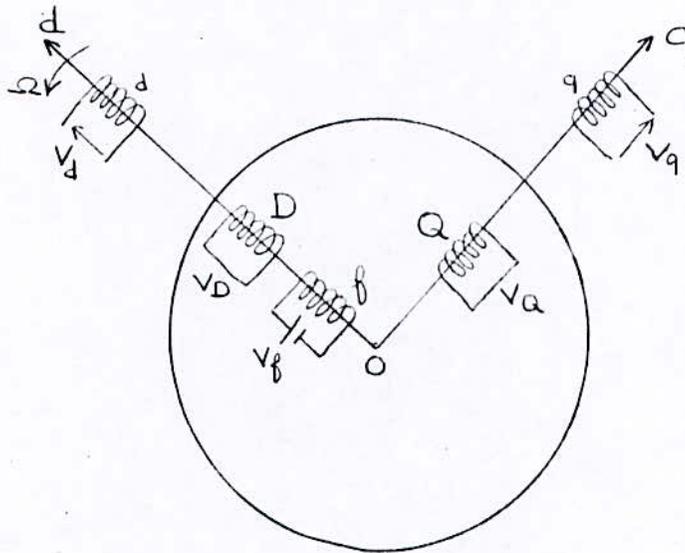


figure II.2 Représentation bipolaire de la machine.

L'application de celle-ci aux équations (II.1) , (II.2) et (II.3) conduit aux équations électriques suivantes :

$$V_d = -R_a I_d - \phi_q \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\phi_d}{dt} \quad (II.8)$$

$$V_q = -R_a I_q + \phi_d \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\phi_q}{dt} \quad (II.9)$$

Les équations magnétiques liant les courants et les flux dans les différents enroulements se décomposent alors en deux systèmes linéaires : un pour chacun des deux axes. Ces derniers s'écrivent

sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_f \\ \phi_D \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} X_d & X_{df} & X_{dD} \\ \sqrt{3/2} X_{fd} & X_f & X_{fD} \\ \sqrt{3/2} X_{Dd} & X_{Df} & X_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_f \\ I_D \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{bmatrix} \phi_q \\ \phi_Q \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} X_q & X_{qQ} \\ \sqrt{3/2} X_{Qq} & X_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

avec :

ϕ_k : Le flux dans l'enroulement k.

I_k : Le courant dans l'enroulement k.

X_{kl} : La réactance mutuelle entre les enroulements k'et l.

(k,l = d,q,f,D et Q).

X_d et X_q étant respectivement les réactances synchrones longitudinale et transversale.

Dans les études concernant les machines synchrones dans un modèle de réseau d'énergie électrique, il est préférable de travailler avec des grandeurs normalisées par rapport aux grandeurs nominales. Ces grandeurs réduites sont exprimées en p.u (per.unit).

Les valeurs de base sont définies par :

* Pour la vitesse :

$$\omega_b = 2 \pi f$$

Où f est la fréquence du réseau.

* Pour la tension :

$$V_b = R_b I_b$$

$$V_b = \omega_b \phi_b$$

* Pour le flux :

$$\phi_b = \frac{X_b I_b}{\omega_b}$$

Les valeurs réduites sont alors définies par :

$$i_k = \frac{I_k}{I_b}$$

$$\phi_k = \frac{\phi_k}{\phi_b}$$

$$v_k = \frac{V_k}{V_b}$$

$$r_k = \frac{R_k}{R_b}$$

Avec :

$$k = d, q, f, D \text{ et } Q.$$

Les équations (II.4), (II.5), (II.6), (II.8) et (II.9), exprimées en valeurs réduites sont de la forme :

$$v_d = -r_a i_d - \phi_q \omega + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\phi_d}{dt} \quad (II.12)$$

$$v_q = -r_a i_q + \phi_d \omega + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\phi_q}{dt} \quad (II.13)$$

$$v_f = r_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \quad (II.14)$$

$$0 = r_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \quad (II.15)$$

$$0 = r_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \quad (II.16)$$

On peut aussi rendre les matrices des deux systèmes (II.10) et (II.11) symétriques par un choix approprié des grandeurs de base pour les réactances. L'équation magnétique matricielle en valeur réduite s'écrit alors [1] :

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_f \\ \phi_D \\ \phi_q \\ \phi_Q \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} x_d & x_{md} & x_{md} & 0 & 0 \\ x_{md} & x_f & x_{md} & 0 & 0 \\ x_{md} & x_{md} & x_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_q & x_{mq} \\ 0 & 0 & 0 & x_{mq} & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

Considérons (II.12) et (II.13). Nous allons faire les hypothèses suivantes, généralement adoptées dans l'étude du régime transitoire des machines synchrones [1], [6] :

1.^{ère} hypothèse : Les f.e.m de transformation sont négligeables devant les f.e.m de rotation (les variations du module du flux sont négligeables devant les variations dues à la rotation).

$$\frac{d\phi_d}{dt} \ll \omega \phi_d \quad \text{et} \quad \frac{d\phi_q}{dt} \ll \omega \phi_q$$

2.^{ème} hypothèse : La tension aux bornes de la résistance de l'induit est négligeable devant la f.e.m de rotation .

Nous aboutissons donc aux équations suivantes pour le stator :

$$v_d = - \omega \phi_q \quad (II.18)$$

$$v_q = \omega \phi_d \quad (II.19)$$

L'ensemble des équations (II.14), (II.15), (II.16), (II.17), (II.18) et (II.19) permet d'étudier le régime transitoire électrique de la machine.

II.2.2 ÉQUATIONS MÉCANIQUES :

Pour caractériser la vitesse angulaire de rotation de la machine notée Ω , nous appellerons l'angle θ l'angle entre l'axe lié au stator et l'axe direct fixé au rotor (figure II.1).

Nous avons donc :

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (II.20)$$

Nous pouvons également caractériser cette vitesse à partir de l'angle δ_m entre l'axe tournant à la vitesse de synchronisme notée Ω_0 (fixe par hypothèse, puisque la fréquence du réseau est supposée constante) et l'axe transversal accroché au rotor. La position de l'axe q par rapport à l'axe fixé au stator est donnée par la relation suivante (figure II.1) :

$$\theta - \frac{\pi}{2} = \delta_m + \Omega_0 t \quad (\text{II.21})$$

Cela donne l'équation de variation de l'angle mécanique :

$$\frac{d\delta_m}{dt} = \Omega - \Omega_0 \quad (\text{II.22})$$

En première approximation, lorsque Ω est peu différente de Ω_0 , les mouvements du rotor de la machine sont régis par l'équation suivante :

$$J \Omega \frac{d\Omega}{\Omega dt} = P_m - P_e \quad (\text{II.23})$$

Avec :

J : moment d'inertie des parties tournantes de la machine.

Ω : vitesse angulaire.

Ω_0 : vitesse synchrone.

P_m : puissance mécanique développée par la turbine.

P_e : puissance électrique développée par la machine.

La puissance électrique s'écrit :

$$P_e = R_e (\bar{v} \bar{i}^*) \quad (\text{II.24})$$

Avec :

\bar{v} : la tension complexe aux bornes de la machine.

\bar{i}^* : l'expression conjuguée du courant statorique.

En divisant les deux membres de la relation (II.23) par la puissance nominale de la machine notée S_n l'équation précédente devient :

$$\frac{J\Omega_0}{S_n} \frac{d\Omega}{dt} = p_m - p_e \quad (\text{II.25})$$

Dans laquelle p_m et p_e sont exprimées en valeurs réduites (p.u.).

Remarquons que :

$$\frac{\Omega}{\Omega_0} = \frac{\omega}{\omega_b}$$

$$\omega_b = 2 \pi f$$

$$\delta = p_r \delta_m$$

Avec :

f : fréquence sur le réseau.

ω : pulsation de la tension aux bornes du stator.

ω_b : pulsation de référence.

δ : angle rotorique électrique de la machine.

p_r : nombre de paires de pôles de la machine.

Le mouvement des masses tournantes est régi par les équations suivantes :

$$M \frac{d\omega}{dt} = p_m - p_e \quad (\text{p.u.}) \quad (\text{II.26})$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b \quad (\text{II.27})$$

$M = \frac{J \cdot \Omega_0^2}{S_n \cdot \omega_b}$: étant le moment d'inertie des masses tournantes.

On remarque que le moment d'inertie M peut s'écrire selon la relation suivante :

$$M = \frac{2 W_c}{S_n \omega_b}$$

Avec $W_c = \frac{1}{2} J \cdot \Omega_0^2$: l'énergie cinétique des masses tournantes à la vitesse nominale Ω_0 .

On définit ainsi une quantité H appelée constante d'inertie :

$$H = \frac{W_c}{S_n} \quad (\text{en s})$$

Les équations (II.26) et (II.27) s'écrivent alors :

$$\frac{2.H}{\omega_b} \frac{d\omega}{dt} = p_m - p_e \quad (\text{II.28})$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b \quad (\text{II.29})$$

II.2.3 MODELE A DEUX AXES :

II.2.3.1 DETERMINATION DES PARAMETRES DE LA MACHINE :

Considérons la figure (II.2). Si l'enroulement amortisseur D d'axe direct n'est pas considéré, l'équation magnétique matricielle en valeurs réduites devient :

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_f \\ \phi_q \\ \phi_a \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} x_d & x_{md} & 0 & 0 \\ x_{md} & x_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_q & x_{mq} \\ 0 & 0 & x_{mq} & x_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ i_a \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Pour tenir compte des fuites dans les enroulements, posons :

$$\begin{cases} x_{1f} = x_f - x_{md} \\ x_{1a} = x_a - x_{mq} \end{cases}$$

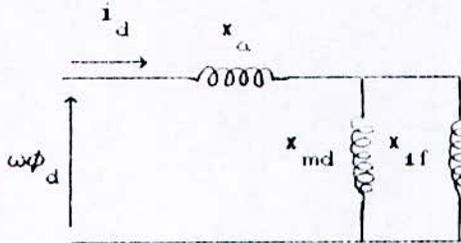
On peut alors représenter la machine synchrone par les schémas équivalents sur les deux axes illustrés sur la figure (II.3)

A partir de ces deux schémas nous pouvons définir :

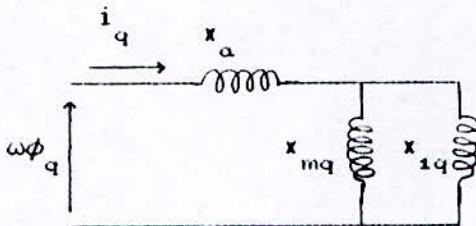
* les réactances transitoires directe et en quadrature notées respectivement x'_d et x'_q [1].

$$x'_d = x_d - \frac{x_{md} x_{mf}}{x_{1f} + x_{md}}$$

$$x'_q = x_q - \frac{x_{mq} x_{1q}}{x_{1q} + x_{mq}}$$



"sur l'axe direct"



"sur l'axe quadratique"

figure II.3 : Représentation magnétique de la machine.

* La constante de temps transitoire d'axe direct (resp d'axe en quadrature) notée T'_{d0} (resp T'_{q0}).

$$T'_{d0} = \frac{1}{\omega r_f} (x_{1f} + x_{md})$$

$$T'_{q0} = \frac{1}{\omega r_a} (x_{1q} + x_{mq})$$

Afin de déterminer les équations du modèle de la machine quelque changements de variables sont effectués.

Posons :

$$e'_q = \omega \frac{x_{md}}{x_f} \phi_f$$

$$e'_d = -\omega \frac{x_{mq}}{x_\alpha} \phi_\alpha$$

$$e_{ex} = \frac{x_{md}}{r_f} v_f$$

avec :

e'_q : f.e.m transitoire d'axe direct.

e'_d : f.e.m transitoire d'axe transversal.

e_{ex} : tension de l'excitation.

II.2.3.2 EXPRESSION DE LA TENSION TERMINALE :

Pour la composante directe, nous avons :

$$v_d = -x_{pq} i_q - x_{mq} i_\alpha$$

En remplaçant i_α par son expression, nous obtenons :

$$v_d = e'_d - x'_{q} i_q \quad (II.31)$$

Pour celle en quadrature, on peut écrire :

$$v_q = x_d i_d + x_{md} i_f$$

En remplaçant i_f par son expression (II.29), nous avons :

$$v_q = e'_q + x'_d i_d \quad (II.32)$$

En notation complexe, la tension aux bornes de la machine dans le repère (d,q) s'écrit sous la forme :

$$\bar{v}_{tr} = v_q + j v_d$$

De la même manière, pour la f.e.m interne et le courant dans le stator nous avons les expressions suivantes :

$$\bar{e}'_r = e'_q + j e'_d$$

$$\bar{i}'_r = i_q + j i_d$$

Compte tenu des équations (II.31) et (II.32), l'expression complexe de la tension aux bornes devient :

$$\bar{v}_{tr} = e'_r - j x'_d \bar{i}'_r + j (x'_d - x'_q) i_q$$

La représentation de Fresnel correspondante est donnée sur la figure (II.4):

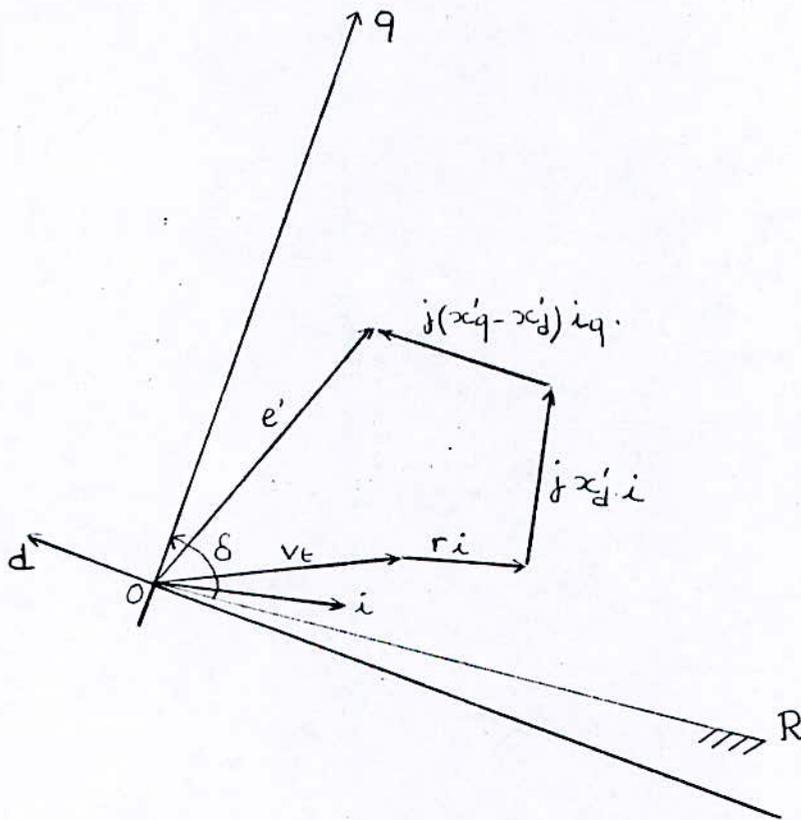


figure II.4: Représentation vectorielle de la machine.

la machine est alors modélisée dans ce cas, par le schéma électrique monophasé de la figure (II,5) :

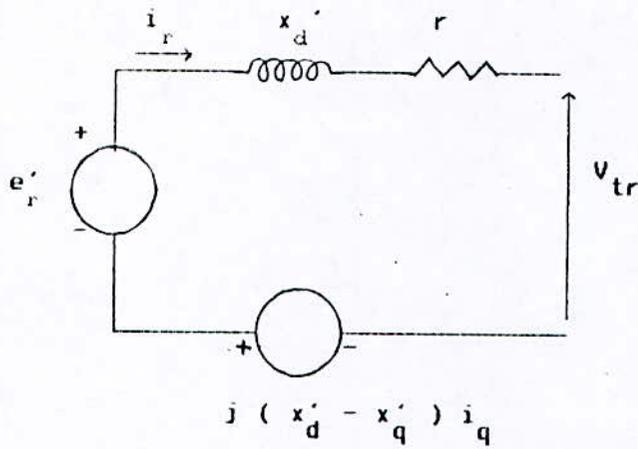


figure II.5 schéma électrique monophasé équivalent.

II.2.33 ÉQUATIONS DYNAMIQUES DE LA MACHINE :

A. VARIATION DE LA F.E.M TRANSITOIRE D'AXE TRANSVERSAL :

Considérons l'équation (II.14) relative aux variations du flux dans l'enroulement inducteur :

$$\frac{d\phi_f}{dt} = v_f - r_f i_f$$

$$\text{avec : } i_f = \frac{1}{x_f} (\omega \phi_f - x_{md} i_d)$$

l'équation de la dynamique de e'_q s'écrit donc :

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} \left\{ e_{ex} - e'_q + (x_d - x'_d) i_d \right\} \quad (\text{II.34})$$

B. VARIATION DE LA F.E.M TRANSITOIRE D'AXE DIRECT :

L'équation régissant les variations du flux dans l'enroulement amortisseur est donnée par :

$$\frac{d\phi_a}{dt} = -r_a i_a$$

Avec :

$$i_a = \frac{1}{x_a} (\omega \phi_a - x_{mq} i_q)$$

L'équation relative à e'_d s'écrit donc :

$$\frac{de'_d}{dt} = \frac{1}{T_{q0}} \left\{ -e'_d - (x'_q - x_q) i_q \right\} \quad (\text{II.35})$$

Le modèle à deux axes de la machine est donné par :

- * Les équations électriques (II.34) et (II.35).
- * Les équations mécaniques (II.28) et (II.29).

La puissance électrique développée par la machine est définie par :

$$P_e = e'_d i_d + e'_q i_q + (x'_d - x'_q) i_d i_q \quad (\text{II.36})$$

II.2.4 MODELE A UN AXE :

Si les enroulements amortisseurs D et Q respectivement d'axe direct et quadratique ne sont pas considérés la relation matricielle (II.17) en valeurs réduites devient :

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_f \\ \phi_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} x_d & x_{md} & 0 \\ x_{md} & x_f & 0 \\ 0 & 0 & x_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

En reprenant les mêmes calculs que pour le modèle à deux axes

(avec $\phi_a = 0$, $i_a = 0$ et $x_a = 0$), on aura :

$$e'_d = 0$$

$$v_d = -x_q i_q$$

$$v_q = e'_q + x'_d i_d$$

L'expression complexe de la tension aux bornes de la machine devient:

$$\bar{v}_{tr} = e'_q - j x'_d i_r + j (x'_d - x_q) i_q \quad (II.38)$$

La représentation de fresnel correspondante est donnée sur la figure (II.6) :

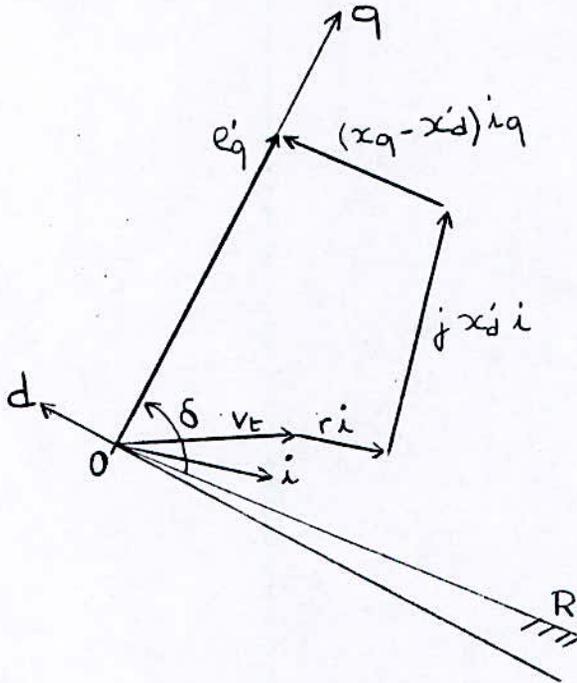


figure II.6 Représentation vectorielle de la machine.

La machine est alors modélisée dans ce cas par le schéma électrique monophasé de la figure (II.7) :

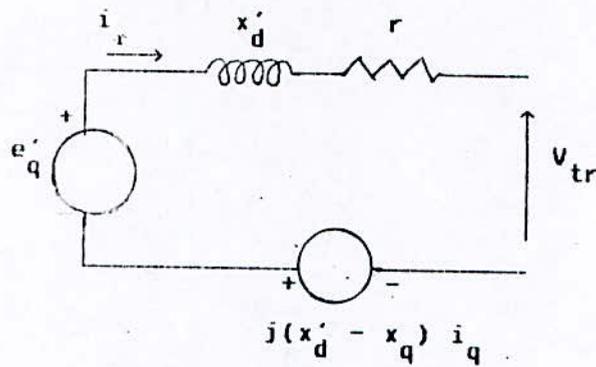


figure II.7 Schéma électrique monophasé équivalent.

L'équation de la dynamique de e'_q s'écrit :

$$\frac{de'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{do}} \left\{ e_{ex} - e'_q + (x_d - x'_d) i_d \right\} \quad (II.39)$$

Le modèle à un axe de la machine est donné par les équations mécaniques (II.28), (II.29) et l'équation électrique (II.39) que nous rappelons :

$$\frac{2H}{\omega_b} \frac{d\omega}{dt} = p_m - p_e$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b$$

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} \left\{ e_{ex} - e'_q + (x_d - x'_d) i_d \right\}$$

La puissance électrique développée par la machine est définie par :

$$p_e = e'_q i_q + (x'_d - x_q) i_q i_d \quad (II.40)$$

II.2.5 MODELE DU SECOND ORDRE :

Cette représentation de la machine considère le flux dans l'inducteur

constant. Ce qui revient à supposer que la machine se comporte comme une force électromotrice constante notée (e), en série avec la réactance transitoire de la machine notée x'_d . Cette hypothèse n'est valable que pendant un temps relativement court après l'apparition d'une perturbation. Par cette formulation la régulation de tension est ignorée. En général, cette modélisation manque de précision dans l'illustration des phénomènes transitoires de la machine synchrone. [1]

Les équations différentielles régissant la dynamique des machines se réduisent alors aux seules équations mécaniques suivantes :

$$\frac{2 H}{\omega_b} \frac{d\omega}{dt} = p_m - p_e \quad (II.41)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega - \omega_b \quad (II.42)$$

La puissance mécanique est considérée comme constante.

Cette représentation de la machine est un cas particulier de la modélisation à deux axes. En effet, si l'enroulement amortisseur D n'est pas pris en compte, la composante directe de la f.e.m interne est nulle ($e'_d = 0$). D'autre part, si la variation du flux dans l'enroulement inducteur est nulle pendant le régime transitoire (e'_q est constante), l'expression complexe de la f.e.m interne s'écrit alors :

$$\bar{e}' = e'_q + j 0 = e_q \quad (II.43)$$

e_q : étant la f.e.m en régime permanent.

La tension aux bornes de la machine devient :

$$\bar{v}_{tr} = \bar{e}_q - j x'_d \bar{i}_r \quad (II.44)$$

La représentation de Fresnel correspondante est donnée sur la figure (II.8):

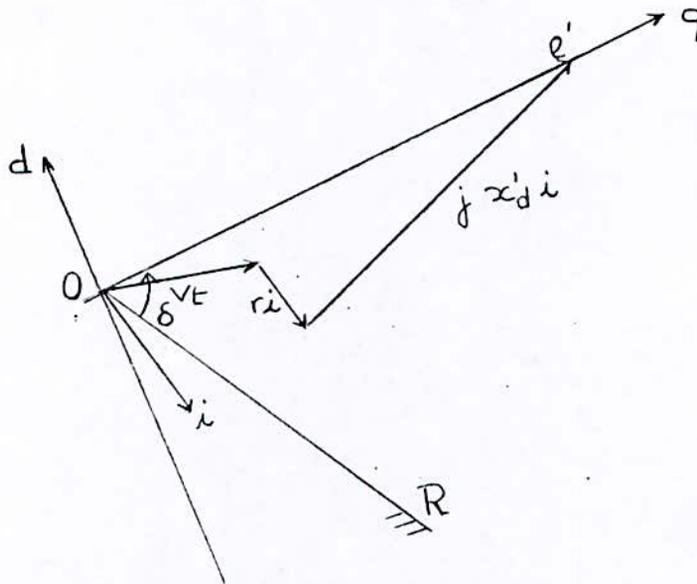


figure II.8 Représentation vectorielle de la machine.

La machine est alors modélisée par le schéma électrique monophasé de la figure (II.9):

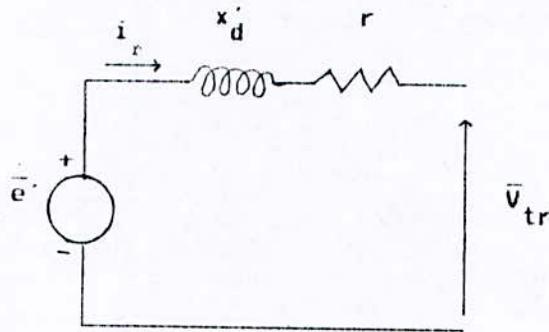


figure II.9 schéma électrique monophasé équivalent.

II.3 ORGANES DE REGULATION DE LA MACHINE :

La fréquence est l'expression électrique de la vitesse de rotation des alternateurs. En régime permanent les machines rendues solidaires par le couple synchronisant tournant toutes à la même vitesse. La variation de vitesse due au déséquilibre entre la puissance mécanique et la puissance électrique montre que les actions correctrices sur l'une des deux puissances peuvent être bénéfiques pour le maintien de la stabilité. Le choix de ces organes de commande peut non seulement améliorer le comportement statique mais avoir une action importante sur le comportement transitoire de la machine.

II.3.1 STRUCTURE DU REGULATEUR DE TENSION :

Le régulateur de tension a une influence directe sur la puissance électrique développée par la machine. Au niveau des groupes de production, un régulateur primaire de tension agit sur la tension d'excitation commandant le courant rotor de la machine de façon à asservir la tension stator à une valeur de consigne notée V_{ref} et fixée à priori. Ce réglage est rapide (temps de réponse inférieur à la seconde). Le signal d'erreur est amplifié pour fournir le signal de commande nécessaire au changement de la tension d'excitation. Ce réglage rapide permet de faire face aux variations aléatoires de la charge ou aux changements de topologie.

Nous considérons le régulateur dont le schéma bloc est celui de la figure (II.10) :

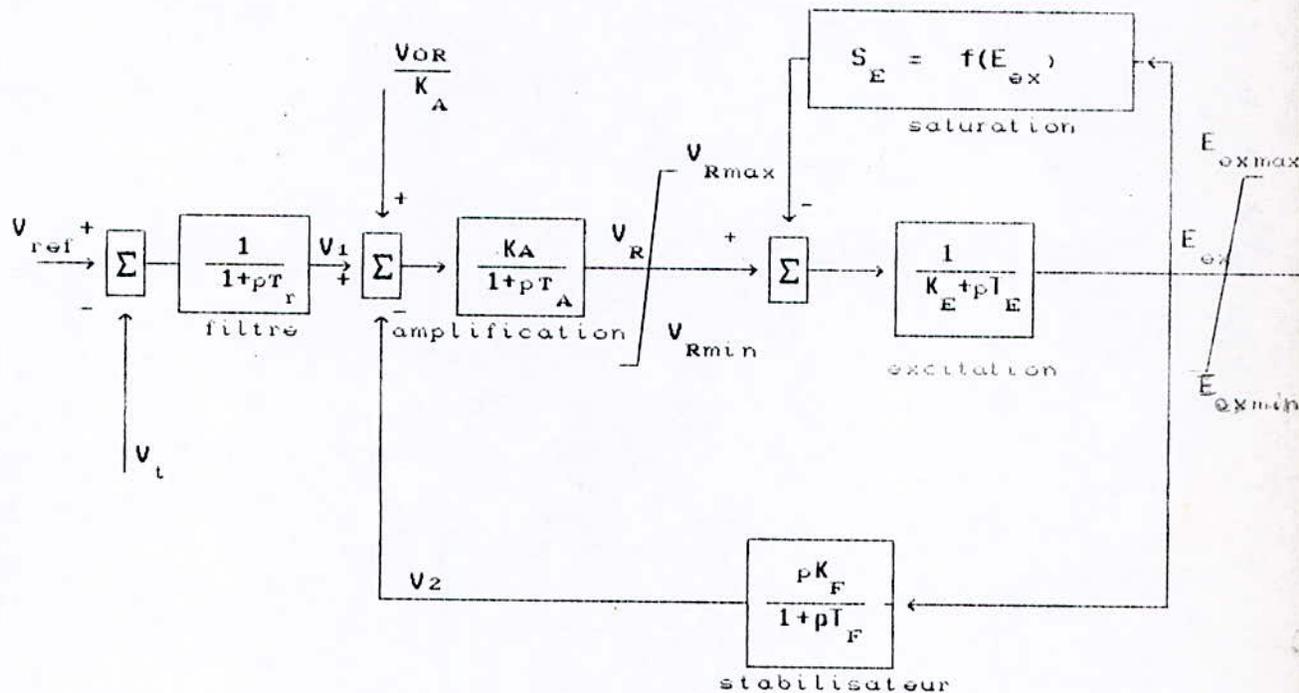


figure II.10 schéma bloc du régulateur de tension.

Les équations différentielles régissant la dynamique du régulateur de tension dans la zone linéaire ont pour expression :

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{T_r} \left(V_{ref} - V_l - V_1 \right)$$

$$\frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{T_A} \left(K_A \left(V_1 + \frac{V_{OR}}{K_A} - V_2 \right) - V_R \right)$$

$$\frac{dE_{ex}}{dt} = \frac{1}{T_E} \left(V_R - (S_E + K_E) E_{ex} \right)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{T_F} \left(K_F \frac{dE_{ex}}{dt} - V_2 \right)$$

Les seuils sont pris en compte de la manière suivante :

$$V_R = V_{Rmax} \quad \text{pour } V_R \geq V_{Rmax}$$

$$V_R = V_{Rmin} \quad \text{pour } V_R \leq V_{Rmin}$$

$$E_{ex} = E_{exmax} \quad \text{pour } E_{ex} \geq E_{exmax}$$

$$E_{ex} = E_{exmin} \quad \text{pour } E_{ex} \leq E_{exmin}$$

où :

V_{OR} : La tension à la sortie de l'amplificateur avant la perturbation.

V_l : Tension statorique (tension à réglée).

La saturation du système d'excitation est assimilée à une exponentielle : [11], [12]

$$S_E = A_{ex} e^{B_{ex} \cdot E_{ex}}$$

II.3.2 STRUCTURE DU REGULATEUR DE VITESSE :

La puissance mécanique développée par la turbine est essentiellement fonction de la position des soupapes d'admission, elles-mêmes sous la dépendance du régulateur de vitesse.

La commande de vitesse est assurée par un ajustement de la puissance mécanique. A la suite d'une perturbation, la réserve de puissance permet d'assurer la correction de l'écart entre la fréquence de référence (50 Hz.) et la fréquence réelle.

Le régulateur de vitesse des machines agit sur les vannes d'admission du fluide moteur afin de rétablir l'équilibre.

Le schéma bloc du régulateur de vitesse considéré est représenté sur la figure (II.11) :

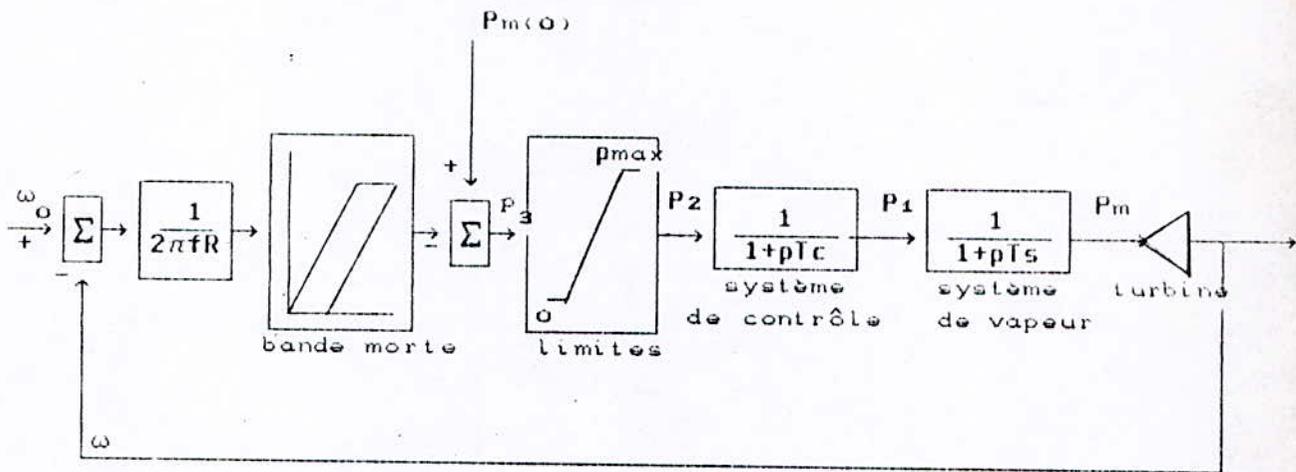


figure II.11 schéma bloc du régulateur de vitesse.

Les équations différentielles régissant le régulateur dans la zone linéaire sont :

$$\begin{cases} \frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{T_s} (P_1 - P_m) \\ \frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{T_c} (P_2 - P_1) \end{cases}$$

Avec :

$$P_2 = P_m(0) - \frac{1}{R} \left[\frac{\omega_0 - \omega}{2\pi f} \pm DBt \right]$$

Les limites sur la puissance mécanique sont données par :

$$P_2 = P_{\max} \quad \text{pour } P_3 \geq P_{\max}$$

$$P_2 = 0 \quad \text{pour } P_3 \leq 0.$$

Où:

$P_m(0)$: puissance mécanique à l'état initiale.

R : Coefficient de régulation -

DBt : valeur de la bande morte (variation de la fréquence tolérée; au delà de cette limite, le régulateur entre en action). [11]

II.4 MODELISATION DES LIGNES DE TRANSMISSION :

II.4.1 ÉQUATIONS DU RESEAU :

Les différentes machines ne sont pas indépendantes entre-elles, mais reliées par un réseau d'énergie électrique, celui-ci correspond à un ensemble de lignes et de transformateurs triphasés . Les bornes extrêmes des lignes et des transformateurs sont connectées par des jeux de barres ,par lesquels, il est possible de raccorder des producteurs, des consommateurs, etc...

Les lignes de transmission permettent d'amener l'énergie électrique des centres de production vers les centres de consommation. Les lignes sont représentées par un quadripôle symétrique donné par la figure (II.12) :

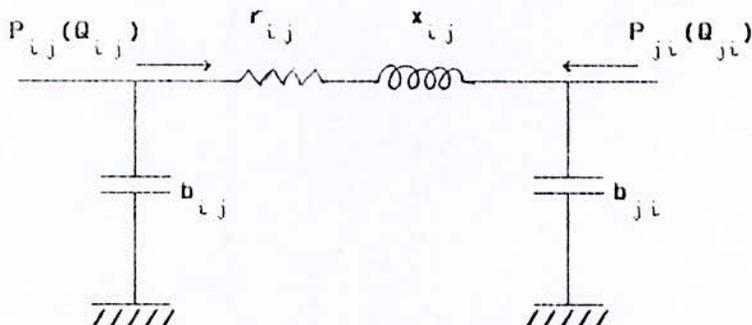


Figure II.12 Représentation des lignes de transport.

r_{ij} : la résistance de la ligne i-j.

X_{ij} : la réactance de la ligne i-j.

b_{ij} : la susceptance latérale (coté i).

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + j \cdot X_{ij}}$$

y_{ij} : L'admittance série de la ligne i-j.

On définit $Y(n,n)$, la matrice d'admittance nodale du réseau (ne tenant pas compte des générateurs ni des charges) par :

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad \text{si } i \neq j$$

$$Y_{ii} = \sum_{k=1}^n (y_{ik} + b_{ik})$$

n : nombre de noeuds.

II.4.2 REPRESENTATION DES CHARGES :

Les charges sont représentées par des admittances constantes du type :

$$y_{ic} = \frac{P_{ci} - j Q_{ci}}{2 V_i^2} \quad i = 1, \dots, n_{ch}$$

Avec :

V_i : module de la tension au noeud de charge i.

P_{ci} : puissance active consommée par la charge i.

Q_{ci} : puissance réactive consommée par la charge i.

n_{ch} : nombre de charges.

Durant le régime transitoire, on définit la matrice admittance Y_t (tenant compte des charges) par :

$$Y_{t_{ij}} = Y_{t_{ji}} \quad i \neq j$$

$$Y_{t_{ii}} = Y_{t_{ii}} \quad 1 \leq i \leq n_g \quad (\text{pour les noeuds g\u00e9n\u00e9rateurs}).$$

$$Y_{t_{ii}} = Y_{t_{ii}} + y_{t_{i0}} \quad n_g + 1 \leq i \leq n \quad (\text{pour les noeuds de charges}).$$

n_g : nombre de noeuds g\u00e9n\u00e9rateurs.

n_{ch} : nombre de noeuds consommateurs.

$$n = n_g + n_{ch}.$$

II.5 MODELISATION DES DEFAUTS:

II.5.1 DECLENCHEMENT TRIPHASE D'UNE LIGNE i-j :

On d\u00e9finit une matrice $Y'_t(n,n)$ d'admittances nodales pendant le d\u00e9faut, \u00e0 partir de Y_t , en ajoutant aux termes $Y_{t_{ij}}$ et $Y_{t_{ji}}$ l'admittance de la ligne d\u00e9clench\u00e9e, et en retranchant aux termes $Y_{t_{ii}}$ et $Y_{t_{jj}}$ l'admittance et la susceptance de la ligne d\u00e9clench\u00e9e.

II.5.2 COURT-CIRCUIT TRIPHASE AU NOEUD i :

A partir de la matrice $Y_t(n,n)$ on d\u00e9finit la matrice $Y'_t(n-1,n-1)$ en supprimant la ligne et la colonne i.

II.6 CHANGEMENT DE REPERE :

Dans un syst\u00e8me multimachine, l'axe tournant \u00e0 la vitesse de synchronisme permet de d\u00e9finir un rep\u00e8re synchrone not\u00e9 R. Ce rep\u00e8re est li\u00e9 au mouvement de l'ensemble des machines. Il constitue une r\u00e9f\u00e9rence fixe. Les grandeurs li\u00e9es au comportement dynamique de chaque machine prise individuellement sont exprim\u00e9es par rapport au rep\u00e8re R.

Consid\u00e9rons une grandeur complexe A_t dans les deux syst\u00e8mes de coordonn\u00e9es (figure II.13) :

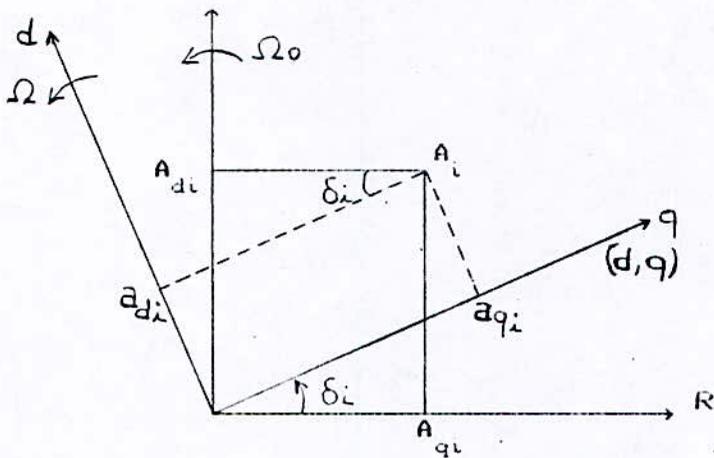


figure II.13 Repère synchrone (R) et repère machine (d,q).

A_i peut s'écrire suivant le repère :

$$\begin{cases} A_{ir} = a_{qi} + j \cdot a_{di} & \text{dans } (d,q). \\ A_{iR} = A_{qi} + j \cdot A_{di} & \text{dans } R. \end{cases}$$

La figure (II.13) montre que l'on peut écrire A_{iR} sous la forme :

$$A_{iR} = (a_{qi} \cos \delta_i - a_{di} \sin \delta_i) + j(a_{di} \cos \delta_i + a_{qi} \sin \delta_i) \quad (\text{II.45})$$

Pour chaque machine, nous avons alors :

$$A_{iR} = A_{ir} \exp(j \delta_i) \quad \text{pour } i=1, \dots, n_g \quad (\text{II.46})$$

En notation matricielle, le changement de base s'effectue par la relation suivante :

$$\underline{A}_R = P \underline{A}_r \quad (\text{II.47})$$

Les éléments de la matrice de passage P sont de la forme :

$$\begin{cases} p_{i i} = \exp\{j \delta_i\} \\ p_{i j} = 0 \quad \forall i, j=1, \dots, n_g \end{cases}$$

II.6.1 EXPRESSION DES EQUATIONS DU RESEAU DANS LE REPERE (D,Q) :

Le réseau peut être modélisé par un système d'équations linéaires reliant les courants injectés aux noeuds et les tensions aux bornes. En écrivant ces équations sous forme matricielle dans le repère synchrone, nous avons :

$$\bar{i}_R = Y \bar{v}_R \quad (II.48)$$

Avec :

n_g : nombre de noeuds machine.

n_d : nombre de noeuds interne (noeuds PQ).

\bar{i}_R : vecteur courants à $(n_g + n_d)$ éléments.

\bar{v}_R : vecteur tensions à $(n_g + n_d)$ éléments.

Y : matrice nodale carrée de dimension $(n_g + n_d) \cdot (n_g + n_d)$.

En distinguant les noeuds machine des autres noeuds, l'équation (II.48) peut s'écrire sous forme de blocs. Elle devient alors :

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{ng} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ng,ng} & Y_{ng,m} \\ Y_{m,ng} & Y_{m,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{ng} \\ \bar{v}_m \end{bmatrix} \quad (II.49)$$

En développant la relation (II.49), on aura :

$$I_{ng} = Y_{ng,ng} V_{ng} + Y_{ng,m} V_m \quad (II.50)$$

$$0 = Y_{m,ng} V_{ng} + Y_{m,m} V_m \quad (II.51)$$

En éliminant V_m de l'équation (II.50), nous déduisons alors la relation matricielle réduite aux noeuds machine :

$$\bar{I}_{ng} = Y_{rr} \bar{V}_{ng} \quad (II.52)$$

Avec :

$$Y_{rr} = Y_{ng,ng} - Y_{ng,m} Y_{m,m}^{-1} Y_{m,ng} \quad (II.53)$$

L'équation (II.52) représente le réseau réduit aux noeuds machines seulement.

On peut également écrire la relation (II.52) en fonction des forces électromotrices transitoires des machines en incluant dans la matrice Y_{rr} les réactances transitoires [1], [12]. Nous aurons alors l'expression suivante qui lie les courants injectés (aux noeuds producteurs) aux f.e.m transitoires des machines.

$$\bar{i}_R = Y_{re} e'_R \quad (II.54)$$

Avec :

\bar{i}_R : vecteur des courants injectés aux noeuds producteurs.

e'_R : vecteur des f.e.m transitoires des machines.

Y_{re} : Matrice d'admittance réduite aux noeuds générateurs du réseau.

Les éléments de Y_{re} sont données par :

$$Y_{re \ i j} = G_{ij} + j B_{ij} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, ng$$

G_{ij} (respectivement B_{ij}) étant la conductance (respectivement la susceptance) de transfert entre le noeud i et le noeud j.

Compte tenu de l'équation (II.47), les courants et les f.e.m transitoires satisfont les relations suivantes :

$$\bar{i}_R = P \bar{i}_r \quad (II.55)$$

$$\bar{e}'_R = P \bar{e}'_r \quad (II.56)$$

En portant \bar{i}_R et \bar{e}'_R dans l'équation (II.54), nous pouvons écrire :

$$\bar{i}_r = M e'_r \quad (II.57)$$

M : étant la matrice qui s'écrit :

$$M = P^{-1} \cdot Y_{re} \cdot P$$

Ses éléments sont :

$$\begin{cases} m_{ii} = G_{ii} + j B_{ii} \\ m_{ij} = F_{G+B}(\delta_{ij}) + j \cdot F_{B-G}(\delta_{ij}) \end{cases} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n_g$$

avec :

$$\begin{cases} F_{G+B}(\delta_{ij}) = G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \\ F_{B-G}(\delta_{ij}) = B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \end{cases}$$

Dans la suite des calculs, nous considérons la représentation de la machine à deux axes. De plus on négligera la saillance des pôles c.à.d : $x'_{di} = x'_{qi}$.

Considérons l'équation (II.57). Nous avons pour une machine i la

relation suivante :

$$\bar{i}_{ri} = \sum_{j=1}^n m_{ij} e'_{rj} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n_g$$

comme :

$$\begin{cases} \bar{i}_{ri} = i_{qi} + j i_{di} \\ e'_{ri} = e'_{qi} + j e'_{di} \end{cases}$$

Les composantes directe et quadratique s'écrivent alors sous la forme:

$$\left[\begin{array}{l} i_{di} = G_{ii} e'_{di} + B_{ii} e'_{qi} + \sum_{j=1 (j \neq i)}^n \left\{ e'_{dj} F_{G+B}(\delta_{ij}) + e'_{qj} F_{B-G}(\delta_{ij}) \right\} \\ i_{qi} = G_{ii} e'_{qi} - B_{ii} e'_{di} + \sum_{j=1 (j \neq i)}^n \left\{ e'_{qj} F_{G+B}(\delta_{ij}) - e'_{dj} F_{B-G}(\delta_{ij}) \right\} \end{array} \right. \quad (II.58)$$

Les composantes directe et quadratique de la tension aux bornes de la machine sont obtenues à partir de (II.31) et (II.32) que nous rappelons :

$$\begin{cases} v_{di} = e'_{di} - x'_{di} i_{qi} \\ v_{qi} = e'_{qi} + x'_{di} i_{di} \end{cases} \quad \text{avec } (x'_{di} = x'_{qi})$$

Le module de la tension est alors :

$$v_i = \sqrt{v_{di}^2 + v_{qi}^2}$$

La puissance électrique développée par la machine est donnée par la relation (II.36) que nous rappelons :

$$p_{ei} = e'_{di} i_{di} + e'_{qi} i_{qi} \quad \text{avec : } x'_{di} = x'_{qi}$$

II.7 SOLUTION DU PROBLEME DE STABILITE TRANSITOIRE :

Les équations du modèle adoptées pour l'étude de la stabilité transitoire sont données ci-dessous :

* Pour les machines synchrones :

$$\left[\begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_b}{2H} (P_m - P_e) \\ \frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T_{do}} \left[E_{ex} - e'_q + (x_d - x'_d) i_d \right] \\ \frac{de'_d}{dt} = \frac{1}{T_{qo}} \left[-e'_d - (x_q - x'_q) i_q \right] \end{array} \right.$$

* Pour les régulateurs de tension :

$$\left[\begin{array}{l} \frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{T_r} (V_{ref} - V_t - V_1) \\ \frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{T_A} \left(K_A \left(V_1 + \frac{V_{oR}}{K_R} - V_2 \right) - V_R \right) \\ \frac{dE_{ex}}{dt} = \frac{1}{T_E} \left(V_R - (S_E + K_E) E_{ex} \right) \\ \frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{T_F} \left(K_F \frac{dE_{ex}}{dt} - V_2 \right) \end{array} \right.$$

* Pour les régulateurs de vitesse :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{T_S} (P_1 - P_m) \\ \frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{T_C} (P_2 - P_1) \end{array} \right.$$

On pose :

$$x_{1i} = \delta_i$$

$$x_{2i} = \omega_i$$

$$x_{3i} = e_{qi}$$

$$x_{4i} = e_{di}$$

$$x_{5i} = V_{1i}$$

$$x_{6i} = V_{Ri}$$

$$x_{7i} = E_{\text{oxi}}$$

$$x_{8i} = V_{2i}$$

$$x_{9i} = P_{mi}$$

$$x_{10i} = P_{1i}$$

avec $i = 1, \dots, ng.$

Les équations du modèle s'écrivent alors :

$$\dot{x}_{1i} = x_{2i} - \omega_b$$

$$\dot{x}_{2i} = \frac{\omega_b}{2H_i} \left(x_{9i} - P_{ei} \right)$$

$$\dot{x}_{3i} = \frac{1}{T_{doi}} \left(x_{7i} - x_{3i} - (x_{di} - x'_{di}) I_{di} \right)$$

$$\dot{x}_{4i} = \frac{1}{T_{qoi}} \left(-x_{4i} - (x_{qi} - x'_{di}) I_{qi} \right)$$

$$\dot{x}_{5i} = \frac{1}{T_{ri}} \left(V_{refi} - V_{1i} - x_{5i} \right)$$

$$\dot{x}_{\sigma i} = \frac{1}{I_{Ai}} \left\{ K_{Ai} \left(x_{5i} + \frac{x_{\sigma i}^s}{K_{Ai}} - x_{\sigma i} \right) - x_{\sigma i} \right\}$$

$$\dot{x}_{7i} = \frac{1}{I_{Ei}} \left[x_{\sigma i} - \left(K_{Ei} + A_{ex} e^{B_{ex} x_{7i}} \right) x_{7i} \right]$$

$$\dot{x}_{8i} = \frac{1}{I_{Fi}} \left(K_{Fi} x_{7i} - x_{8i} \right)$$

$$\dot{x}_{9i} = \frac{1}{I_{Si}} \left(x_{10i} - x_{9i} \right)$$

$$\dot{x}_{10i} = \frac{1}{I_{Ci}} \left(P_{2i} - x_{10i} \right)$$

avec :

$$I_{di} = G_{ii} x_{4i} + B_{ii} x_{3i} + \sum_{j=1 (j \neq i)}^n \left(x_{4j} F_{G+B}(x_i - x_j) + x_{3j} F_{B-G}(x_i - x_j) \right)$$

$$I_{qi} = G_{ii} x_{3i} - B_{ii} x_{4i} + \sum_{j=1 (j \neq i)}^n \left(x_{3j} F_{G+B}(x_i - x_j) - x_{4j} F_{B-G}(x_i - x_j) \right)$$

$$P_{ei} = x_{3i} I_{qi} + x_{4i} I_{di}$$

$$V_{ti} = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2}$$

$$V_{di} = x_{4i} - x_{di}^s$$

$$V_{qi} = x_{3i} - x_{qi}^s$$

$$V_{refi} = V_{ti}^s$$

$$P_2 = x_{9i}^s - \frac{1}{R_i} \left[\frac{x_{2i}^s - x_{2i}}{2\pi f} \pm DB_{ti} \right]$$

$\bar{x} = [x_{1i}^s, x_{2i}^s, \dots, x_{10i}^s]^t$ étant le point d'équilibre avant la perturbation.

Le vecteur d'état X peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{X} = F(X)$$

$$\dot{X} = \left(\frac{dx_{1n}}{dt}, \frac{dx_{2n}}{dt}, \dots, \frac{dx_{10n}}{dt} \right)$$

Avec : $n = 1, \dots, ng.$

Ce vecteur d'équations différentielles non-linéaires est résolu numériquement par l'utilisation de la méthode d'intégration numérique de RUNGE KUTTA du 4^{ème} ordre.

II.8 CONCLUSION :

On a vu dans ce chapitre comment déduire des modèles différents de la machine synchrone moyennant certaines approximations des équations générales. Le choix d'un modèle est lié, d'une part, à la possibilité de déterminer avec suffisamment de précision ces paramètres et d'autre part, au fait qu'il puisse ouvrir au mieux tous les aspects physiques susceptibles de se présenter au cours des sollicitations que l'on désire calculer.

L'introduction de la régulation améliore la stabilité du réseau, sachant qu'il existe plusieurs types de régulations de vitesse et de tension. L'utilisation d'un type donné est fonction de la nature des consommateurs, de la taille du réseau et des contraintes que le réseau doit respecter.

CHAPITRE III : RESEAU ETUDIE.

Nous prenons comme exemple l'application, un réseau à 9 noeuds et 3 machines. Nous donnons ci-dessous le schéma du réseau ainsi que ces caractéristiques.[12]

III.1 SCHEMA DU RESEAU :

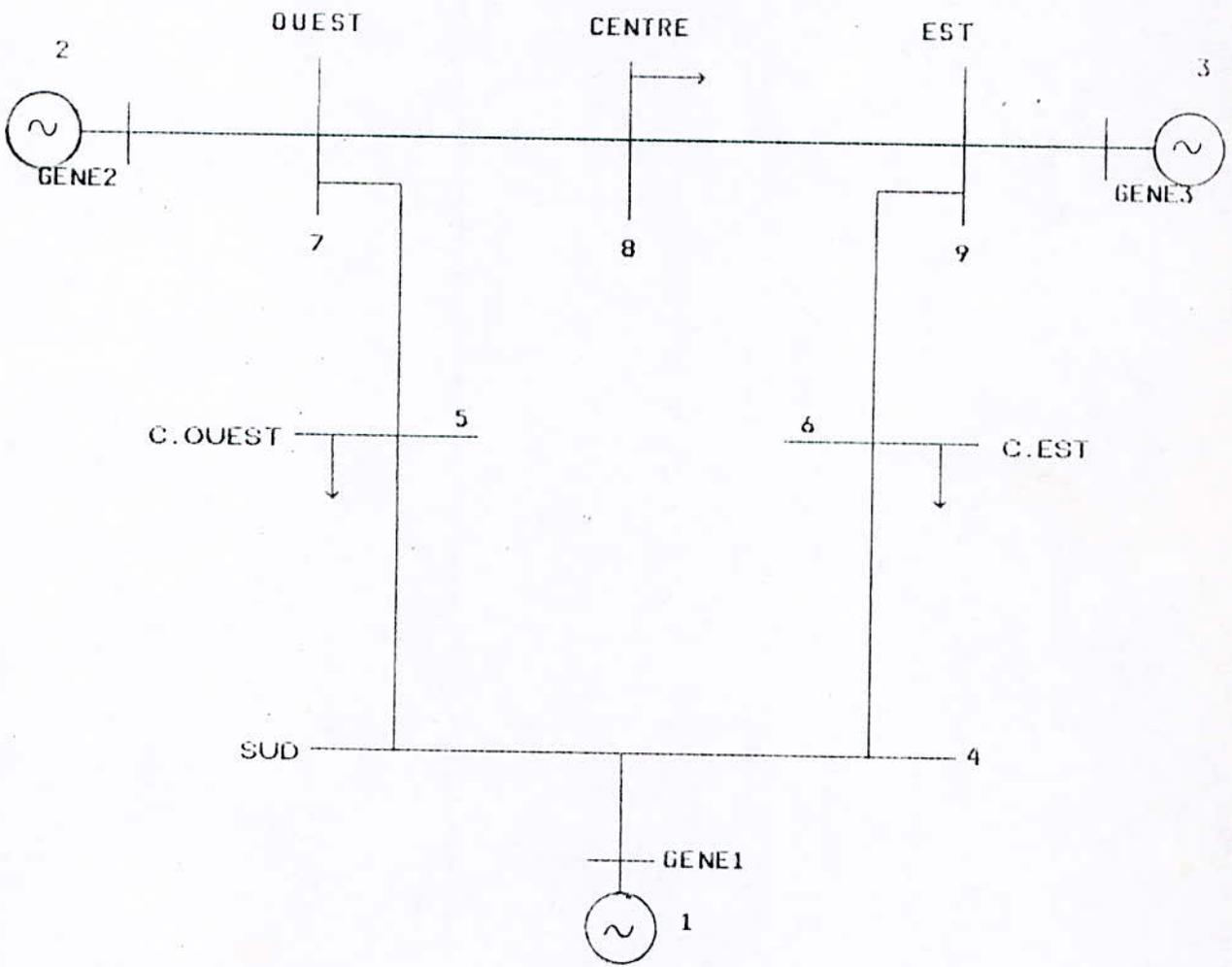


figure III.1: schéma du réseau étudié.

III.2 DONNEES DU RESEAU :

III.2.1 CARACTERISTIQUES DES LIGNES.

N° LIGNE	NOEUD 1	NOEUD 2	R(pu)	X(pu)	B/2(pu)
1	GENE1	SUD	0.0	0.0576	0.0
2	SUD	C.OUE	0.01	0.085	0.0088
3	SUD	C.EST	0.017	0.092	0.0079
4	GENE2	OUEST	0.0	0.0625	0.0
5	OUEST	CENTR	0.0085	0.072	0.00745
6	CENTR	EST	0.0119	0.1008	0.01045
7	GENE3	EST	0.0	0.0586	0.0
8	C.EST	EST	0.039	0.170	0.0179
9	C.OUE	OUEST	0.032	0.161	0.0153

Tableau III.1.

B/2 : demi-susceptance de la ligne.

III.2.2 CARACTERISTIQUES DES MACHINES :

	GENE1	GENE2	GENE3
Wc(Mw.s)	2364.	640.	301.
SN(MVA)	247.5	192.	128.
D (pu)	0.0	0.07	0.05
X'_d (pu)	0.0608	0.1198	0.1813
X_d (pu)	0.1460	0.8958	1.3125
X_q (pu)	0.0969	0.8645	1.2578
T'_{d0} (s)	8.96	6.0000	5.89
T'_{q0} (s)	0.	0.535	0.6

Tableau III.2.

W_c : énergie cinétique à la vitesse nominale.

D : coefficient d'amortissement dû aux frottements.

III.2.3 CARACTERISTIQUES DES REGULATEURS DE TENSION :

	GENE1	GENE2	GENE3
K_E	0.17	0.04	0.03
T_E (s)	0.50	0.35	0.45
T_r (s)	0.0	0.0	0.0
T_A (s)	0.05	0.1	0.06
T_F (s)	1.	1.	1.
K_A	400.	50.	50.
K_F	0.04	0.04	0.04
V_{rmax} (pu)	7.3	3.5	3.2
V_{rmin} (pu)	-7.3	0.	-3.2
Δ_{ex}	0.0027	0.0039	0.0027
B_{ex}	1.465	1.555	1.639
E_{exmax} (pu)	4.5	2.5	2.4

Tableau III.3.

III.2.4 CARACTERISTIQUES DES REGULATEURS DE VITESSE :

	GENE1	GENE2	GENE3
T_S (s)	0.2	0.3	0.25
R	-0.04	-0.04	-0.04
DBt	0.0	0.0	0.0
T_C (s)	0.40	0.15	0.15
P_{max} (pu)	1.5	1.65	1

Tableau III.4.

Toutes les données sont exprimées dans la base 100 Mva.

III.3 RESULTATS OBTENUS DE LA SIMULATION :

Le calcul de la circulation de puissance nécessaire avant la simulation de défaut est fait selon l'organigramme A.1 (voir annexe) et le calcul de la stabilité par la méthode de RANGE KUTTA selon l'organigramme A.2 (voir annexe). Le programme de calcul est écrit en fortran 77 et exécuté sur le VAX de l'ENP.

On suppose l'existence d'un défaut triphasé symétrique sur la ligne 9 (code noeud 5-7) partageant celle-ci dans les proportions 1/3 et 2/3 (le défaut étant proche du noeud 7).

L'ouverture de la ligne affectée par le défaut est réalisée en deux stades grâce aux deux disjoncteurs extrêmes. Pour simuler un défaut éliminé en deux temps t_1 et t_2 on a procédé de la manière suivante :

Soit A et B les extrémités d'une ligne et D (proche de A) le lieu du défaut choisi :



La chronologie du déroulement du défaut est :

- Création d'un noeud fictif D.
- Elimination du défaut au premier stade en éliminant la ligne AD.
- Elimination du défaut au deuxième stade en éliminant la ligne DB et suppression du noeud D.

On rappellera que le problème primordial qui se pose à l'exploitant d'un réseau électrique soumis à une perturbation est de savoir quelle temporisation à afficher au niveau des protections pour éviter l'écroulement du réseau. Ainsi en simulant, on peut tester plusieurs niveaux de temporisations jusqu'à avoir celle permettant la sauvegarde de la stabilité (temporisations optimales).

Nous présentons tout d'abord, le cas d'un défaut en ligne bien éliminé par les protections rapides qui laissent les machines stables,

puis le cas d'un défaut avec défaillance des disjoncteurs qui entraînent des temps d'éliminations élevés conduisant à la perte de synchronisme des groupes.

* Cas stable ($t_1=0.1s$ et $t_2=0.3s$) :

Les résultats obtenus sont donnés par les figures allant de III.1 à III.16. Pour mettre en évidence l'influence des systèmes de régulations, nous avons considéré les quatre cas suivants :

- * 1^{er} cas : sans régulation.
- * 2^{ème} cas : avec régulation de vitesse.
- * 3^{ème} cas : avec régulation de tension.
- * 4^{ème} cas : avec régulation de tension et de vitesse.

Dans tous les cas, on constate que durant le défaut il y a une chute de tension aux bornes des machines et une augmentation des vitesses de celles-ci, du fait que les puissances électriques fournies diminuent considérablement. On remarque que la machine 1 par exemple fonctionne pendant quelques fractions de secondes en moteur, alors que les deux autres sont moins sollicitées par la perturbation.

Après élimination du défaut, on retrouve brutalement les puissances électriques et les tensions statoriques suivi d'un régime oscillatoire amorti. Les figures III.5 à III.16 montre bien l'influence des systèmes de régulation sur les grandeurs de la machine. Par exemple l'introduction du régulateur de tension améliore et amortit les premières oscillations de la tension, il en est de même pour le régulateur de vitesse qui améliore la qualité de la fréquence. L'introduction des deux systèmes à la fois donne des performances meilleurs.

* Cas instable ($t_1=0.3s$ et $t_2=0.45s$):

Les résultats obtenus sont donnés par les figures allant de III.17 à III.20.

Malgré la présence des régulateurs, on voit que les machines oscillent fortement. On notera que la machine 1 perd son synchronisme en sous-vitesse alors que les deux autres ont perdu leur synchronisme en survitesse.

Sans regulation
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

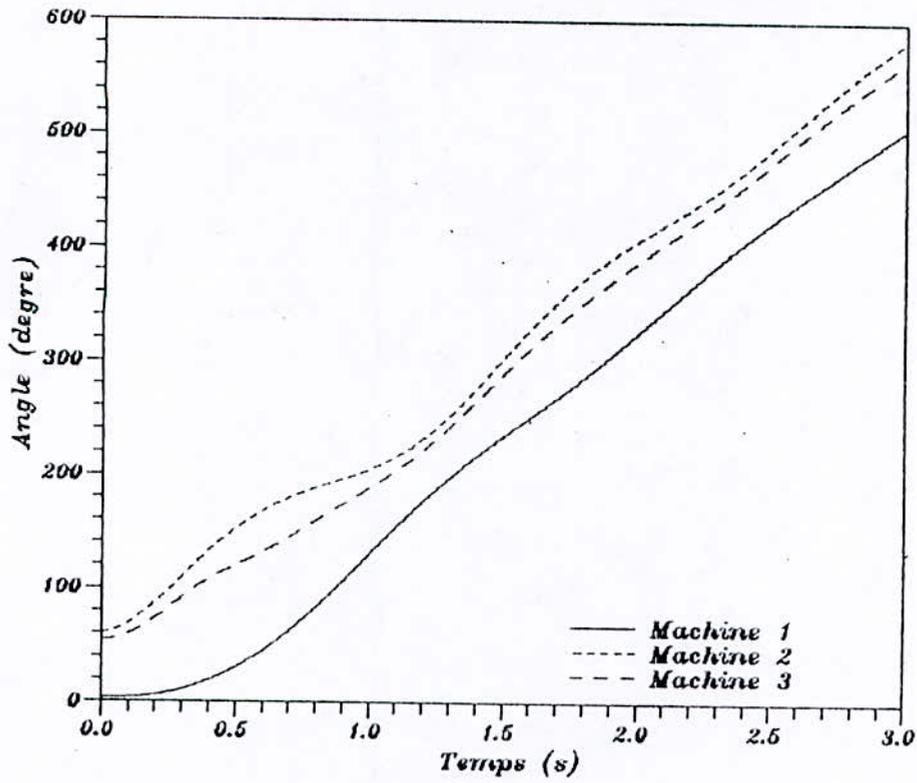


figure III.1.

Sans regulation
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

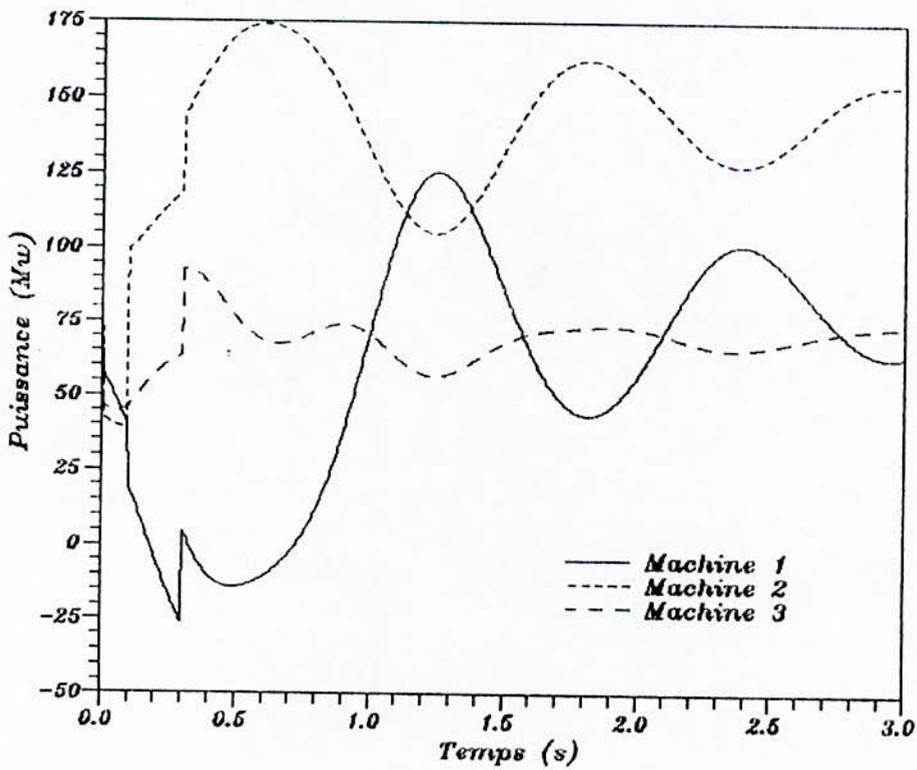


figure III.2.

Sans regulation
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

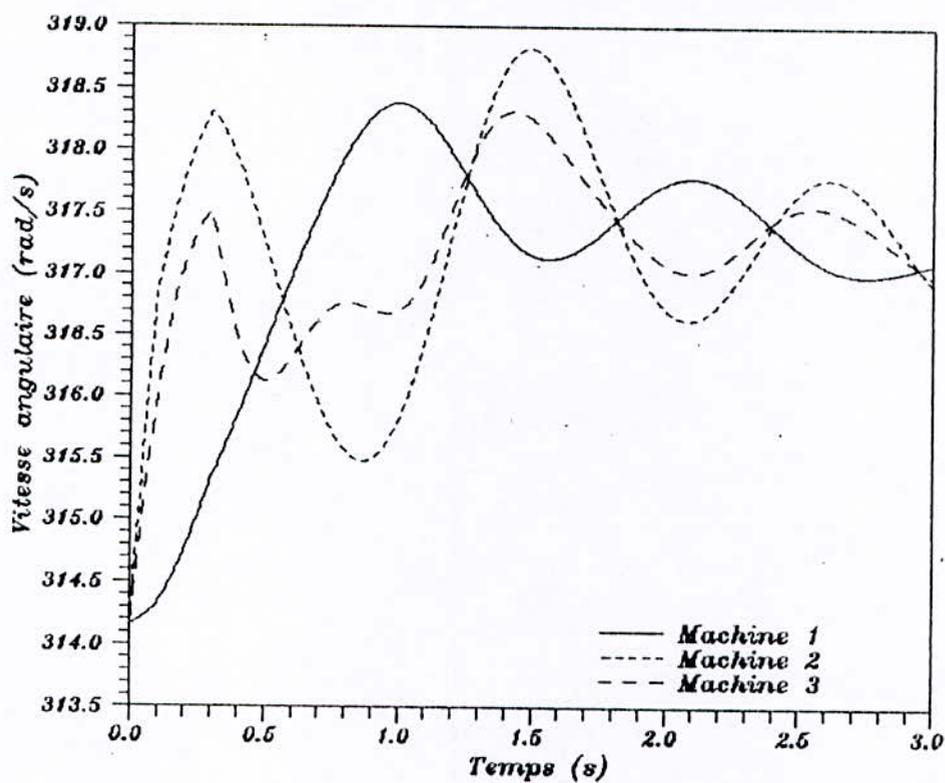


figure III.3.

Sans regulation
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

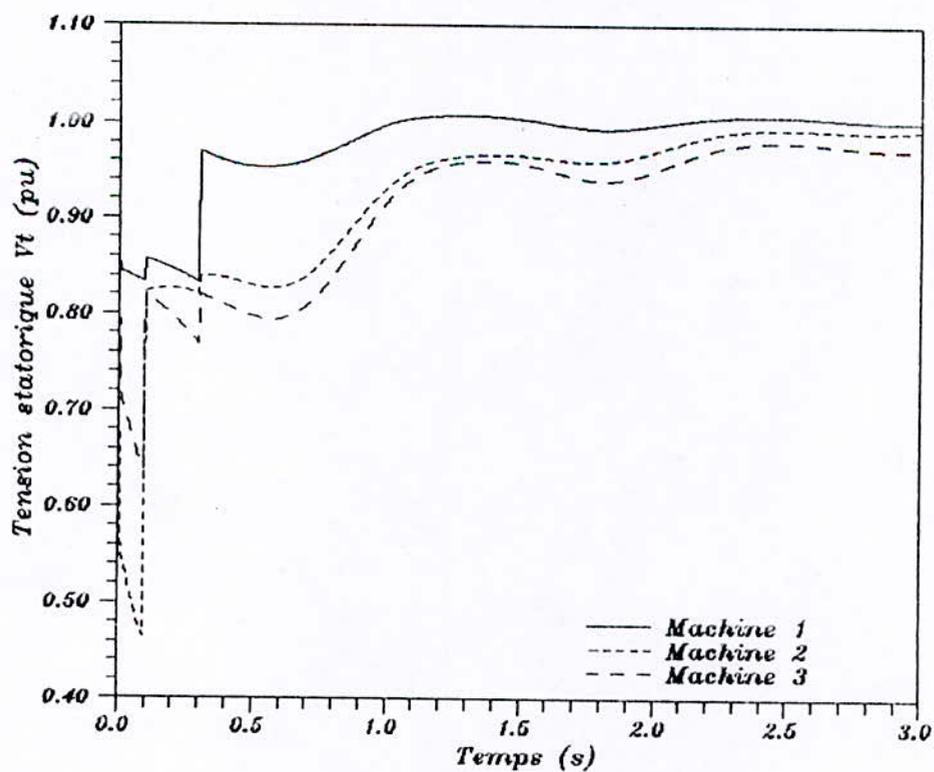


figure III.4.

Avec regulation de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

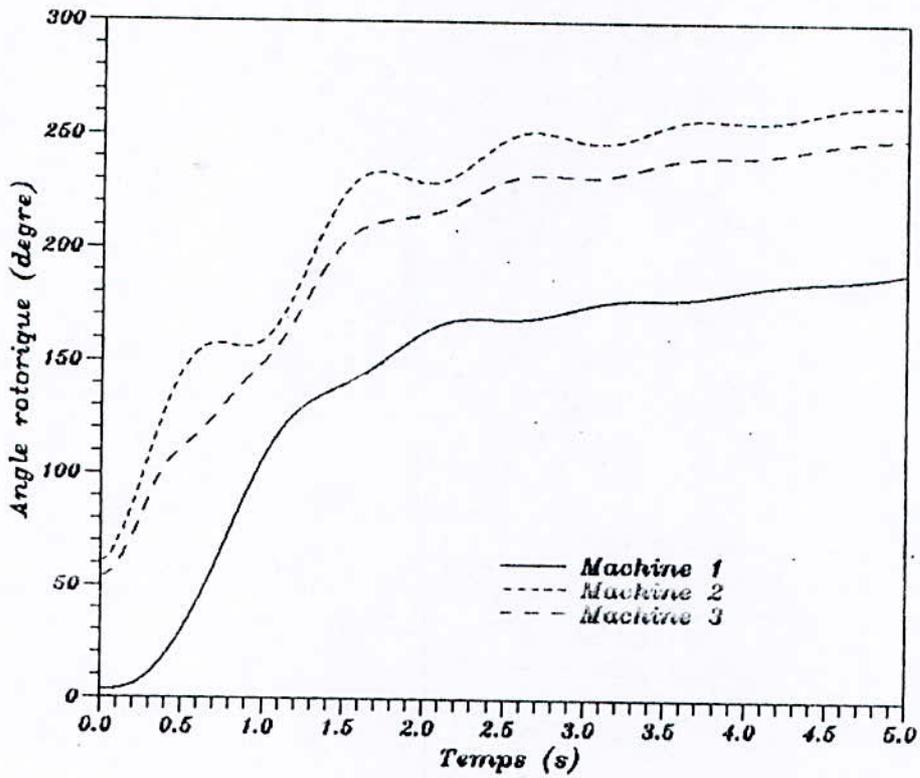


figure III.5.

Avec regulation de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

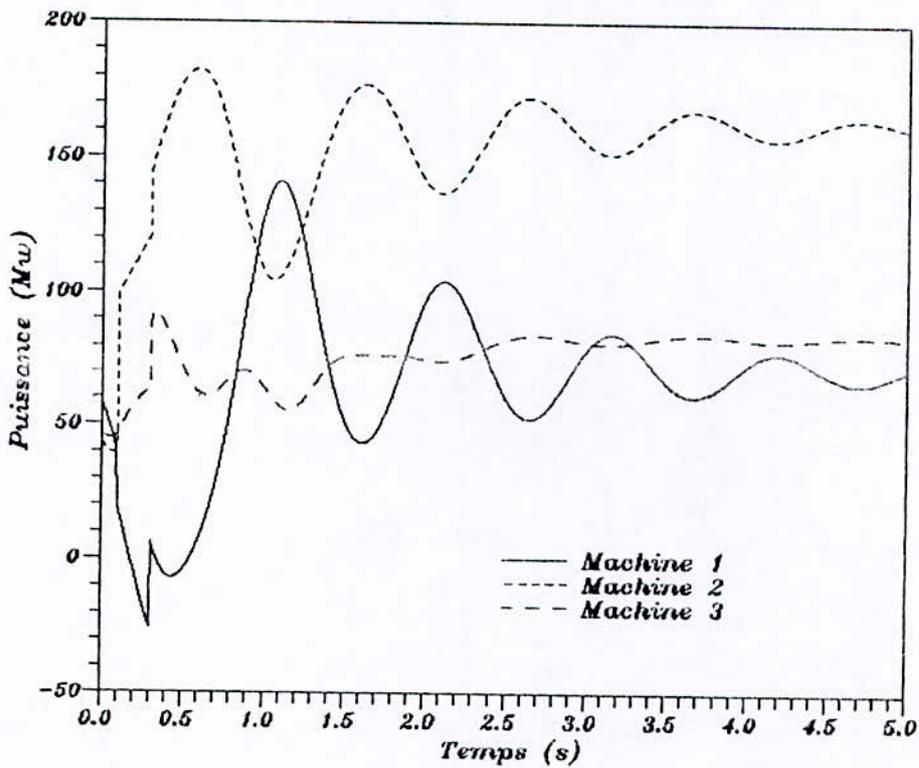


figure III.6.

Avec regulation de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

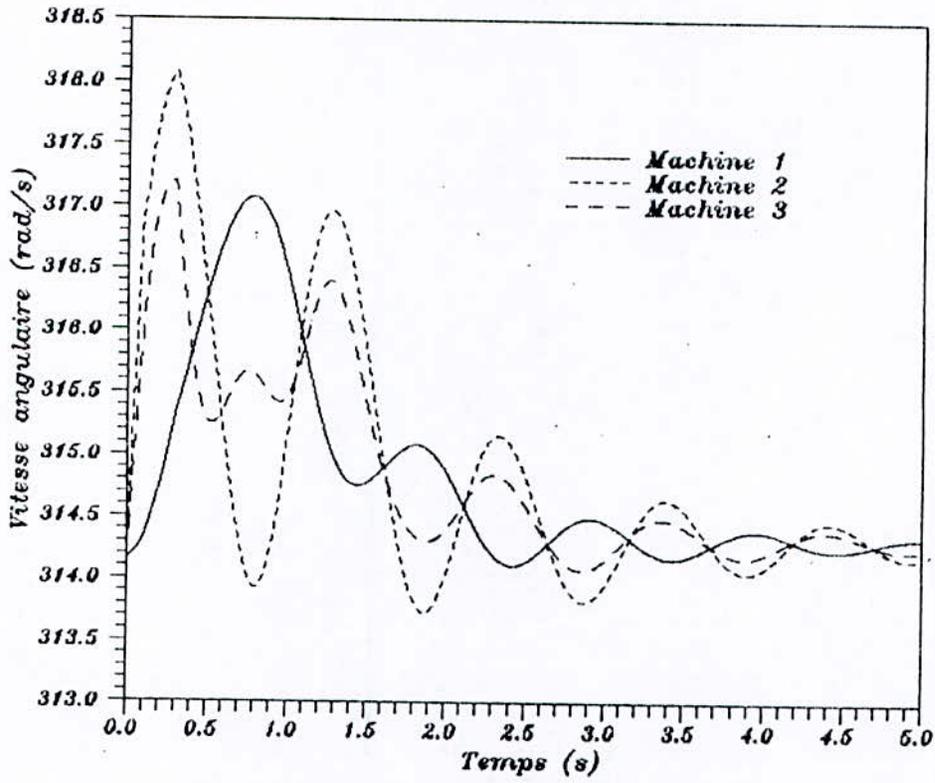


figure III.7.

Avec regulation de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

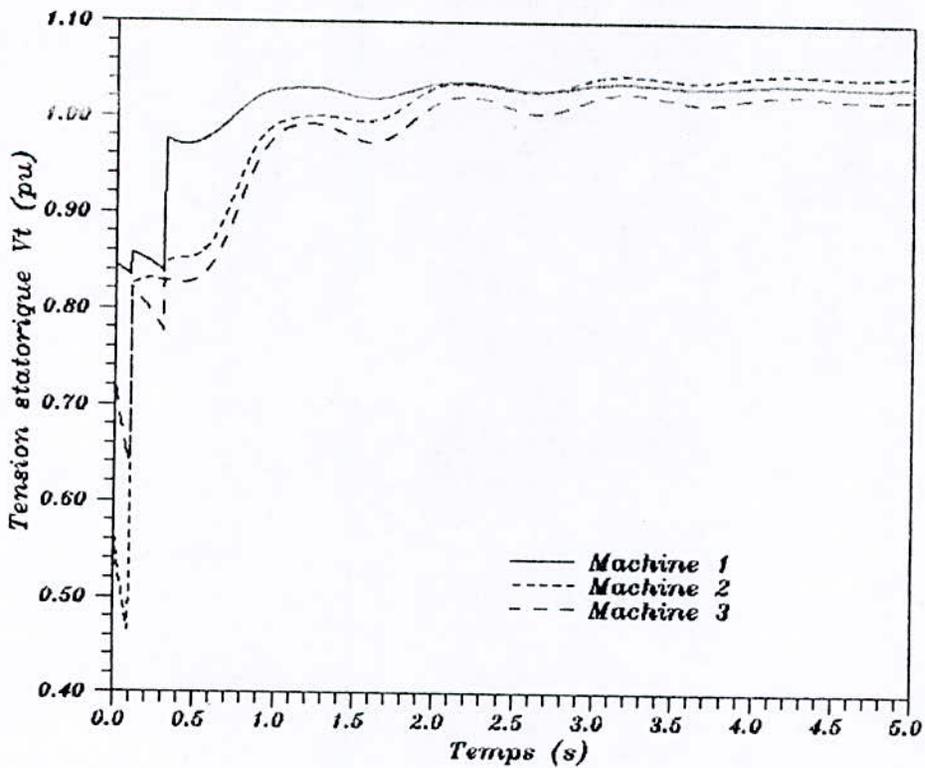


figure III.8.

Avec regulation de tension.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

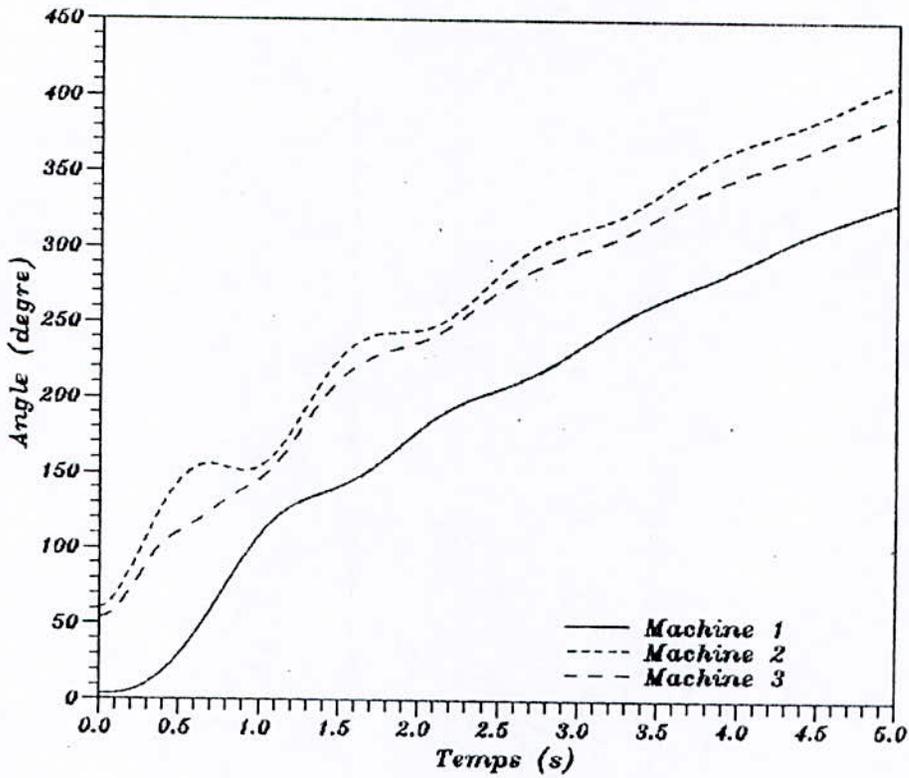


figure III.9.

Avec regulation de tension.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

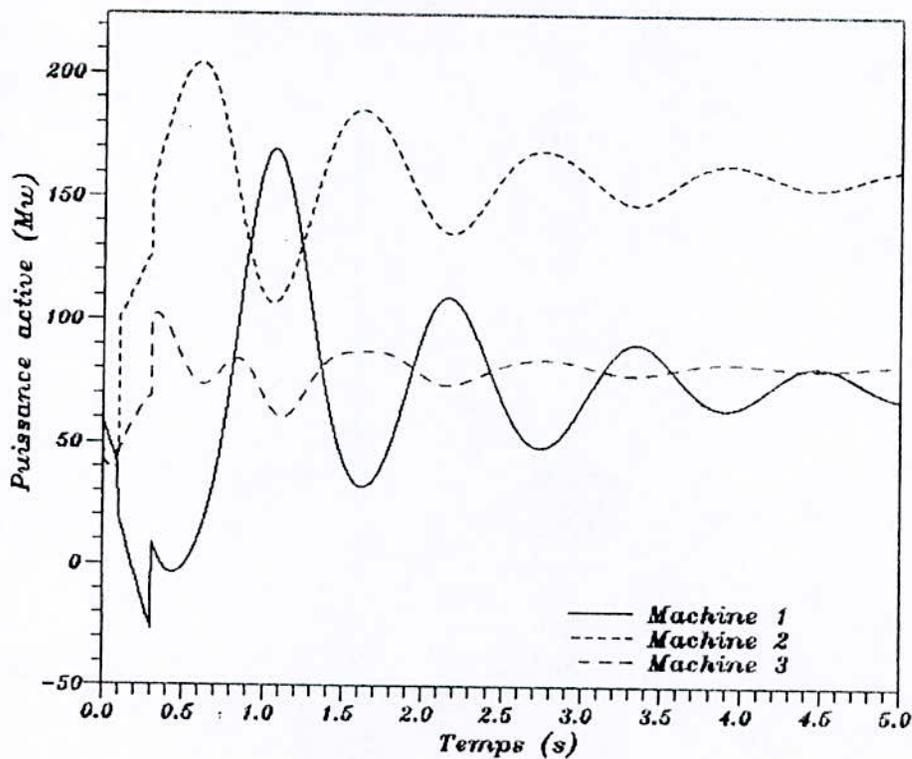


figure III.10.

Avec regulation de tension.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

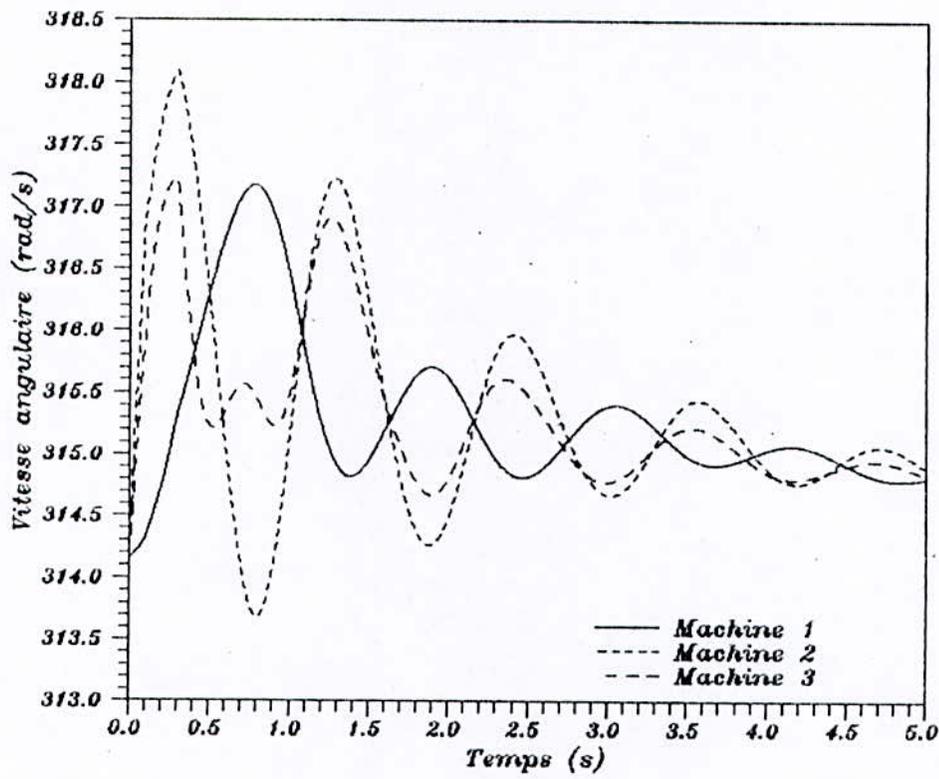


figure III.11.

Avec regulation de tension.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

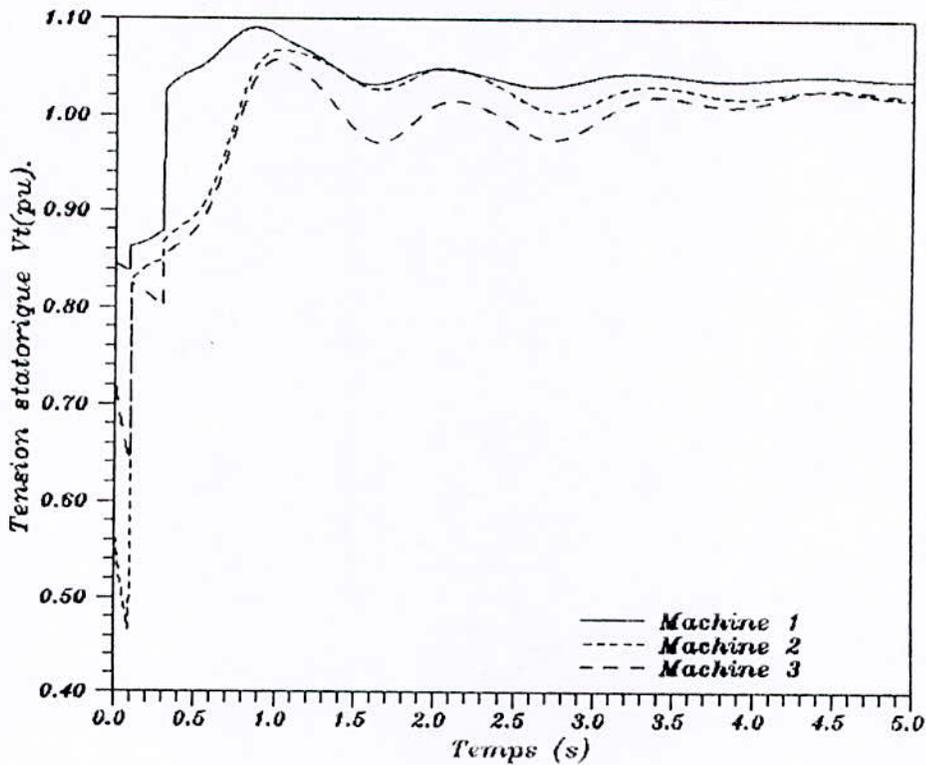


figure III.12.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

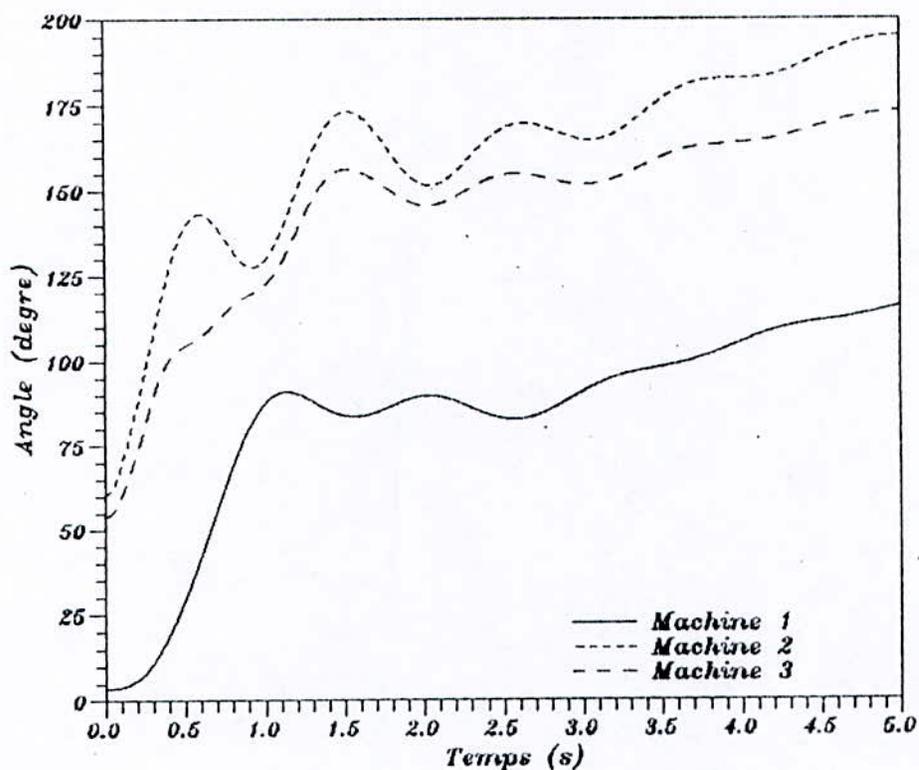


figure III.13.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

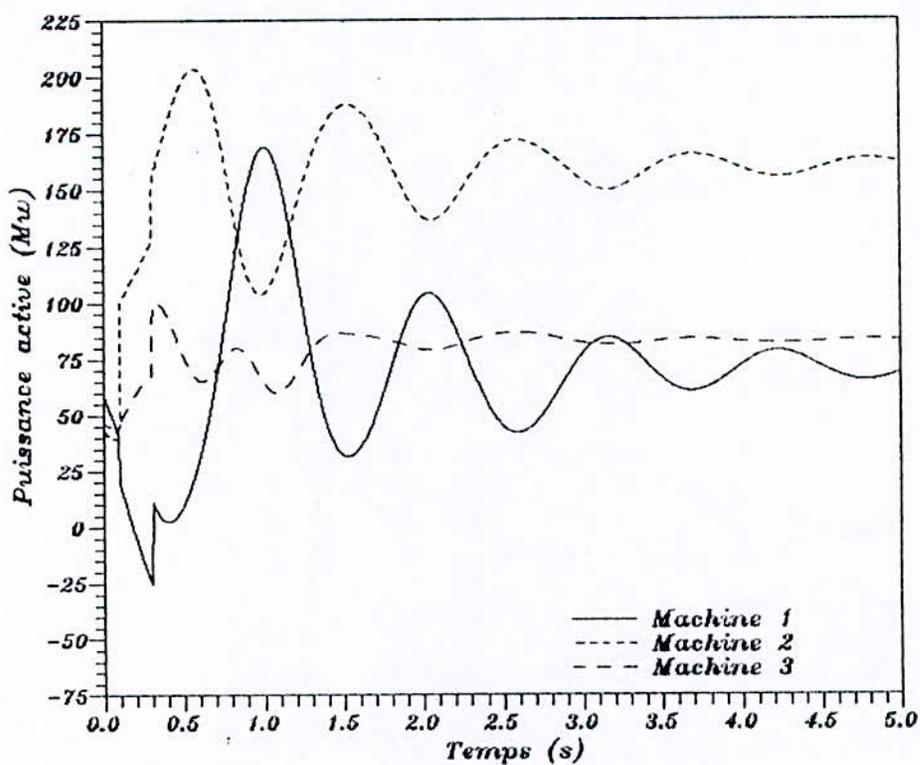


figure III.14.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

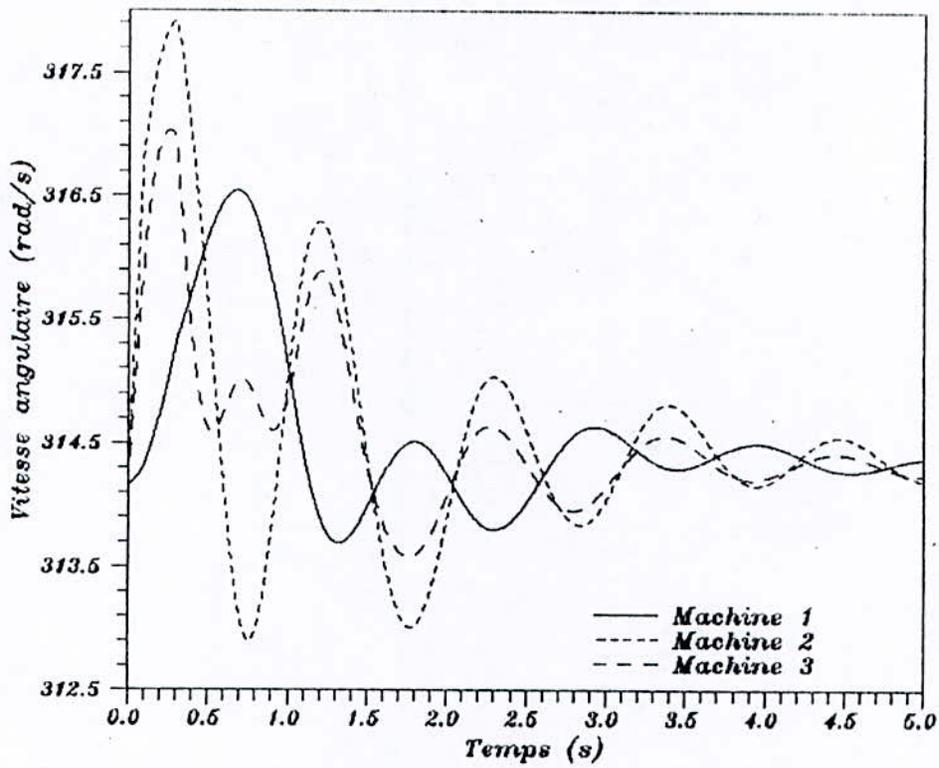


figure III.15.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

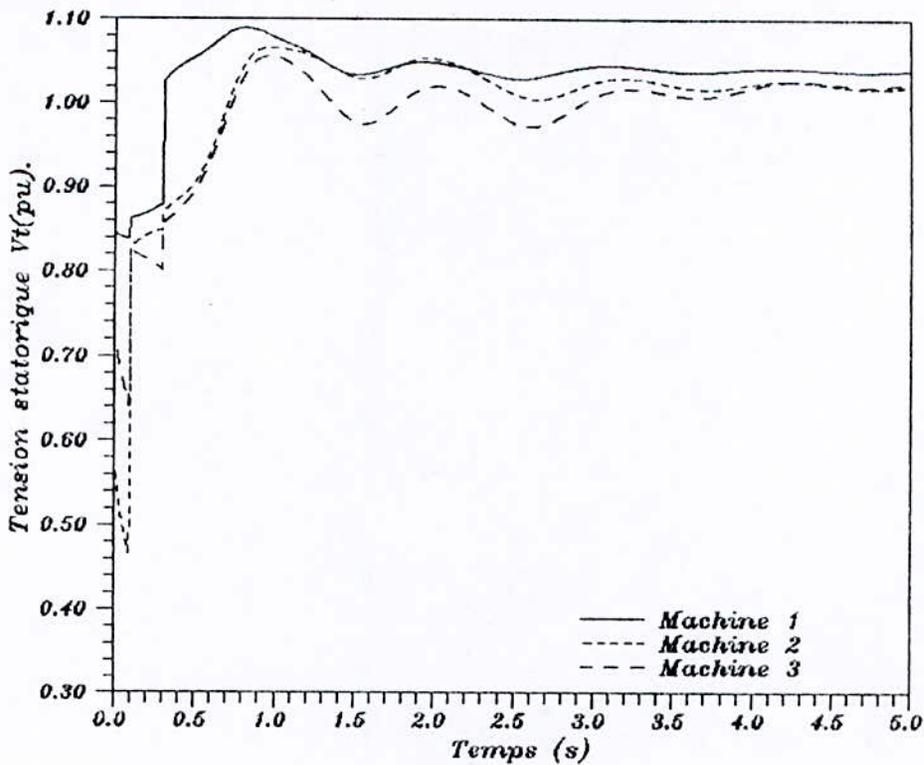


figure III.16.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.3$ s, $t_2 = 0.45$ s)

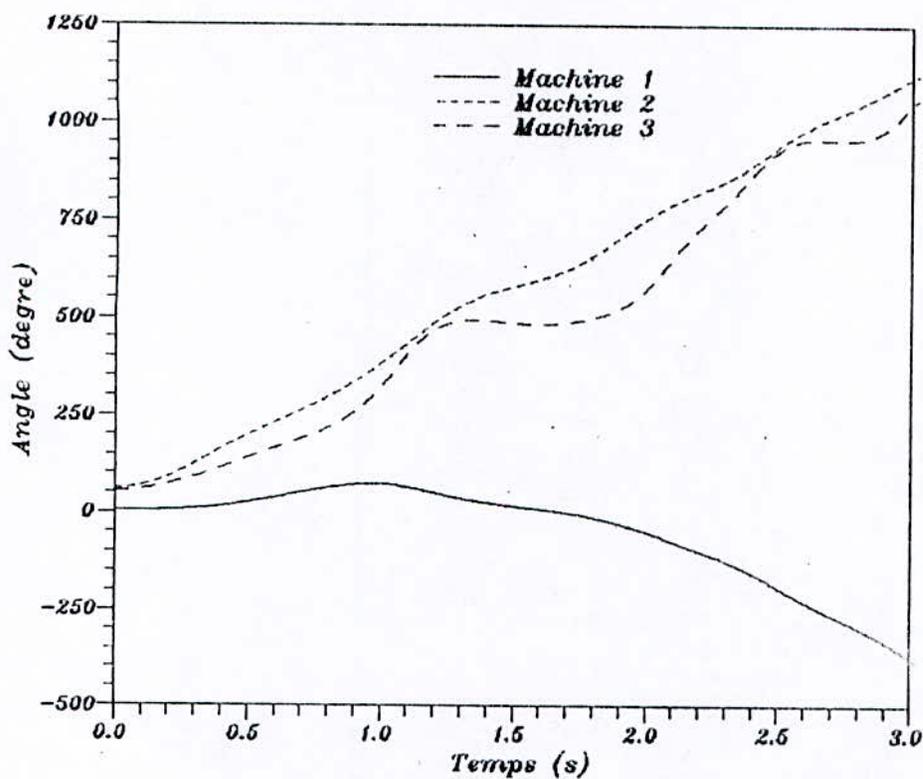


figure III.17.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.3$ s, $t_2 = 0.45$ s)

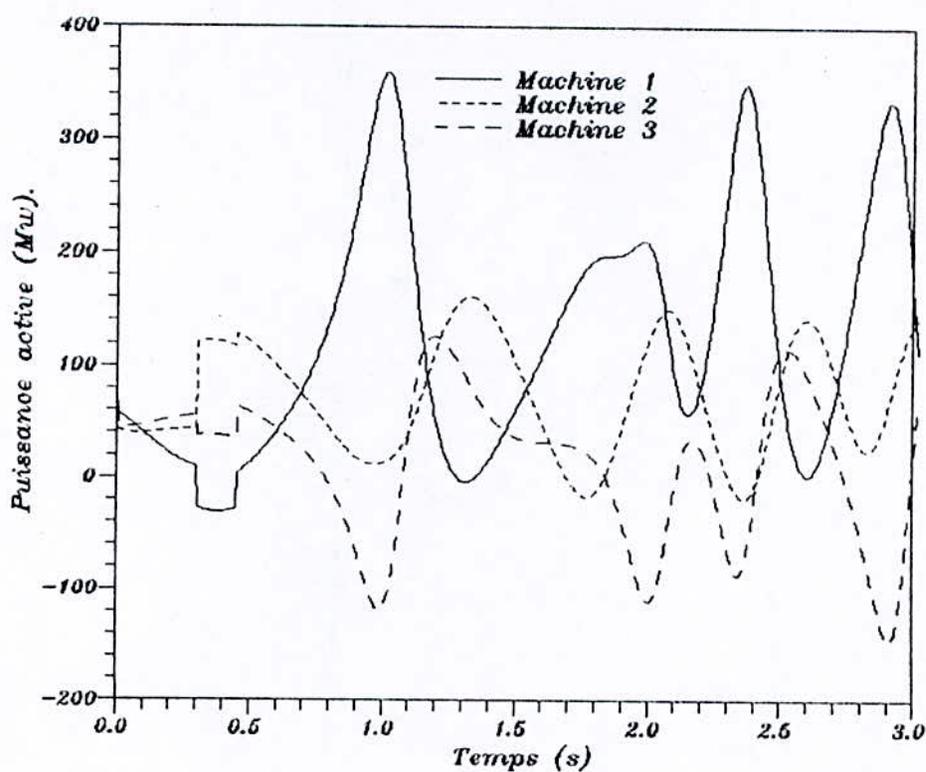


figure III.18.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.3$ s, $t_2 = 0.45$ s)

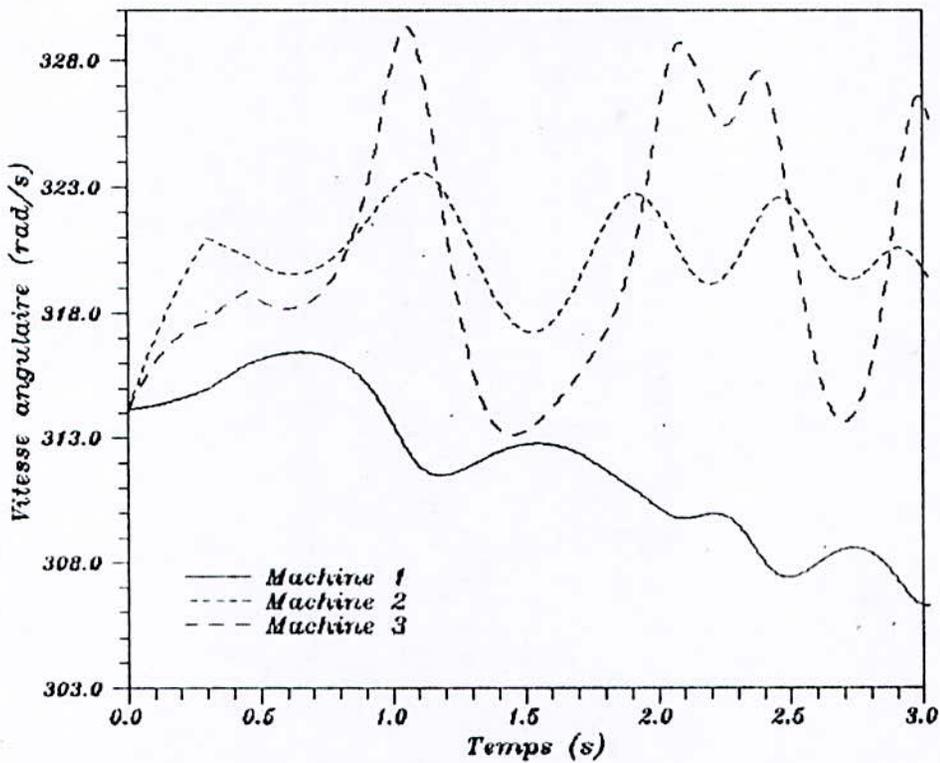


figure III.19.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.3$ s, $t_2 = 0.45$ s)

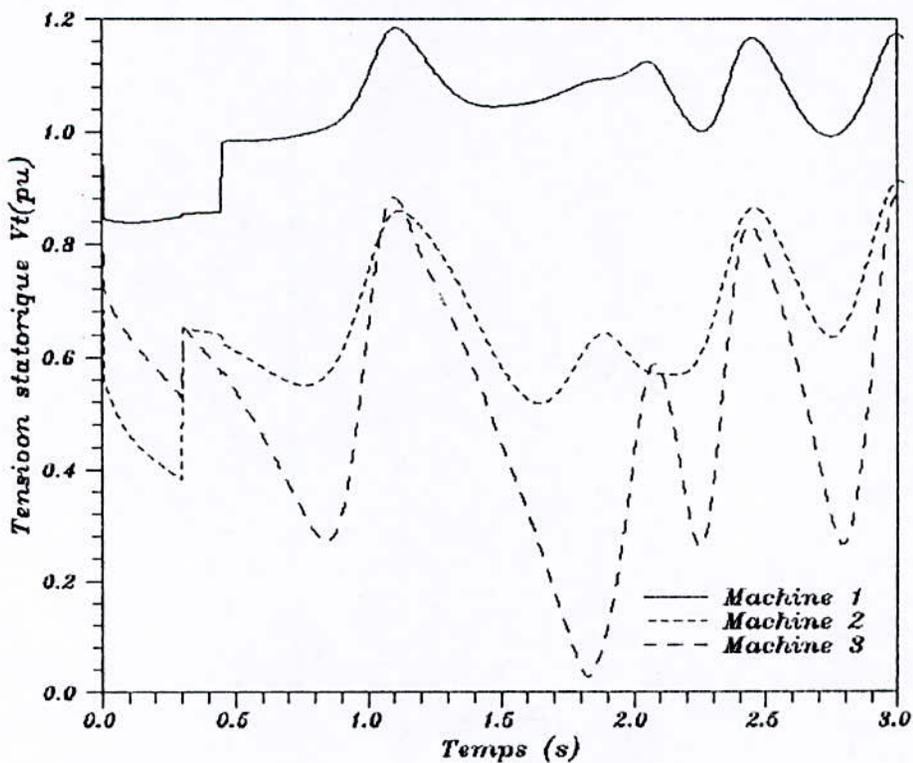


figure III.20.

Bien que nous ne présentons pas de courbes, on a constaté que pour un temps $t_1 = 0.1$ s, l'ouverture au deuxième stade peut être retardée jusqu'à $t_2 = 0.9$ s (temps critique) sans perdre la stabilité du réseau.

Plusieurs temporisations ont été essayées, on a constaté que plus le temps d'ouverture t_1 au premier stade augmente, plus le temps d'ouverture t_2 au deuxième stade se rapproche de t_1 .

Le tableau ci-dessous donne les temps critiques obtenus pour diverses temporisations :

t_1 (s)	$t_{2\text{critique}}$ (s)
0.1	0.9
0.2	0.75
0.25	0.60
0.3	0.40

III.4 RESULTATS OBTENUS PAR LE MODELE TRANSTAB DE SONELGAZ :

On a simulé le même défaut pour les mêmes temporisations (c.à.d pour $t_1 = 0.1$ s et $t_2 = 0.3$ s) par le modèle TRANSTAB de SONELGAZ dans deux cas différents :

- * Sans régulation .
- * Avec régulation de tension et de vitesse.

Les courbes obtenues sont données par les figures (III.21) et (III.22). En les comparant à celles obtenues par notre modèle, c'est à dire, respectivement aux courbes (III.1) et (III.13) on remarque qu'elles ont les mêmes allures.

On notera que le modèle TRANSTAB nécessite des données supplémentaires telles que la réactance de fuite X_l et les réactances subtransitoires X''_d et X''_q , de plus, il tient compte de la saturation de la machine.

Sans regulation
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

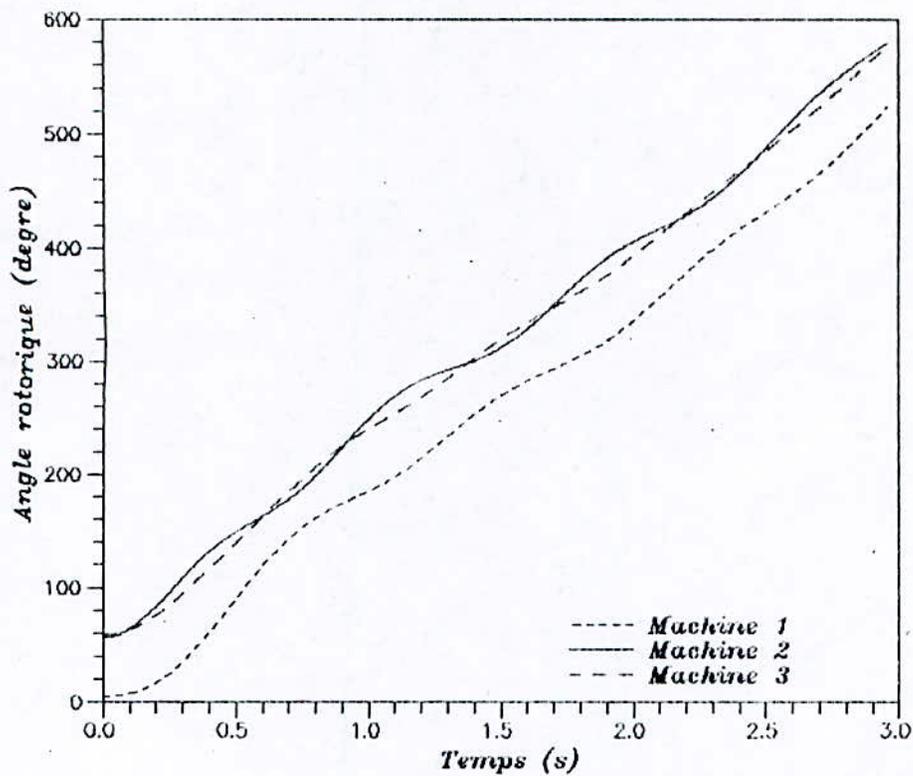


figure III.21.

Avec regulation de tension et de vitesse.
($t_1 = 0.1$ s, $t_2 = 0.3$ s)

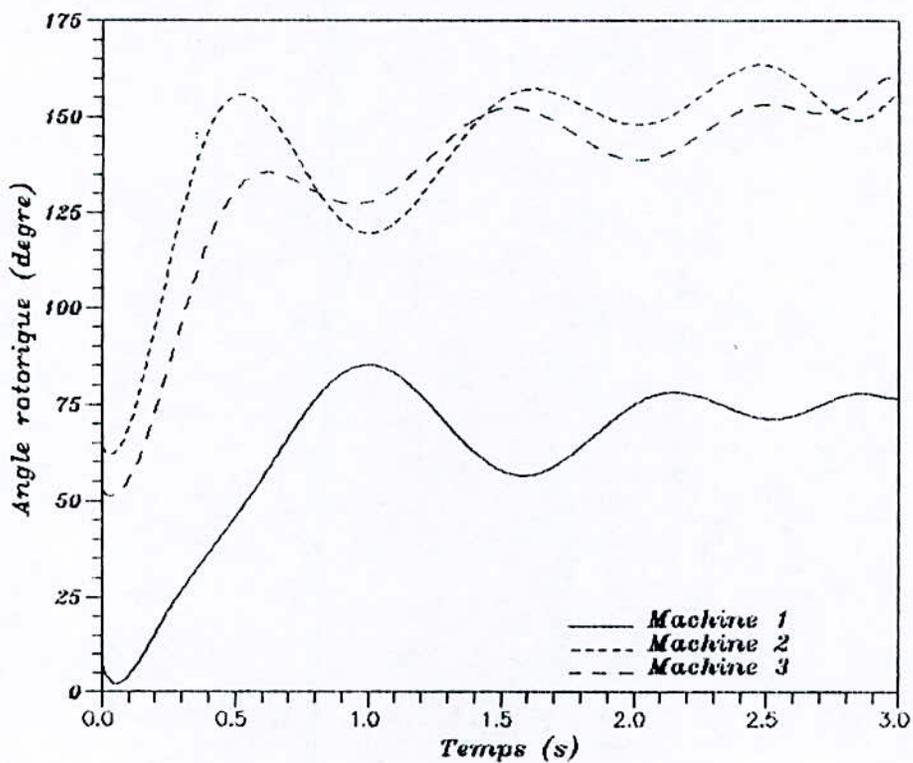


figure III.22.

CONCLUSION GENERALE :

Nous avons appliqué la méthode d'intégration numérique pas à pas à l'étude de la stabilité transitoire des systèmes multimachine. Toutefois, l'étude n'a porté que sur un défaut triphasé symétrique.

Les tests effectués nous ont permis de confirmer que :

- 1) Les résultats obtenus par notre modèle sont approximativement proche de ceux obtenus par TRANSTAB, ce qui valide notre étude.
- 2) La perte de stabilité se traduit par des variations importantes de tension, de puissance, de la fréquence ...etc, préjudiciables au bon fonctionnement du réseau, à la tenue du matériel et à la qualité de l'énergie distribuée.
- 3) Une régulation bien adaptée améliore les performances du réseau en présence d'une perturbation. Elle permet d'élargir la marge de manoeuvre (temps d'ouverture de la ligne).
- 4) L'intérêt de l'élimination du défaut en deux stades est d'assurer la sélectivité des protections.
- 5) La détermination du temps critique nécessite un tâtonnement. La méthode numérique d'intégration demande un temps d'exécution long et répétitif ce qui devient coûteux.

Nous souhaitons que ce travail soit un début à d'autres études qui incluent les défauts déséquilibrés, la perte d'un groupe et qui tiennent compte de l'effet de la compensation et de la variation de la charge, en utilisant d'autres méthodes qui offrent un gain en temps de calcul dans la détermination du temps critique.

BIBLIOGRAPHIE.

[1] MONSEF. BERBICHE

"Stabilité transitoire des réseaux d'énergie: approche par reconnaissance des formes statistiques".

Docteur es-sciences . Soutenue le 05/07/90 à TOULOUSE.

[2] CIGRE. M. KIBBENS , P.G. MURTHY

"Evaluation de la stabilité transitoire et analyse de la sécurité en temps réel".

Rapport 32.19 ,1982.

[3] CIGRE .

"Application d'un critère général de stabilité transitoire des réseaux".

24^{ème} Session , Tome 2 , 1972.

[4] J. P. BARRET

"Stabilité transitoire".

Séminaire sur le fonctionnement des réseaux organisé par SDNELGAZ

et EDF du 10 au 13 Novembre 1984, Alger.

[5] M. MOUDJAHED , BOUTELDJA , MOULAI.

"Etude de la stabilité d'un réseau électrique H.I".

Projet de fin d'études , Promotion 1990.

[6] P-BARRET.

"Régimes transitoires des machines tournantes électriques".

Editions Eyrolles - 1982.

[7] STEVENSON. W.D. Jr

"Element of power system analysis".

Mc Graw Hill . New-York , 1968.

[8] PELISSIER

"Les réseaux d'énergie électrique" Tome 2.
DUNOD , Paris 1971.

[9] R. G. E

"Analyse des quatre processus de dégradation des réseaux"
Tome 87 . N°3 . Mars 1978.

[10] KIMBAK. E. W

"Power system stability", Tome 1 et 2.
JOHN. WILY , New York 1967.

[11] GLENN W. STAGG AHMED . EL ABIAD

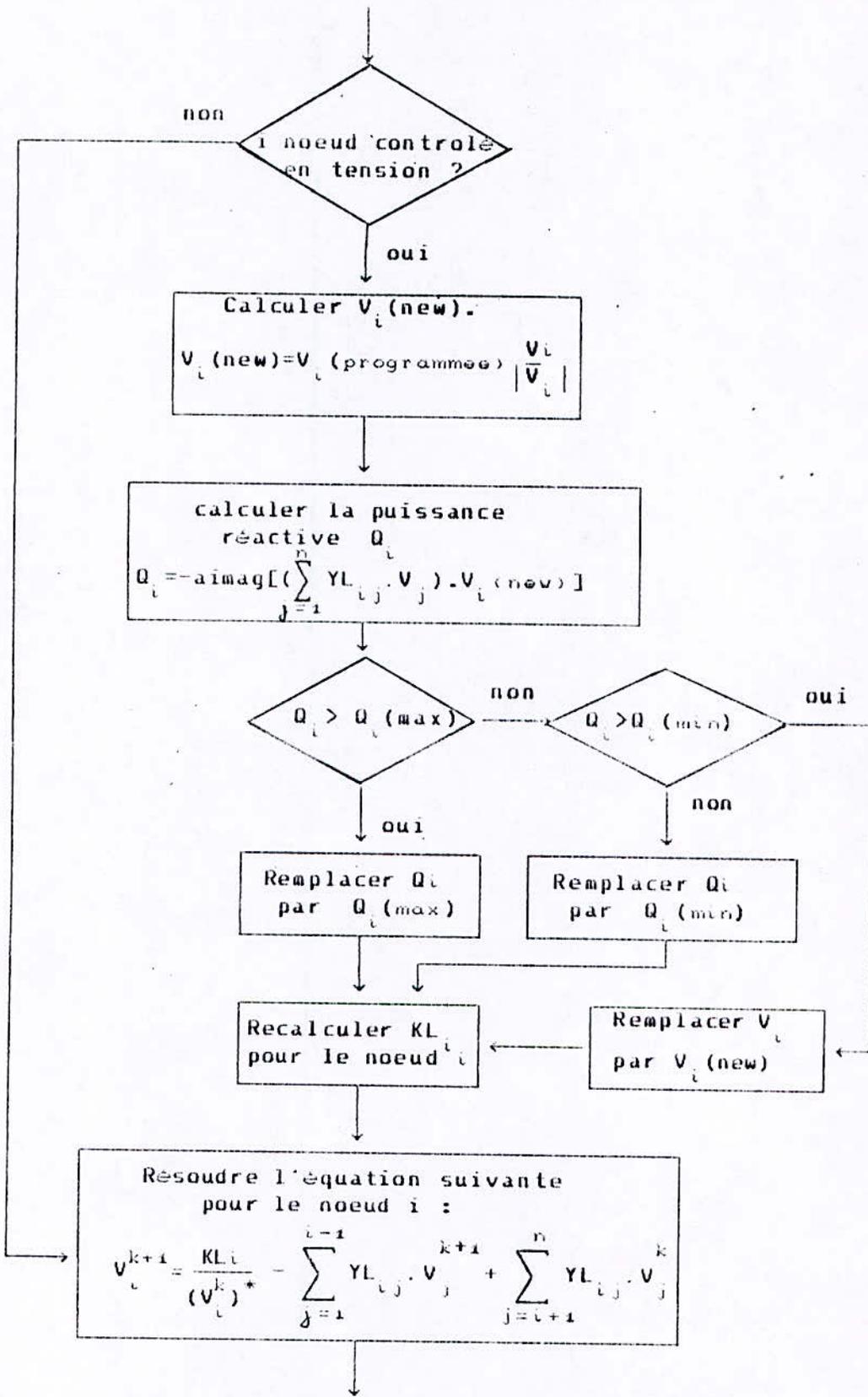
"Computer methods in power system analysis".
Mc Graw Hill - Kogakusha , Ltd , Tokyo 1968.

[12] P. M. ANDERSON , A. A. FOUAD

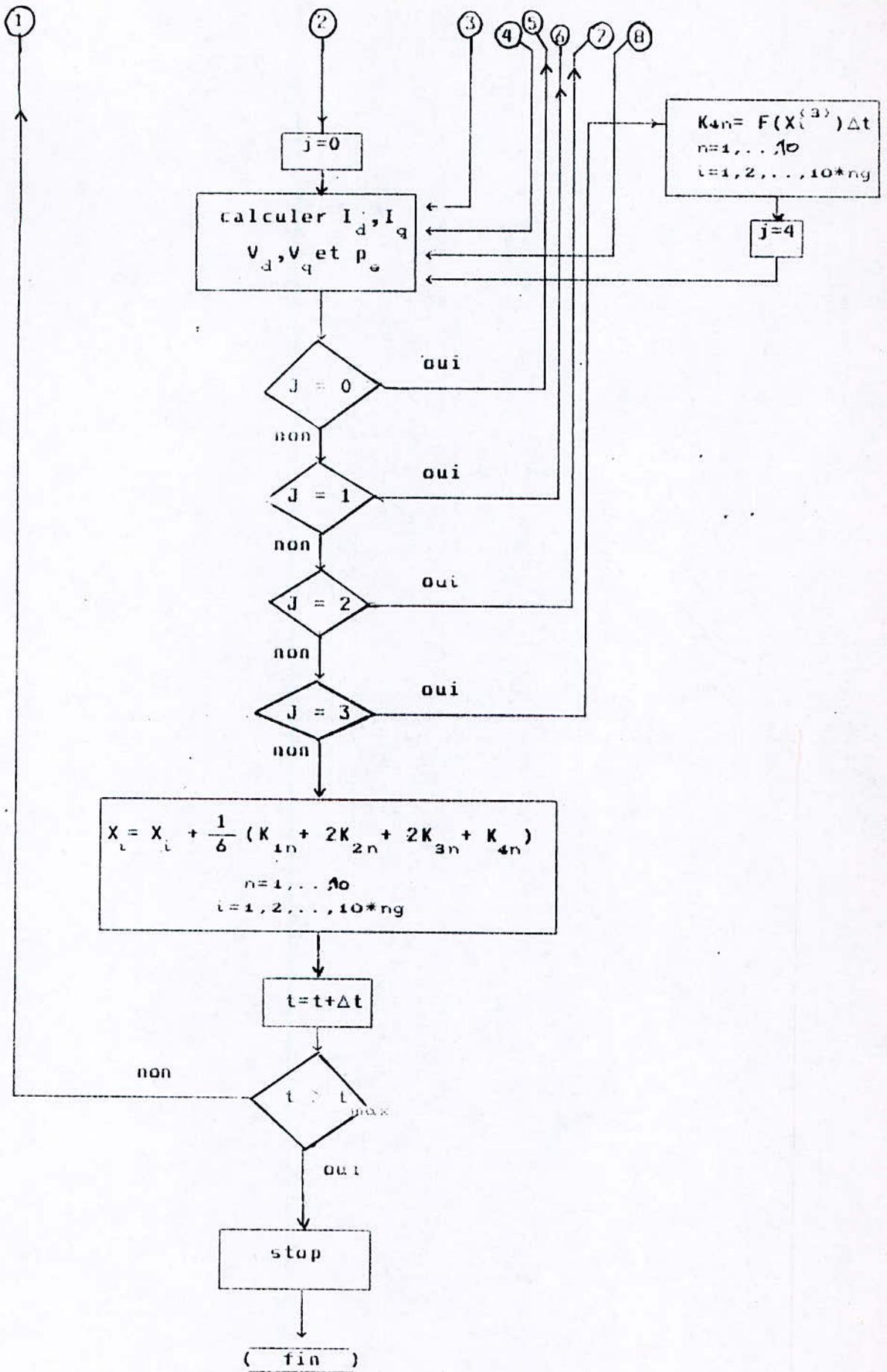
"Power system control and stability".
The Iowa State University Press, Ames, Iowa, U.S.A.

ANNEXE

A.1. Organigramme qui calcul l'écoulement de puissance avec la prise en compte des noeuds contrôlés en tension.



Pour le calcul des coefficients KL_i et YL_{ij} voir référence [11].



C
C
C
C
C

```
-----  
*                               *  
*   PROGRAMME PRINCIPAL       *  
*                               *  
-----
```

PARAMETER M=30

```
CHARACTER*5 LISTE(M),NAME1(M),NAME2(M),SIGMA  
CHARACTER*5 NOEUDF1,NOEUDF2  
COMPLEX V(M),KL(M),Y(M,M),YL(M,M),YS(M),Ysh(M),S(M,M),PERTE(M)  
COMPLEX Yload(M),Ypf(M,M),Ig(M),Eprim,IC,ZF1,ZF2,YF1,YF2  
REAL P(M),Q(M),QGmin(M),QGmax(M),QL(M),PL(M),PG(M),QG(M)  
REAL Qmax(M),Vsh(M),Xdt(M),X(M),XP(M),H(M),Iq0(M),t01,t02  
REAL Pm0(M),Wr(M),Pe(M),Id0(M),Xq(M),Vt(M),Vref(M),Kex(M),TEX(M)  
REAL KL1(M,M),Qmin(M),B(M,M),G(M,M),Tr(M),Ta(M),Ist(M),Kst(M)  
REAL DV,Dt,Xd(M),F,E30(M),Id(M),Iq(M),Ka(M),Vrmax(M),Vrmin(M)  
INTEGER LIGNE(M),Npv,N,NL,Nm,JJ,NCC,LF,ETAT,INDEX,J  
REAL K1(10,M),K2(10,M),K3(10,M),K4(10,M),Aex(M),Bex(M),Eexmax(M)  
REAL Tc(M),Ts(M),R(M),DBt(M),Pmax(M),D(M)
```

```
COMMON/BL1/PG,QGmin,QGmax,PL,QL,Q,P,Qmin,Qmax  
COMMON/BL2/LIGNE,NAME1,NAME2,LISTE,NOEUDF1,NOEUDF2  
COMMON/BL3/Y,VSH,KL,YL  
COMMON/BL4/N,NL,Npv,Nm,JJ,NCC,LF,ETAT,index,ICHOIX  
COMMON/BL5/Vbase,Sbase,Eexmax,t01,t02  
COMMON/BL6/Yload,Ypf,YSH,YS,ZF1,ZF2,YF1,YF2  
COMMON/BL7/X,XP,Dt,Pm0,Pe,Wr,Vref,Vt,E30  
COMMON/BL8/H,Id0,Iq0,Xd,Xdt,Xq,D  
COMMON/BL9/V,Id,Iq  
COMMON/BL10/Tr,Ta,Tst,Ka,Kst,Kex,Iex,Vrmax,Vrmin,Aex,Bex  
COMMON/BL12/Tc,Ts,R,DBt,Pmax
```

EXTERNAL CLASSER,MATY,ARG

```
OPEN(4,FILE='RESULTAT.DAT',STATUS='NEW')  
OPEN(2,FILE='RES.DAT',STATUS='NEW')  
OPEN(3,FILE='RES1.DAT',STATUS='NEW')  
DATA tmax,Dt/5.,0.005/
```

CALL READFILE

C-----
C CHOIX DU MODELE A ADOPTER POUR LA MACHINE
C-----

```
WRITE(*,*)'**** MODELE DU SECOND ORDRE : 1 ****'  
WRITE(*,*)'**** MODELE A DEUX AXES : 2 ****'  
WRITE(*,119)  
READ(*,*)MOD  
IF(MOD.EQ.1)THEN  
WRITE(*,*)'  
WRITE(*,*)'CE MODELE NE VOUS PERMET PAS DE PRENDRE EN  
* CONSIDERATION LA REGULATION'  
WRITE(*,*)'  
GOTO 104  
ENDIF
```

```

C -----
C INTRODUCTION DES SYSTEMES DE REGULATIONS.
C -----
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) **** SANS REGULATION : 1 ****
WRITE(*,*) **** AVEC REGULATION de TENSION : 2 ****
WRITE(*,*) **** AVEC REGULATION DE VITESSE : 3 ****
WRITE(*,*) **** AVEC REGUL TENSION + VITESSE : 4 ****
WRITE(*,119)
119 FORMAT(1X,/, ' VOTRE CHOIX:?' ,*)
READ(*,*) ICHOIX

GOTO(107,102,103,103) ICHOIX
107 Ne=4
GOTO 104
102 Ne=8
GOTO 104
103 Ne=10
GOTO 104

104 CALL SEIDEL
CALL TRANSIT(S,PERTE,YS,YSH,V,N,NL)

DO I=1,N

YLOAD(I)=CMPLX(PL(I),-QL(I))/(V(I)*CONJG(V(I)))
ENDDO

ETAT=1
SIGMA='FALSE'
CALL YAD(B,G,Xdt)
C
C.....CALCUL DES VALEURS INITIALES
GOTO(1010,1011)MOD
1010 DO I=1,Nm
Iq(I)=(CMPLX(P(I),-Q(I))/CONJG(V(I)))
Eprim=v(I)+cplx(0.,Xdt(I))*Iq(I)
X(I)=ARG(EPRIM)
X(I+2*Nm)=CABS(EPRIM)
X(I+3*Nm)=0.
X(I+Nm)=3.14159*2.*50.
Iq(I)=Iq(I)*CEXP(CMPLX(0.,-X(I)))
Iq(I)=REAL(Iq(I))
Id(I)=AIMAG(Iq(I))
enddo
CALL COURANT(X,ID,IQ,G,B,M,NM)
CALL PUISSANCE(PE,X,ID,IQ,XDT,Xq,NM,M)
DO I=1,NM
X(I+8*Nm)=Pe(I)
enddo
Ne=2
GOTO 301

1011 DO I=1,Nm
Iq(I)=CMPLX(P(I),-Q(I))/CONJG(V(I))
Eprim=v(I)+CMPLX(0.,Xq(I))*Iq(I)

```

```

X(I)=ARG(Eprim)
Iq(I)=Iq(I)*CEXP(CMPLX(0.,-X(I)))
Iq(I)=REAL(Iq(I))
Id(I)=AIMAG(Iq(I))
V(I)=V(I)*CEXP(CMPLX(0.,-X(I)))
Vq=REAL(V(I))
Vd=AIMAG(V(I))
X(I+3*Nm)=Vd+Xdt(I)*Iq(I)
X(I+2*Nm)=Vq-Xdt(I)*Id(I)
X(I+Nm)=2.*3.14159*50.
Vt(I)=CABS(V(I))
Vref(I)=Vt(I)
ENDDO
CALL COURANT(X, Id, Iq, G, B, M, Nm)
CALL PUISSANCE(Pe, X, Id, Iq, Xdt, Xq, Nm, M)
DO I=1, Nm
Pm0(I)=Pe(I)
X(I+6*Nm)=X(I+2*Nm)-(Xd(I)-Xdt(I))*Id(I)
X(I+8*Nm)=Pm0(I)
X(I+9*Nm)=Pm0(I)
X(I+4*Nm)=0.
X(I+5*Nm)=Aex(I)*EXP(Bex(I)*X(I+6*Nm))*X(I+6*Nm)+
* Kex(I)*X(I+6*Nm)
X(I+7*Nm)=0.
E30(I)=X(I+5*Nm)
ENDDO

```

301 CONTINUE

C.....FIN DE CALCUL DES VALEURS INITIALES

t=0.

```

300 DO I=1, Ne*Nm
XP(I)=X(I)
ENDDO
IF(SIGMA.EQ.'FALSE') THEN
CALL YAD(B, G, Xdt)
J=0
SIGMA='TRUE'
GOTO 100
ENDIF
200 CONTINUE
DO I=1, Ne*Nm
index=(I-1)/Nm+1
I1=I-(I-1)/Nm*Nm
K1(INDEX, I1)=F(I)*Dt
ENDDO
DO I=1, Ne*Nm
INDEX=(I-1)/Nm+1
I1=I-(I-1)/Nm*Nm
X(I)=XP(I)
X(I)=X(I)+K1(INDEX, I1)/2.
CALL VERIFIER(Vrmax, Vrmin, Eemax, X, INDEX, I1, Nm)
ENDDO
J=1
100 continue
CALL COURANT(X, Id, Iq, G, B, M, Nm)
CALL TENSION(X, Vt, Id, Iq, Xdt, M, Nm, Xq)

```

```

CALL PUISSANCE(Pe,X,Id,Iq,Xdt,Xq,Nm,M)
IF(J.EQ.0)GOTO 200
IF(J.EQ.1)THEN
DO I=1,Ne*NM
INDEX=(I-1)/NM+1
I1=I-(I-1)/NM*NM
K2(INDEX,I1)=F(I)*Dt
ENDDO
DO I=1,Ne*Nm
INDEX=(I-1)/NM+1
I1=I-(I-1)/NM*NM
X(I)=XP(I)
X(I)=X(I)+K2(INDEX,I1)/2.
CALL VERIFIER(Vrmax,Vrmin,Eemax,X,INDEX,I1,Nm)
enddo
J=2
goto 100
endif
IF(J.EQ.2) THEN
DO I=1,Ne*NM
I1=I-(I-1)/NM*NM
INDEX=(I-1)/NM+1
K3(INDEX,I1)=F(I)*Dt
ENDDO
DO I=1,Ne*Nm
INDEX=(I-1)/NM+1
I1=I-(I-1)/NM*NM
X(I)=XP(I)
X(I)=X(I)+K3(INDEX,I1)
CALL VERIFIER(Vrmax,Vrmin,Eemax,X,INDEX,I1,Nm)
ENDDO

J=3
GOTO 100
ENDIF
IF(J.EQ.3)THEN
DO I=1,Ne*NM
INDEX=(I-1)/NM+1
I1=I-(I-1)/NM*NM
K4(INDEX,I1)=F(I)*Dt
ENDDO
DO I=1,Ne*Nm
index=(I-1)/NM+1
I1=I-(I-1)/NM*NM
X(I)=XP(I)
X(I)=X(I)+K4(INDEX,I1)*Dt
CALL VERIFIER(Vrmax,Vrmin,Eemax,X,index,I1,Nm)
ENDDO
J=4
GOTO 100
ENDIF
DO I=1,Ne*NM
IND=(I-1)/NM+1
I1=I-(I-1)/NM*NM
X(I)=XP(I)+(1./6.)*(K1(IND,I1)+2.*K2(IND,I1)+2.*K3(IND,I1)
* +K4(IND,I1))
CALL VERIFIER(Vrmax,Vrmin,Eemax,X,IND,I1,Nm)

```

```
ENDDO

t=t+Dt
IF((t.LE.t01).AND.(ETAT.NE.2))THEN
ETAT=2
SIGMA='FALSE'
GOTO 300
ENDIF
IF((t.LE.t02).AND.(t.GT.t01).AND.(ETAT.NE.3))THEN
ETAT=3
SIGMA='FALSE'
GOTO 300
ENDIF
IF((t.GT.t02).AND.(ETAT.NE.4))THEN
ETAT=4
SIGMA='FALSE'
GOTO 300
ENDIF
1000 IF(t.LE.tmax)GOTO 300
STOP
END
```

FIN DU PROGRAMME PRINCIPALE.

```

C -----
C * *
C *   SOUS PROGRAMMES DE CALCUL *
C * *
C -----

```

```

C-----
C          SOUSPROGRAMME QUI LIT LES DONNEES
C-----

```

SUBROUTINE READFILE

PARAMETER M=30

```

COMPLEX Y(M,M),YSH(M),YS(M),KL(M),YL(M,M),Yload(M)
COMPLEX Ypf(M,M),Z,ZF1,ZF2,YF1,YF2
REAL PG(M),QGmin(M),QGmax(M),PL(M),QL(M),VSH(M),Wr(M),Vbase
REAL A,P1,Q1,Q2,P3,Q3,Q(M),P(M),Qmin(M),Qmax(M),H(M),Xdt(M)
INTEGER NL,N,Npv,N1,N2,Nm,LIGNE(M),NCC,ETAT,L,LF
CHARACTER*5 NAME1(M),NAME2(M),LISTE(M),NOEUD,NBLANK
CHARACTER*5 NOEUDF1,NOEUDF2
REAL X(M),XP(M),Pm0(M),Pe(M),SN,Sbase,E30(M),Vref(M),Vt(M)
REAL pi,Dt,Xq(M),Xd(M),Id0(M),Tq0(M),Kex(M),Tex(M),t01,t02
REAL Tr(M),Ta(M),Tst(M),Ka(M),Kst(M),Vrmax(M),Vrmin(M),D(M)
REAL Aex(M),Bex(M),Eexmax(M),Tc(M),Ts(M),R(M),DBt(M),Pmax(M)

```

```

COMMON/BL1/PG,QGmin,QGmax,PL,QL,Q,P,Qmin,Qmax
COMMON/BL2/LIGNE,NAME1,NAME2,LISTE,NOEUDF1,NOEUDF2
COMMON/BL3/Y,VSH,KL,YL
COMMON/BL4/N,NL,Npv,Nm,JJ,NCC,LF,ETAT,INDEX,ICHOIX
COMMON/BL5/Vbase,Sbase,Eexmax,t01,t02
COMMON/BL6/Yload,Ypf,YSH,YS,ZF1,ZF2,YF1,YF2
COMMON/BL7/X,XP,Dt,Pm0,Pe,Wr,VREF,Vt,E30
COMMON/BL8/H,Id0,Tq0,Xd,Xdt,Xq,D
COMMON/BL10/Tr,Ta,Tst,Ka,Kst,Kex,TeX,Vrmax,Vrmin,Aex,Bex
COMMON/BL12/Tc,Ts,R,DBt,Pmax

```

OPEN(1,FILE='D.DAT',STATUS='OLD')

NBLANK=''
DATA pi/3.14159265/

```

DO 5 I=1,M
DO 5 J=1,M
LISTE(I)=NBLANK
Y(I,J)=CMPLX(0.,0.)
5 CONTINUE

```

```

READ(1,10) SBase,VBase
10 FORMAT(1X,2(F6.2,5X),/)

```

C.....LECTURE DES NOEUDS A TENSION CONTROLLEE.....

```

Npv=1
DO I=1,M
READ(1,111)LISTE(I),Vsh(I)
111 FORMAT(1X,A5,2X,F6.4)
IF(LISTE(I).EQ.NBLANK) GOTO 32
Npv=Npv+1

```

```
END DO
32 Npv=Npv-1
```

C.....LECTURE DES CARACTERISTIQUES DES LIGNES.....

```
NL=0
15 NL=NL+1
READ(1,20) LIGNE(NL),NAME1(NL),NAME2(NL),Z,YSH(NL)
20 FORMAT(1X,I3,1X,2(A5,1X),2(F7.4,1X),2(F7.4,1X))
IF(NAME1(NL).EQ.NBLANK) GOTO 31
YS(NL)=1./Z
CALL CLASSER(NAME1(NL),LISTE,M,N1,N)
CALL CLASSER(NAME2(NL),LISTE,M,N2,N)
```

C.....FORMATION DE LA MATRICE ADMITTANCE.....

```
CALL MATY(Z,YSH(NL),Y,N1,N2,M)
GO TO 15
31 CONTINUE
Nm=0
NL=NL-1
```

C.....LECTURE DES CHARGES NODALES AUX NOEUDS PQ.....

```
DO 123 I=1,N
READ(1,13) NOEUD,P1,Q1,Q2,P3,Q3

13 FORMAT(1X,A5,1X,5(F7.2,1X))
IF(NOEUD.EQ.NBLANK) GOTO 200
DO 124 J=1,N
IF(LISTE(J).EQ.NOEUD) THEN
PG(J)=P1/SBase
QGmin(J)=Q1/SBase
QGmax(J)=Q2/SBase
PL(J)=P3/Sbase
QL(J)=Q3/SBase
GOTO 123
ENDIF
124 CONTINUE
123 CONTINUE
```

C.....LECTURE DES CARACTERISTIQUES DES MACHINES

```
200 CONTINUE
READ(1,100)NOEUD
IF(NOEUD.EQ.NBLANK) GOTO 201
Nm=Nm+1
DO I=1,N
IF(NOEUD.EQ.LISTE(I))THEN
READ(1,250)EC,SN,D(I),Xd(I),Xd(I),Xq(I),Td0(I),Tq0(I)
H(I)=EC/SN
H(I)=H(I)*SN/Sbase
goto 200
ENDIF
ENDDO
201 CONTINUE
```

```

C.....LECTURE DE LA LIGNE AFFECTEE PAR LE DEFAUT
  READ(1,141)L,NOEUDF1,ZF1,YF1,t01,NOEUDF2,ZF2,YF2,t02
  DO I=1,NL
  IF(L.EQ.LIGNE(I)) LF=I
  ENDDO

```

```

C.....LECTURE DES CARACTERISTIQUES DU REGULATEUR DE TENSION
121 CONTINUE

```

```

  READ(1,100)NOEUD
  IF(NOEUD.EQ.NBLANK)GOTO 122

  DO K=1,N
  IF(LISTE(K).EQ.NOEUD)THEN
  READ(1,143)Kex(k),Tex(k),Tr(k),Ta(k),Tst(k);Ka(k),Kst(k),Vrmax(k)
  *,Vrmin(k),Aex(k),Bex(k),Eexmax(k)
  GOTO 121
  ENDF
  ENDDO

```

```

C.....LECTURE DES CARACTERISTIQUES DU REGULATEUR DE VITESSE
122 CONTINUE

```

```

  READ(1,100,ERR=126)NOEUD
  IF(NOEUD.EQ.NBLANK) GOTO 1000
  DO K=1,N
  IF(LISTE(K).EQ.NOEUD)THEN
  READ(1,144)Tc(k),Ts(k),R(k),DBt(k),Pmax(k)
  GOTO 122
  ENDF
  ENDDO

```

```

1000 WRITE(4,230)N,Nm,NL,Npv

```

```

230 FORMAT(2X,4(I3,5X),/)

```

```

  WRITE(4,1002)

```

```

  DO I=1,N

```

```

  WRITE(4,400)LISTE(I),I

```

```

400 FORMAT(2X,A5,20X,I3)

```

```

  ENDDO

```

```

1002 format(/,2x,'LISTE DES NOEUDS',5x,'CODE NOEUD',/)

```

```

100 FORMAT(1X,A5)

```

```

250 FORMAT(8(1X,F10.5,/))

```

```

141 FORMAT(1X,I2,2(5X,A5,1X,4(F7.4,1X),F5.3,/,3X))

```

```

143 FORMAT(12(1X,F10.5,/))

```

```

144 FORMAT(5(1X,F10.5,/))

```

```

126 RETURN

```

```

  END

```

```

C-----
C      SOUS PROGRAMME QUI CALCUL LE LOADFLOW
C-----

```

```

SUBROUTINE SEIDEL

```

```

PARAMETER M=30

```

```

COMPLEX V(M),Y(M,M),KL(M),YL(M,M),SOM,VOLD

```

```

REAL VSH(M),Q(M),QGmin(M),QL(M),P(M),PG(M),PL(M)

```

```

REAL QGmax(M),Qmax(M),Qmin(M),Id(M),Iq(M)

```

```

REAL FA,EPS,DVmax

```

COMPLEX A,DV

COMMON/BL1/PG,QGmin,QGmax,PL,QL,Q,P,Qmin,Qmax

COMMON/BL3/Y,VSH,KL,YL

COMMON/BL4/N,NL,Npv,Nm,JJ,NCC,LF,ETAT,INDEX,ICHOIX

COMMON/BL9/V,Id,Iq

DATA FA,EPS/1.6,1.E-3/

C.....INITIALISATION DES TENSIONS

DO I=1,N

IF(I.LE.1)THEN

V(I)=Vsh(I)*CMPLX(1.0,0.)

ELSE

V(I)=(1.,0.)

ENDIF

ENDDO

C.....FORMATION DE L'ADMITTANCE SHUNT EQUIVALENTE A LA CHARGE

DO I=2,N

Q(I)=QGmin(I)-QL(I)

P(I)=PG(I)-PL(I)

Qmin(I)=QGmin(I)-QL(I)

Qmax(I)=QGmax(I)-QL(I)

KL(I)=(CMPLX(P(I),-Q(I)))/Y(I,I)

ENDDO

C.....FORMATION DE YLoad

DO 101 I=1,N

DO 101 J=1,N

IF(I.NE.J)THEN

YL(I,J)=Y(I,J)/Y(I,I)

ENDIF

101 CONTINUE

Iter=0

100 Iter=Iter+1

WRITE(*,*)ITER

DVmax=0

DO 151 I=2,N

WRITE(*,*)V(I)

IF(I.LE.Npv) THEN

C.....CALCUL DE LA PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE AU NOEUD I

SOM=(0.,0.)

DO J=1,N

SOM=SOM+Y(I,J)*V(J)

ENDDO

SOM=SOM*(CONJG(V(I)))

Q(I)=-AIMAG(SOM)

IF(Q(I).LT.Qmax(I))THEN

IF(Q(I).LE.Qmin(I))THEN

Q(I)=Qmin(I)

ENDIF

ELSE

Q(I)=Qmax(I)

ENDIF

```

KL(I)=(CMPLX(P(I),-Q(I)))/Y(I,I)
ENDIF
Vold=V(I)
V(I)=KL(I)/(CONJG(V(I)))
DO J=1,N
IF(J.NE.I)THEN
V(I)=V(I)-YL(I,J)*V(J)
ENDIF
ENDDO
IF(I.LE.Npv)THEN
V(I)=V(I)*Vsh(I)/CABS(V(I))
ENDIF
DV=V(I)-Vold
V(I)=Vold+FA*DV
DV=V(I)-Vold
IF(CABS(DV).GT.DVmax) DVmax=CABS(DV)
151 CONTINUE
IF(DVmax.GT.EPS) GOTO 100

```

C.....CALCUL DES PUISSANCES GENEREES.

```

DO I=1,N
SOM=(0.,0.)
DO J=1,N
SOM=SOM+Y(I,J)*V(J)
ENDDO
SOM=SOM*(CONJG(V(I)))
P(I)=REAL(SOM)
Q(I)=-AIMAG(SOM)
ENDDO
WRITE(4,30)
DO I=1,N
WRITE(4,10)I,V(I)
10 FORMAT(2X,I3,15X,2(F5.3,1X))
ENDDO
WRITE(4,40)
DO I=1,NPV
WRITE(4,20)I,P(I),Q(I)
20 FORMAT(2X,I3,10X,2(F6.2,10X))
ENDDO
30 FORMAT(/,2X,'CODE NOEUD',8X,'TENSION')
40 FORMAT(/,2X,'CODE NOEUD',2X,'P.generee',6X,'Q.generee')
RETURN
END

```

C-----
C SOUS PROGRAMME DE CLASSEMENT DES NOEUDS
C-----

```

SUBROUTINE CLASSER(NOEUD,LISTE,M,I,N)
CHARACTER*5 NOEUD,LISTE(M),NBLANK
NBLANK=' '
DO 10 J=1,M
I=J
IF(NOEUD.EQ.LISTE(J)) RETURN
IF(LISTE(J).EQ.NBLANK) GO TO 20
10 CONTINUE
WRITE(*,*) 'ERREUR'
STOP
20 LISTE(I)=NOEUD

```

```
N=I
RETURN
END
```

```
C-----
C   SOUS PROGRAMME QUI FORME LA MATRICE ADMITTANCE
C-----
```

```
      SUBROUTINE MATY(Z,YH,Y,N1,N2,M)
      COMPLEX Y(M,M),Z,YH
      Y(N1,N1)=Y(N1,N1)+1./Z+YH
      Y(N2,N2)=Y(N2,N2)+1./Z+YH
      Y(N1,N2)=Y(N1,N2)-1./Z
      Y(N2,N1)=Y(N2,N1)-1./Z
      RETURN
      END
```

```
C-----
C   SOUSPROGRAMME QUI CALCUL LA MATRICE ADMITTANCE
C   AVANT, PENDANT ET APRES LE DEFAULT
C-----
```

```
      SUBROUTINE YAD(B,G,Xdt)
      PARAMETER M=30
      COMPLEX Z,YS(M),Ypf(M,M),Ysh(M),Yload(M),ZF1,ZF2,YF1
      COMPLEX YF2
      CHARACTER*5 NAME1(M),NAME2(M),LISTE(M),NOEUD,NOEUDF1
      CHARACTER*5 NOEUDF2,DFAUT
      REAL Xdt(M),B(M,M),G(M,M)
      INTEGER N,NL,Npv,Nm,JJ,LIGNE(M),ETAT,LF,NF1,NF2
      COMMON/BL2/LIGNE,NAME1,NAME2,LISTE,NOEUDF1,NOEUDF2
      COMMON/BL4/N,NL,Npv,Nm,JJ,NCC,LF,ETAT,INDEX,ICHOIX
      COMMON/BL6/Yload,Ypf,YSH,YS,ZF1,ZF2,YF1,YF2

      DO I=1,N+1
      DO J=1,N+1
      YPF(I,J)=(0.,0.)
      ENDDO
      ENDDO
      DO 100 I=1,NL
      DO J=1,N
      IF(NAME1(I).EQ.LISTE(J))THEN
      DO K=1,N
      IF(NAME2(I).EQ.LISTE(K))THEN
      Z=1./YS(I)+CMPLX(0.,Xdt(J))
      YPF(J,J)=YPF(J,J)+1./Z+YSH(I)
      YPF(K,K)=YPF(K,K)+1./Z+YSH(I)
      YPF(J,K)=YPF(J,K)-1./Z
      YPF(K,J)=YPF(K,J)-1./Z
      GOTO 100
      ENDF
      ENDDO
      ENDF
      ENDDO
100  CONTINUE
      DO I=1,N
      YPF(I,I)=YPF(I,I)+YLOAD(I)
      ENDDO
```

```

IF(ETAT.EQ.2)THEN
DO I=1,N
IF(LISTE(I).EQ.NOEUDF1) NF1=I
IF(LISTE(I).EQ.NOEUDF2) NF2=I
ENDDO
YPF(NF1,NF2)=YPF(NF1,NF2)+YS(LF)
YPF(NF2,NF1)=YPF(NF2,NF1)+YS(LF)
YPF(NF1,NF1)=YPF(NF1,NF1)-YS(LF)+(1./ZF1)
YPF(NF2,NF2)=YPF(NF2,NF2)-YS(LF)+(1./ZF2)
ENDIF
IF(ETAT.EQ.3)THEN
YPF(NF1,NF2)=YPF(NF1,NF2)+YS(LF)
YPF(NF2,NF1)=YPF(NF2,NF1)+YS(LF)
YPF(NF1,NF1)=YPF(NF1,NF1)-YS(LF)-YSH(LF)+YF1
YPF(NF2,NF2)=YPF(NF2,NF2)-YS(LF)+(1./ZF2)-YSH(LF)+YF2
ENDIF
IF(ETAT.EQ.4)THEN
YPF(NF1,NF2)=YPF(NF1,NF2)+YS(LF)
YPF(NF2,NF1)=YPF(NF2,NF1)+YS(LF)
YPF(NF1,NF1)=YPF(NF1,NF1)-YS(LF)
YPF(NF2,NF2)=YPF(NF2,NF2)-YS(LF)
ENDIF

```

C.....REDUCTION DE LA MATRICE ADMITTANCE AUX NOEUDS GENERATEURS

```

DO 50 I1=1,N-Nm
J1=N+1-I1
K=N-I1
IF(YPF(J1,J1).EQ.(0.,0.)) GOTO 50

DO 60 I=1,K
DO 60 J=1,K
60 YPF(I,J)=YPF(I,J)-YPF(I,J1)*YPF(J1,J)/YPF(J1,J1)
50 CONTINUE
DO I=1,Nm
do J=1,Nm
G(I,J)=REAL(YPF(I,J))
B(I,J)=AIMAG(YPF(I,J))
ENDDO
ENDDO
RETURN
END

```

C-----
C SOUSPROGRAMME QUI DETERMINE L'ARGUMENT
C D'UN NOMBRE COMPLEXE.
C-----

```

REAL FUNCTION ARG(Y)
COMPLEX Y
IF(CABS(Y).EQ.0.)THEN
ARG=0.
RETURN
ELSE
IF(REAL(Y).EQ.0.)THEN
ARG=ASIN(AIMAG(Y)/CABS(Y))
RETURN
ELSE
ARG=ATAN2(AIMAG(Y),REAL(Y))

```

```
RETURN
ENDIF
ENDIF
END
```

```
C
C
C
```

```
-----
SOUSPROGRAMME QUI FORME LES FONCTIONS A RESOUDRE
-----
```

```
REAL FUNCTION F(K)
PARAMETER M=30
complex V(M)
REAL Xdt(M),H(M),X(M),XP(M),Td0(M),Tq0(M),Kex(M),Tex(M),D(M)

REAL Pm0(M),Pe(M),Wr(M),Xd(M),Xq(M),E30(M),Id(M),Iq(M),Vref(M)
REAL Vt(M),Tr(M),Ta(M),Tst(M),Ka(M),Kst(M),FG,Vrmax(M),Vrmin(M)
INTEGER N,NL,Npv,Nn,JJ,NCC,LF,ETAT,INDEX,K,I,ICHOIX
REAL Aex(M),Bex(M),Tc(M),Ts(M),R(M),DBt(M),Pmax(M),P2,P4

COMMON/BL4/N,NL,Npv,Nn,JJ,NCC,LF,ETAT,INDEX,ICHOIX
COMMON/BL7/X,XP,Dt,Pm0,Pe,Wr,Vref,Vt,E30
COMMON/BL8/H,Td0,Tq0,Xd,Xdt,Xq,D
COMMON/BL9/V,Id,Iq
COMMON/BL10/Tr,Ta,Tst,Ka,Kst,Kex,TeX,Vrmax,Vrmin,Aex,Bex

COMMON/BL12/Tc,Ts,R,DBt,Pmax

I=K-(K-1)/Nm*Nm
Wb=2.*3.14159*50.
IF(ICHOIX.EQ.3.AND.INDEX.GE.5.AND.INDEX.LE.8)RETURN
GOTO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)INDEX
1 F=X(I+Nm)-Wb
RETURN

2 F=(Wb/(2.*H(I)))*(X(I+B*Nm)-Pe(I)-D(I)*(X(I+Nm)-Wb))
RETURN

3 F=(X(I+6*Nm)-X(I+2*Nm)+(Xd(I)-Xdt(I))*Id(I))/Td0(I)
RETURN

4 IF(Tq0(I).EQ.0.)THEN
F=0.
RETURN
ELSE
F=(-X(I+3*Nm)-(Xq(I)-Xdt(I))*Iq(I))/Tq0(I)
ENDIF
RETURN

5 IF(Tr(I).eq.0.)THEN
F=0.
XP(I+4*Nm)=Vref(I)-Vt(I)
ELSE
F=(Vref(I)-Vt(I)-X(I+4*Nm))/Tr(I)
ENDIF
RETURN

6 F=(Ka(I)*(X(I+4*Nm)+E30(I)/Ka(I)-X(I+7*Nm))-X(I+5*Nm))/Ta(I)
```

RETURN

7 F=(X(I+5*Nm)-X(I+6*Nm)*Aex(I)*EXP(Bex(I)*X(I+6*Nm))-
* Kex(I)*X(I+6*Nm))/Tex(I)

RETURN

8 FG=(X(I+5*Nm)-X(I+6*Nm)*Aex(I)*EXP(Bex(I)*X(I+6*Nm))-
* Kex(I)*X(I+6*Nm))/Tex(I)

F=(Kst(I)*FG-X(I+7*Nm))/Tst(I)

RETURN

9 F=(X(I+9*Nm)-x(I+8*Nm))/Ts(I)

RETURN

10 P4=(1./R(I))*((wb-X(I+Nm))/Wb+DBt(I))

P2=Pm0(I)-P4

IF(P2.LE.0.)P2=0.

IF(P2.GE.Pmax(I))P2=Pmax(I)

F=(P2-X(I+9*Nm))/Tc(I)

RETURN

END

C-----
C SOUS PROGRAMME QUI CALCUL LES COURANTS Id ET Iq DANS
C LE REPERE MACHINE (q,d)
C-----

SUBROUTINE COURANT(X, Id, Iq, G, B, M, Nm)

REAL X(M), Id(M), Iq(M), B(M,M), G(M,M)

INTEGER Nm

DO I=1, Nm

Id(I)=G(I, I)*X(I+3*Nm)+B(I, I)*X(I+2*Nm)

Iq(I)=G(I, I)*X(I+2*Nm)-B(I, I)*X(I+3*Nm)

DO J=1, Nm

IF(I.NE.J)THEN

Id(I)=Id(I)+X(J+3*Nm)*(G(I, J)*COS(X(I)-X(J))+

* B(I, J)*SIN(X(I)-X(J)))+X(J+2*Nm)*(B(I, J)*COS(X(I)-X(J))-

* G(I, J)*SIN(X(I)-X(J)))

Iq(I)=Iq(I)+X(J+2*Nm)*(G(I, J)*COS(X(I)-X(J))+

* B(I, J)*SIN(X(I)-X(J)))-X(J+3*Nm)*(B(I, J)*COS(X(I)-X(J))-

* G(I, J)*SIN(X(I)-X(J)))

ENDIF

ENDDO

ENDDO

RETURN

END

C-----
C SOUS PROGRAMME QUI CALCUL LA PUISSANCE ELECTRIQUE
C DEVELOPPEE PAR LA MACHINE
C-----

SUBROUTINE PUISSANCE(Pe, X, Id, Iq, Xdt, Xq, Nm, M)

REAL Pe(M), X(M), Id(M), Iq(M), Xdt(M), Xq(M)

INTEGER Nm

```

DO I=1,Nm
Pe(I)=X(I+3*Nm)*Id(I)+X(I+2*Nm)*Iq(I)
ENDDO
RETURN
END

```

```

C-----
C           SOUS PROGRAMME QUI CALCUL LE MODULE DE LA TENSION
C           TERMINAL.
C-----

```

```

SUBROUTINE TENSION(X,Vt,Id,Iq,Xdt,M,Nm,Xq)
REAL X(M),Vt(M),Id(M),Iq(M),Xdt(M),Xq(M)
INTEGER Nm

```

```

DO I=1,Nm
Vd=X(I+3*Nm)-Xdt(I)*Iq(I)
Vq=X(I+2*Nm)+Xdt(I)*Id(I)
Vt(I)=SQRT((Vd**2)+(Vq**2))
ENDDO
RETURN
END

```

```

C-----
C           SOUSPROGRAMME QUI VERIFIER LES SORTIES DU
C           REGULATEUR DE TENSION.
C-----

```

```

SUBROUTINE VERIFIER(Vrmax,Vrmin,Eemax,X,INDEX,I,Nm)
PARAMETER M=30
REAL Vrmax(M),Vrmin(M),Eemax(M),X(M)
INTEGER INDEX,I,Nm
IF(INDEX.EQ.6)THEN
IF(X(I+5*Nm).GT.Vrmax(I))X(I+5*Nm)=Vrmax(I)
IF(X(I+5*Nm).LT.Vrmin(I))X(I+5*Nm)=Vrmin(I)
RETURN
ENDIF
IF(INDEX.EQ.7)then
IF(X(I+6*Nm).GT.Eemax(I))X(I+6*Nm)=Eemax(I)
IF(X(I+6*Nm).LT.0.)X(I+6*Nm)=0.
RETURN
ENDIF
RETURN
END

```

```

C-----
C           SOUS PROGRAMME QUI CALCUL LE TRANSITE DE PUISSANCE
C-----

```

```

SUBROUTINE TRANSIT(S,PERTE,YS,YSH,V,N,NL)
PARAMETER M=30
CHARACTER*5 LISTE(M),NAME1(M),NAME2(M),NOEUDF1,NOEUDF2
COMPLEX S(M,M),YS(M),YSH(M),V(M),PERTE(M)
INTEGER LIGNE(M),N,NL

COMMON/BL2/LIGNE,NAME1,NAME2,LISTE,NOEUDF1,NOEUDF2
WRITE(4,400)
DO 100 I=1,NL

```

```

DO 100 K=1,N
IF(NAME1(I).NE.LISTE(K)) GOTO 100
DO 100 J=1,N
IF(NAME2(I).NE.LISTE(J)) GOTO 100
S(K,J)=CONJG(YS(I))*CONJG(V(K)-V(J))*V(K)+CONJG(YSH(I))*V(K)*V(K)
S(J,K)=CONJG(YS(I))*CONJG(V(J)-V(K))*V(J)+CONJG(YSH(I))*V(J)*V(J)
Pactive=ABS(REAL(S(K,J)))-ABS(REAL(S(J,K)))
Preactive=ABS(AIMAG(S(K,J)))-ABS(AIMAG(S(J,K)))
PERTE(I)=CMPLX(Pactive,Preactive)
WRITE(4,200)LIGNE(1),J,K,S(J,K),PERTE(I)
200 FORMAT(3(1X,I3),5X,2(F6.3,5X,F6.3,10X))
100 CONTINUE
400 FORMAT(2X,/, 'LIGNE',2X, 'CODE NOEUD',2X, 'PUISSANCE TRANSITEE',2X,
* 'PERTES')
RETURN
END

```

-----FIN-----

Etat du réseau avant la perturbation.

NOMBRE DE NOEUDS : 9
 NOMBRE DE MACHINES : 3
 NOMBRE DE BRANCHES : 9
 NOMBRE DE NOEUDS PV: 6
 NOMBRE DE CHARGES : 3

LISTE DES NOEUDS	CODE NOEUD
GENE1	1
GENE2	2
GENE3	3
SUD	4
C.OUE	5
C.EST	6
OUEST	7
CENTR	8
EST	9

CODE NOEUD	TENSION	
1	1.040	0.000
2	1.012	0.165
3	1.022	0.084
4	1.025	-.040
5	0.991	-.069
6	1.011	-.065
7	1.023	0.067
8	1.015	0.013
9	1.031	0.036

Puissances générées aux noeuds machines.

CODE NOEUD	PG	QG
1	0.72	0.27
2	1.63	0.08
3	0.85	-0.10

LIGNE	CODE NOEUD	PUISSANCE TRANSITEE	PERTES		
			active	reactive	
1	4 1	-0.717	-0.236	0.000	0.031
2	5 4	-0.418	-0.418	-0.016	-0.155
3	6 4	-0.316	-0.163	-0.015	-0.154
4	7 2	-1.627	0.077	0.000	0.004
5	8 7	-0.758	-0.099	0.017	-0.085
6	9 8	0.250	0.032	-0.011	0.211
7	9 3	-0.852	0.144	0.000	-0.041
8	9 6	0.621	-0.184	-0.003	-0.055
9	7 5	0.886	-0.071	-0.023	0.050