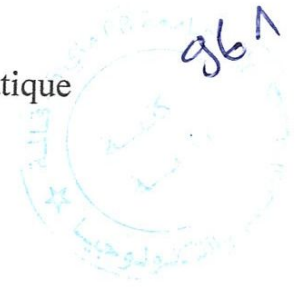


République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Mémoire de fin d'étude  
pour l'obtention du diplôme de master Académique**

Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Réseaux Electrique

---

**ETUDE DE LA STABILITE D'UN RESEAU  
ELECTRIQUE**

---

Présenté par :  
**HAMLAOUI IBRAHIM**

Sous la direction de :  
**M. GOUAIDIA SAID.**

Jun 2017



77/3483



## *Remerciements :*

*Mes remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience, qu'il ma données durant toutes ces années d'étude.*

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur GOUAIDIA SAAID pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils et remarques.*

*Mes remerciements particuliers aux membres de jury de ma soutenance. Je tiens également à remercier tous les enseignants du département génie électrotechnique et automatique.*

*Mes remerciements les plus vifs, vont à mes parents.*

*En fin, je tiens à remercier vivement toutes les personnes qui m'ont aidée à élaborer et réaliser ce mémoire*

*Dédicace :*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes parents,*

*Mes frères*

*Mes sœurs*

*Et à tous mes amis.*



<b>Introduction générale :</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur la stabilité des réseaux électrique</b>	
I-1-Généralités sur les réseaux électriques	4
I-2- Définition de la stabilité des réseaux électrique	4
I-3-Notion et types de la stabilité d'un réseau électrique	4
I-3-1-Stabilité angulaire (stabilité de l'angle de rotor)	5
a-Stabilité angulaire aux petites perturbations	6
b-Stabilité transitoire	6
I-3-2-Stabilité de fréquence	6
I-3-3-Stabilité de tension	7
I-4-Les différents méthodes d'analyses la stabilité transitoire	7
I-4-1- Analyse en planification	7
I-4-2- L'analyse en mode préventif	7
I-4-3- Analyse en mode curatif aboutissant	7
I-5-Modèle simplifié de la machine synchrone et réseaux équivalent	8
I-6-Equation de mouvement d'un générateur	11
I-7 : Conclusion	14
<b>Chapitre II : Modélisation d'un réseau électrique</b>	
II -1 : Introduction	15
II -2 : Modèle de l'alternateur	15
II -3 : Modèle de ligne de transmission	15
II -4 : Modèle des transformateurs	16
II -5:Modélisation des charges	17
II -6 : Modèle des nœuds du réseau	18
II .6 .Prédire la stabilité- critère des aires égales	18
II .7 .Conclusion	22
<b>Chapitre III : Analyse d'un réseau électrique par méthode d'intégration numérique</b>	
III -1-Introduction	23
III -2-Les méthodes d'intégration numérique	23

---

III -2-1-Méthode d'Euler	23
III -2-2-Méthode d'Euler modifié	24
III -2-3-Méthode de Runge Kutta	24
III -2-Réseau à plusieurs machines	26
III -3-la matrice admittance et la puissance électrique	27
III -3-1-La matrice admittance	27
III -3-2-La puissance électrique	29
III -4-Schémas du réseau étudié	30
III -4-1 : Les données de réseau	31
III- 5 : Calcule de la matrice admittance	33
III- 5 -1:Calcule de la matrice admittance avant défaut	33
III -5-2 : Calcule de la matrice admittance durant le défaut	34
III -5-3 : Calcule de la matrice admittance après défaut	35
III -6:Application des méthodes d'intégration numériques	36
III -7 : Conclusion :	43
<b>Conclusion Générale</b>	<b>45</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>46</b>

# Introduction Générale

Depuis la première pile électrique de Volta à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, les utilisations de l'énergie électrique se sont diversifiées et intensifiées, aussi bien dans l'industrie que chez les particuliers. Cette augmentation de l'usage de l'énergie électrique est parvenue à un point tel que, bien souvent, la consommation d'énergie électrique d'un pays sert à mesurer son développement économique.

Cette place prépondérante qu'a prise l'énergie électrique dans notre société tient non seulement à sa facilité de transformation, depuis ou vers les autres formes d'énergie, mais aussi à la simplicité de son transport.

Ce transport de l'énergie électrique est réalisé par l'intermédiaire des réseaux dont la taille et la complexité ont augmenté avec l'accroissement des besoins des utilisateurs.

L'augmentation de la demande a poussé aux interconnexions de plusieurs réseaux d'énergie, ce qui a engendré certains avantages, comme l'utilisation optimale des moyens de production, l'assistance mutuelle des réseaux, un bon plan de fréquence, mais aussi des inconvénients. Les réseaux deviennent plus grands et plus complexes, ce qui implique que leur étude et analyse deviennent plus difficiles, particulièrement les études de stabilité transitoire.

En principe la planification des systèmes d'énergie électrique est régie par des bases scientifiques et techniques rigoureuses. Néanmoins, l'évolution réelle est toujours dictée par des facteurs d'ordre social, politique, géographique et environnemental compliquant la morphologie des réseaux. Les difficultés d'ordre pratique, rencontrées par exemple, dans l'implantation de nouvelles lignes de transport, contribuent énormément dans la complexité des systèmes d'énergie électrique.

Actuellement, le traitement des modèles complexes des grands systèmes d'énergie électrique et l'évaluation rapide de leur comportement face à diverses éventualités pour un contrôle en temps réel de la sécurité sont des problèmes qui préoccupent les compagnies et les chercheurs dans le domaine. De plus, la réduction des ressources d'énergie conventionnelles (charbon, pétrole) a fait que l'utilisation optimale des ressources d'énergie est devenue très importante.

Un autre souci qui préoccupe les conducteurs des systèmes d'énergie est celui de produire, transporter, et distribuer l'énergie électrique de la façon la plus économique, tout en poussant les systèmes à fonctionner aux limites de stabilité.

Face à toutes ces difficultés, les grands objectifs de tout réseau d'énergie électrique se résument ainsi :



- Fournir une énergie de qualité (i.e. maintenir la tension et la fréquence dans une plage bien définie pour le consommateur et sans harmoniques, distorsions).
- Maintenir la continuité de la fourniture d'énergie (sans coupures ou avec un minimum d'interruption). Ceci reste lié à la sécurité du système.
- Annuler la différence entre l'énergie fournie et la charge demandée (bilan énergétique).
- Gestion des échanges aux interconnexions selon les contrats arrêtés.
- Utilisation optimale des ressources d'énergie disponible (charbon, pétrole, gaz, hydraulique, nucléaire ...).
- Conduire efficacement et économiquement le système.
- S'assurer de la compatibilité environnementale.

Pour réaliser ces objectifs, parfois contradictoires, l'étude de la stabilité des réseaux d'énergie électrique a toujours été considérée comme un facteur principal, que ce soit pour les planificateurs ou les exploitants. Plusieurs techniques analytiques et numériques ont été développées pour résoudre ce problème.

Les modèles mathématiques détaillés des réseaux d'énergie électrique sont non linéaires et très complexes. Ceci est dû à la nature des charges non linéaires, au non linéarité associée à tout système utilisant des circuits magnétiques (effet de saturation) et au non linéarité présente dans les systèmes de contrôle des turbines, de régulation de vitesse et de régulation de tension (boucle d'excitation).

Ce travail s'intéressera donc à l'étude de la stabilité transitoire d'un réseau électrique qui, suite à un défaut particulier, déstabilise le système et entraîne principalement les générateurs à un fonctionnement anormal. L'étude de la stabilité transitoire consistera à analyser l'évolution de paramètres particuliers, comme les puissances mécaniques et électriques, la vitesse et d'autres paramètres.

A travers ce projet de mémoire, nous nous sommes attelé à la réalisation d'un programme complet de l'étude de la stabilité transitoire, qui en fait, suite à un défaut particulier déstabilise le système et entraîne principalement les générateurs à un fonctionnement anormal.

L'étude de la stabilité transitoire consiste à analyser alors l'évolution de paramètres

particuliers, comme la fréquence de rotation des machines, leur tension ou phase de tension, ou encore les tensions aux nœuds du réseau électrique.

Il est connu que chaque variable du système définissant un réseau électrique, nécessite un certain temps pour répondre à un changement aux conditions de fonctionnement, et un grand ensemble d'équations différentielles doit être traité et résolu pour déterminer la réponse.

Aussi, il serait plus intéressant de faire certaines hypothèses afin de simplifier la modélisation.

# **Chapitre I :**

## **Généralités sur la stabilité des réseaux électrique**

### I-1-Généralités sur les réseaux électriques :

On appelle réseau électrique l'ensemble des infrastructures et ouvrages, permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales électriques (centres de production), vers les consommateurs d'électricité (charge).

Le réseau de transport électrique est divisé en lignes très haute, haute, moyenne et basse tension (distribution). La structure des réseaux varie d'un pays à un autre, mais on peut la représenter de la façon générale suivante :

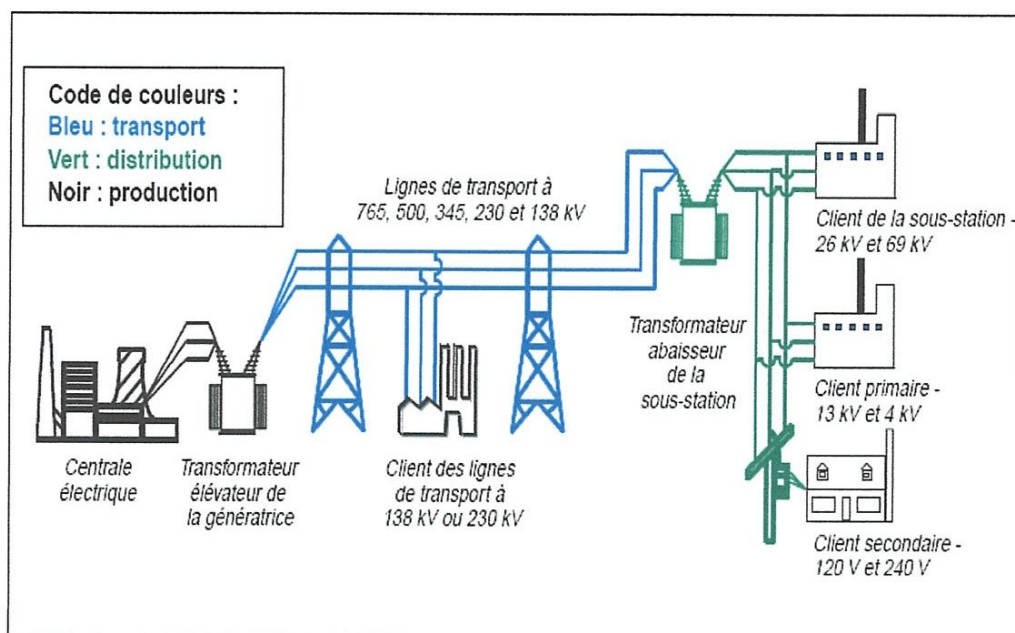


Figure I.1 Structure de base d'un réseau d'énergie électrique.

### I-2- Définition de la stabilité des réseaux électrique :

La stabilité d'un réseau électrique est la propriété qui lui permet de rester dans un état d'équilibre, pour des conditions de fonctionnement normales, et de retrouver un état d'équilibre acceptable, suite à une perturbation . Selon la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude de perturbations.

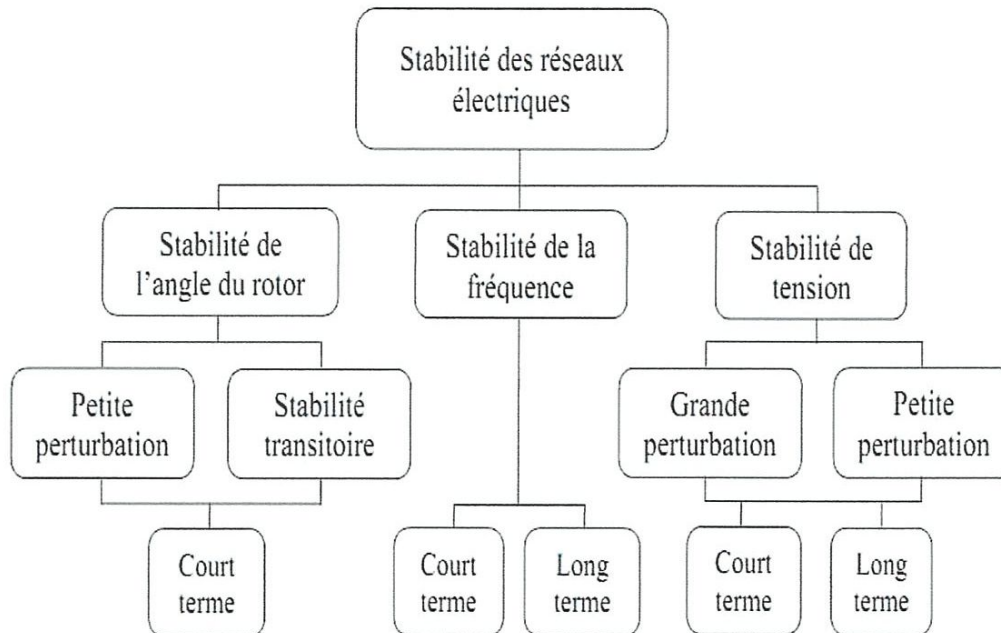
### I-3-Notion et types de la stabilité d'un réseau électrique :

Un changement de condition de fonctionnement d'un réseaux électrique (changement de charges, manœuvre de ligne, défaut, perte de générateurs ...etc. ) implique de changement de point de fonctionnement des machines synchrones connectées au



réseau .le réseau est défini stable si les machines sont capable de suivre ces changements sans perdre le synchronisme .

On distingue les types de stabilité suivant la nature des perturbations :



**Figure I-2** classification des types de la stabilité des réseaux électrique

### I-3-1-Stabilité angulaire (stabilité de l'angle de rotor) :

Etant donné que les systèmes de puissance recourent principalement aux machines synchrones pour la génération de puissance électrique, un aspect important est le fonctionnement de ces générateurs au synchronisme.

La stabilité angulaire (ou stabilité d'angle rotorique) implique l'étude des oscillations Électromécaniques inhérentes aux réseaux électriques. Elle est définie comme la capacité d'un ensemble des machines synchrones interconnectées de conserver le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normales ou après avoir été soumis à une perturbation.

L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques :

Soit d'une machine et de reste du système, soit d'un groupe de machines et du reste du système. Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme, ce qui met en danger l'équilibre production consommation du système.

Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire aux petites perturbations ou de la stabilité transitoire.

#### a-Stabilité angulaire aux petites perturbations :

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc.

#### b-Stabilité transitoire :

Les perturbations considérées sont plus importantes : changement soudain de charges, manœuvre de ligne, défaut, perte de générateur,... après la perturbation, la fréquence des machines synchrones dérive à la valeur nominale (60hz par exemple) et les angles interne changent.

L'objectif d'une analyse de stabilité transitoire est de déterminer si les machines synchrones vont retourner à la fréquence synchrone avec une nouvelle valeur de l'angle interne.

On examine aussi les changements d'écoulement de puissance et les tensions des barres.

Dans plusieurs cas, la stabilité est déterminée pendant la première oscillation des angles internes des machines après une perturbation.

Durant la première oscillation (qui dure approximativement 1 seconde), la puissance mécanique et la tension interne d'une machine sont supposée constantes. Cependant lorsqu'on considère des oscillations multiples qui durent plusieurs secondes, des modèles de turbine-gouvernail et excitation et des modèles plus détaillés de machine doivent être utilisés pour obtenir des résultats plus précis sur une période plus longue.

### I-3-2-Stabilité de fréquence :

La stabilité de fréquence concerne la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale, suite à un incident sévère ayant ou non conduit à un

morcellement du système. La stabilité de fréquence est étroitement liée à l'équilibre global entre la puissance active produite et consommée.

### I-3-3-Stabilité de tension :

La stabilité de tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions du fonctionnement système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension.

### I-4-L es différents méthodes d'analyses la stabilité transitoire :

Il y a différentes méthodes pour analyser un système de puissance dans l'état transitoire. Trois méthodes d'analyses se détachent :

#### I-4-1- Analyse en planification :

qui tient compte :

- . Du temps de réponse des protections
- . Du type de conducteurs
- . Du niveau de tension

#### I-4-2- L'analyse en mode préventif :

Mettant en œuvre :

- . Les méthodes numérique ou indirecte
- . Les méthodes directes

#### I-4-3- Analyse en mode curatif aboutissant :

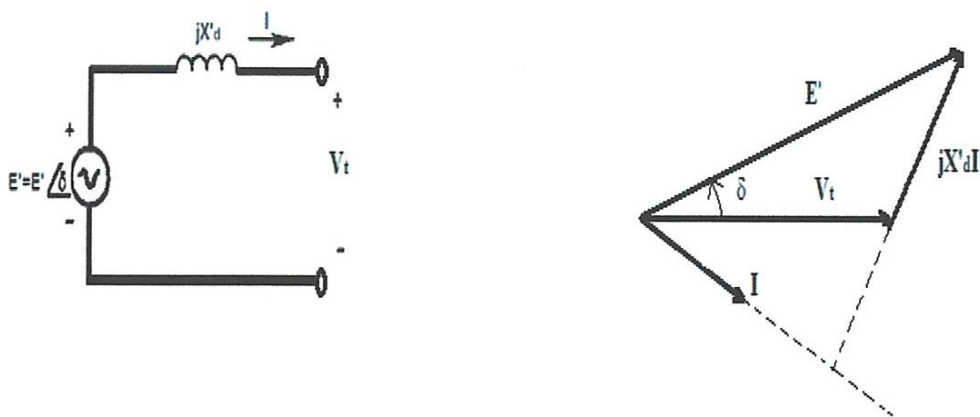
- à la modification de la caractéristique des lignes
- au contrôle de transit de puissance dans les lignes

En résumé, ce dernier mode est susceptible de fournir une solution optimale à la conduite en temps réel du réseau. Reste à savoir s'il existe des techniques appropriées à l'étude de la Stabilité transitoire, et si elles sont satisfaisantes. En effet, la rapidité d'évolution des Phénomènes transitoires impose aux méthodes curatives des conditions d'applicabilité Particulièrement contraignantes.



### I-5-Modèle simplifié de la machine synchrone et réseaux équivalent :

Dans l'analyse de la stabilité transitoire, on peut utiliser un modèle simplifié pour représenter une machine synchrone ce modèle est constitué d'une f.e.m sinusoïdale en série avec la réactance transitoire.



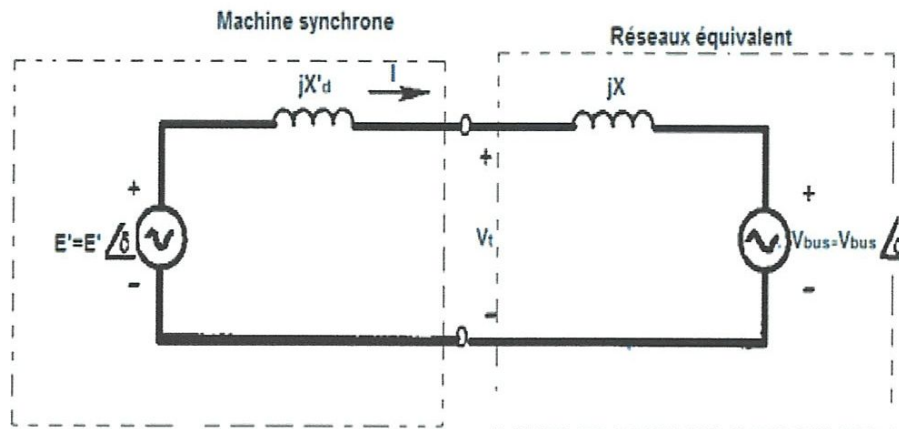
**Figure I-3** Modèle simplifié d'une machine synchrone utilisé dans l'analyse de stabilité transitoire

Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- La machine fonctionne en mode équilibré (seulement la séquence directe est considérée)
- l'excitation est constante
- on néglige les pertes, la saturation et la saillance des pôles

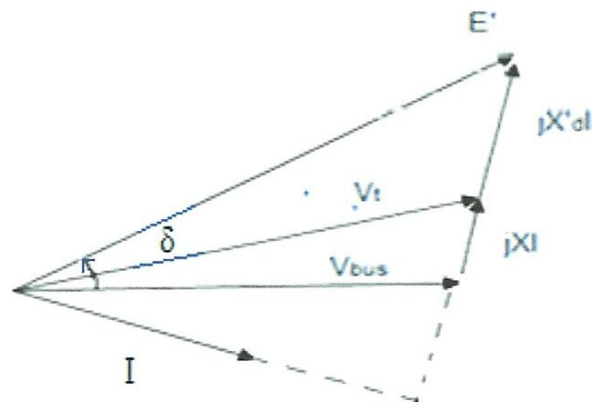
Ce modèle simplifié donne une précision acceptable pour l'étude de la stabilité transitoire tout en réduisant la complexité du modèle de réseau.

Dans le modèle du réseau, chaque machine est connectée à l'ensemble des lignes, transformateurs, charges et d'autres machines. À la première approximation, on peut représenter le réseau par un réseau équivalent constitué d'une source de tension idéale en série avec une réactance équivalente. La source de tension idéale a les paramètres (amplitude, fréquence, phase) constants.



**Figure I-4** Machine synchrone connectée à un réseau équivalent

Les relations entre les tensions et courants dans le système équivalent sont illustrées dans la figure I-5



**Figure I-5** Diagramme vectoriel illustrant les tensions et courant du système équivalent

On calcule la puissance complexe délivrée à la source  $V_{bus}$  :

$$S_{bus} = V_{bus} \times I^* = V_{bus} \times \left[ \frac{E' - v_{bus}}{j(X + X'_d)} \right]^* = \frac{j[v_{bus}E'^* - v_{bus}V_{bus}^*]}{X + X'_d} = \frac{j(v_{bus}E'e^{-j\delta} - v_{bus}^2)}{X + X'_d}$$

$$S_{bus} = \frac{v_{bus}E'\sin\delta}{X + X'_d} + j \frac{v_{bus}E'\cos\delta - v_{bus}^2}{X + X'_d}$$

$\uparrow$   
 $P_{bus}$

$\uparrow$   
 $Q_{bus}$

La puissance active fournie à la source  $v_{bus}$  est :

$$P_{bus} = \frac{v_{bus}E'\sin\delta}{X + X'_d}$$

À remarque que  $P_{bus}$  est aussi la puissance électrique fournie par la machine synchrone :

$$P_e = P_{bus} = \frac{v_{bus}E'\sin\delta}{X + X'_d} = \frac{v_{bus}E'\sin\delta}{X_{eq}}$$

Où  $X_{eq} = X + X'_d$  est la réactance total reliant les deux sources  $E'$  et  $v_{bus}$ .

Durant les transitoires, on peut considérer que  $E'$  et  $V_{bus}$  demeurent constantes. Par conséquent, la puissance électrique fournie par la machine synchrone est une fonction sinusoïdale de l'angle interne  $\delta$ .

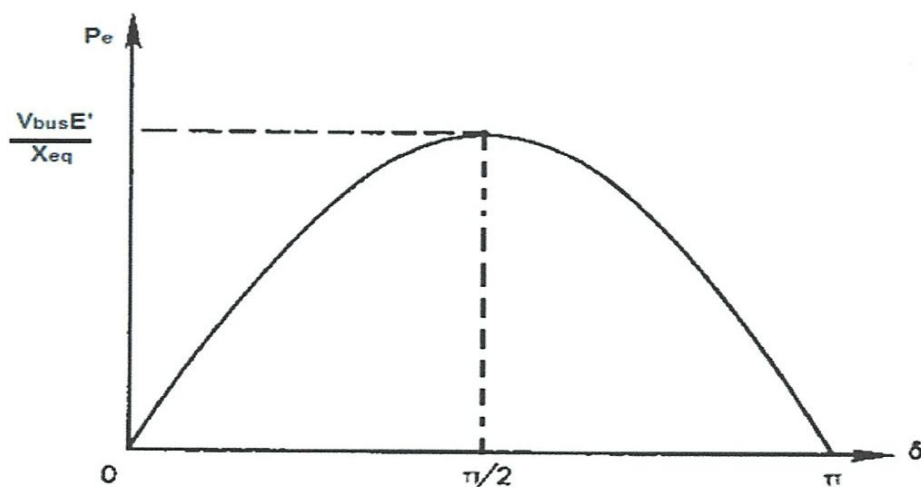


Figure I-5 Puissance électrique fournie par la machine synchrone à un réseau équivalent

Remarque : le réseau équivalent peut être considéré comme l'équivalent d'une machine synchrone de constante d'inertie  $H$  infinie et tournante à une vitesse constante. On l'appelle aussi réseau infini.

### I-6-Equation de mouvement d'un générateur :

Considérons un moteur mécanique (une turbine) qui entraîne une machine synchrone (un alternateur) qui délivre de l'énergie dans une charge électrique.

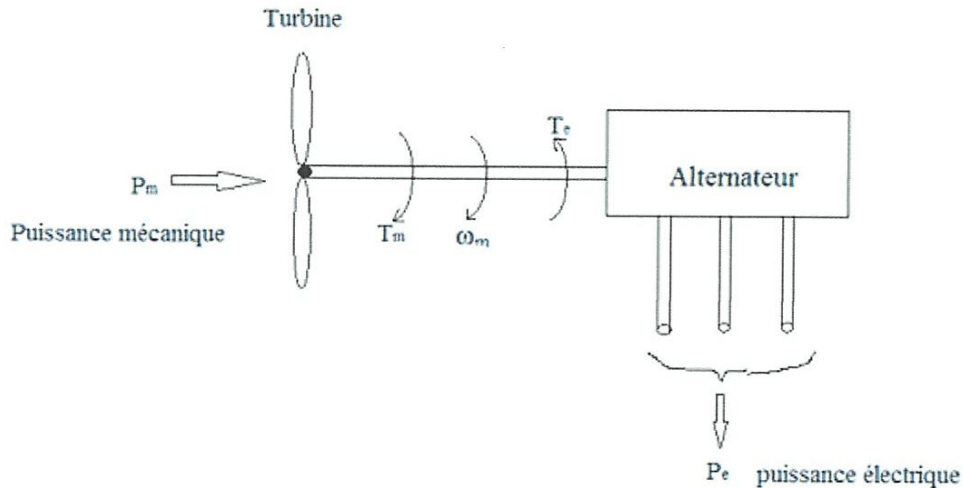


Figure I-6 Diagramme simplifié d'un générateur

L'équation de mouvement de système est écrite :

$$J\alpha_m(t) + B\omega_m(t) = T_m(t) + T_e(t) \quad (1)$$

Ou :  $J$  = inertie total du système (turbine + machine) (en  $\text{Kg.m}^2$ )

$B$  = coefficient de frottement total du système (turbine + machine) (en  $\text{N.m.s}$ )

$\omega_m(t)$  = vitesse angulaire (en  $\text{rad/s}$ )

$\alpha_m(t)$  = accélération angulaire (en  $\text{rad/s}^2$ )

$T_m(t)$  = couple mécanique (en  $\text{N.m}$ )

$T_e(t)$  = couple électrique (résultat de la puissance électrique délivrée plus les Pertes électriques dans la machine (en  $\text{N.m}$ ))

Le couple de frottement  $B\omega_m(t)$  est en général très petit par rapport à aux couple mécanique et électrique. pour l'analyse on peut négliger ce terme , l'équation de mouvement est écrit donc comme :

$$J\alpha_m(t) = T_m(t) - T_e(t) \quad (2)$$

On a :

$$\alpha_m(t) = \frac{d^2}{dt^2} [\omega_m(t)] = \frac{d^2}{dt^2} [\theta_m(t)] \quad (3)$$

Ou  $\theta_m(t)$  est la position angulaire dans le référentiel  $\omega_m(t) = \frac{d}{dt} [\theta_m(t)]$  est la vitesse angulaire (rad/s).

En régime permanent, la vitesse est constante, et on a  $\alpha_m = 0$  et  $T_m = T_e$ .

Il est plus pratique d'utiliser la position angulaire rotorique dans le référentiel synchrone (référentiel tournant à la vitesse synchrone). On pose :

$$\theta_m(t) = \omega_{msyn}t + \delta_m(t) \quad (4)$$

ou  $\omega_{msyn}$  est la vitesse synchrone de rotor ( en rad/s) et  $\delta_m(t)$  est la position angulaire du rotor dans le référentiel synchrone .

l'équation 2 devient :

$$J \frac{d^2}{dt^2} \theta_m(t) = J \frac{d^2}{dt^2} \delta_m(t) = T_m(t) - T_e(t) = T_a(t) \quad (5)$$

Ou  $T_a(t)$  est e couple d'accélération.

Il est aussi plus pratique de travailler avec la puissance (au lieu du couple) et calculer en p.u.

On multiplie (5) par  $\omega_m$  et on divise par  $S_{nom}$  (puissance apparente nominale de générateur) :

$$\omega_m \frac{J}{S_{nom}} \frac{d^2}{dt^2} \delta_m = \frac{T_m \omega_m}{S_{nom}} - \frac{T_e \omega_m}{S_{nom}} \quad (6)$$

Ou encore :



$$\frac{J\omega_m}{s_{nom}} \frac{d^2}{dt^2} \delta_m = p_{mpu} - p_{epu} \quad (7)$$

Ou  $p_{mpu}$  : puissance mécanique fournie par la turbine.

$p_{epu}$  : Puissance électrique fournie par le générateur plus les pertes électrique.

On définit une constante d'inertie H :

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{msyn}^2}{s_{nom}} \quad (\text{en joules/va ou pu-s}) \quad (8)$$

Ou  $\frac{1}{2}J\omega_{msyn}^2$  est l'énergie cinétique stockée à la vitesse synchrone.

Il est plus pratique de travailler avec H qu'avec J car la valeur de H est dans une plage de valeurs plus restreinte (1 – 10 pu-s).

L'équation de mouvement devient :

$$2H \frac{\omega_m}{\omega_{msyn}^2} \frac{d^2}{dt^2} \delta_m = p_{mpu} - p_{epu} \quad (9)$$

On définit la vitesse normalisée comme  $\omega_{pu} = \frac{\omega_m}{\omega_{msyn}}$

$$\text{L'équation de mouvement devient : } \frac{2H}{\omega_{msyn}} \omega_{pu} \frac{d^2}{dt^2} \delta_m = p_{mpu} - p_{epu} \quad (10)$$

Pour une machine synchrone avec P pole, on a les relations suivantes :

-accélération angulaire électrique :  $\alpha = \left(\frac{P}{2}\right) \alpha_m$

- fréquence angulaire électrique :  $\omega = \left(\frac{P}{2}\right) \omega'_m$

-angle interne :  $\delta = \left(\frac{P}{2}\right) \delta_m$

- fréquence angulaire synchrone électrique :  $\omega_{syn} = \left(\frac{P}{2}\right) \omega_{msyn}$

La vitesse angulaire normalisée est :  $\omega_{pu} = \frac{\omega_m}{\omega_{msyn}} = \frac{\omega_m}{\omega_{syn}}$

Finalement n peut écrire l'équation de mouvement sous la forme suivante :

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \omega_{pu} \frac{d^2}{dt^2} \delta = p_{mpu} - p_{epu} = p_{apu} \quad (11)$$

Cette équation est appelée équation de mouvement en per – unit. C'est une équation différentielle non linéaire à cause de  $p_{apu}$  qui est une fonction non linéaire de  $\delta$  et de  $\omega_{pu}$ .

L'équation de mouvement (11) peut être écrite en deux équations différentielles du premier ordre :

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{syn} \quad (12)$$

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \omega_{pu} \frac{d\omega}{dt} = p_{mpu} - p_{epu} \quad (13)$$

### I-7 : Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions de base sur la stabilité des réseaux électrique et leurs types et les perturbations considérées la stabilité transitoire qui peuvent être analysé par diverses méthodes et nous avons présenté un modèle simplifié d'une machine synchrone et réseau équivalent avec son diagramme vectoriel et la puissance électrique fournie par la machine synchrone à un réseau équivalent , nous avons aussi présenté l'équation de mouvement de la machine synchrone .

# **Chapitre II :**

## **Modélisation d'un réseau électrique**

## II -1 : Introduction :

Un réseau d'énergie électrique se compose d'éléments (générateurs, transformateurs, lignes, charges), ce chapitre propose de présenter les bagages mathématique nécessaire de la modélisation d'un réseau électrique pour l'étude de la stabilité.

## II -2 : Modèle de l'alternateur :

Le groupe turbo-alternateur est considéré comme le cœur du réseau électrique, il assure la production de l'énergie électrique demandée par le consommateur. Dans notre cas, le groupe turboalternateur est modélisé par une source de tension constante qui injecte, au niveau du nœud auquel il est connecté, une puissance active  $P_G$  et réactive  $Q_G$ .

L'alternateur possède deux boucles de régulation automatique, une pour le réglage automatique de la puissance AGC (Automatic Generation Control) et l'autre pour le réglage automatique de la tension AVR (Automatic Voltage Regulator).

La production de l'énergie réactive dans un générateur est limitée suivant l'équation :

$$Q_G^{min} \leq Q \leq Q_G^{max}$$

Cette limitation est due principalement à la limite thermique du bobinage statorique et rotorique ainsi que la limitation de l'angle rotorique permise ( $30^\circ$ ).

## II -3 : Modèle de ligne de transmission :

Une courte ligne de transmission est représentée par son impédance en série. Les moyennes et longues lignes sont représentées par un circuit  $\pi$ , figure II-1. La résistance de la ligne de transmission est souvent négligée car elle est petite par rapport à sa réactance.

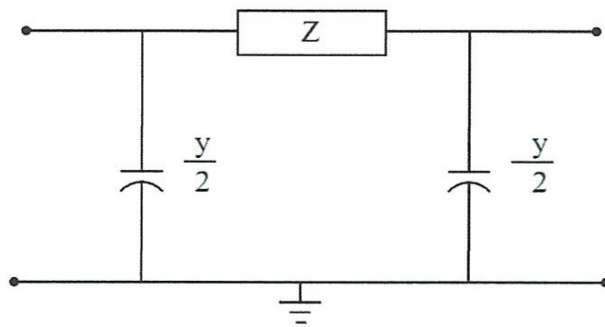


Figure II.1. Modèle en  $\pi$  des lignes de transmission

#### II -4 : Modèle des transformateurs :

Les transformateurs sont généralement placés entre les unités de production et le réseau de transport en fonctionnement élévateur, et entre le réseau de transport et les réseaux de distribution en fonctionnement abaisseur. Outre la transmission de l'énergie électrique avec modification des tensions, les transformateurs peuvent être utilisés pour contrôler les tensions de nœuds des réseaux.

On utilise des transformateurs à prise variable (discontinue) qui permet de modifier le rapport de transformation. Le changement de prise peut être effectué manuellement ou automatiquement grâce à des dispositifs dits « régulateurs en charge ». La figure (II.2) montre le schéma équivalent du transformateur idéal : il est doté de plusieurs prises (côté haute tension) permettant de modifier le nombre de spires du primaire. L'impédance  $Z_T$  correspond à l'impédance équivalente totale vue du primaire .et où  $m$  est le rapport de transformation défini par le rapport des nombres de spires du primaire et du secondaire.

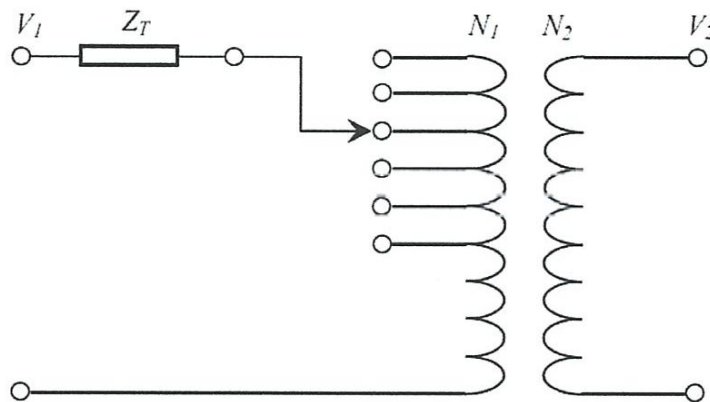
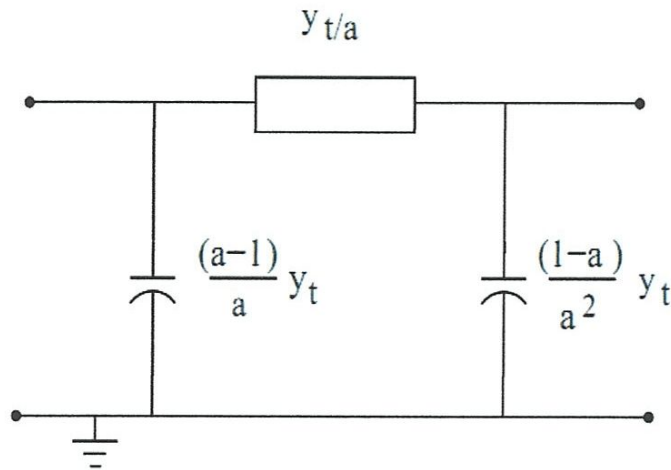


Figure II.2.Représentation schématique d'un transformateur à prise variable

La figure (II.3) représente le schéma équivalent en  $\pi$  d'un transformateur à circuit magnétique sans pertes. Dans notre étude, les régulateurs en charge ne sont pas modélisés : ainsi le rapport de transformation reste fixe pendant les simulations dynamiques.

On doit préciser aussi que s'il n'y a pas de prise alors  $a=1$ .



Figure II.3. Modèle en  $\pi$  du transformateur

### II -5: Modélisation des charges :

Les caractéristiques des charges ont une influence importante sur la stabilité et la dynamique du système. En raison de la complexité et la variation continue des charges et de la difficulté d'obtenir des données précises sur leurs caractéristiques, une modélisation précise des charges est très difficile. Ainsi, des simplifications sont indispensables selon le but de l'étude demandée. Pour les études de stabilité dans lesquelles la gamme de temps considérée est de l'ordre de 10 secondes après la perturbation, les modèles de charges les plus utilisés sont généralement des modèles Statiques. Le caractère statique est lié à la description de la charge par des équations purement algébriques.

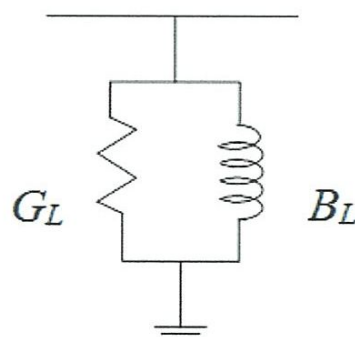


Figure II.4. Modélisation d'une charge par son admittance équivalente

En effet, on peut écrire pour un nœud de tension connectée par une charge consommant une puissance  $P_L + jQ_L = S_L$ . Cette charge peut être représentée par des admittances statiques

$$G_L = P_L/V_L^2 \text{ et } B_L = -jQ_L/V_L^2$$

Les charges statiques sont représentées par des admittances constantes, qu'on peut déterminer après calcul de l'écoulement de puissance.

$$Y_L = P_L/V_L^2 - jQ_L/V_L^2$$

## II -6 : Modèle des nœuds du réseau :

Les nœuds dans un réseau électrique sont divisés en trois types :

- Nœud de charge (PQ) : c'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont considérées connues.
- Nœud générateur (PV) : c'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. La puissance active et la tension sont considérées connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures,  $Q_g^{min}$  et  $Q_g^{max}$  respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud (PQ).
- Nœud bilan (slack bus) : c'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant ; il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud bilan, l'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus.

### II .6 .Prédire la stabilité- critère des aires égales :

On peut développer une méthode rapide pour prédire la stabilité transitoire d'un générateur connecté a un réseau infini en utilisant le modèle simple du générateur

(équation de mouvement simplifiée  $\frac{2H}{\omega_{syn}} \omega_{pu} \frac{d^2}{dt^2} \delta = p_{mpu} - p_{epu}$  ) et l' équation

de transfert de puissance entre deux sources (  $P_e = \frac{V_{bus} E' \sin \delta}{X_{eq}}$  ).

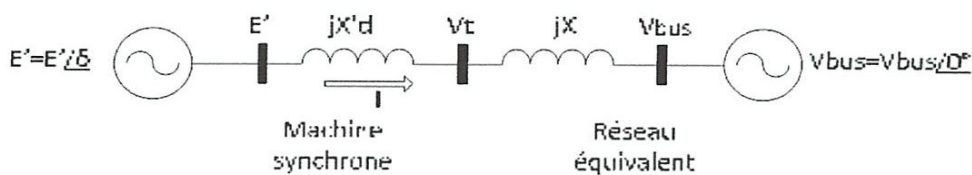


Figure II.5 : Machine synchrone connectée à un jeu de barre infinie

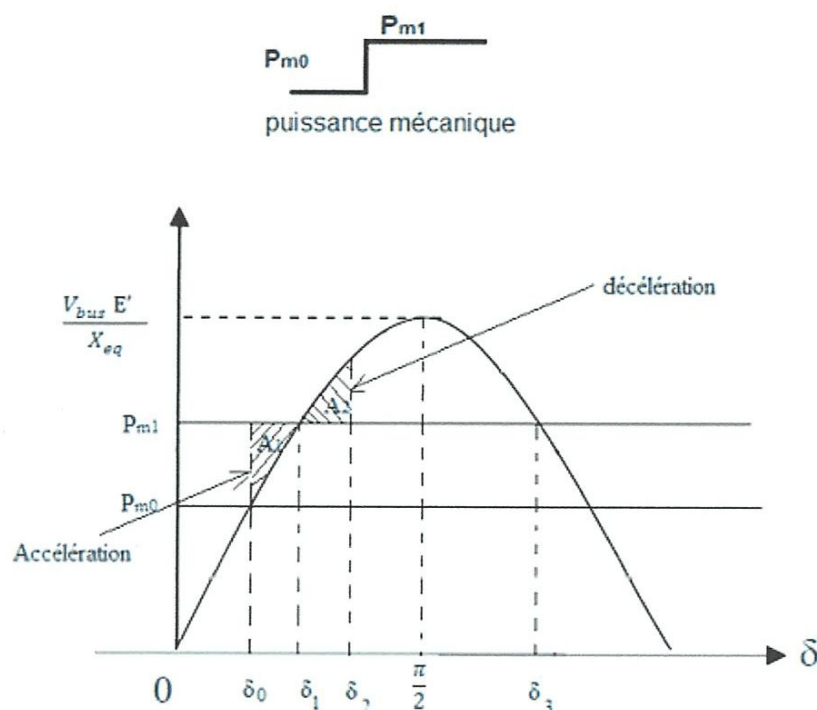


Figure II.6 : Augmentation brusque de la puissance mécanique

Le système est en régime permanent :  $P_e = P_m = P_{m0}$  et  $\delta = \delta_0$

A  $t = 0$ , la puissance mécanique fournie par la turbine est augmentée brusquement à un niveau plus élevé  $P_{m1}$ .

(Note : En pratique la puissance mécanique ne peut varier rapidement car la constante de temps mécanique est dans l'ordre de secondes).

A cause de l'inertie du système, la position du rotor ne peut changer instantanément. On a les conditions initiales suivantes :



$$\delta(0^+) = \delta(0^-) = \delta_0 \quad \text{et} \quad p_e(0^+) = p_e(0^-)$$

On suppose que la vitesse normalisée demeure constante durant la perturbation :

$\omega_{pu} = 1.0$ . l'équation de mouvement devient :

$$\frac{2H}{\omega_{msyn}} \frac{d^2}{dt^2} \delta = p_{mpu} - p_{epu} \quad (1)$$

En multipliant les deux membres par :  $\frac{d\delta}{dt}$  , on obtient :

$$\frac{2H}{\omega_{msyn}} \frac{d^2}{dt^2} \delta \left( \frac{d\delta}{dt} \right) = (p_{mpu} - p_{epu}) \left( \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (2)$$

$$\text{Mais : } \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 \left( \frac{d\delta}{dt} \right) \left( \frac{d^2}{dt^2} \delta \right) .$$

$$\text{Alors : } \frac{H}{\omega_{msyn}} \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = (p_{mpu} - p_{epu}) \left( \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (3)$$

$$\text{Ou encore : } \frac{H}{\omega_{msyn}} d \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = (p_{mpu} - p_{epu}) d\delta \quad (4)$$

On définit  $\delta_0$  comme l'angle interne initial (à  $t=0$  ou la perturbation survient ).

En intégrant les deux membres de l'équation (4), on obtient :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{H}{\omega_{msyn}} d \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \int_{\delta_0}^{\delta} (p_{mpu} - p_{epu}) d\delta \quad (5)$$

$$\frac{H}{\omega_{msyn}} \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \Big|_{\delta_0}^{\delta} = \int_{\delta_0}^{\delta} (p_{mpu} - p_{epu}) d\delta \quad (6)$$

à  $t=0$ , la dérivée de  $\delta$  est nulle :  $\frac{d\delta}{dt} \Big|_{\delta=\delta_0} = 0$  .

lorsque  $\delta$  atteint le maximum  $\delta_2$ , la dérivée de  $\delta$  est nulle :  $\frac{d\delta}{dt} \Big|_{\delta=\delta_2} = 0$

L'intégrale (6) évaluée entre  $\delta_0$  et  $\delta_2$  sera donc nulle et on aura :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} (p_{mpu} - p_{epu}) d\delta = 0 \quad (7)$$

On peut séparer cette intégrale en deux parties :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{mpu} - p_{epu}) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_{mpu} - p_{epu}) d\delta = 0 \quad (8)$$

$$\left\{ \int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{mpu} - p_{epu}) d\delta \right\} = \left\{ \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_{mpu} - p_{epu}) d\delta \right\} \quad (9)$$



$A_1$

Aire d'accélération



$A_2$

Aire de décélération

On constate qu'après la perturbation, l'angle interne  $\delta$  de la machine augmente et dépasse la valeur  $\delta_1$  pour atteindre la valeur maximale  $\delta_2$ . Cette valeur maximale est déterminée par la relation (9) connue comme "critère de surface égales". L'angle interne  $\delta$  oscille autour du nouveau point de fonctionnement  $\delta_1$  (l'angle interne correspondant à la condition  $p_e = p_{m1}$ ) et à cause des pertes mécaniques et électriques il se stabilisera à  $\delta_1$ .

Si l'angle interne maximale  $\delta_2$  dépasse la valeur critique  $\delta_3$  (valeur non retour), le couple mécanique sera plus grand que le couple électrique. La machine s'accéléra et  $\delta$  augmenta. La stabilité sera perdue.

La méthode des aires est applicable aux autres cas de perturbation pour prédire la stabilité transitoire.

## II.7 .Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un réseau d'énergie électrique pour les études de la stabilité transitoire (aux grandes perturbations), et présenté les équations mathématiques qui permettent de les modéliser. Nous avons aussi présenté un modèle d'un réseau connectée à un jeu de barre infinie , la limite de la restauration de la stabilité transitoire se traduit mathématiquement par l'égalité des aires de la zone  $A_1$  et de la zone  $A_2$  : cette condition est appelée critère d'égalité des aires:

$A_1 > A_2$  : Système instable

$A_1 < A_2$  : Système stable

Par conséquent, les contrôleurs de la stabilité transitoire peuvent améliorer la stabilité soit en diminuant la zone d'accélération (zone  $A_1$ ), soit en augmentant la zone de décélération (zone  $A_2$ ).

Cela peut être réalisé soit en augmentant la puissance électrique, soit en diminuant la puissance mécanique.

# **Chapitre III :**

## **Analyse d'un réseau électrique par méthode d'intégration numérique**

### III -1-Introduction :

L'étude de la stabilité en utilisant la méthode d'intégration numérique consiste à trouver un modèle mathématique capable de représenter le réseau et la dynamique des machines durant trois phases importantes : avant, pendant et après une perturbation quelconque. Les équations sont résolues dans le domaine temporel en se servant des méthodes d'intégration numérique.

Les méthodes les plus utilisées sont la méthode d'Euler modifiée et celle de Runge-Kutta.

### III -2-Les méthodes d'intégration numérique :

Les équations différentielles à résoudre dans l'analyse de la stabilité du système d'alimentation sont des équations différentielles ordinaires non linéaires avec des valeurs initiales connues:  $\frac{dx}{dt} = f(x,t)$

Où est le vecteur d'état de n variable dépendante, et t est la variable indépendante

comme s'il s'agissait d'une équation différentielle de premier ordre. Cela simplifie la présentation et facilite la compréhension des caractéristiques particulières de chaque (temps), notre objectif est de résoudre x en fonction de t, les valeurs initiales de x et t étant égales à  $x_0$  et  $t_0$ , respectivement.

#### III -2-1-Méthode d'Euler :

Considérons la première équation différentielle

$$\frac{dx}{dt} = f(x,t)$$

A  $x = x_0$ ,  $t = t_0$  on peut approximer la courbe représentant la vraie solution par sa tangente ayant une pente

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} = f(x_0, t_0)$$

Donc,

$$\Delta x = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta t$$



La valeur de  $x$  à  $t = t_1 = t_0 + \Delta t$  est donnée par:

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta t$$

La méthode Euler équivaut à l'utilisation des deux premiers termes de l'expansion de la série Taylor pour  $x$  autour du point  $(x_0, t_0)$ :

$$x_1 = x_0 + \Delta t (\dot{x}_0) + \frac{\Delta t^2}{2!} (\ddot{x}_0) + \frac{\Delta t^3}{3!} (\dddot{x}_0) + \dots$$

Après avoir utilisé la technique d'Euler pour déterminer  $x = x_1$  correspondant à  $t = t_1$ , on peut prendre une autre étape de temps court  $\Delta t$  et déterminer  $x_2$  correspondant à  $t_2 = t_1 + \Delta t$  comme suit:

$$x_2 = x_1 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_1} \cdot \Delta t$$

### III -2-2-Méthode d'Euler modifié :

La méthode standard d'Euler entraîne des inexactitudes car elle utilise la dérivée au début de l'intervalle comme si elle s'appliquait tout au long de l'intervalle. La méthode Euler modifiée essaie de résoudre ce problème en utilisant la moyenne des dérivées aux deux extrémités.

La méthode Euler modifiée se compose des étapes suivantes:

$$\begin{aligned} \text{A. } x_1^p &= x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta t \\ \text{B. } x_1^c &= x_0 + \frac{1}{2} \left( \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_1^p} \right) \Delta t \end{aligned}$$

À nouveau en utilisant  $x = x_1^c$ . Cette dérivée peut être utilisée pour calculer une valeur plus précise de la dérivée moyenne qui est à son tour utilisée pour appliquer de nouveau l'étape correctrice.

### III -2-3-Méthode de Runge Kutta :

Les méthodes R-K se rapprochent de la solution de la série Taylor; Cependant, contrairement à la solution formelle de la série Taylor, les méthodes R-K ne nécessitent pas d'évaluation explicite des dérivés supérieures aux premiers.

Méthode R-K de deuxième ordre

En se référant à l'équation différentielle, la formule R-K de second ordre pour la valeur de  $x$  à  $t = t_0 + \Delta t$  est

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \frac{k_1 + k_2}{2}$$

Où :

$$k_1 = f(x_0, t_0) \Delta t$$

$$k_2 = f(x_0 + k_1, t_0 + \Delta t) \Delta t$$

Une formule générale donnant la valeur de  $x$  pour la  $(n + 1)^{ST}$  étape est

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k_1 + k_2}{2}$$

Où

$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t$$

$$k_2 = f(x_n + k_1, t_n + \Delta t) \Delta t$$

Quatrième méthode de R-K:

La formule générale donnant la valeur de  $x$  pour la  $(n + 1)^{ST}$  step est

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

ou

$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t$$

L'interprétation physique de la solution ci-dessus est la suivante:

$K1 =$  (pente au début de l'étape temporelle)  $\Delta t$

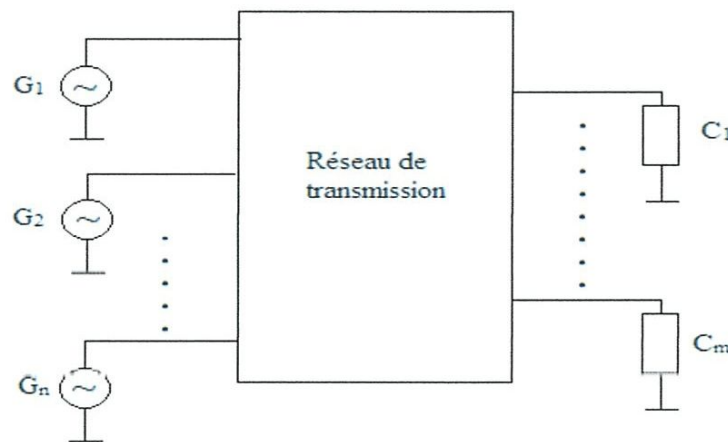
$K2 =$  (première approximation de la pente à midstep)  $\Delta t$

$K3 =$  (deuxième approximation de la pente à midstep)  $\Delta t$

$K4 =$  (pente à la fin de l'étape)  $\Delta t$

$\Delta x = 1/6 (K1 + 2 K2 + 2 K3 + K4)$

### III -2-Réseau à plusieurs machines :



**Figure III.1 Représentation d'un système électrique multi-machine**

L'établissement d'un modèle généralisé du réseau de transport et des charges implique de déterminer les équations algébriques représentant les interconnexions entre les circuits des générateurs et l'ensemble des transformateurs, des lignes de transmission et des charges du système.

Le réseau électrique peut être décrit par des équations reliant les courants injectés aux nœuds et les tensions aux bornes à travers la matrice d'admittance du réseau sous la forme matricielle suivante :

$$\bar{I} = \bar{Y} \bar{E}$$

Où  $\bar{Y}$  comprend les éléments de la diagonal  $\bar{Y}_{ii}$  et les éléments de  $\bar{Y}_{ij}$



### III -3-la matrice admittance et la puissance électrique :

#### III -3-1-La matrice admittance :

Pour étudier la stabilité d'un système électrique on doit préparer les données de ce dernier en les étapes suivantes :

1-Toutes les données du système sont converties a une base commune, une puissance de base de 1000 MVA et fréquemment utilisée.

2-Les charges sont converties en impédances ou admittances équivalentes cela se fait au moyen de la formule suivante :

$$Y_{ch} = G_{ch} + jB_{ch}$$

$$Y_{ch} = \frac{P_{ch}}{U_{ch}^2} - j \left( \frac{Q_{ch}}{U_{ch}^2} \right)$$

3-La matrice admittance Y pour chaque condition du réseau est calculée en l'étape suivant :

a-L'impédance équivalente des charges sont connectée entre les nœuds de charge et les nœuds de référence.

b-Toutes les impédances sont converties en admittance pour les éléments hors la diagonale :

$$Y_{ij} = \frac{-1}{Z_{ij}}$$

$Z_{ij}$  : est l'impédance entre les nœuds i et j.

Pour les éléments de la diagonal :

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}} Y_{i,j}$$

$$\begin{cases} Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \\ Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \end{cases}$$

La taille du réseau électrique peut être réduite, en effet on peut éliminer tous les nœuds où il n'y a pas d'injection de courant sauf les nœuds internes des générateurs par la méthode de Kron.

L'équation s'écrit alors comme

$$\begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nm} \\ Y_{mn} & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ V_m \end{bmatrix}$$

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$$

n : indice des nœuds internes des générateurs.

m : indice des nœuds restants.

Le développement de l'équation donne :

$$Y_{nn} V_n + Y_{nm} V_m = I_n$$

$$Y_{mn} V_n + Y_{mm} V_m = 0$$

$$V_m = -Y_{mm}^{-1} Y_{mn} V_n$$

$$Y_{nn} V_n - Y_{nm} Y_{mm}^{-1} Y_{mn} V_n = I_n$$

$$V_n (Y_{nn} - Y_{nm} Y_{mm}^{-1} Y_{mn}) = I_n$$

$$V_n Y_r = I_n$$

$$Y_r = Y_{nn} - Y_{nm} Y_{mm}^{-1} Y_{mn}$$

$$\text{Et : } Y_{mn} = Y_{nm}^t$$

$$\text{Donc : } Y_r = Y_{nn} - Y_{nm} Y_{mm}^{-1} Y_{nm}^t$$

$Y_r$  : est la matrice d'admittance réduite du réseau électrique de dimension (n x n) où n est le nombre des générateurs du réseau

### III -3-2-La puissance électrique :

La puissance électrique au nœud i du réseau électrique qui est la puissance fournie par la machine i est donnée par :

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

$$i=1, 2, 3, \dots, n$$

Où :  $\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle -\theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  = l'admittance entre les nœuds i et j

$$\bar{Y}_{ii} = Y_{ii} \angle -\theta_{ii} = G_{ii} + jB_{ii}$$
 = l'admittance du nœud i

Les équations du mouvement sont alors données par :

$$\frac{2H_i}{\omega_m} \frac{d\omega_i}{dt} + D_i \omega_j = P_{mi} - \left[ E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \right]$$

Et :  $\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_m$

Avant le défaut à t=0 :  $P_{mi0} = P_{ei0}$  donc :

$$P_{mi0} = E_i^2 G_{ii0} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij0} \cos(\theta_{ij0} - \delta_{i0} + \delta_{j0})$$

L'indice 0 est utilisé pour indiquer les conditions avant le régime transitoire.

III -4-Schémas du réseau étudié :

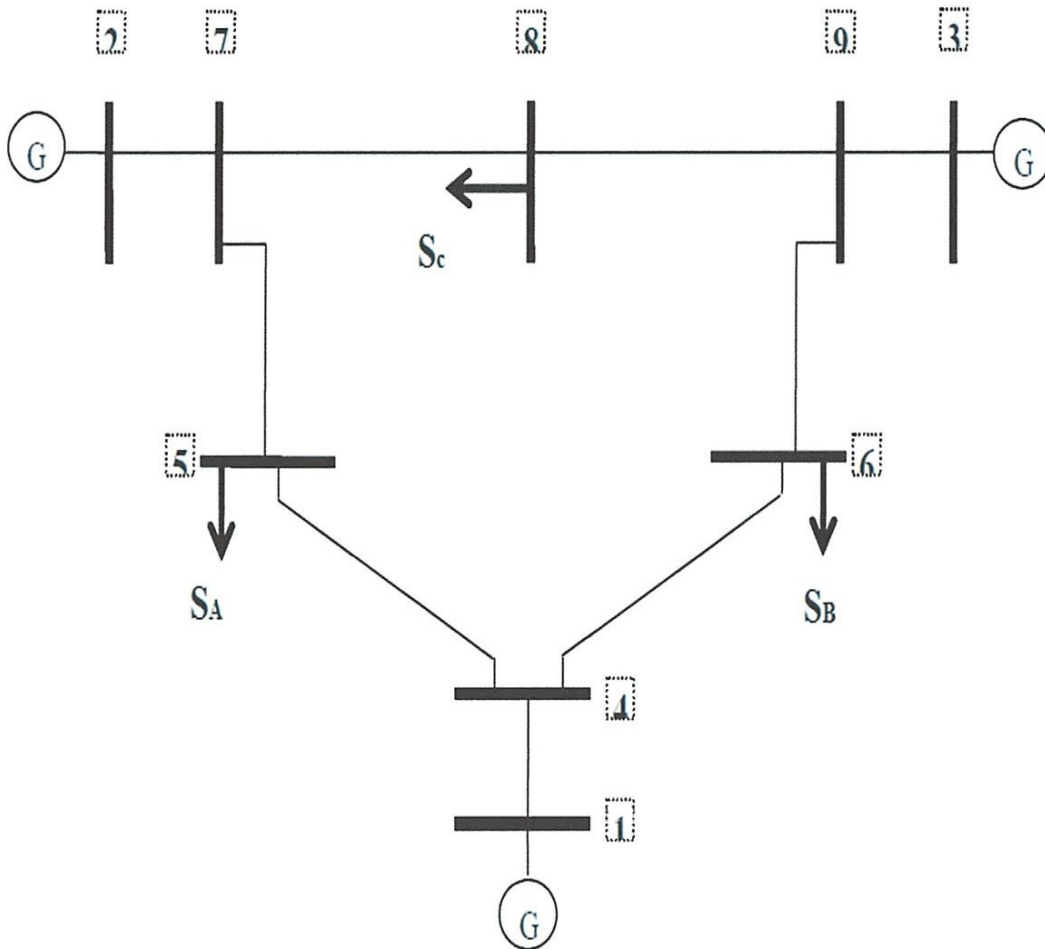


Figure III.1 schéma du réseau 3 générateurs 9 jeux de barres

Les données en unités relative de notre réseau sont :

III -4-1 : Les données de réseau :

Générateur	1	2	3
S(MVA)	247.5	192.0	128.0
KV	16.5	18	13.8
Facteur de puissance	1.0	0.85	0.85
Vitesse de rotation	180 tr/min	3600 tr/min	3600 tr/min
$X_d$	0.1460	0.8958	1.3125
$X'_d$	0.0608	0.1198	0.1813
$X_q$	0.0969	0.8645	1.2578
$X'_q$	0.0969	0.1969	0.25
$X_l$	0.0336	0.0521	0.0742
$X'_{d0}$	8.96	6	5.89
$X'_{q0}$	0	0.0535	0.600
Energie	2364 MW.s	640 MW.s	301 MW.s
H	23.64	6.4	3.01
R	0	0	0



liaisons		<u>Impédance</u>		<u>Admittance</u>	
		R	X	G	B
<b>Générateurs</b>					
1					
2	1-4	0	0.1184	0	-8.4459
3	2-7	0	0.1823	0	-5.4855
	3-9	0	0.2399	0	-4.1684
<b>Lignes de transmission</b>	4-5	0.0100	0.0850	1.3652	-11.6041
	4-6	0.0170	0.0920	1.9422	-10.5107
	5-7	0.0320	0.1610	1.1876	-5.9751
	6-9	0.0390	0.1700	1.2820	-5.5882
	7-8	0.0085	0.0720	1.6171	-13.6980
	8-9	0.0119	0.1008	1.1551	-9.7843
Charge A	5-0			1.2610	0.2634
Charge B	6-0			0.8777	0.0346
Charge C	8-0			0.9690	0.1601
	4-0				0.1670
	7-0				0.2275
	9-0				0.2835

Les angles internes et les tensions des générateurs :

$$E_1 \angle \delta_{10} = 1.0566 \angle 2.22717^\circ$$

$$E_2 \angle \delta_{20} = 1.0502 \angle 19.7315^\circ$$

$$E_3 \angle \delta_{30} = 1.0170 \angle 13.1752^\circ$$

Les transformateurs :

$$X_t(1) = 0.0576$$

$$X_t(2) = 0.0625$$

$$X_t(3) = 0.0586$$

**III- 5 : Calcule de la matrice admittance:**

**III- 5 -1: Calcule de la matrice admittance avant défaut :**

On a  $Y_{ij} = Y_{ji}$

Donc la matrice admittance Y avant défaut est écrit comme suit :

-j8.4459	0	0	J8.4459	0	0	0	0	0
0	-j5.4855	0	0	0	0	J5.44855	0	0
0	0	-j4.1684	0	0	0	0	0	J4.1684
J8.4459	0	0	3.3074- j30.3937	-1.3652 +j11.6041	-1.9422 +j10.5107	-1.9422 +j10.5107	0	0
0	0	0	-1.3652 +j11.6041	3.1838- j17.8426	0	-1.1876 +j5.9754	0	0
0	0	0	-1.9422 +j10.5107	0	4.1019- j16.1335	0	0	-1.2820 +j5.5882
0	J5.4855	0	0	-1.1876 +j5.9751	0	2.8047 – j24.9311	-1.6171 +j13.6980	0
0	0	0	0	0	0	-1.6171 +j13.6980	3.7412- j23.9424	-1.1551 +j9.7843
0	0	J4.1684	0	0	-1.2820 +j5.5882	0	-1.1551+ J9.7843	2.4371- j19.2574

On applique la méthode de kran et on obtient la matrice réduite avant défaut comme suit :

$$Y_{\text{ravd}} = \begin{bmatrix} 0.846 - j2.988 & 0.287 + j1.513 & 0.210 + j1.226 \\ 0.287 + j1.513 & 0.420 - j2.724 & 0.213 + j1.088 \\ 0.210 + j1.226 & 0.213 + j1.088 & 0.277 - j2.368 \end{bmatrix}$$

### III -5-2 : Calcule de la matrice admittance durant le défaut :

Le défaut est un court circuit au nœud 7 et la conséquence de ce défaut pour les calculs des matrices admittance c'est que la ligne et la colonne N°7 annuler

Donc la matrice durant défaut sera :

- j8.4459	0	0	J8.4459	0	0	0	0	0
0	- j5.4855	0	0	0	0	0	0	0
0	0	- j4.1684	0	0	0	0	0	J4.1684
J8.4459	0	0	3.3074- j30.3937	-1.3652 +j11.6041	-1.9422 +j10.5107	0	0	0
0	0	0	-1.3652 +j11.6041	3.1838- j17.8426	0	0	0	0
0	0	0	-1.9422 +j10.5107	0	4.1019- j16.1335	0	0	-1.2820 +j5.5882
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	3.7412- j23.9424	-1.1551 +j9.7843
0	0	J4.1684	0	0	-1.2820 +j5.5882	0	-1.1551+ J9.7843	2.4371- j19.2574

La matrice réduite durant défaut est :

$$Y_{rdurd} = \begin{bmatrix} 0.657 - j3.816 & 0.000 + j0.000 & 0.070 + j0.631 \\ 0.000 + j0.000 & 0.000 - 5.486 & 0.000 + j0.000 \\ 0.070 + j0.631 & 0.000 + j0.000 & 0.174 - j2.796 \end{bmatrix}$$

### III -5-3 : Calcul de la matrice admittance après défaut :

Les appareils de protection débranchent la ligne (5-7).

Matrice admittance après défaut est :

-j8.4459	0	0	J8.4459	0	0	0	0	0
0	-j5.4855	0	0	0	0	J5.44855	0	0
0	0	-j4.1684	0	0	0	0	0	J4.1684
J8.4459	0	0	3.3074- j30.3937	-1.3652 +J11.6041	-1.9422 +j10.5107	0	0	0
0	0	0	-1.3652 +j11.6041	2.6262- J11.8675	0	0	0	0
0	0	0	-1.9422 +j10.5107	0	4.1019- j16.1335	0	0	-1.2820 +j5.5882
0	0	0	0	0	0	1.6171- J8.9559	0	0
0	0	0	0	0	0	-1.6171 +j13.6980	3.7412- j23.9424	-1.1551 +j9.7843
0	0	J4.1684	0	0	-1.2820 +j5.5882	0	-1.1551+ J9.7843	2.4371- j19.2574

Donc la matrice réduite après défaut est :



### III -6: Application des méthodes d'intégration numériques :

On fait un programme sur Matlab qui nous permet de calculer les puissances mécanique et électrique de chaque générateur et tracer les allures de la variation de la puissance électrique  $P_e(t)$  et aussi le calcul des valeurs final de  $\delta_i$  et  $\omega_i$  pour chaque intervalle  $\Delta t = 0.02$  et au cours d'une période de trois second et tracer les allures de ces variation utilisant la méthode d'Euler qui permet de résoudre les équations différentielle en utilisant la matrice admittance réduite, et on varie a chaque fois le temps d'élimination de défaut  $t_c$  et on remarque.

L'application de la méthode d'Euler aux équations différentielles donne :

$$\frac{d\omega_i(t)}{dt} = \frac{f\pi}{H_i} (P_{mi} - P_{ei})$$

$$\omega_i(t + 1) = \omega_i(t) + \frac{d\omega_i(t)}{dt} \cdot \Delta t$$

$$\frac{d\delta_i(t)}{dt} = \omega_i(t + 1) - \omega_0$$

$$\delta_i(t + 1) = \delta_i(t) + \frac{d\delta_i(t)}{dt} \cdot \Delta t$$

**Note :** pour les figures qui représente l'angle delta et la puissance électrique et la vitesse  $\omega$  :

— générateur 1  
 — générateur 2  
 — générateur 3

Pour les figures qui représente l'angle différentiel deltadiff :

— delta 2-delta1  
 — delta 3-delta1

Pour  $t_c=0.1$  :



figure III-2 representation de la puissance électrique

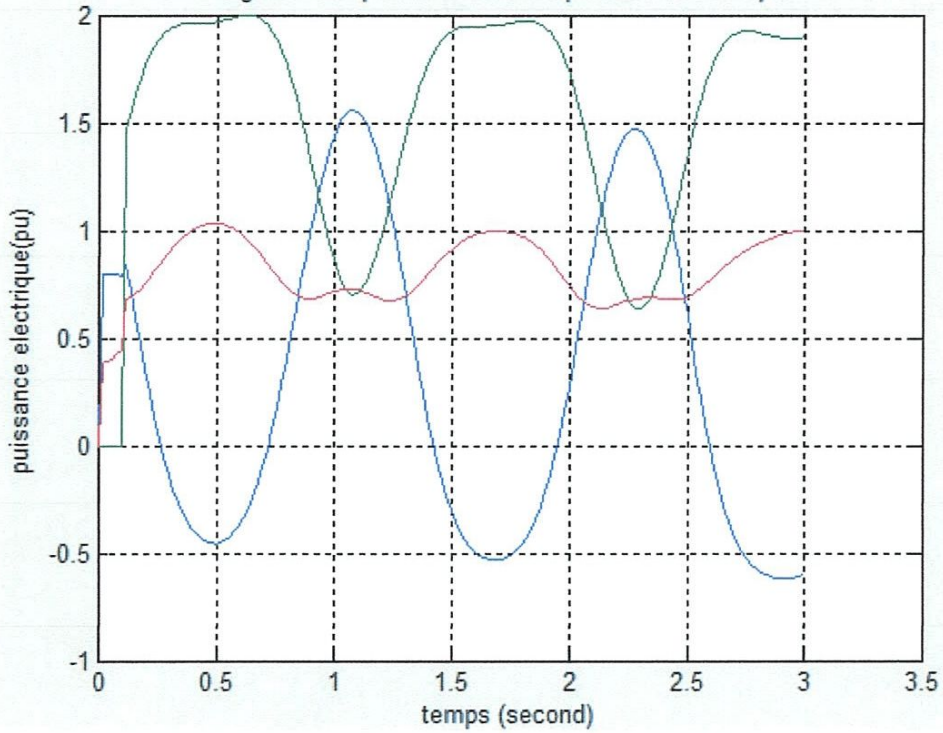


figure III-3 representation de l'angle delta

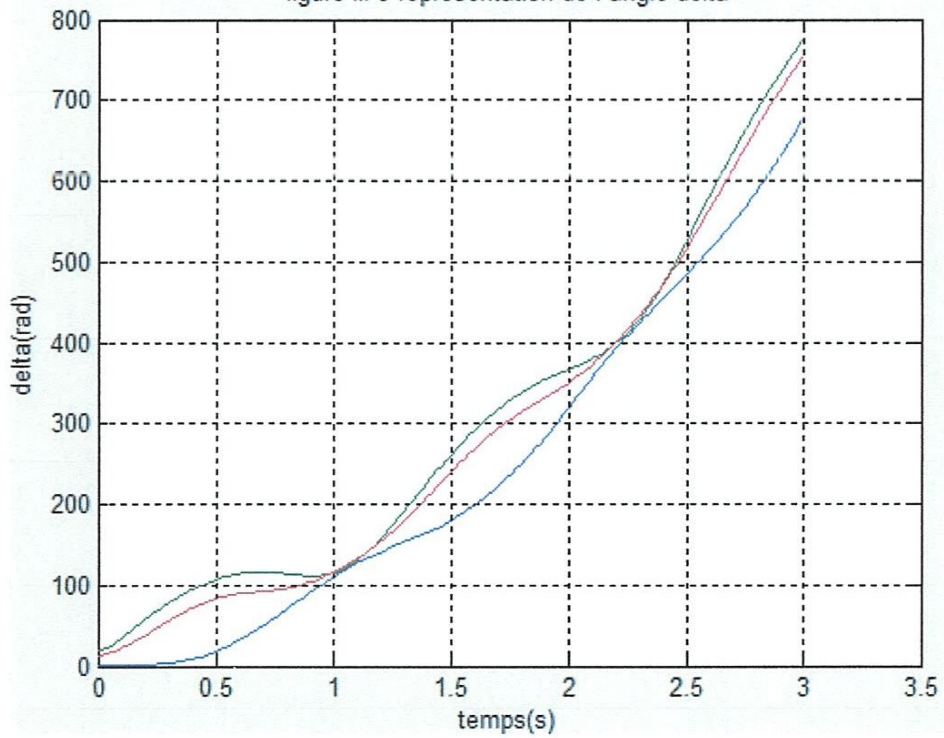


figure III-3 representation de la vitesse  $w$

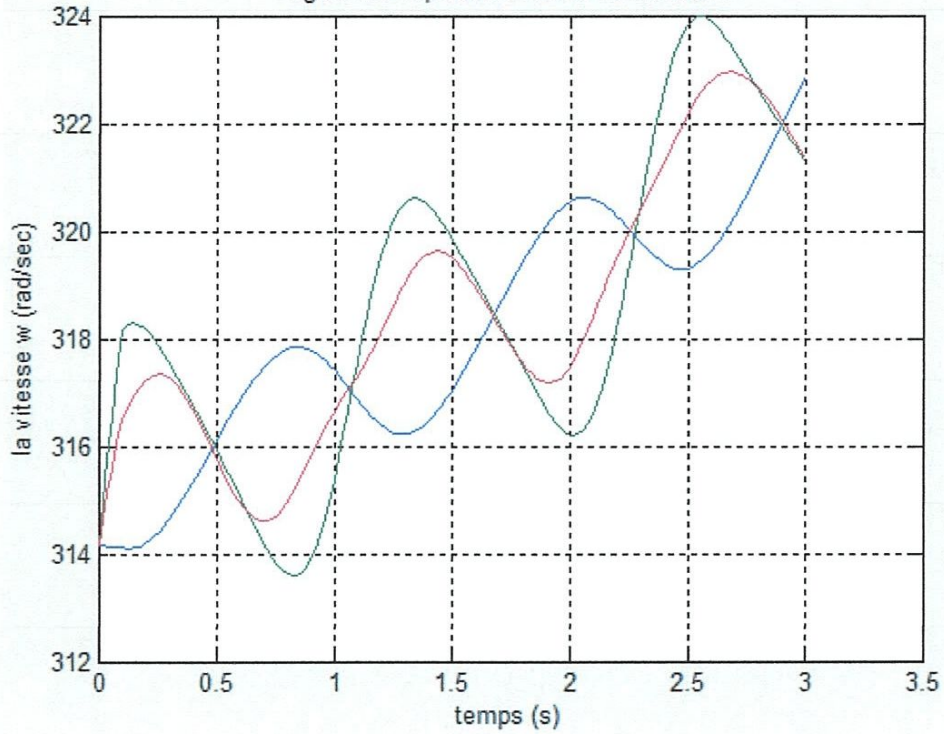
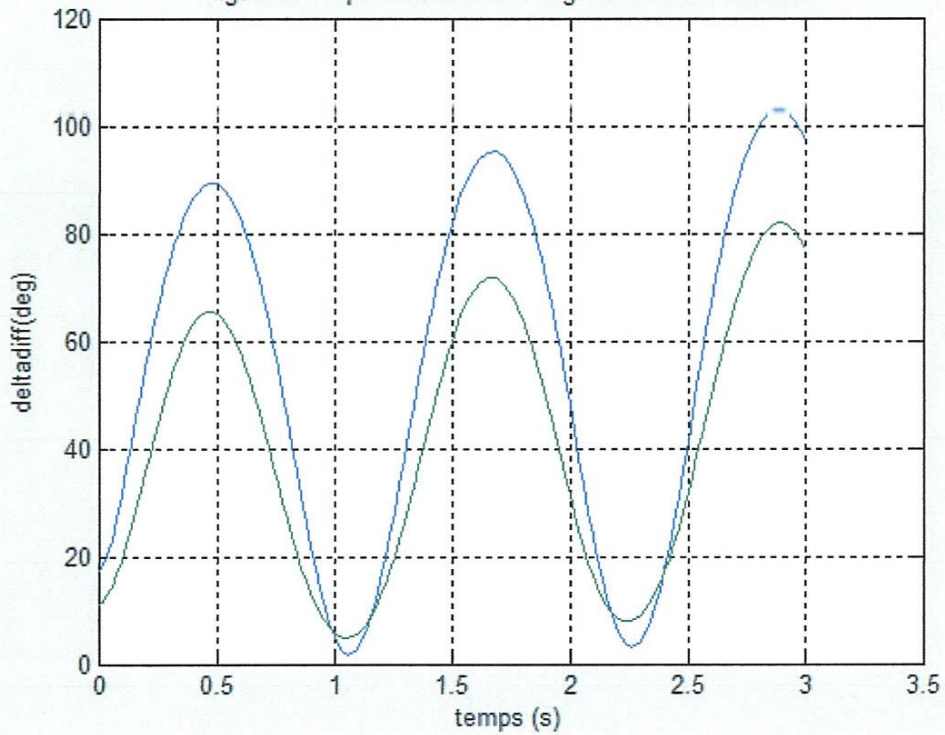


figure III-4 representation de l'angle différentiel  $\Delta\omega$



Pour  $t_c=0.15$  :

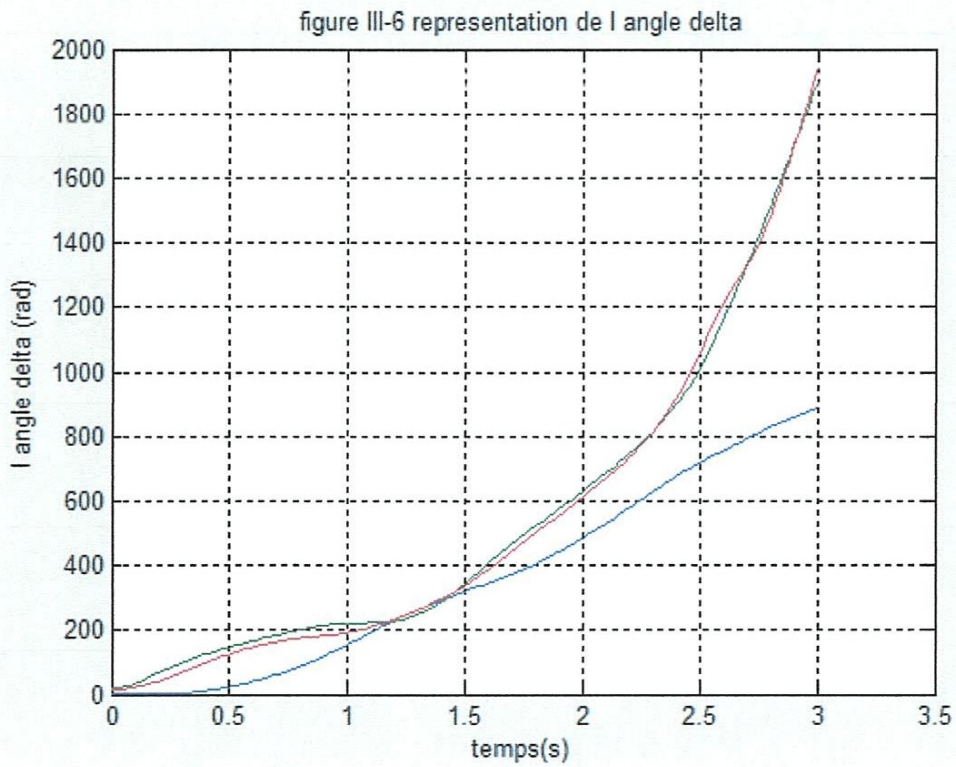
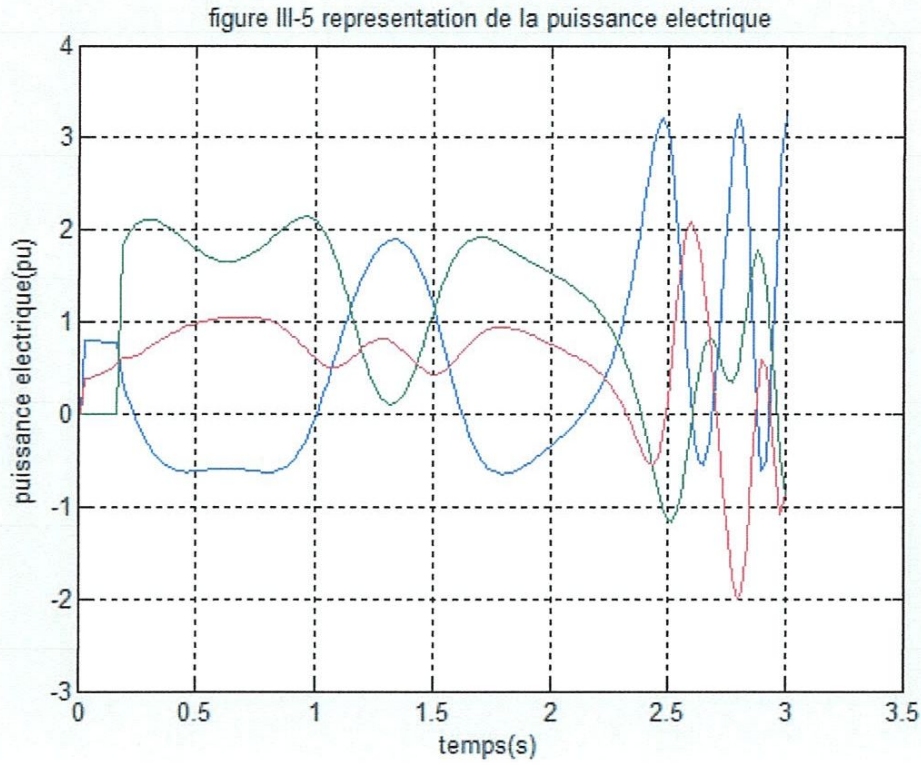




figure III-7 representation de la vitesse  $w$

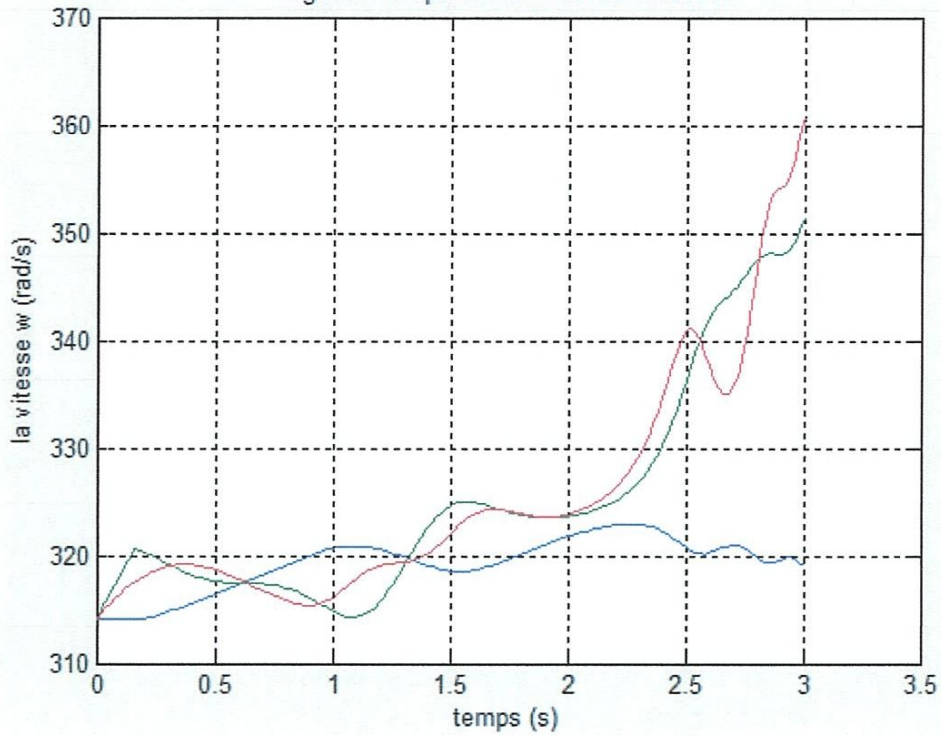
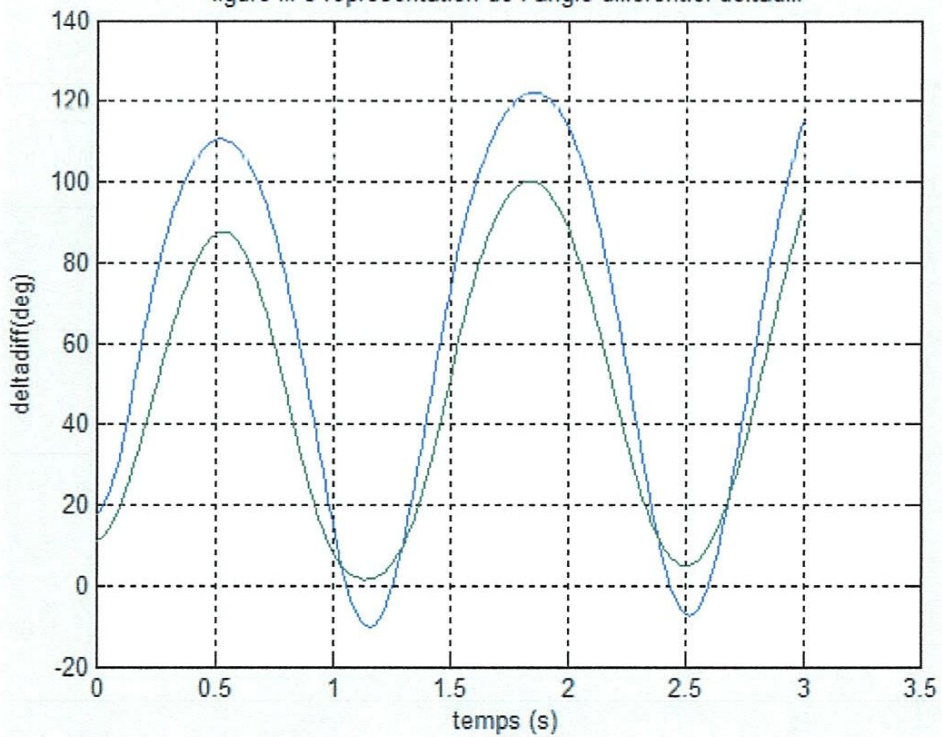


figure III-8 representation de l'angle différentiel  $\text{deltadiff}$



Pour  $t_c=0.17$  :

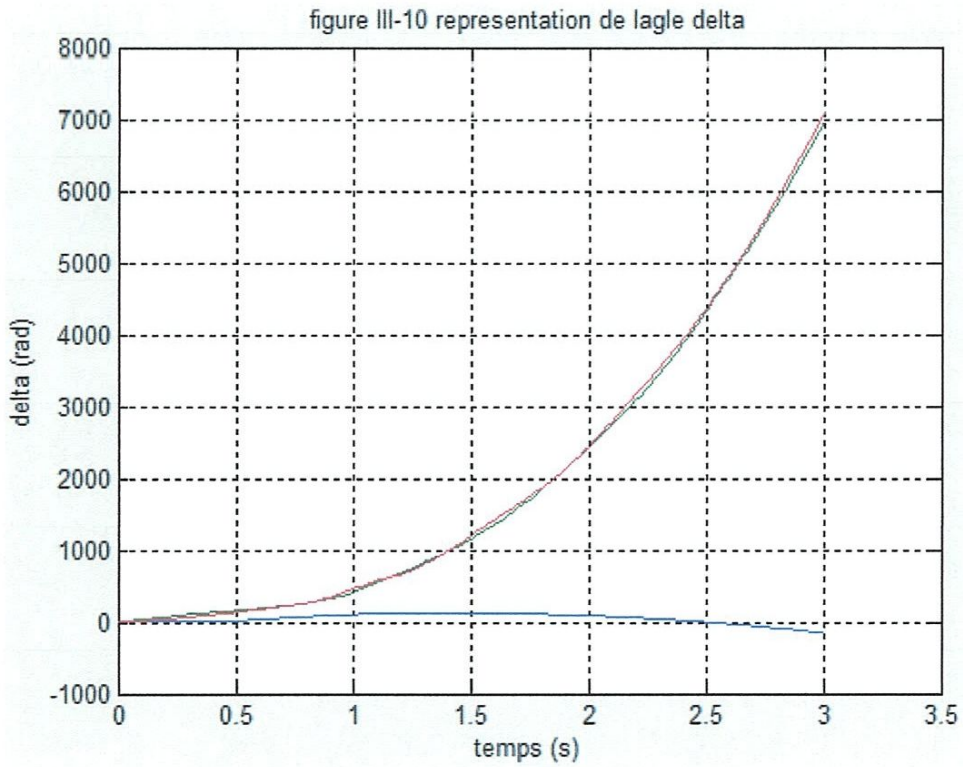
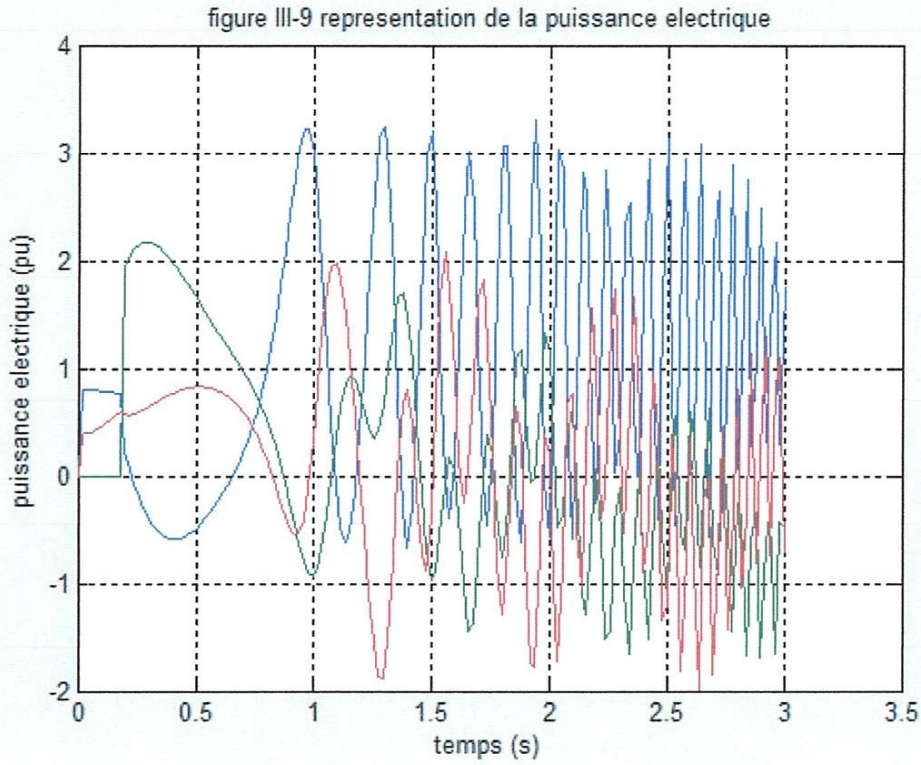




figure III-11 representation de la vitesse  $w$

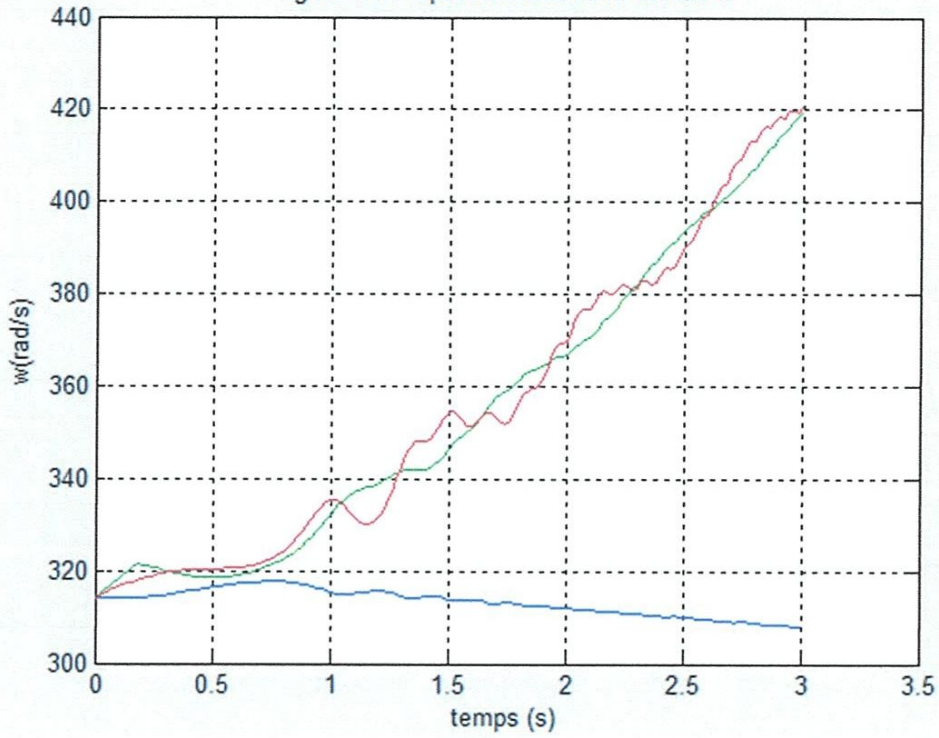
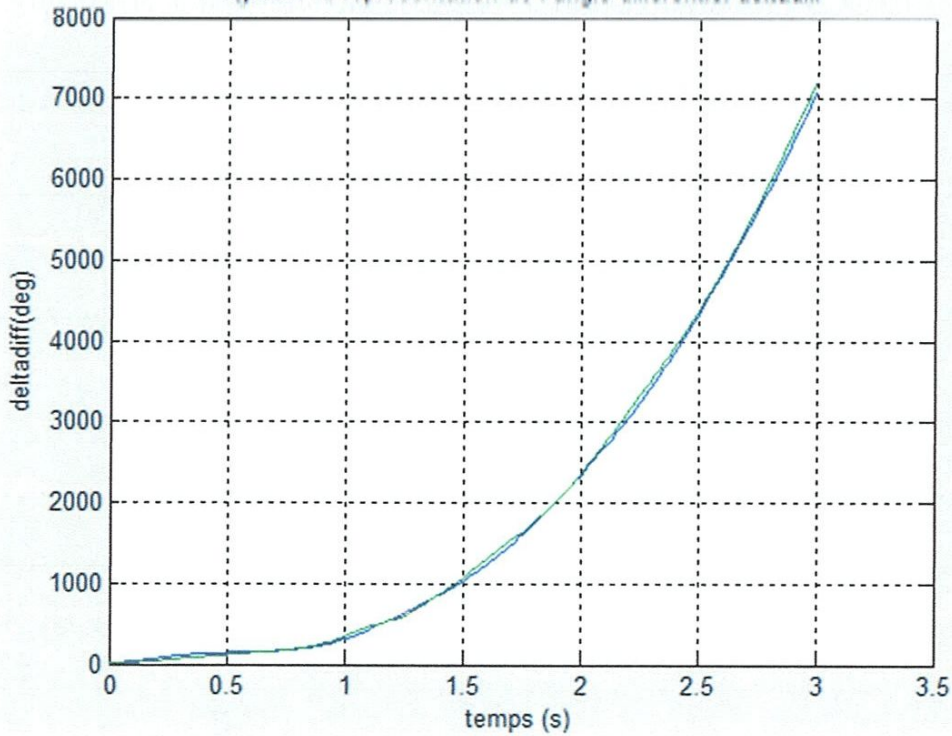


figure III-12 representation de l'angle différentiel  $\delta_{\text{diff}}$



L'évaluation de la stabilité transitoire nécessite plusieurs exécutions de programme pour différents temps de défaut.

Dans ce cas les résultats obtenus montrent que le système de puissance retrouve son fonctionnement stable après un court-circuit momentanée toucher la ligne 5-7.

Nous remarquons, tout d'abord, que le défaut est illuminé après 0.17s de son apparition, ce qui diminue le risque de la perturbation sur la dynamique de groupe de génération, et fait aider le réseau à revenir à un fonctionnement stable.

-d'après les courbes de simulation des angles différentiel on peut remarquer que si la différence des angles  $\delta_{ij}$  ne dépasse pas  $180^\circ$  le système est stable.

Ceci est d'autant plus important que dans ce cas d'élimination de défaut par l'ouverture de la ligne liant les nœuds 5 et 7, la protection ne produit pas l'isolation d'un des groupes de génération.

### III -7 : Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté un exemple d'un réseau électrique de 3 générateurs 9 jeux de barres et son données ,on a utilisé la méthode de kan pour éliminer tout les jeux de barre sauf celle avec le générateur et on calcule les matrices réduite dans les trois phases avant ,durant et après le défaut et après avoir rappelé les différents méthode d'intégration numérique nous avons proposé un algorithme basé sur la méthode d'Euler , nous avons élaboré également un programme sous l'environnement MATLAB qui permet l'évaluation et l'analyse de la stabilité transitoire de notre réseau .

réduite dans les trois phases avant ,durant et après le défaut et après avoir rappelé les différents méthode d'intégration numérique nous avons proposé un algorithme basé sur la méthode d'Euler , nous avons élaboré également un programme sous l'environnement MATLAB qui permet l'évaluation et l'analyse de la stabilité transitoire de notre réseau .

# Conclusion Générale

L'étude de la stabilité fait partie des études qui permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux.

Quand une perturbation qui a causé momentanément un changement de vitesse des machines a été éliminée, les machines (générateurs) du système de puissance doivent à nouveau retrouver la vitesse de synchronisme. Si une machine ne retrouve pas le synchronisme avec les autres machines du système, de forts courants de circulation vont apparaître et dans un système bien dimensionné, des relais et des disjoncteurs doivent découpler la machine du système.

On peut discuter la stabilité d'un système, si toutes les différences des angles internes atteignent une valeur puis diminuent : on dit que le système est stable mais si l'une des différences augmente (croît infiniment) le système est instable à cause de la perte du synchronisme d'une machine.

Les études de stabilité transitoire s'occupent des grandes perturbations. Ces perturbations peuvent être d'origines diverses : pertes de groupes, de lignes, branchement, débranchement de charges, défaut shunt (court-circuit), franc ou via une impédance de défaut .... Dans notre programme le défaut est considéré comme un court-circuit franc lié à la terre : c'est le plus sévère des défauts qui menacent le système électrique.

Ces grandes perturbations ne permettent pas la linéarisation des équations autour d'un point de fonctionnement comme c'est le cas pour les études de stabilité statique et dynamique. Il faut donc recourir à des méthodes directes ou itératives pour la résolution de ces équations différentielles.

Les études de stabilité transitoire permettent de connaître l'évolution des grandeurs critiques d'un réseau électrique pendant et après la perturbation. Le programme de stabilité transitoire doit donc évaluer spécialement l'évolution des vitesses et des angles internes des machines du réseau. D'autres paramètres peuvent aussi être évalués comme les couples électriques, les tensions aux nœuds, etc.



# **BIBLIOGRAPHIE**

1. GEL-4150 RESEAUX ELECTRIQUES, Hoang le-Huy 2009.
2. Power System Control and Stability, P.M.ANDERSON, A.A.FOUAD.
3. Cahier de cours du module –Modélisation des systèmes d'énergie électrique, M.GOUAIDIA SAID.
4. P. Kundur; Power system stability and control, New York: McGraw-Hill, 1994.
5. J. D., Glover, M. S. Sarma et T. Overbye, Power system analysis and design, Thomson, 2008
6. J. Machowski, J.W. Bialek et J.R. Bumby, Power system dynamics: stability and control; 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2008
7. cahier de cours de module régime transitoire –M BOUDFEL.
- 8-"Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité Transitoire des réseaux électriques", Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2003. E G SHAHRAKI
9. Mémoire Analyse de la stabilité d'un réseau électrique 2012, université 8 mai 1945 Guelma .
10. Mémoire Magister – Programmation en MATLAB de la Stabilité Transitoire d'une Modélisation Interactive d'un Réseau Electrique par Intégration Numérique, SLIANE RAMDANE, Université laghouat, Algérie
- 11-Logiciel-MATLAB 2009.