

17/621.747

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



**Domaine: Sciences et Technologie**  
**Filière: Electrotechnique**  
**Spécialité: Réseaux électriques**

**Mémoire de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

---

---

**Analyse et Amélioration de la stabilité dynamique des  
Réseaux électriques**

---

---

Présenté par : DIFALLAH ISSAM, AFAIFIA YOUSOUF

Sous la direction de : Dr. BOUDFEL AMAR.

JUIN 2012





# Remerciement

*C'est avec un grand plaisir que nous apportons ce modeste travail à tous ceux qui nous ont gratifiés de leur soutien et de leur confiance.*

*Louanges à dieu, qui nous donné vie et santé pour le parachèvement de ce modeste travail.*

*Notre remerciement à notre encadreur Dr. BOUDFEL AMAR, qui a dirigée notre travail par ces conseils bénéfiques, pour son soutient et sa patience*

*Tous les enseignants du département de Génie électrique.*

*Nos familles, qui durant nos études, nous ont toujours donné la possibilité de faire ce que nous voulions et ont toujours croie a nous.*

Issam

Youssef

## *Dédicace*

*Avant tous, je remercie le mon dieu de ma voir mis sur le bon chemin pour pouvoir réaliser ce travail.*

*AU cristal de ma vie, la lune de mes nuits, le soleil de mes jours, et la source d'amour à ma très chère mère.*

*A mon cher père qui m'a toujours aidé, et encouragé tout au long de ma vie.*

*A mes frères « Belkacem, Hichem, Hamza,lotfi ».*

*A mes amis : « Yousef, Zouhir,hichem, saber »,*

*Merci pour vous « hichem et tout les amis » pour votre soutien, aide, et compréhension.*

*A toutes les promotions de réseaux électriques.*

*A tous ceux qui m'aiment et j'aime.*

***issam***



## *Dédicace*

*Avant tous, je remercie le mon dieu de ma voir mis sur le bon chemin pour  
pouvoir réaliser ce travail.*

*AU cristal de ma vie, la lune de mes nuits, le soleil de mes jours, et la source  
d'amour à ma très chère mère.*

*A mon cher père qui m'a toujours aidé, et encouragé tout au long de ma vie.*

*A mes frères « ramzi, halim ,mostapha ».*

*A mes amis : « issam, zohir , mourad ».*

*Merci pour vous « nabile et mostapha » pour votre soutien, aide, et  
compréhension.*

*A toutes les promotions de réseaux électriques.*

*A tous ceux qui m'aiment et j'aime.*

***youcef***

# SOMMAIRE

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

## Chapitre I : Généralité sur les machines synchrones

1.1. Introduction.....	03
1.2 : Schéma équivalent d'une machine synchrone .....	05
1.3 : Caractéristique de la puissance .....	06
1.3.1 : Pour une Machine synchrone à pôles lisses.....	06
1.3.2 : Pour une Machine synchrone à pôles saillants .....	09
1.4. Conclusion.....	11

## Chapitre II : Stabilité Statique

2.1 : Introduction .....	12
2.2 : Schéma d'analyse de la stabilité statique.....	12
2.3 : Critère de la stabilité .....	15
2.4 : Puissance maximale $P_m$ pour une machine à pôles saillants .....	16
2.5 : Marge de la stabilité statique $K_{m,s}$ .....	17
2.6 : Conclusion .....	18

## Chapitre III : Stabilité dynamique

3.1 : Introduction.....	19
3.2 : Caractéristiques de puissance pour le cas de débranchement d'une ligne.	19
3.3 : Caractéristiques de puissance pour le cas d'un court-circuit.....	22
3.3.1: Types des courts-circuits .....	22
3.3.2 : Caractéristiques de puissances .....	22
3.4 Lois des surfaces (des aires).....	23
3.5 Méthodes des intervalles successifs .....	24

3.6 Conclusion .....	28
<b>Chapitre IV : Application sur un réseau de transport</b>	
4.1 Données du réseau .....	29
4.2 : caractéristiques de puissance .....	30
a. Régime normal .....	30
b- Régime d'avarie (durant le court-circuit).....	31
c- Régime après avarie .....	31
d- Détermination du temps limite de débranchement .....	32
e- Influence du temps de débranchement sur la stabilité dynamique .....	33
4.3 Amélioration de la stabilité dynamique.....	35
4.3.1 Branchement de lignes en parallèle .....	35
4.3.2 Branchement en série des batteries de condensateurs .....	36
4.4 Conclusion .....	37
CONCLUSION GENERALE.....	38
BIBLIOGRAPHIE .....	39

# INTRODUCTION GENERALE

Le réseau électrique est une infrastructure vitale et stratégique pour nos sociétés modernes. Aujourd'hui, la perte du réseau est une véritable catastrophe quand cela arrive, tant nous dépendons de l'énergie électrique. Pourtant, c'est un système très énergétique qui doit constamment préserver un équilibre fragile entre la production et la consommation, du fait que l'électricité ne se stocke pas en grande quantité. Or, le réseau est un système complexe de grande dimension et multicouches qui est sujet en permanence à des perturbations diverses, ce qui rend son comportement chaotique et difficile à maîtriser. [1]

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation du coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences. [2]

Ce travail s'articule autour de la stabilité dynamique et de son amélioration. Divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous étudierons des généralités sur la machine synchrone, la caractéristique de puissance à partir de type de la machine synchrone (pôles lisses. pole saillants).

Dans le deuxième chapitre nous étudierons le premier type de la stabilité A savoir la stabilité statique.

Dans le troisième chapitre nous étudierons le deuxième type de la stabilité  
Qui est la stabilité dynamique.

Dans le dernier chapitre on a fait une application sur un réseau HT de  
transport et on a présenté les moyens d'améliorations de la stabilité dynamique.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.



# CHAPITRE I

## GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES SYNCHRONES

### 1.1 Introduction :

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas.

Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales.

Les stators, Notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone (voir ci-contre).

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique.

Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors.[6]

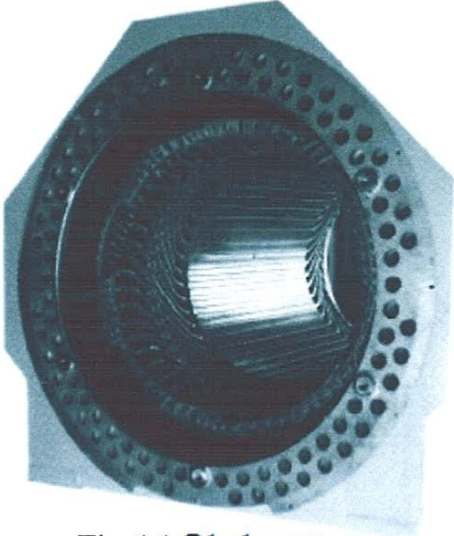


Fig. 1.1 Stator [6]

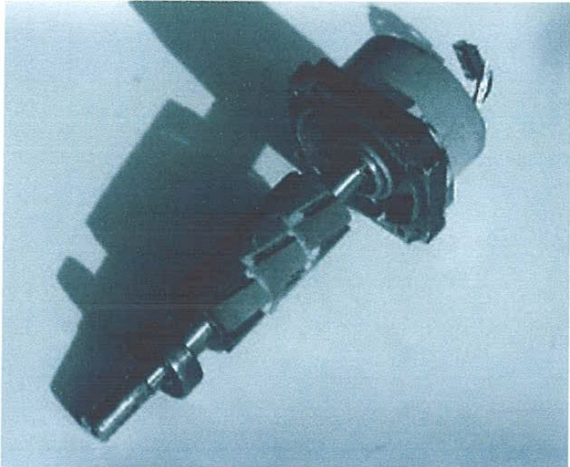


Fig. 1.2 Rotor à aimants [6]

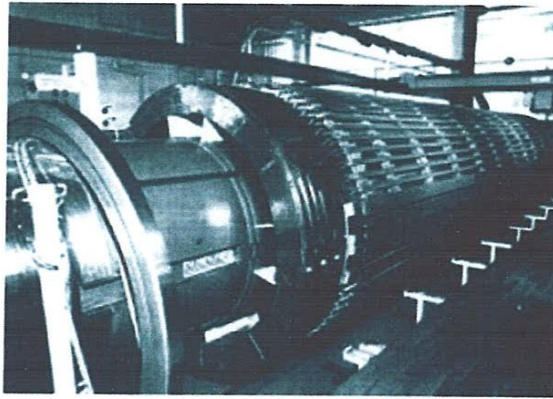


Fig. 1.3 Rotor à pôles lisses [6]

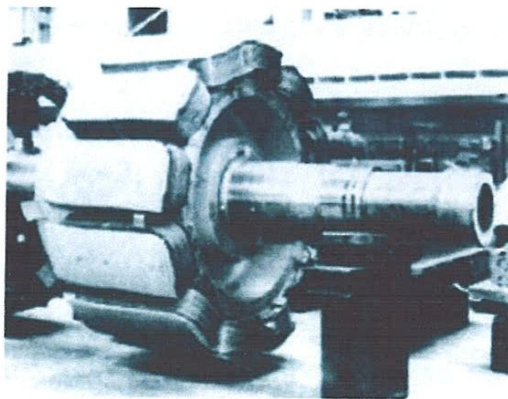


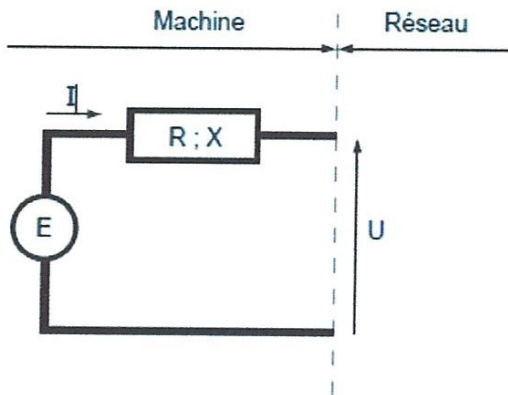
Fig. 1.4 Rotor à pôles saillants [6]

### 1.2 Schéma équivalent d'une machine synchrone :

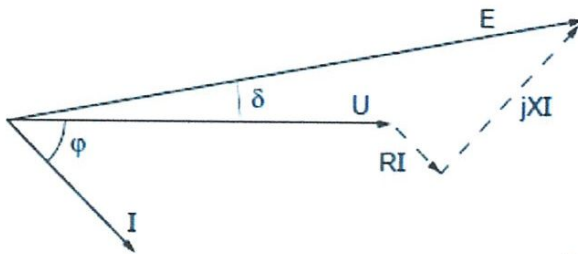
D'une manière générale les génératrices et les moteurs synchrones sont représentés dans le schéma de calcul par une f.e.m.:[8]



## a - Schéma d'une machine synchrone



## b - Diagramme vectoriel correspondant à la machine ci-dessus



[5]

Fig. 1.5 : représentation d'une machine synchrone.

## 1.3 Caractéristique de la puissance :

### 1.3.1 Pour une machine synchrone à pôles lisses :

Considérons le réseau de transport (Fig. 1.6) constitué par une centrale débitait sur deux lignes en parallèle à travers un transformateur T1.

Le réseau est interconnecté par l'intermédiaire d'un transformateur T2 à un système électro-énergétique de puissance infinie. Dans ce cas la tension aux bornes de ce système est constante.

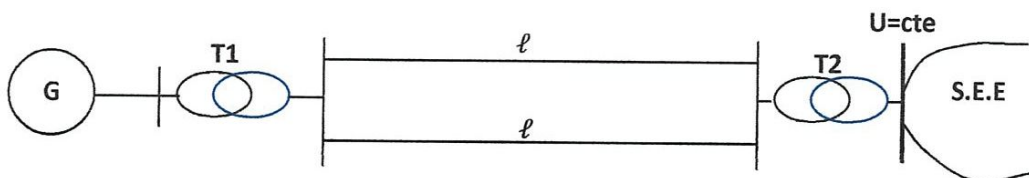


Fig. 1.6 Exemple d'un réseau de transport



## Chapitre I : Généralités sur les machines synchrones

Les paramètres du système permettant d'établir le schéma équivalent correspondant (Fig. 1.7) où  $x_s$  est la réactance sommaire du système considéré pour lequel on considère que  $r_s \ll x_s$ .

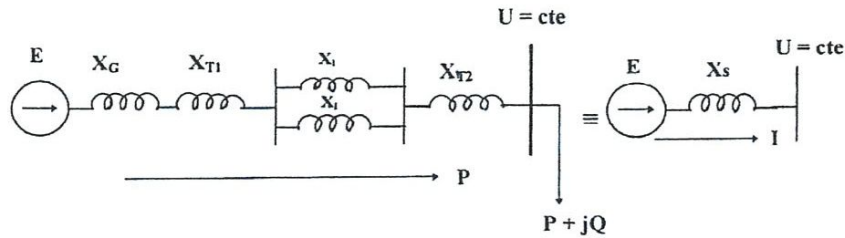


Fig. 1.7 Schéma équivalent du réseau

Dans ce cas-là on peut établir le diagramme vectoriel suivant (Fig. 1.8).

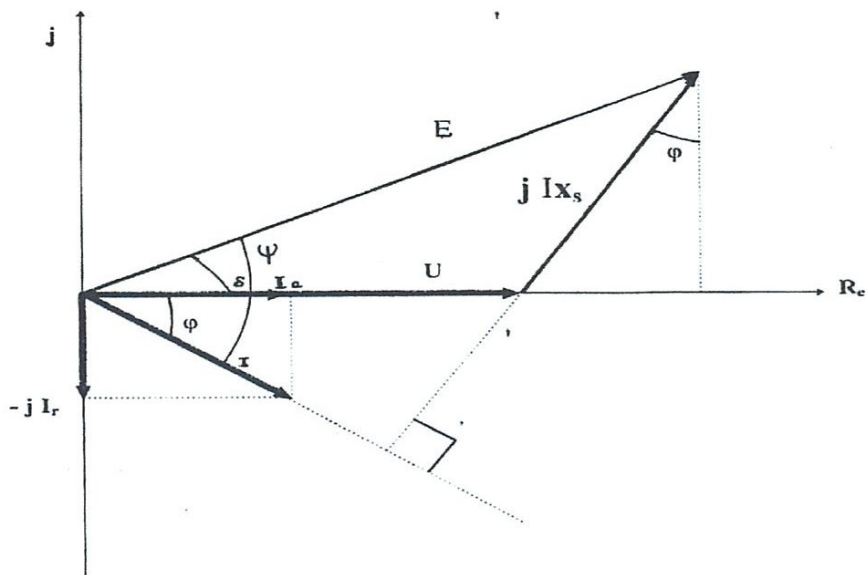


Fig. 1.8 Diagramme vectoriel du réseau

## Chapitre I : Généralités sur les machines synchrones

La puissance active  $P$  donnée par le système étudié sera définie comme suit:

$$P = U \hat{I}_a$$

$$\text{D'autre part } \hat{I} = (I_a - jI_r)$$

$$\text{Et du diagramme vectoriel on a : } j I x_s = j (I_a - jI_r) x_s = I_r x_s + j I_a x_s$$

Où  $I_a x_s$  : projection du vecteur  $j x_s$  sur l'axe imaginaire qui est égale à la projection du vecteur  $E$ ,

$$\text{Donc : } I_a x_s = E \sin \delta \Rightarrow I_a = (E / x_s) \sin \delta$$

Ainsi nous aurons :

$$P = U I_a = (E \cdot U / x_s) \sin \delta$$

La caractéristique  $P = f(\delta)$  est dite caractéristique angulaire ou caractéristique de puissance (Fig. 1.9).

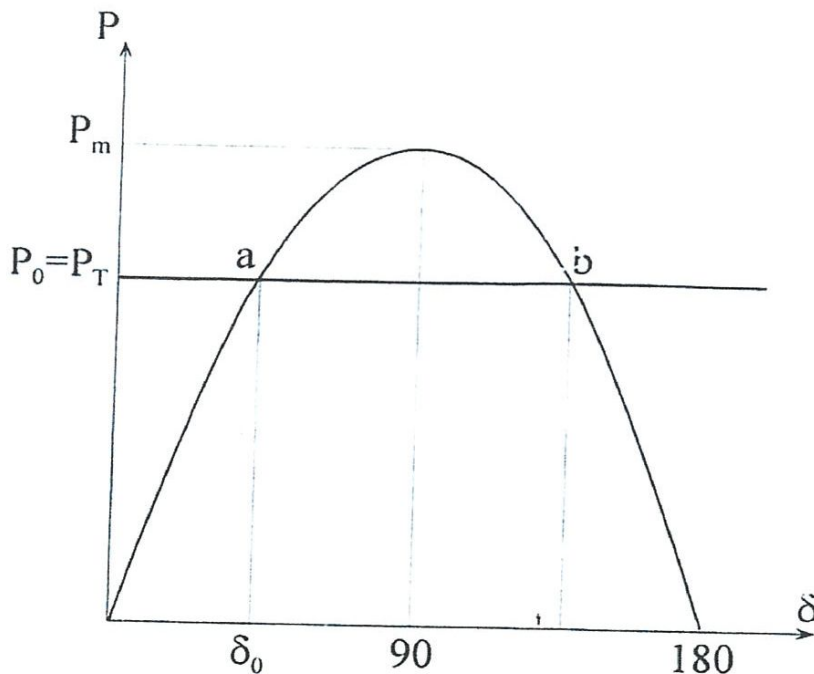


Fig. 1.9 Caractéristique de puissance pour une machine à pôles lisses.

## Chapitre I : Généralités sur les machines synchrones

---

Pour pouvoir étudier la stabilité d'une machine synchrone nous devons connaître sa caractéristique angulaire. Pour cela pour les machines synchrones à pôles lisses, la réactance du générateur dans l'axe longitudinale ( $x_d$ ) est transversale ( $x_q$ ) sont pratiquement les mêmes et la puissance est exprimée comme suit :

$$P = [E.U / X_{d\Sigma}] \sin \delta$$

### 1.3.2 .Pour une Machine synchrone à pôles saillants :

Dans une machine à pôles saillants l'entrefer sous les pôles est différent à celui entre les pôles, ce qui fera la différence entre la réactance longitudinale  $x_d$  et la réactance transversale  $x_q$  ( $x_d > x_q$ ), et la puissance active  $P$  délivrée par la machine à pôles saillants sera :

$$P = UI \cos \varphi$$

Ou bien en développant, avec  $\varphi = \Psi - \delta$ ,  $P = UI \cos \Psi \cos \delta + UI \sin \Psi \sin \delta$

Du diagramme vectoriel, on peut obtenir :

$$I \cos \Psi = I_q$$

$$I \sin \Psi = I_d$$

$$E_q = U_s \cos \delta + I_d x_{d\Sigma}$$

Des deux dernières expressions on peut exprimer :

$$I_d = [E_q - (U_s \cos \delta)] / x_{d\Sigma}$$

$$I_q = (U_s \sin \delta) / x_{q\Sigma}$$

Ce qui Donne:

$$I \sin \Psi = [E_q - (U_s \cos \delta)] / X_{d\Sigma}$$

$$I \sin \Psi = (U_s \sin \delta) / X_{d\Sigma}$$

On peut écrire alors :

$$P = \frac{U_s E_q \sin \delta}{X_{q\Sigma}} \cos \delta + U_s \frac{E_q - U_s \cos \delta}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

$$P = \frac{U_s E_q}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \left( \frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

$$P = \frac{U_s E_q}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \left( \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

On voit que la puissance à deux composantes l'une fondamentale et l'autre harmonique (Fig. 1.10).

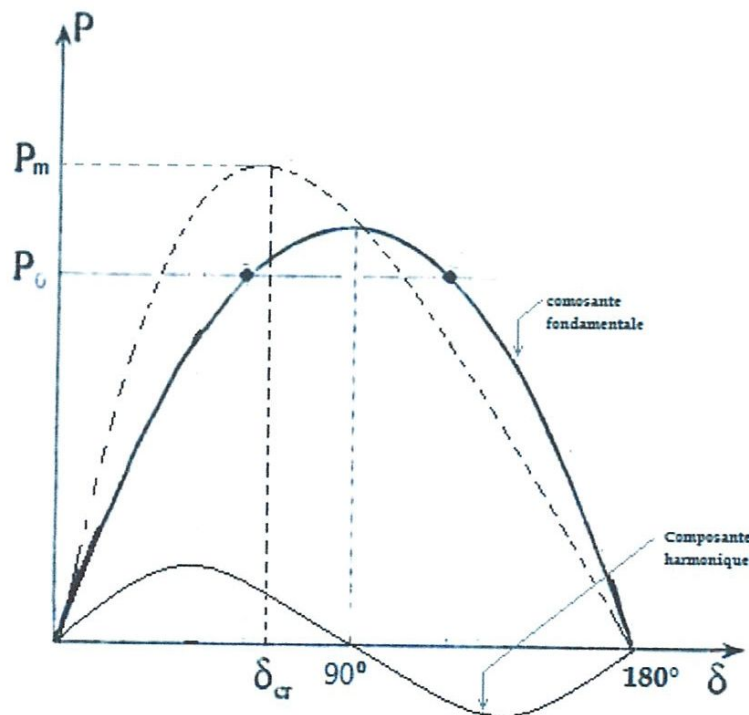


Fig. 1.10 Caractéristique de puissance pour une machine à pôles saillants.

### 1.4. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présentés la machine synchrone qui est l'élément principal de la production de l'énergie électrique dans les réseaux électriques, on a vu que la puissance délivrée par le générateur dépend essentiellement de la f.é.m  $E$  du générateur, de la tension  $U$  du système, de la réactance sommaire de liaison  $x_s$  entre la machine et le système et de l'angle de déphasage entre  $E$  et  $U$ .



# CHAPITRE II

## ANALYSE DE LA STABILITÉ STATIQUE

### 2.1 Introduction :

La stabilité statique signifie la capacité du système de rétablir, par lui-même l'état d'équilibre initial après de faibles perturbations

Les perturbations peuvent avoir des origines diverses mais leurs effets se focalisent dans la balance entre la puissance de la turbine qui est motrice et la puissance électrique du générateur (puissance requise, ou demandée par le système) qui est résistante (de freinage).

Comme perturbation infiniment petite on peut citer :

La tension du réseau pendant le régime stationnaire n'est jamais stable à cause des petites variations dues au branchement et débranchement des charges des différents récepteurs.

### 2.2 Schéma d'analyse de la stabilité statique :

Considérons le régime de fonctionnement correspondant au point «a» (Fig. 2.1) de la caractéristique de puissance  $P=f(\delta)$

Ce régime est caractérisé par l'équilibre

$$P_0 = P_T$$

Pour lequel :

$$\delta = \delta_0$$

Avec  $P_T$  étant la puissance motrice de la turbine et  $P_0$  la puissance résistante débitée dans le système (consommée).

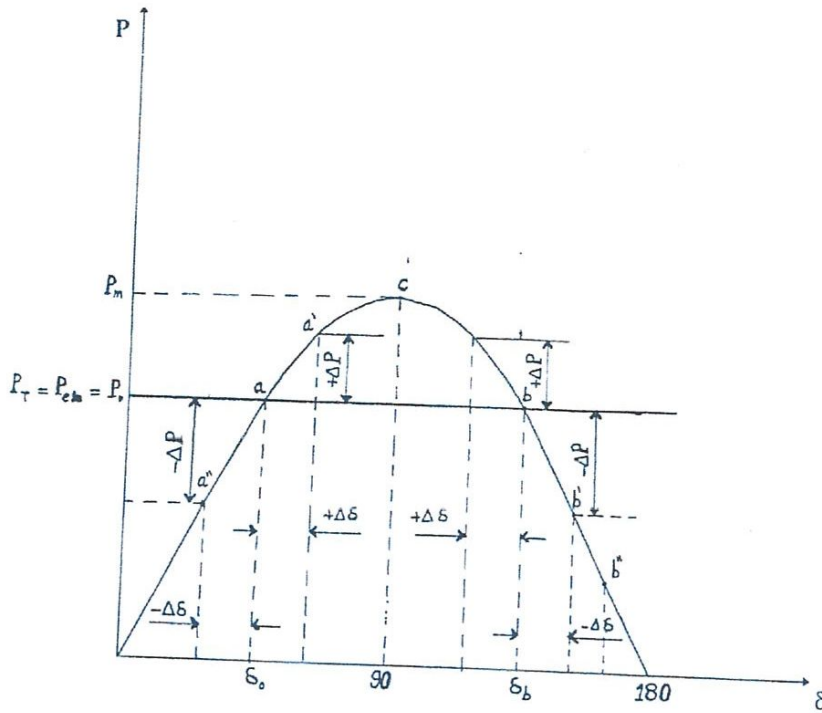
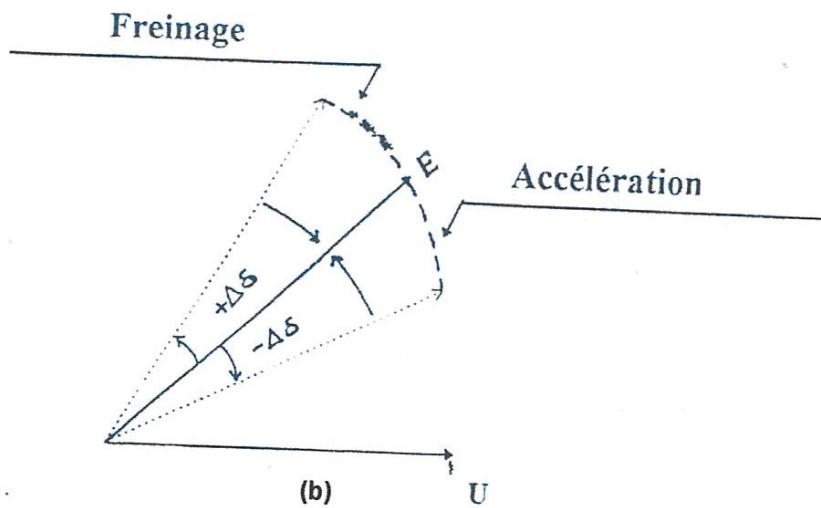


Fig. 2.1 : Schéma d'analyse de la stabilité statique d'un générateur synchrone



Si l'angle  $\delta$  subit une variation positive  $\Delta\delta$  (passage du point  $a$  au point  $a'$ ), et si  $P_T$  ne dépend pas de  $\delta$  (ce qu'on suppose généralement être le cas), le nouveau régime serait tel que :

$$P'_a > P_T = P_0$$

c.-à-d. le rotor sera soumis à un moment de freinage correspondant à  $P'_a$ , le régime continu jusqu'au rétablissement de l'équilibre initial (Fig. 2.2).

Même raisonnement si l'angle  $\delta$  subit une variation  $\Delta \delta$  négative (passage du point a au point a''), dans ce cas le rotor sera soumis à une accélération jusqu'au rétablissement de l'équilibre initial (Fig. 2.2).

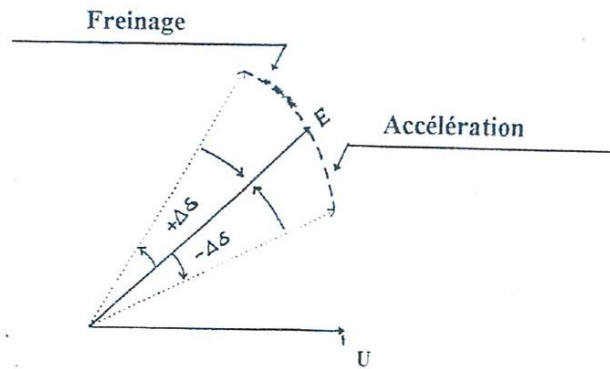


Fig. 2.2 Caractéristique du régime correspondant au point « a »

Considérons maintenant le régime correspondant au point b sur la caractéristique  $P=f(\delta)$  (Fig. 2.1)

Pour un écart positif  $\Delta\delta_b$  (passage du point b au point b'), la puissance  $P$  de la machine varie d'un écart  $\Delta P$  correspondant mais, dans ce cas, tel que

$$P'_b < P_T = P_0$$

Le rotor sera soumis alors à un couple d'accélération défini par l'équation :

$$P_T - P'_b = \Delta P_b$$

Sous l'action de ce couple l'angle  $\delta$  continuera à augmenter en entraînant la diminution progressive de la puissance électrique  $P$ .

L'accélération augmente et les régimes successifs s'éloignent du régime «b», en faisant sortir du synchrone la machine (Fig. 2.3).

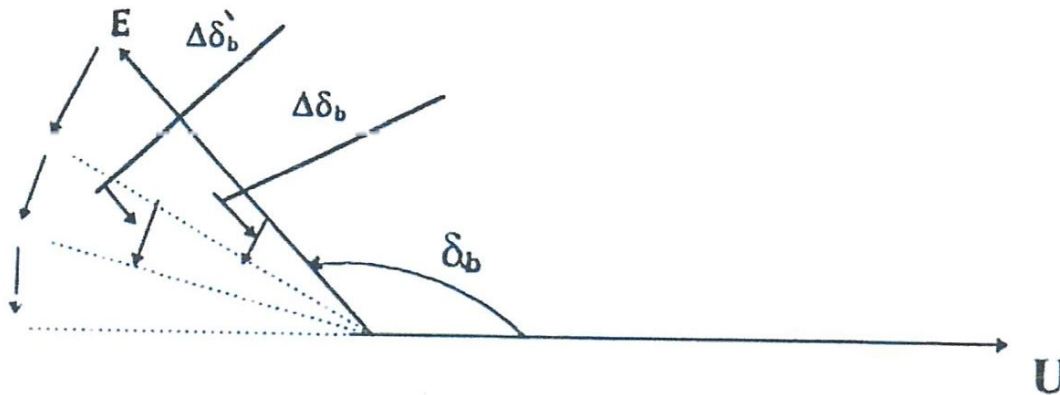


Fig. 2.3 Caractéristique du régime correspondant au point « b »

On peut tenir le même raisonnement si le régime initial est supposé être celui correspondant à  $P_m = \frac{EU}{x_s}$  (point «c», Fig. 2.1).

Pour ce régime une petite variation positive  $\Delta \delta > 0$  entrainera la machine vers l'instabilité, mais une variation  $\Delta \delta < 0$  ne gênera pas la stabilité.

Ce régime correspond à la limite de la stabilité statique.

### 2.3 Critère de la stabilité :

On peut dire donc que sur la branche de la caractéristique  $P=f(\delta)$

Correspondant à  $\delta = (0 \div \pi/2)$  ou  $P = (0 \div P_m)$  les régimes établis sont stables .

Les régimes correspondants à  $\delta = (\pi/2 \div \pi)$  et  $P = (P_m \div 0)$  sont instables.



Le critère de stabilité peut-être défini, de manière générale comme suit :

$$dP/d\delta > 0 \quad (\text{Fig. 2.4})$$

$$\text{où : } dP/d\delta = (EU/X_s) \cos\delta > 0$$

$dP/d\delta = S$ : est appelée puissance de synchronisme.

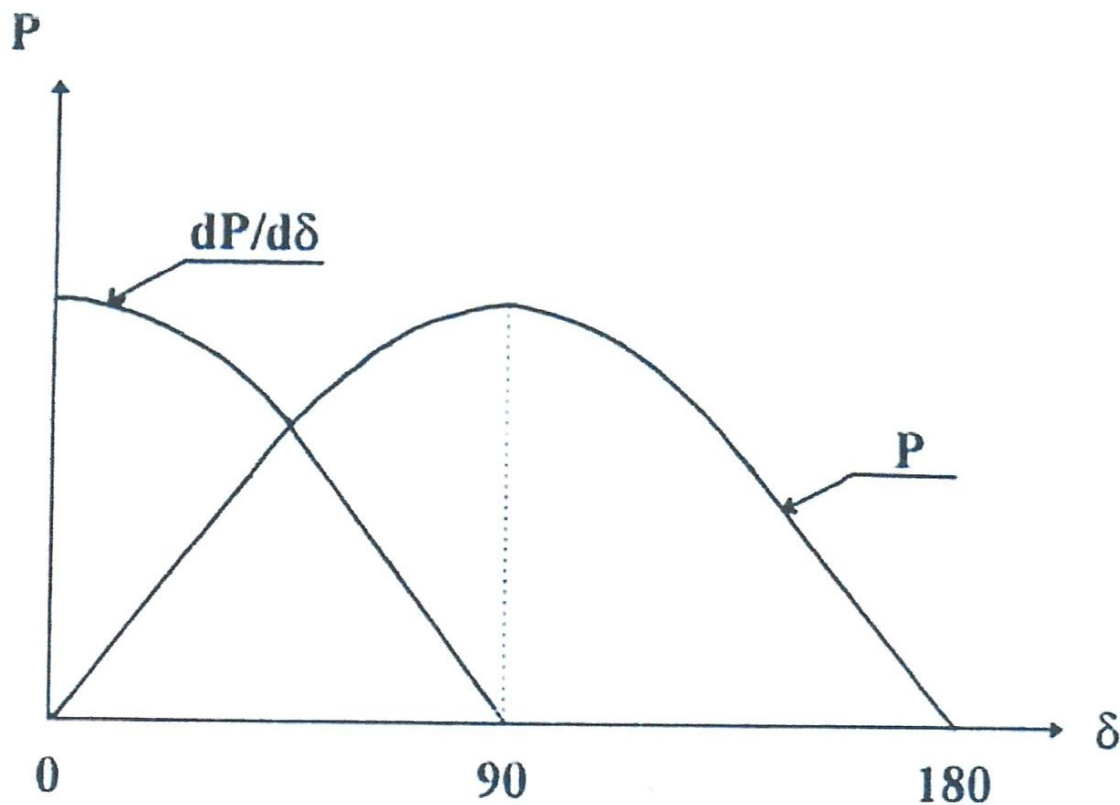


Fig. 2.4 : Courbe définit le critère de la stabilité statique

### 2.4 Puissance maximale $P_m$ pour une machine à pôles saillants :

Pour une machine à pôles saillant la puissance délivrée est exprimée comme suit :

## Chapitre II : Analyse de la stabilité statique

---

$$P = (EU_s / X_{d\Sigma}) \sin \delta + (U_s^2 / 2) [(x_d - x_q) / (x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma})] \cdot \sin 2\delta$$

$$= A \sin \delta + B \sin 2\delta$$

La puissance de synchronisme :

- $S = (dP/d\delta) = A \cos \delta + 2B \cos 2\delta$

$$= A \cos \delta + 2B (2 \cos^2 \delta - 1)$$

$$= 4B \cos^2 \delta + A \cos \delta - 2B$$

$$S = 0 \rightarrow \Delta = A^2 + 32B^2$$

$$D' \text{ ou } \cos \delta_{cr} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 32B^2}}{8B}$$

$$\rightarrow \delta_{cr} = \arccos \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 32B^2}}{8B}$$

Pour une machine à pôles lisses on a  $B=0$

$$\text{Alors: } S = A \cos \delta \quad S = 0 \rightarrow \delta_{cr} = 90^\circ$$

Ayant déterminé l'angle critique, on remplace dans la formule de la puissance,

On obtient la puissance maximale  $P_m$  délivrée par la machine.

### 2.5 Marge de la stabilité statique $K_{m,s}$ :

Du fait que les charges d'un système électrique sont, il devient indispensable de prévoir au niveau de chaque centrale une marge de stabilité statique  $K_{m,s}$ .

On définit la marge de la stabilité statique ( $K_{m,s}$ ) par le rapport, entre la puissance électrique maximale  $P_m$ , et la puissance d'équilibre  $P_0$  :

$$K_{m,s} = [(P_m - P_0) / P_0] \cdot 100\%$$

Pour une puissance à transmettre donnée  $K_{m,s}$  dépend de  $P_m$ , et pour E et U donnée  $P_m$  dépend de  $x_s$  d'une manière hyperbolique parce que  $P_m$  et inversement proportionnelle à  $x_s$ .

### 2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présentés une analyse sur la stabilité statique, on a déterminé les points stables et instables dans la caractéristique de puissance d'une machine synchrone, les paramètres caractérisant la stabilité statique tel que la puissance maximale et le coefficient de la marge de stabilité.

# CHAPITRE III

## ANALYSE DE LA STABILITÉ DYNAMIQUE

### 3.1 Introduction :

La stabilité dynamique est la capacité du générateur de rétablir le régime normal après de fortes perturbations.

Ces perturbations sont de natures oscillatoires (interaction entre couples accélérateur et de freinage correspondants respectivement aux puissances de la turbine et du générateur) et peuvent avoir différents origines :

- Variations brusques de la charge (saut de charge) ;
- Débranchement inattendu d'une ligne ou d'un transformateur ;
- Débranchement d'une génératrice ;
- Courts-circuits.

Les plus dures de ces perturbations sont les courts circuits (la tension est nulle au point de court-circuit triphasé).

Le degré d'effet du court-circuit sur la stabilité dynamique est évalué par la chute de tension dans le point de défaut. Plus la tension dans le point de défaut diminue plus la sortie du synchronisme est plus probable. Ceci fait que la stabilité dynamique est particulièrement étudiée dans le cas des courts-circuits triphasés.

### 3.2 Caractéristiques de puissance pour le cas de débranchement d'une ligne:

Considérons le même système du chapitre I (Fig.1.6) et supposons qu'une des deux lignes en parallèle s'est débranchée on aura alors :

$$\text{Avant le débranchement : } X_s = X_G + X_{T1} + \frac{1}{2}X_l + X_{T2}$$

$$\text{Après le débranchement : } X_{s1} = X_G + X_{T1} + X_l + X_{T2}$$



Donc  $X_s$  a augmenté de  $\frac{1}{2}X_l \rightarrow P_m = EU_s/X_{s1}$  diminue de m fois

Le débranchement de la ligne définit une caractéristique de la puissance

(Caractéristique 2) avec un maximum inférieur à celui de la caractéristique 1 (Fig.3.1).

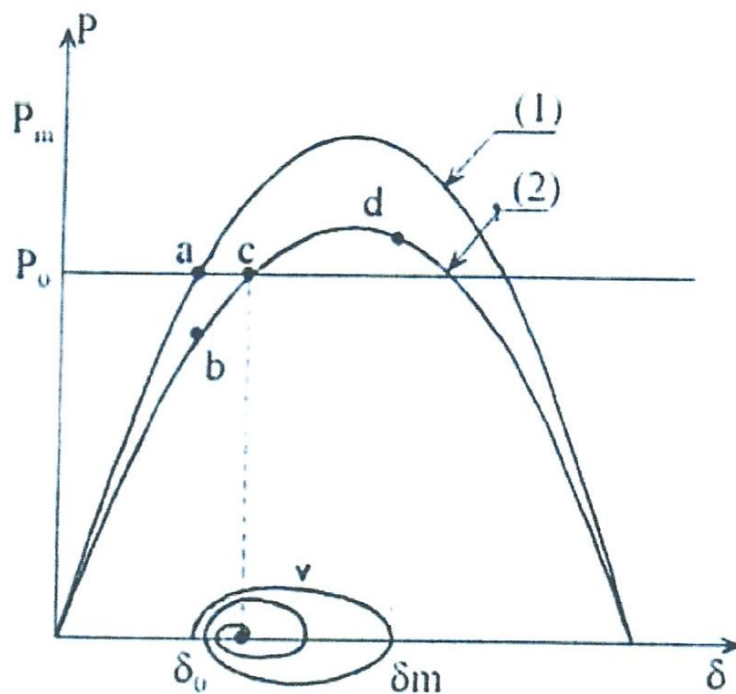


Fig. 3.1 Caractéristiques de puissances dans le cas de débranchement d'une ligne (régime stable).

A l'instant même du débranchement de la ligne, et en raison de l'énergie mécanique du rotor, l'angle  $\delta$  entre les vecteurs  $E$  et  $U$  ne varie pas instantanément  $\delta = \delta_0$  mais le régime passe du (point a) au (point b), dans ce point la puissance de la turbine  $P_T$  qui est supposée constante et ne dépend pas des conditions extérieures est supérieure à celle de la machine  $P_b$  ( $P_T > P_b$ ).

La génératrice fera accélérer alors le rotor et le vecteur  $E$  qui jusqu'alors tournait en synchronisme avec le vecteur  $U$  commence à tourner à une vitesse plus grande il apparaît une vitesse relative de rotation  $v$  de  $E$  par rapport à  $U$ .

## Chapitre III Analyse de la stabilité dynamique

Le processus d'accélération continue jusqu'au point où les moments s'équilibrent (point c), à cet instant la vitesse relative  $v$  est maximale, et le rotor animé relativement par cette vitesse ne peut pas reprendre instantanément la vitesse du synchronisme et le processus de freinage commence jusqu'à ce que la vitesse s'annule (point d par exemple).

Au point d où la vitesse relative s'annule, l'angle  $\delta$  est alors à valeur maximale mais le moment de freinage reste supérieur au moment accélérateur par conséquent la vitesse  $v$  commence à évoluer dans le sens inverse et l'angle  $\delta$  commence à diminuer  $\delta_m \rightarrow \delta_{moy}$  et au delà, il s'établit une oscillation jusqu'à l'équilibre énergétique avec  $v=0$  et  $\delta = \delta_{moy}$  (point c).

Si pendant l'évaluation de la vitesse (Fig.3.2) pendant la première phase, de zéro à sa valeur max ( $a \rightarrow c$ ) et au delà, l'angle  $\delta$  attend sa valeur critique

$\delta = \delta_{cr}$  Avant que la vitesse  $v$  ne s'annule (Point c') l'équilibre se renverse au profit de l'accélération du rotor ce qui fera, inversement, augmenter la vitesse (et l'angle  $\delta$ ). Ce processus conduit à la sortie du synchronisme de la machine.

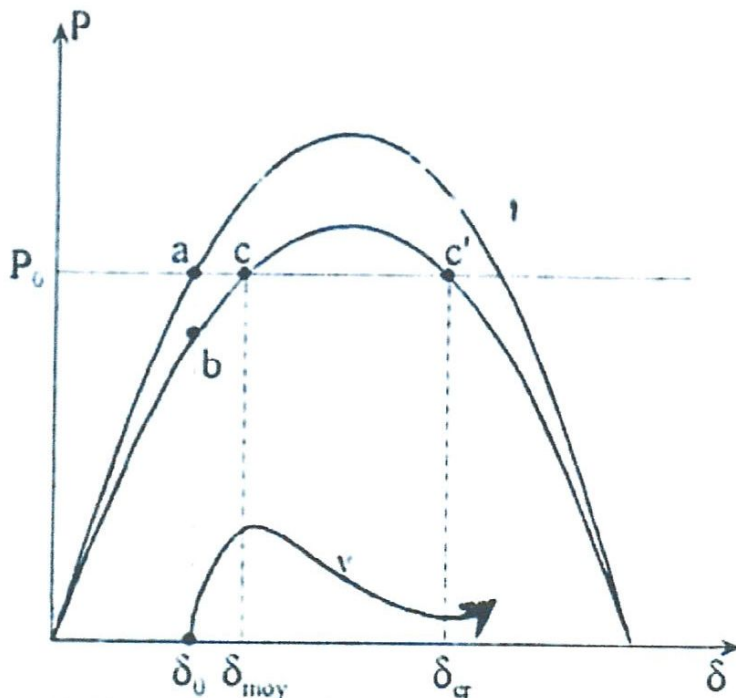


Fig. 3.2 Perte de la stabilité dynamique à la suite de débranchement de l'une des deux lignes.

### 3.3 Caractéristiques de puissance pour le cas d'un court-circuit:

#### 3.3.1 Types des courts-circuits :

On distingue trois types de court-circuit :

- Court-circuit monophasé;
- Court-circuit biphasé non et à la terre ;
- Court-circuit triphasé non et à la terre.

Les courts-circuits triphasés sont peut fréquents et simples à calculés, les deux premiers types sont plus fréquents et peuvent donner lieu à des courants de court-circuit plus élevés dans certains cas.

#### 3.3.2 Caractéristiques de puissances :

Dans le cas d'un court-circuit on obtient en général les caractéristiques de puissances suivantes (Fig. 3.3) :

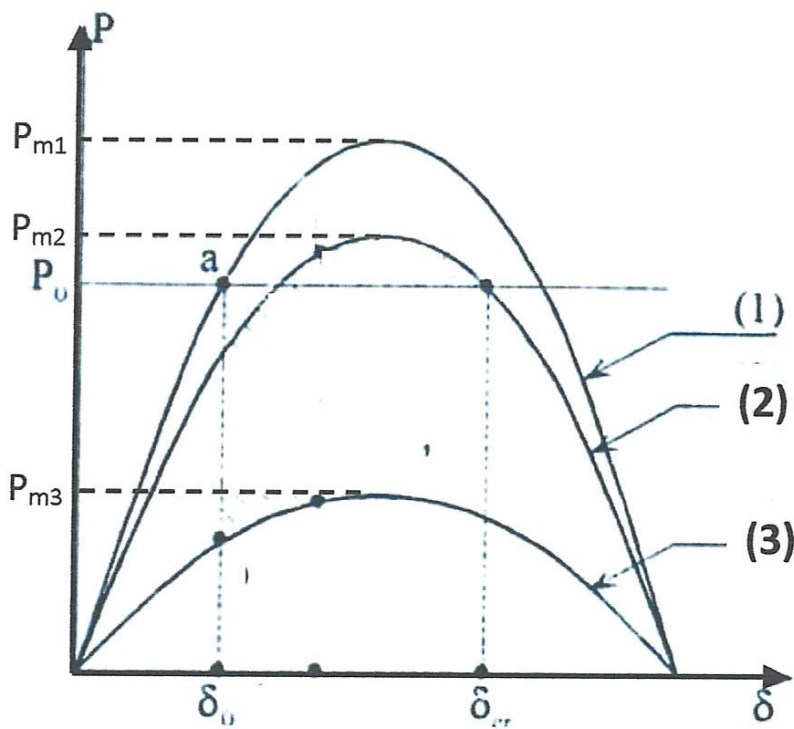


Fig. 3.3 Caractéristiques de puissances dans le cas d'un court-circuit.



- (1) Durant le régime normal (avant le défaut) ;
- (2) Durant le régime après avarie (après élimination du défaut) ;
- (3) Durant le régime d'avarie (durant le défaut).

### 3.4 Lois des surfaces (des aires):

Elle est basée sur le fait que l'énergie accumulée lors de l'accélération du rotor doit être égale avec celle dépensée pendant le freinage.

Si on a par exemple un court-circuit qui s'est produit dans l'une des deux lignes en parallèles du système présenté au chapitre I (Fig. 1. ?), alors les caractéristiques angulaires pour les différents régimes seront représentées comme dans la figure 3.4.

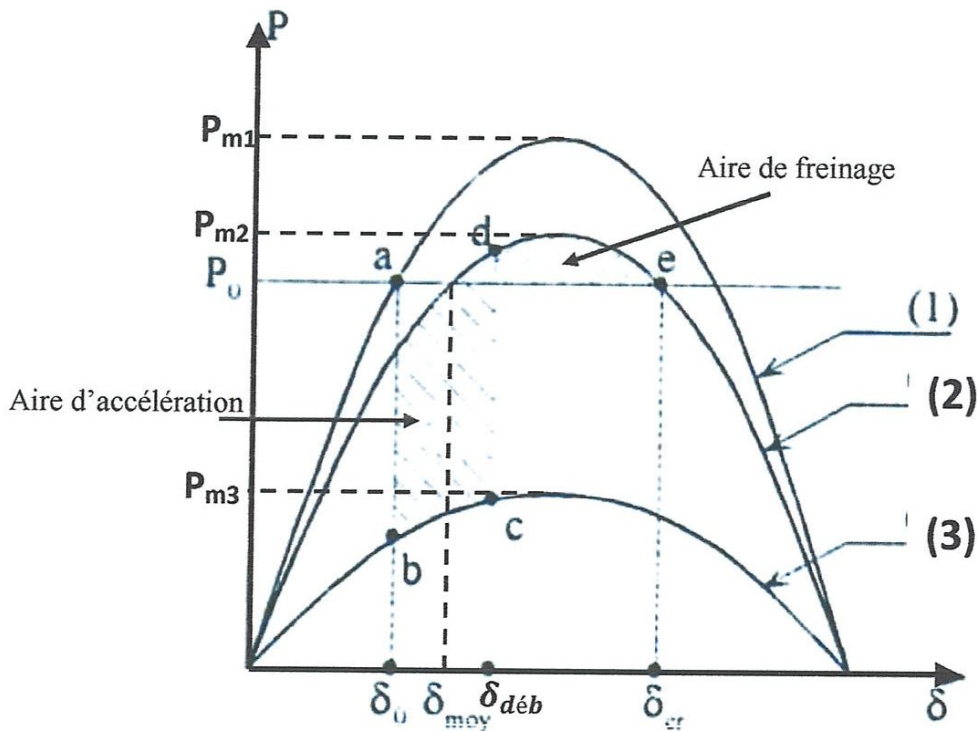


Fig. 3.4 Loi des aires

## Chapitre III Analyse de la stabilité dynamique

Avec la loi des aires on peut déterminer l'angle limite de débranchement  $\delta_{deb}$ .

Alors, l'égalité des deux aires hachurées nous permet d'écrire:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{deb}} (P_0 - P_{m3} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{deb}}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{m2} \sin \delta) d\delta = 0$$

$$\text{Où } \delta_{cr} = \pi - \delta_2 = 180 - \arcsin(P_0 / P_{m2})$$

$$\text{D'où : } P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) + P_{m3} (\cos \delta_{deb} - \cos \delta_0) + P_0 (\delta_{cr} - \delta_{deb}) + P_{m2} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{deb}) = 0$$

Ce qui donne:

$$P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) + (P_{m3} - P_{m2}) \cos \delta_{deb} + P_{m2} \cos \delta_{cr} - P_{m3} \cos \delta_0 = 0$$

Et on aura enfin :

$$\cos \delta_{deb} = \frac{P_0 \frac{(\delta_{cr} - \delta_0)\pi}{180} + P_{m2} \cos \delta_{cr} - P_{m3} \cos \delta_0}{P_{m2} - P_{m3}}$$

Où les angles sont exprimés en degrés.

### 3.5 Méthodes des intervalles successifs :

La procédure consiste à découper l'intervalle du temps du régime transitoire à analyser en éléments  $\Delta t$  pour lesquels, on détermine successivement la variation de l'angle  $\delta$  et de la puissance  $P$ . Le régime permanent avant perturbation est défini par le point « a ».

A l'instant  $t_0 = 0$  de la perturbation, la puissance du générateur varie en faisant un écart avec  $P_0(P_T)$  de  $\Delta P(0)$  (Fig. 3.4). Si les éléments de temps  $\Delta t$  sont choisis suffisamment petits, on peut considérer que  $\Delta P(0)$  reste constante pendant l'écart  $\Delta \delta(1)$  correspondant à  $\Delta t$ .



## Chapitre III Analyse de la stabilité dynamique

---

Pour déterminer le temps de débranchement, on se base sur l'équation du mouvement du rotor.

$$\Delta P = T_j \cdot (d^2\delta / dt^2) = P_0 - P_{m3} \sin \delta$$

$T_j$  : Constant de temps.

Du caractère de l'équation (équation différentielle de 2<sup>ème</sup> ordre), il est difficile de la résoudre directement en fonction de  $\delta$ , pour cela on utilise d'autres méthodes tel que la méthode des intervalles successifs qui consiste en ce qui suit :

On calcule le coefficient  $k$  correspondant au pas  $\Delta t$ .

$$k = \frac{2\pi f (\Delta t)^2}{T_j}$$

$$\text{Ou : } T_j^* = T_j \cdot (S_n / S_b)$$

L'écart de la puissance au début de l'intervalle (1) est :

$$\Delta P(0) = P_0 - P(0) = P_0 - P_{m3} \sin \delta_0$$

L'angle correspond à la fin du premier intervalle (1) est :

$$\delta(1) = \delta_0 + \Delta\delta(1)$$

Où  $\Delta\delta(1)$  : écart de  $\delta$  correspond au premier intervalle (1) qui est égale à :

$$\Delta\delta(1) = k \Delta P(0) / 2$$

En insérant la valeur de  $\delta(1)$  dans l'expression de  $\Delta P$ , on obtient :

$$\Delta P(1) = P(0) - P_{m3} \sin \delta(1)$$

Où  $\Delta p(1)$  : écart entre les puissances du générateur et de la turbine au début du deuxième intervalle.

## Chapitre III Analyse de la stabilité dynamique

$$\Delta\delta(2) = \Delta\delta(1) + k \Delta P(1)$$

On peut constater que les écarts de  $\delta$  correspondant à des intervalles de temps ne sont pas égaux  $\Delta\delta(2) > \Delta\delta(1)$ , dues à l'accélération initiale au deuxième intervalle.

L'angle  $\delta$  correspondant sera donc :

$$\delta(2) = \delta(1) + \Delta\delta(2)$$

La valeur de  $\Delta P(2) = P_0 - P_{m3} \sin\delta(2)$

La valeur de l'écart  $\Delta P(2)$  définit l'accélération qui à son tour permet de déterminer :

$$\delta(3) = \delta(2) + K \Delta\delta(2)$$

Et ainsi de suite....

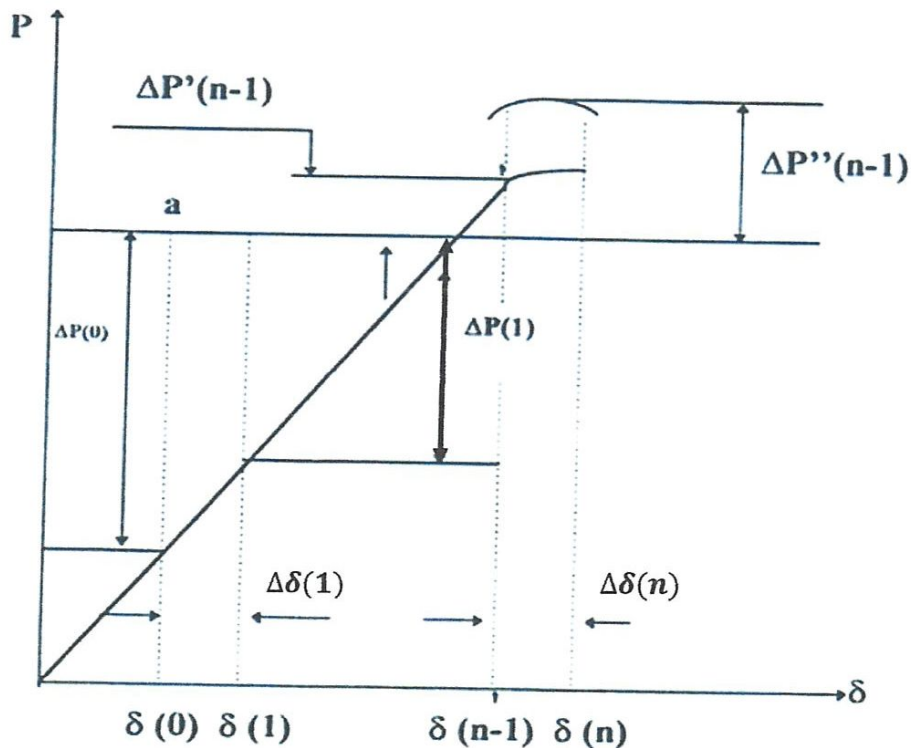


Fig. 3.4 Méthode des intervalles successives

### Remarque :

Si au début d'un certain intervalle de temps «n» la ligne en défaut est débranchée, alors l'écart de puissance passe de  $\Delta P'(n-1)$  à  $\Delta P''(n-1)$  (Fig. 3.4), et l'écart de l'angle dans cet intervalle sera défini comme suit :

$$\Delta \delta(n) = \Delta \delta(n-1) + K/2[\Delta P'(n-1) + \Delta P''(n-1)]$$

Et d'une manière générale, sauf le cas de discontinuité (ci-dessus) on a :

$$\Delta \delta(m) = \Delta \delta(m-1) + K \Delta P(m-1)$$

Le calcul continue jusqu'à que  $\delta$  commence à diminuer (la machine est stable) où bien jusqu'à ce que l'on soit sûr que  $\delta$  continue à augmenter, dans ce cas la machine sort du synchronisme.

Les résultats de calcul permettent de relever la courbe  $\delta=f(t)$  (Fig. 3.5).

De la courbe, et après détermination de l'angle limite de débranchement  $\delta_{deb}$ , on fait correspondre cette angle et on détermine graphiquement le temps correspondant  $t_{deb}$ .

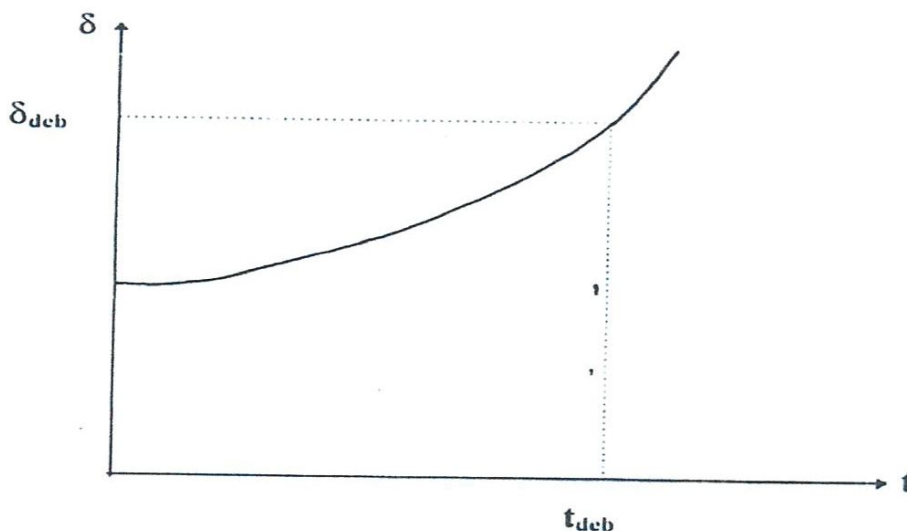


Fig.3.5 : Détermination du temps limite de débranchement.

### 3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a étudié les paramètres caractéristiques de la stabilité dynamiques, qui sont l'angle limite de débranchement du court-circuit  $\delta_{deb}$  déterminée à partir de la loi des aires et le temps de débranchement limite  $t_{deb}$  déterminé à partir de la méthode des intervalle successives, le temps est un paramètre très important dans l'analyse et l'exploitation des réseaux électriques (choix des moyens de protection tel que les disjoncteurs).

# CHAPITRE IV

## APPLICATION SUR UN RÉSEAU DE TRANSPORT



## 4.1 Données du réseau :

Le réseau proposé à l'étude est présenté dans la figure 4.1 ci-dessous [3] :

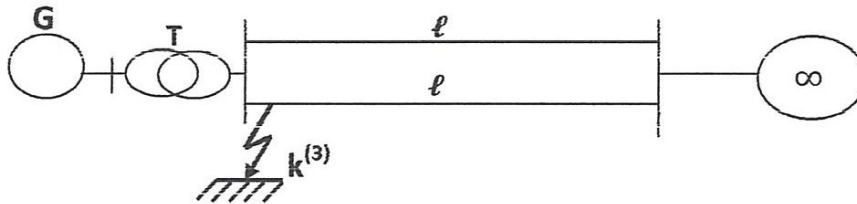


Fig. 4.1 Réseau de transport à calculer.

Où le schéma équivalent est représenté par la figure 4.2 ;

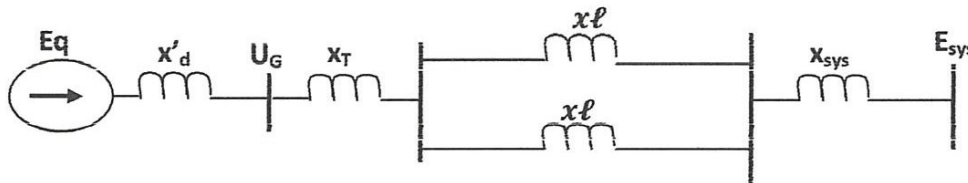


Fig. 4.2 Schéma équivalent du réseau

Les paramètres du réseau sont exprimés en unité relative comme suit :

$S=1.0$  : la puissance apparente à la sortie du générateur ;

$\text{Cos}\varphi=+0.8$  : Facteur de puissance de la machine ; *(en retard)*

$U_G=1.0 \angle 0^\circ$  : Tension à la sortie du générateur ;

$x_T=0.1$  : Réactance du transformateur ;

$x_\ell = 0.4$  : Réactance de la ligne ;

$x_{\text{sys}} = 0.1$  : Réactance du système ;

$x'_d = 0.25$  : Réactance transitoire du générateur ;

$H=4$  : constante d'inertie du générateur ;

### 4.2 : caractéristiques de puissance :

On va étudier le cas d'un court-circuit triphasé qui s'est produit au début de la deuxième ligne, alors on a :

#### a. Régime normal :

$$I_{gen} = S/U_G \cdot \cos^{-1}(0.8) = 1 \angle -36.87^\circ = (0.8 - j0.6)$$

Et la tension du système  $E_{sys}$  et la f.é.m  $E_q$  du générateur seront égale à :

$$\dot{E}_{sys} = \dot{U}_G - j(x_T + \frac{x_l}{2} + x_{sys}) I_{gen} = 1 - j(0.1 + 0.2 + 0.1)(0.8 - j0.6)$$

$$\rightarrow \dot{E}_{sys} = 0.76 - j0.32 = 0.8246 \angle -22.83^\circ$$

$$\text{Et } E_q = U_G + jx_d I_{gen} = 1 + j0.25(0.8 - j0.6) = 1.15 + j0.2 = 1.1672 \angle 9.86^\circ$$

L'angle initial  $\delta_0$  est l'angle entre les tensions  $\dot{E}_q$  et  $\dot{E}_{sys}$

$$\text{Donc } \delta_0 = 9.86^\circ + 22.83^\circ = 32.69^\circ$$

Puis la puissance maximale sera:

$$P_{max} = \frac{E_q \cdot E_{sys}}{x_\Sigma} = \frac{1.1672 \cdot 0.8246}{0.25 + 0.1 + 0.2 + 0.1} = 1.4807$$

Alors  $P_{e1} = P_{max} \sin \delta$  est la caractéristique de puissance pour le régime normal.

La puissance mécanique initial  $P_T$  (puissance de la turbine) peut être calculé comme suit :

$$P_T = P_0 = P_{e1}(\delta_0) = P_{max} \sin \delta_0 = 1.4807 \cdot \sin(32.69) = 0.8$$

$$\text{Donc la marge de stabilité } K_{m,s} = \frac{P_{max} - P_0}{P_0} = \frac{1.4807 - 0.8}{0.8} = 0.85 = 85\%$$

**b- Régime d'avarie (durant le court-circuit):**

Durant le court-circuit au début de la ligne la puissance délivrée par le générateur au système égale à 0.

Donc  $P_{e3}=0$

**c- Régime après avarie :**

Après élimination du court-circuit (élimination de la ligne en défaut) on a :

$P_{e2} = P_{m2} \sin \delta$  avec

$$P_{m2} = \frac{E_1 E_{sys}}{x_{\Sigma 2}} \quad \text{ou} \quad x_{\Sigma 2} = x'd + xT + x_l + x_{sys} = 0.25 + 0.1 + 0.4 + 0.1 = 0.8$$

$$\rightarrow P_{m2} = \frac{1.1672 - 0.8246}{0.85} = 1.1323$$

Et l'angle de débranchement limite est déterminé par la formule:

$$\cos \delta_{\text{déb}} = \frac{P_0(\delta_{cr} - \delta_0) \frac{\pi}{180} + P_{m2} \cos \delta_{cr} - P_{m3} \cos \delta_0}{P_{m2} - P_{m3}}$$

$$\text{Avec } \delta_{cr} = 180 - \sin^{-1} \left( \frac{P_0}{P_{m2}} \right) = 180 - \sin^{-1} \left( \frac{0.8}{1.1323} \right)$$

$$= 135.04^\circ$$

$$\text{Ce qui donne } \cos \delta_{\text{déb}} = \frac{0.8(135.04 - 32.69) \frac{\pi}{180} + 1.1323 \cos(135.04)}{1.1323} = 0.5538$$

$$\rightarrow \delta_{\text{déb}} = 56.37^\circ$$

Les caractéristiques de puissance pour les trois régimes sont représentées par la figure 4.3 ci-dessous.

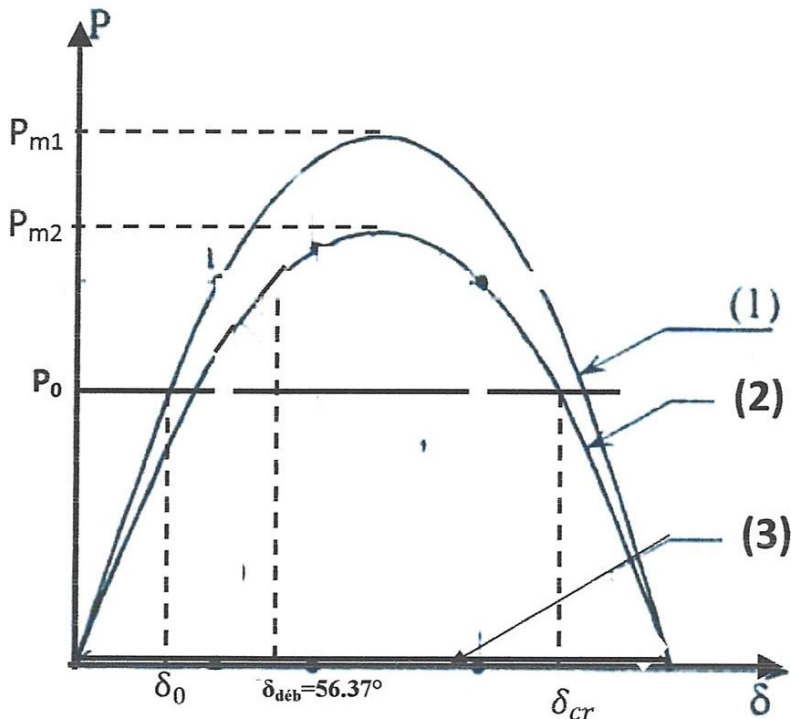


Fig. 4.3 : Caractéristiques de puissance du réseau

- (1) Pour le régime initial ;
- (2) Pour le régime après avarie ;
- (3) Pour le régime d'avarie.

**d- Détermination du temps limite de débranchement :**

Pour cela on a utilisé un programme de calcul écrit en matlab [3], qui nous permet de faire la solution de l'équation de mouvement et de tracer la variation de l'angle  $\delta$  en fonction du temps, alors ce qui nous a permis de tracer la courbe suivante :

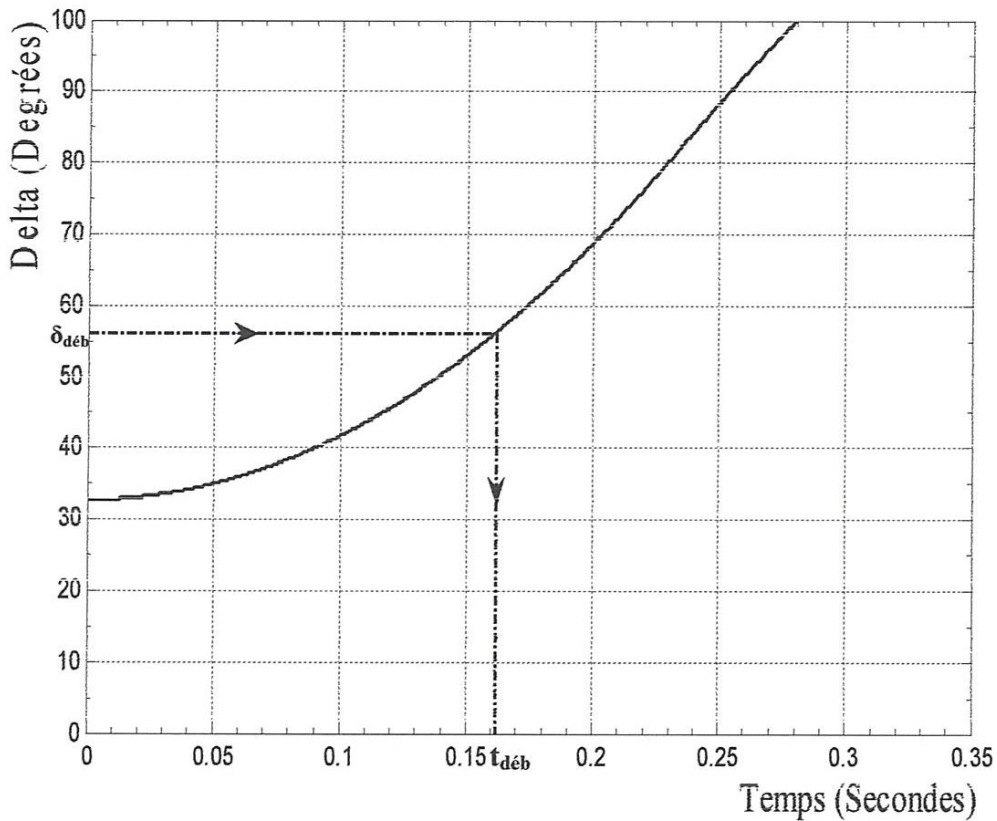


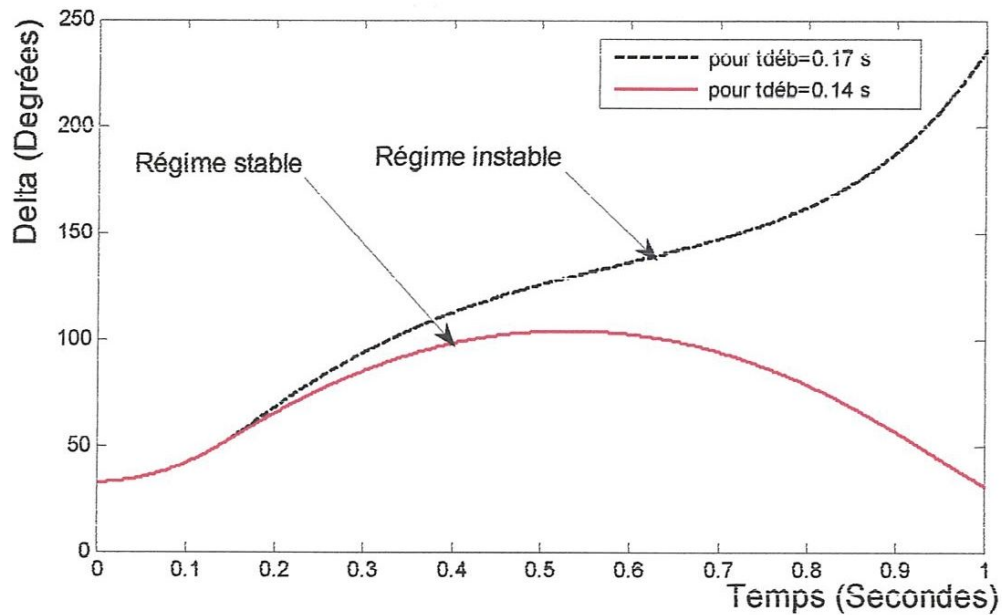
Fig. 4.4 Détermination du temps de débranchement

Une fois qu'on a tracé la variation de l'angle  $\delta$  en fonction du temps, on fait correspondre la valeur de  $\delta_{déb}=56.37^\circ$  sur la courbe, on trouve  $t_{déb} = 0,16$  s.

### e- Influence du temps de débranchement sur la stabilité dynamique :

Avec le même programme en matlab on a tracé la variation de l'angle  $\delta$  en fonction du temps pour deux valeurs du temps de débranchement  $t_{déb}$  et on a trouvé les résultats suivants (Fig. 4.5) :





**Fig. 4.5** Variation de l'angle  $\delta$  en fonction du temps

**a-** Pour  $t_{déb} = 0.14$  s

**b-** Pour  $t_{déb} = 0.17$  s

D'après ces courbes, on voit que pour  $t_{déb} = 0.17$  s la machine tombe dans l'instabilité et pour  $t_{déb} = 0.14$  s la machine maintient la stabilité, ce qui montre que le temps limite de débranchement  $t_{déb} \in [0.14s, 0.17s[$  et aussi que est un paramètre très important caractérisant la stabilité dynamique.

### 4.3 Amélioration de la stabilité dynamique :

Il existe plusieurs moyens pour l'amélioration de la stabilité dynamique, parmi lesquels on va étudier deux cas :

#### 4.3.1 Branchement de lignes en parallèle :

On a étudié les cas de trois et quatre lignes en parallèle et on a comparé avec celle de deux lignes, les résultats de calcul sont regroupés dans le tableau 4.1 ci-dessous :

Tab. 4.1

Paramètres Réseau à	$P_{m1}$	$k_{ms}(\%)$	$\delta_{deb} (^\circ)$	$t_{deb} (s)$
Deux lignes	1,48	85	56,37	0,16
Trois lignes	1,68	110	75,19	0,22
Quatre lignes	1,81	126,25	81,68	0,24

D'après ces résultats on voit que plus on met de ligne en parallèle, plus la marge de stabilité  $k_{ms}$  augmente et même chose pour l'angle limite de débranchement  $\delta_{deb}$  et le temps limite de débranchement  $t_{deb}$ .

### 4.3.2 Branchement en série des batteries de condensateurs :

Un autre moyen pour l'amélioration de la stabilité dynamique est le branchement en série de batteries de condensateurs (ou appelé compensation série), alors on a varié la valeur de la réactance capacitive  $x_c$  de 0 à 40% de la valeur de  $x_l$ , on a trouvé les résultats suivantes (Tab. 4.2):

**Tab. 4.2**

<b>Paramètres de la stabilité</b> $x_c$ (%)	<b><math>P_{mi}</math></b>	<b><math>k_{ms}</math>(%)</b>	<b><math>\delta_{deb}</math> (°)</b>	<b><math>t_{deb}</math> (s)</b>
<b>0</b>	<b>1,48</b>	<b>85</b>	<b>56,37</b>	<b>0,16</b>
<b>10</b>	<b>1,53</b>	<b>92,16</b>	<b>59,85</b>	<b>0,17</b>
<b>20</b>	<b>1,59</b>	<b>99,77</b>	<b>63,78</b>	<b>0,19</b>
<b>30</b>	<b>1,66</b>	<b>108</b>	<b>67,20</b>	<b>0,20</b>
<b>40</b>	<b>1,73</b>	<b>117</b>	<b>71</b>	<b>0.22</b>

D'après ces résultats, on voit que plus on augmente la valeur de la réactance capacitive et plus on améliore les paramètres caractéristiques de la stabilité dynamique.

### 4.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait une application sur un réseau HT de transport, on a vu que l'angle limite de débranchement  $\delta_{deb}$  et le temps limite de débranchement  $t_{deb}$  sont parmi les paramètres les plus importants caractérisant la stabilité dynamique, et pour l'amélioration de cette dernière, on a vu que le branchement en parallèle des lignes et la compensation série améliorent nettement la stabilité dynamique.

## Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons présenté les notions de base de la stabilité d'un réseau électrique, en particulier la stabilité dynamique. Le problème d'instabilité dynamique peut être favorisé par plusieurs paramètres à savoir :

- Variations brusques de la charge (saut de charge) ;
- Débranchement inattendu d'une ligne ou d'un transformateur ;
- Débranchement d'une génératrice ;
- Courts-circuits.

Les plus dures de ces perturbations sont les courts circuits (la tension est nulle au point de court-circuit triphasé).

Le degré d'effet du court-circuit sur la stabilité dynamique est évalué par la chute de tension dans le point de défaut. Plus la tension dans le point de défaut diminue plus la sortie du synchronisme est plus probable. Ceci fait que la stabilité dynamique est particulièrement étudiée dans le cas des courts-circuits triphasés.

Parmi les paramètres caractéristiques de la stabilité dynamique, on distingue :

Le coefficient de la marge de stabilité ( $k_{ms}$ ), l'angle limite de débranchement ( $\delta_{deb}$ ) et le temps de débranchement ( $t_{deb}$ ).

Afin d'améliorer la stabilité dynamique, on a proposé deux solutions à savoir :

Branchements des lignes en parallèles et compensation en série (branchement des batteries de condensateurs en série), on a trouvé qu'il y'a une nette amélioration de la stabilité dynamique (augmentation des paramètres  $k_{ms}$ ,  $\delta_{deb}$  et  $t_{deb}$ ).



## BIBLIOGRAPHIE

[1] Yvon Bésanger « **Vers l'amélioration de la sécurité des réseaux électriques de puissance** » Habilitation à Diriger des Recherches de l'Institut National Polytechnique de Grenoble/Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble UMR 5529 INPG/UJF-CNRS04/ DECEMBRE 2006.

[2] Thèse de Doctorat en Génie Electrique de Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI, « **Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques** »

Université Henri Poincaré, Nancy-I, Soutenu publiquement le 13 Octobre 2003

[3] Cours sur site internet « Power Systems – Basic Concepts and Applications- Part II », [www.PDHcenter.com](http://www.PDHcenter.com).

[4] Rabah BENABID, Mémoire de Magister en Electrotechnique Université Amar Telidji, Laghouat « **Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les**

**Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques** » Soutenu le 04/09/2007.

[5] Cahier technique n°185. Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels  
**B. De Metz-Noblat, G. Jeanjean**, Merlin Gerin \_ Square D \_ Télémécanique

[6] LES MACHINES SYNCHRONES  
Technologies et différents modes d'alimentations des machines  
Synchrones (internet) (machine synchrone .pdf)

[7] Abdallah DARKAWI « **Etude, développement et mise en œuvre de deux observateurs de position pour la commande sans capteurs de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)** »

Faculté des Sciences Semlalia Marrakech - DESA Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées 2007.

[8] Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Option : Réseaux électriques

Thème : « **Etude et analyse de la stabilité statique et dynamique des générateurs synchrones** », Présentés par : Mr : DRIDAH KAMEL / KROUMA YASSINE, promotion juin 1999, Encadré par : BOUDFEL AMAR, Université 08 mai 1945 – Guelma.