Stabilité et dynamique des réseaux électriques

III. Stabilité dynamique, stabilité transitoire, stabilité de tension, stabilité long terme.

III.1. Notions de base sur la stabilité des réseaux

III.1.1. Définition de la stabilité des réseaux

On définit la stabilité d'un système électrique comme sa capacité de retrouver, après avoir subi une perturbation, un état d'équilibre identique ou très proche de son état initial.

Les différents types de stabilité d'un réseau peuvent être regroupés en famille. Cette classification de la stabilité est basée sur les considérations suivantes :

- la nature physique de l'instabilité résultante.
- l'amplitude de la perturbation.
- la plage de temps nécessaire pour assurer la stabilité.
- les dispositifs et les processus nécessaires pour assurer la stabilité.

Habituellement, la stabilité est divisée en trois groupes, à savoir :

- la stabilité de l'angle de rotor.
- la stabilité de tension.
- la stabilité de fréquence.

La figure 1 présente ces principales catégories de stabilité d'un système de puissance et leurs sous-catégories.

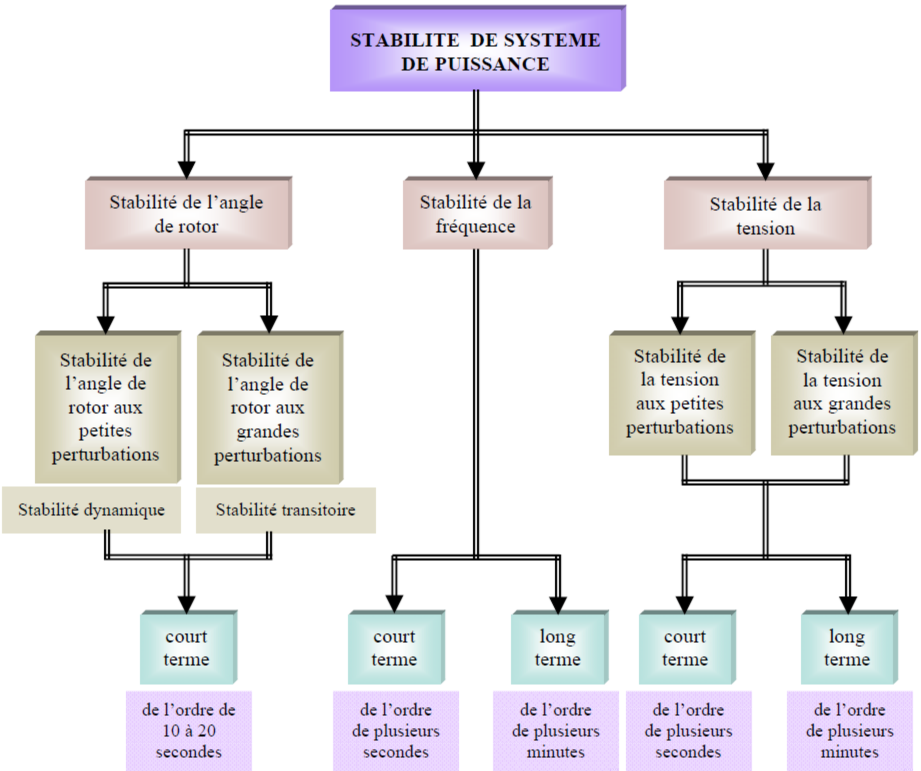


Figure 1. Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.

La stabilité d'un réseau peut se diviser selon la plage de temps nécessaire pour assurer la stabilité en deux types : la stabilité court terme (de l'ordre de plusieurs secondes) et la stabilité long terme (de l'ordre de plusieurs minutes).

La stabilité d'un réseau peut se diviser selon l'amplitude de la perturbation en trois types : la stabilité statique, la stabilité dynamique et la stabilité transitoire.

III.1.1.1. Stabilité statique

Elle correspond à la stabilité d'un réseau électrique sujet à une perturbation lente et de faible amplitude. Elle est utilisée pour l'étude des régimes d'équilibre du système. Cette étude permet de connaître les niveaux de tension et les transits de puissance à travers l'ensemble des bus (jeux de barres) du système. Elle est utilisée principalement dans la phase de dimensionnement des éléments passifs du réseau (câbles, protections…). L'utilisation d'un modèle linéaire pour l'étude de ce type de stabilité est suffisant pour le dimensionnement des régulateurs.

III.1.1.2. Stabilité dynamique

Dans ce cas le réseau électrique est sujet d'une perturbation rapide mais de faible amplitude, qui ont pour origine, par exemple, l'ajustement constant de la puissance consommée par les charges, entrainant un ajustement permanent du système.

Cette stabilité en petit mouvement s'étudie principalement par les techniques d'analyse linéaire appliquées au modèle mathématique préalablement linéarisé autour du point de fonctionnement du réseau (modèle linéaire du réseau).

III.1.1.3. Stabilité transitoire

La stabilité transitoire correspond à la stabilité d'un réseau électrique siège d'une perturbation rapide et sévère. Ces grandes perturbations sont généralement engendrées par des court-circuits ou l'arrêt d'une charge suite à l'isolement d'un élément en défaut.

Cette perturbation allant, le plus souvent, jusqu'à dépasser la capacité des dispositifs de commande. L'utilisation d'un modèle nonlinéaire du réseau électrique est nécessaire pour l'évaluation de la stabilité transitoire.

La stabilité d'un réseau peut se diviser selon la nature physique de stabilité résultante (grandeur électrique perturbée) en trois types : la stabilité angulaire, la stabilité en fréquence et la stabilité de tension.

III.1.1.4. Stabilité angulaire

Elle concerne la capacité du système de puissance de maintenir le synchronisme après avoir subi une perturbation sévère transitoire tel un court-circuit sur une ligne de transmission ou une perte d'une partie importante de la charge ou de la génération. La réponse du système implique de grandes variations des angles de rotor. Elle dépend de la relation non-linéaire couples- angles.

III.1.1.5. Stabilité en fréquence

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée.

III.1.1.6. Stabilité de tension

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. La stabilité de tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge. L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions à quelques nœuds.

Par la suite, on va présenter l'étude de la stabilité angulaire transitoire.

III.2. Stabilité angulaire du réseau électrique

III.2.1. Introduction

Un réseau électrique est constitué de certain nombre de générateurs synchrones fonctionnant en synchronisme sous des conditions de fonctionnement différents. Sous des conditions de fonctionnement normales, la position angulaire relative de l'axe rotorique et le flux magnétique résultant (ou le flux statorique) est constante. Cet angle est connu sous le nom de l'angle de charge ou angle du couple. Durant la perturbation, le rotor accélère ou décélère par rapport à la force magnétomotrice (flux) d'entrefer entre rotor et stator tournant au synchronisme, créant une dynamique de mouvement relatif. L'équation décrivant ce mouvement relatif est connue sous le nom de « »équation de stabilité angulaire (swing equation) ». C'est une équation différentielle non-linéaire du second ordre, qui décrit le mouvement oscillatoire du rotor de du générateur synchrone par rapport au synchronisme. L'échange de puissance entre la partie mécanique du rotor et le réseau électrique dont il est connecté, dû au mouvement oscillatoire du rotor (accélération et décélération), est connu sous le nom de « la réponse inertielle ».

III.2.2. Equation de stabilité angulaire (Swing Equation)

Un générateur synchrone est entrainé par un actionneur primaire. L'équation décrivant le mouvement rotatif du rotor est donnée par l'équation mécanique suivante (coule de frottement est négligeable) :

$$J\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = J\frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e = T_a \qquad (1)$$

Où

J : la somme des moments d'inertie (rotor et actionneur primaire) en kg.m^2.

θ_m : la position angulaire du rotor par rapport à la référence statique statoriqure (phase a statorique) en (rad).

ω_m : la vitesse angulaire du rotor par rapport à la référence statique statoriqure (phase a statorique) en (rad/s).

t : temps en seconds (s).;

T_m : le couple mécanique appliqué par l'actionneur primaire (couple moteur) en (N.m).

T_e : le couple électromagnétique (couple électrique résistant) sortant du générateur synchrone en (N.m).

T_m : le couple net d'accélération en (N.m).

En négligeant les pertes, la différence entre le couple mécanique et le couple électrique donne le couple d'accélération T_a. En régime permanent, le couple électrique est égal au couple mécanique, et par suite la puissance d'accélération devient nulle. Durant cette période, le rotor tourne avec une vitesse synchrone ω_s en rad/s. le couple électrique corresponds T_e à la puissance électromagnétique transmise entre le rotor et le stator qui est égale à la puissance électrique de sortie du générateur plus les partes joules statorique I^2R.

La position angulaire θ est mesurée par rapport à une référence statique statorique. En peut la représenté par rapport à la référence tournante synchrone liée au flux statorique par l'équation suivant :

$$\theta_m = \omega_s.t + \delta_m \qquad (2)$$

où

δ_m : la position angulaire du rotor par rapport à la référence tournante synchrone liée au flux statorique en (rad).

Le dérivé de l'équation précédente par rapport au temps (t) donne :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta_m}{dt} = \omega_m \qquad (3)$$

L'équation précédente montre que la vitesse angulaire du rotor est égale à la vitesse synchrone du flux statorique quand $\frac{d\delta_m}{dt}$ est nulle. Donc, le terme $\frac{d\delta_m}{dt}$ présente la déviation de la vitesse du rotor ω_m par rapport au synchronisme (la vitesse du synchronisme ω_s) e rad/s.

En dérivant l'équation précédente, on obtient l'équation du deuxième dérivé suivant :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \tag{4}$$

En remplaçant l'équation précédente (4) dans l'équation mécanique du rotor (1), on obtient :

$$J\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e = T_a \tag{5}$$

En multipliant les deux parties de l'équation (5) par le terme $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$, on obtient :

$$J\omega_m\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m.T_m - \omega_m.T_e = \omega_m.T_a = P_m - P_e = P_a \tag{6}$$

où

$P_m, P_e et\ P_a$ sont respectivement les puissances mécanique, électrique et d'accélération en (W).

Le coefficient ($J\omega_m$) est le moment cinétique angulaire du rotor (angular momentum of the rotor) : à la vitesse du synchronisme, on le nomme ($J\omega_m$=M) et on l'appelle « la constante d'inertie » de la machine. On peut normaliser l'équation (6), en utilisant l'expression suivant :

$$H = \frac{Energie\ cinétique\ emmagasinée\ à\ la\ vitess\ de\ sychronsime}{Puissance\ apparente\ nominale\ de\ la\ machine} = \frac{J\omega_s^2}{2S_n} \tag{7}$$

Où Sn est la puissance apparente triphasée du générateur synchrone.

En remplaçant (*J*) de l'équation (7) dans l'équation (6), on obtient :

$$2H\frac{S_n}{\omega_s^2}\omega_m\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \tag{8}$$

En régime permanent, la vitesse angulaire du rotor (ω_m) est égale à la vitesse de synchronisme (ω_s) ; par conséquent (ω_m) peut être remplacée par (ω_s). Puisque les puissances (P_m, P_e et P_a) sont donnée en (W), en les divisant par (Sn) donnée en (VA) va produire une équation avec des termes en en (pu). La division de l'équation (8) par (S_n), donne :

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \qquad \text{en pu} \qquad (9)$$

L’équation précédente (9) ou même l’équation (5), connu sous le nom de « équation de stabilité angulaire (swing equation) » décrit le comportement dynamique du rotor. L’angle δm est l’angle de phase de la fcem (force contre électromotrice) du générateur synchrone par rapport sa tension. Elle influe (permet le contrôle) sur la quantité de la puissance qui peut être transmise entre la tension interne (fcem) et la tension externe (tension de phase) du générateur synchrone). Généralement, elle permet le contrôle du transfert de la puissance entre deux jeux de barres liées par une ligne dont les extrémités sont soumises à des tensions d’angles de phase différents. Pour cela, on l’appelle aussi l’angle de charge.

III.2.3. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire)

La stabilité transitoire dépend non seulement de l'amplitude des perturbations et du point de fonctionnement initial mais elle dépend également des caractéristiques dynamiques du système. Elle se manifeste à court terme sous forme d'un écart croissant de façon apériodique de certains angles de rotor. Si le système instable, l'angle du rotor ($\delta(t)$) continu à augmenter infiniment et la machine perd le synchronisme. L'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit par exemple l'élimination du défaut ou par exemple la variation de la charge), elle est appelée instabilité de première oscillation (First Swing Instability), (cas 1, figure 2), et elle s'étend sur 3 à 5 secondes. L'instabilité transitoire peut aussi se manifester autrement. Elle peut résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation, provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation (instabilité de multi-oscillations), (cas 2, figure 2). La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes. Si le système est stable, ($\delta(t)$) présente des oscillations amorties (oscillations d'amplitude décroissant) (cas 3, figure 2).

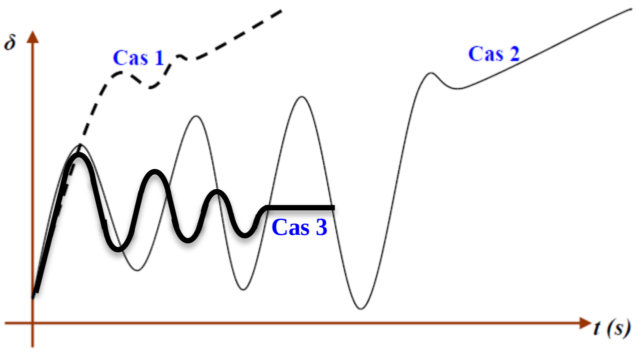


Figure 2. Variation d'angle de rotor.

Cas 1 : instabilité de première oscillation. Cas 2 : instabilité de multi-oscillations.

Cas 3 : stabilité

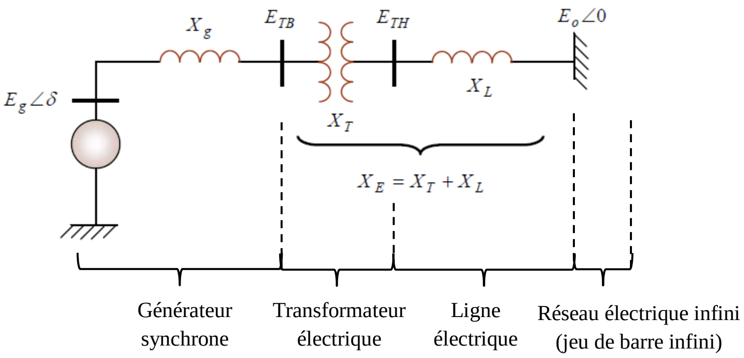
Les méthodes d'analyse de la stabilité transitoire sont divers tels que :

- Intégration Numérique
- Méthodes directes ou méthodes énergétiques
    - Méthodes graphiques (Critère d'égalité des aires)
    - Méthodes directes de Lyapunov
- Méthodes hybrides
- Méthodes stochastiques

Le critère d'égalité des aires (EAC : Equal Area Criterion) est utilisé dans l'étude de la stabilité transitoire développé à l'origine pour un système mono-machine, et par la suite aux systèmes multimachines en les remplaçant par une machine équivalente reliée à un nœud infini. Cette méthode graphique permet de conclure la stabilité du système sans tracer et analyser les réponses temporelles.

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par cette approche graphique simple, à savoir le critère d'égalité des aires. Cette approche regroupe l'équation du mouvement et la courbe (P-δ) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle de rotor.

Pour expliquer cette approche, nous prenons un système de puissance simple constitué d'un générateur synchrone connecté à un jeu de barre infini via une ligne de transmission, figure 3.a. Le générateur est modélisé par une source de tension idéale E_g en série avec une réactance X_g (modèle classique). La ligne et le transformateur sont représentés par la réactance X_E.



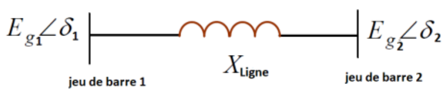


Figure 3. a. Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini , b. jeu de barre 1 connecté à un jeu de barre 2

A l'état équilibré, la puissance produite par le générateur P_e transmise au réseau électrique (entre le point (E_g) et le point (E_0)), ou même la puissance P_{e12} transmise entre deux jeux de barre (1) et (2) liés par une ligne électrique est donnée par l'équation suivante :

$$P_e = \frac{E_g . E_0}{X_g + X_E} . \sin(\delta - 0) \qquad , \qquad P_{e12} = \frac{E_{g1} . E_{g2}}{X_{Ligne}} . \sin(\delta_1 - \delta_2) \qquad (10)$$

Où, δ, l'angle de rotor (dit ici, l'angle de puissance), est le déphasage entre la tension interne du générateur ($\overrightarrow{E_g}$) et la tension du jeu de barre infini ($\overrightarrow{E_0}$) ; et E_g et E_0 sont les valeurs efficaces des tensions ($\overrightarrow{E_g}$) et ($\overrightarrow{E_0}$). Dans le cas de deux jeux de barre, l'angle de puissance est (δ_1-δ_2). L'équation (10) est représentée graphiquement à la figure (4).

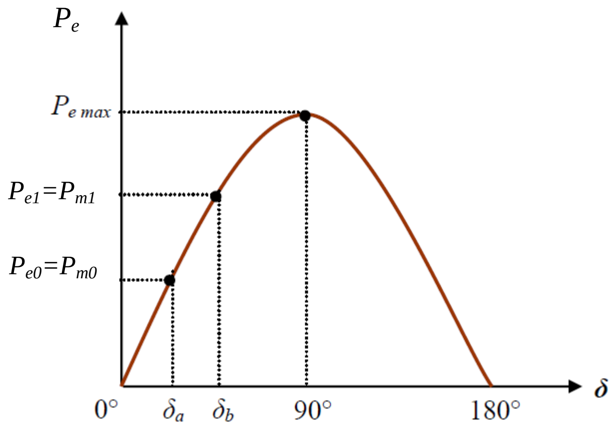


Figure 4. Relation puissance électrique produite-angle de rotor.

III.2.3.1 Critère des aires égales (Critère d'égalité des aires)

Dans un système où un générateur synchrone, dont l'angle de rotor est oscillatoire, raccordé à un bus infini, dont l'amplitude de la tension est toujours constante, il est possible d'étudier la stabilité angulaire transitoire en utilisant le simple critère des aires égales au lieu d'utiliser la méthode numérique de résolution de l'équation de stabilité angulaire transitoire.

Considérons l'équation (9) de stabilité angulaire transitoire (swing equation) suivant :

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \qquad \rightarrow \qquad \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{1}{M}(P_m - P_e) = \frac{P_a}{M} \qquad (11)$$

Avec :

$\delta_m = \delta$

$M = \frac{2H}{\omega_s} = \frac{2H}{2\pi f} = \frac{H}{\pi f}$ en pu

P_a : puissance d'accélération

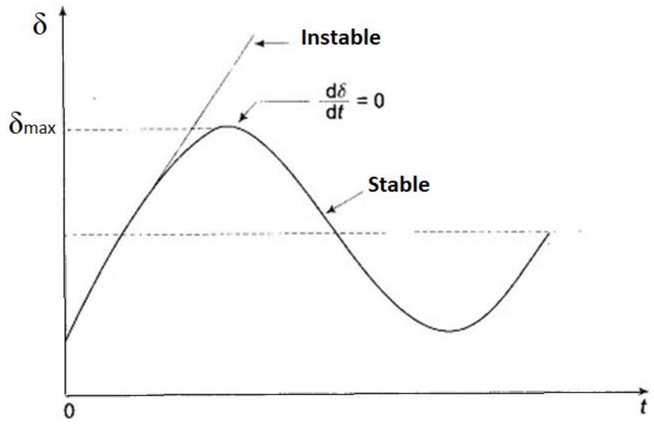


Figure 5. Evolution temporelle de l’angle de rotor ou angle de puissance (δ) pour un system stable et un système instable après une perturbation.

Si le système instable, l’angle du rotor (δ(t)) continu à augmenter infiniment et la machine perd le synchronisme. Par contre, si le système est stable, (δ(t)) présente des oscillations amorties (oscillations d’amplitude décroissant). Ces deux cas sont montrés dans la figure 5.

Puisque le système est non-linéaire, la nature de sa réponse (δ(t)) n’est pas unique et peut montrer une instabilité de modes différents de celui montré dans la figure 5, tout dépend de la nature et la sévérité de la perturbation. Cependant, l’expérience a montré que la réponse (δ(t)) dans un système de réseau électrique généralement se situe dans l’un des deux catégories comme le montre la figure 5. Il est facilement remarqué que pour un système stable, l’indication de stabilité sera révélé en observant la premier oscillation (onde) où (δ(t)) va atteindre un maximum et commence à réduire son amplitude d’oscillation. Cette remarque peut être considérée comme le critère de stabilité et que le system est stable si un instant donné :

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{dt}} = 0 \qquad (12)$$

et il est instable, si :

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{dt}} > 0 \qquad (13)$$

pour une période de temps suffisamment longue (plus d’une seconde est généralement suffisante).

Le critère de stabilité du système (générateur synchrone-bus infini) cité dans l’équation (11) peut être converti en une forme de critère de stabilité, simple et facilement applicable pour ce type de système.

En multipliant les deux parties de l'équation (11) par (2.dδ/dt), on obtient :

$$2.\frac{d\delta}{dt}.\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{2.P_a}{M}.\frac{d\delta}{dt} \qquad (14)$$

En intégrant l'équation précédente (14) selon la loi d'intégration $((\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{dt}})^{\mathrm{n}})' = \mathrm{n}((\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{dt}})')^{(\mathrm{n}-1)}$, on obtient :

$$\int 2.\frac{d\delta}{dt}.\frac{d^2\delta}{dt^2} = (\frac{d\delta}{dt})^2 = \frac{2.}{M}.\int \quad P_a\frac{d\delta}{dt}dt = \frac{2}{M}.\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta$$

Ou

$$\frac{d\delta}{dt} = (\frac{2}{M}.\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{2}{M}.\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta} \qquad (15)$$

où, δ_0 est l'angle initial du rotor avant qui commence à osciller suit au perturbation. De l'équation (12) et (15), la condition de stabilité peut être écrite comme suit :

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{dt}} = 0 = (\frac{2}{M}.\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \frac{2}{M}.\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta = 0$$

Ou

$$\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta = 0 \qquad (16)$$

La condition de stabilité de l'équation précédente peut être décrite comme suit : le système est stable, si la somme des aires des parties englobée entre la courbe P_a-δ et l'axe des abscisses (δ) se réduit à zéro pour une certaine valeur de l'angle δ (avec P_a est puissances d'accélération). Autrement dit, l'aire de la partie positive (accélération) de la courbe P_a-δ doit être égale à l'aire de la partie négative (décélération) de la courbe P_a-δ, d'où le nom du critère des « aires égales ».

Pour illustrer le critère de la stabilité angulaire transitoire, on va considérer quelque exemple de perturbations qui peuvent se produire dans un système (générateur synchrone-réseau électrique à bus infini).

III.2.3.2 Critère des aires égales dans le cas de changement rapide de la puissance mécanique d'entrée sans présence de défaut (structure électrique inchangée)

La figure suivant illustre le modèle équivalent de système de puissance simple constitué d'un générateur synchrone connecté à un jeu de barre infini via une ligne de transmission.

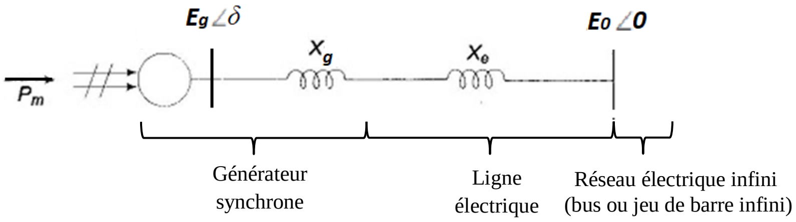


Figure 6. Machine synchrone connectée à réseau électrique infini
(bus ou jeu de barre infini)

A l'état équilibré, la puissance produite par le générateur P_e transmise au réseau électrique (entre le point (E_g) et le point (E_0)), est donnée par l'équation suivante :

$$P_e = \frac{E_g.E_0}{X_g+X_e}.\sin(\delta - 0) = P_{max}\sin(\delta) \qquad (17)$$

Au régime permanent de fonctionnement :

$$P_{m0} = P_{e0} = P_{max}\sin(\delta_0) \qquad (18)$$

Cela est indiqué par le point (a) dans la courbe P_e-δ de la figure 7.

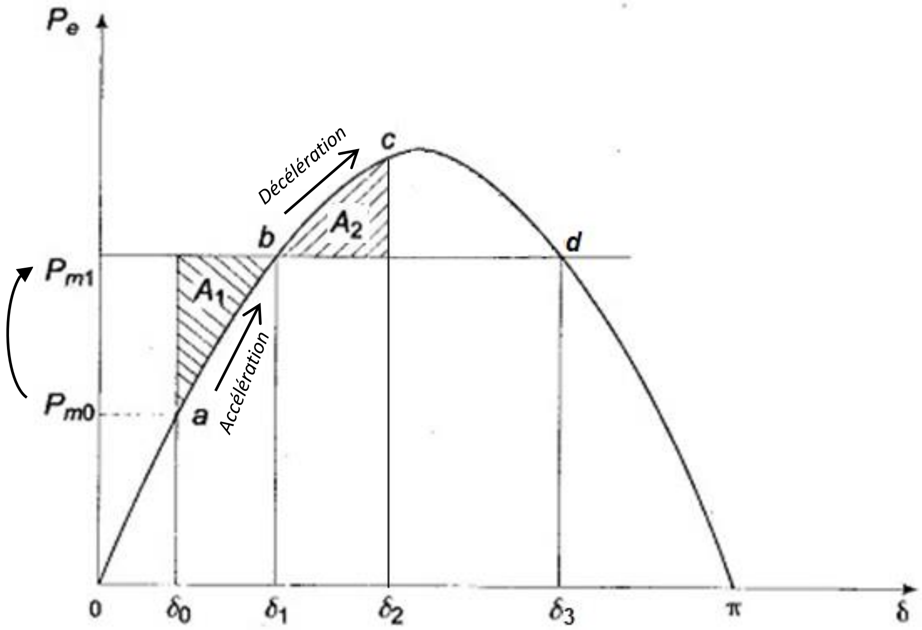


Figure 7. Principe de la méthode des aires égales appliqué à un générateur synchrone connectée à un réseau électrique infini, après application d'une augmentation rapide de la puissance mécanique d'entrée

On considère une augmentation rapide de la puissance mécanique d'entrée à P_{m1} (suite à l'augmentation du débit du fuel du moteur diesel entrainant le générateur synchrone). La puissance d'accélération ($P_a = (P_{m1} - P_e) > 0$) force la vitesse de rotor (ω_m) à augmenter (équation 1 et équation 8) et devenir ($\omega_m > \omega_s$), ce qui conduit l'angle du rotor (δ) à augmenter lui aussi ($\delta > \delta_0$). Pour ($\delta = \delta_1$), la puissance d'accélération devient ($P_a = (P_{m1} - P_e) = 0$ avec $P_e = P_{max} \sin(\delta_1)$) correspondant au point (b), mais l'angle du rotor continue à augmenter ($\omega_m > \omega_s$) et ($\delta > \delta_1$). La puissance électrique P_e devient maintenant supérieure à la puissance mécanique P_m , ($P_e > P_{m1}$) , et par suite la puissance d'accélération P_a devient maintenant négative ($P_a = (P_{m1} - P_e) < 0$) (décélération) ; et donc la vitesse du rotor (ω_m) commence à diminuer, mais l'angle du rotor (δ) continue à augmenter , sous l'effet de l'inertie du rotor et de la partie tournante du moteur d'entrainement, jusqu'à ce qu'il atteint la valeur ($\delta = \delta_2$ où $\omega_m = \omega_s$)) , correspondant au point (c) de la courbe P_e-δ de la figure 7. L'énergie de décélération présentée par l'aire de la zone décélération A_2 est égale à l'énergie d'accélération présentée de l'aire la zone d'accélération A_1 (zones ombrées, figure 7). Donc :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} P_a d\delta = 0 \qquad (19)$$

Le rotor continue à décélérer, et la vitesse du rotor (ω_m) devient inférieure à la vitesse de synchronisme ($\omega_m < \omega_s$) et l'angle du rotor (δ) commence à diminuer. Le système oscille autour de nouveau point de fonctionnement correspondant à l'angle ($\delta=\delta_1$) jusqu'à ce qu'il se stabilise garce à la nature amortie du système, après avoir démarrer de l'ancien point de fonctionnement correspondant à l'angle (δ_0), après une augmentation rapide de la puissance mécanique appliquée au générateur synchrone. Le nouveau point de fonctionnement correspond à l'équation suivante :

$$P_{m1} = P_e = P_{max}\sin(\delta_1) \quad (20)$$

De la figure 7, l'aire de la zone d'accélération A_1 et l'aire de la zone décélération A_2 sont donnée par :

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1}(P_{m1} - P_e)d\delta \quad (21)$$

$$A_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2}(P_e - P_{m1})d\delta \quad (22)$$