

III.1 Introduction

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence un équilibre entre la production et la consommation. En effet, dans un réseau électrique les seules énergies stockées sont l'énergie cinétique des machines tournantes et l'énergie des condensateurs, leurs capacités de stockage sont de quelques secondes.

Les générateurs, les récepteurs et les réseaux électriques qui sont reliés ont des inerties mécaniques et électriques qui rendent difficile le maintien d'un équilibre garantissant une fréquence et une tension relativement constantes.

Normalement, face à une variation de puissance, le système électrique, après quelques oscillations, retrouve un état stable.

Dans certains cas, le régime oscillatoire peut diverger. Des études sont nécessaires pour déterminer les moyens à mettre en oeuvre afin d'éviter ce phénomène et garantir la stabilité du réseau électrique.

Elles sont particulièrement dans le cas des réseaux industriels qui comportent un ou des groupes des générateurs et des moteurs.

Ce chapitre est consacré à l'étude de la stabilité des machines synchrones car elles jouent un rôle prédominant dans les phénomènes de stabilité des réseaux.

III.2 Comportement d'un réseau électrique industriel

Le comportement d'un réseau électrique lors des phénomènes transitoires dépend du comportement de chacun de ses éléments. Ceux-ci, partant d'un état stable, vont influencer sur le comportement transitoire de l'ensemble. Ils vont se trouver, en fin de perturbation, soit dans le même état stable qu'avant la perturbation, soit dans un autre état stable, soit dans un état instable, ce qui en général entraîne la perte d'un ou plusieurs éléments par l'activation des protections. Il importe donc de connaître le comportement de chacun d'eux pour pouvoir déterminer quelques comportements de l'ensemble du réseau électrique.

III.2.1 Les charges passives

Ce sont des consommateurs tels que l'éclairage, le chauffage, les condensateurs, ...etc dont les lois de variation électrique sont :

$$P = \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 P_n \quad (\text{III} - 1)$$

P : Chauffage, éclairage.

$$Q = \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 Q_n \quad (\text{III} - 2)$$

Q: Condensateur.

III.2.2 Les ensembles électroniques de puissance

Ce type de récepteur est en quantité de plus en plus importante dans les réseaux industriels. Ils ont en général une forte sensibilité aux variations de tension. Par exemple, un moteur de vitesse variable peut être mise hors service par protection pour une variation de tension.

III.2.3 Les transformateurs et les liaisons

Les transformateurs et les câbles qui assurent le transit de l'énergie électrique entre les sources et les charges, sont caractérisés par leurs impédances. Celles-ci créent des chutes de tension et des pertes Joule qui dépendent du courant qui les traverse.

Les valeurs de ces impédances sont déterminées en régime transitoire :

- Les forts courants d'appel provoquent des basses de tension qui peuvent être critiques.
- Des réactances importantes entre les sources peuvent induire des oscillations de grande durée.

III.2.3 Les machines asynchrones

En raison de leur comportement et de leur présence majoritaire dans les réseaux industriels (jusqu'à 80 % de la puissance consommée dans certaines installations), les moteurs asynchrones ont un rôle prépondérant dans les phénomènes de stabilité.

III.2.4 Les machines synchrones

Elles jouent un rôle prédominant dans les phénomènes de stabilité des réseaux.

Rappelons les équations principales qui régissent leur fonctionnement :

$$E = V + X_d I \quad (\text{III} - 3)$$

$$P = \frac{3EV}{X_d} \sin \delta. \quad (\text{III} - 4)$$

E : Force électromotrice (f.e.m.) interne, sa valeur varie proportionnellement au courant continu qui traverse le rotor (hors saturation).

V : Tension aux bornes de la machine.

X_d : Réactance synchrone.

I : Courant circulant aux bornes de la machine.

P : Puissance active de la machine.

δ : Angle interne égal à l'angle de phase de E par rapport à V ou angle mécanique entre l'axe du rotor E et la référence synchrone constituée par la tension V aux bornes de la machine.

Et rappelons la règle fondamentale de la stabilité statique d'un alternateur, c'est-à-dire son aptitude à répondre à une variation lente de la charge : le fonctionnement n'est stable que si l'angle interne δ reste inférieur à 90° .

III.3 La stabilité des réseaux

Elle est caractérisée par les variations de puissances actives et réactives transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions, des courants et des fréquences associés à ces puissances.

Plusieurs définitions caractérisent la stabilité des réseaux :

III.3.1 La stabilité en régime statique

Le réseau a un comportement stable, cela signifie que lorsqu'il est soumis à de petites perturbations, il revient à son point de fonctionnement initial avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre.

III.3.2 La stabilité en régime transitoire

Lorsque l'on passe d'un état stable statique à un autre, suite à une perturbation durable voulue ou non, ce changement d'équilibre s'accompagne d'un régime variable

oscillatoire amortie considéré comme acceptable vis-à-vis des intervalles de tension, de fréquence et de durée prédéfinis (Δu , Δf et la durée inférieurs à une valeur max).

III.3.3 La stabilité en régime dynamique

Le réseau est apte à éviter tous régimes oscillatoires divergent et à revenir à un état stable acceptable. Ceci inclut l'intervention éventuelle des protections et des automatismes.

Les études de stabilité dynamique consistent à :

- ✓ Envisager les principaux scénarios critiques tels que court-circuit, perte des groupes de production, perte de l'alimentation du distributeur, variation de charge importante, ...etc.
- ✓ Prédire le comportement du réseau face à ces perturbations
- ✓ Préconiser les moyens à mettre en oeuvre tels réglages, délestages- relestages, configurations interdites, qui permettent d'éviter l'instabilité.

Ces études permettent donc de comprendre le comportement du réseau et de déterminer les moyens de minimiser les risques de perte d'alimentation.

III.4 Etude de stabilité dynamique des réseaux électriques

Cette recherche a pour but de fournir des indications générales sur les objectifs des études et sur leur contenu, et de donner des informations sur les causes, les effets et les remèdes des instabilités dynamiques. Une étude réalisée par le service électrotechnique et réseaux de Schneider est présentée à titre d'exemple.

III.4.2 Objectifs des études

Les études de stabilité dynamique consistent à déterminer les variations dans le temps des grandeurs électriques en différents points d'un réseau et les évolutions des paramètres mécaniques des machines tournantes, suite à des perturbations brutales.

Ces études ont pour but de rechercher :

- Les conditions de fonctionnement du réseau permettant d'assurer une bonne continuité d'alimentation des récepteurs.
- La puissance maximale que l'on peut secourir lors d'une perturbation

- Les valeurs optimales de réglage des protections qui favorisent la stabilité et évitent les déclenchements intempestifs lors de perturbations non critiques
- Les programmes de délestage- relecture lors d'une perturbation qui permettent d'assurer la continuité d'alimentation des récepteurs prioritaires.
- Les meilleurs réglages des régulateurs des machines.

Chaque étude est un cas particulier lié :

- Aux types de sources.
- Aux types de récepteurs.
- A l'architecture du réseau.
- Au mode d'exploitation du réseau.
- Aux causes d'instabilités prises en compte.

Il existe divers motifs d'études de stabilité dynamique :

- Etude préventive à la conception du réseau
- Rajout de générateurs et/ou de récepteurs de grosse puissance sur un réseau existant.
- Etude curative suite à un incident.

Lorsque l'étude est effectuée avant la réalisation de l'installation, on peut agir sur les différents facteurs déterminant la stabilité. Ainsi, en comprenant bien le comportement du réseau en régime transitoire, on peut optimiser son fonctionnement par rapport aux contraintes prédéfinies.

Les études peuvent être globales ou limitées à un problème précis. Par exemple, dans le cas d'un alternateur couplé au réseau de distribution publique, il est intéressant de déterminer la puissance maximale que peut fournir le distributeur en fonctionnement normal, pour qu'en cas de découplage, l'alternateur alimente correctement les récepteurs prioritaires.

III.4.3 Etude de stabilité

Rappelons que la stabilité dynamique d'un réseau est la faculté pour celui-ci de reprendre un fonctionnement normal à la suite d'une perturbation brutale. Une étude de stabilité consiste donc à analyser le comportement électrique et mécanique des machines entre le moment où la perturbation apparaît et le moment où la perturbation éliminée, le réseau revient ou ne revient pas à des conditions normales de fonctionnement. Le problème a trois aspects :

III.4.3.1 Electrique

Il fait intervenir les équations classiques des réseaux (lois de Kirchhoff). Les machines sont représentées par les équations de Park qui permettent d'étudier leurs régimes transitoires. Pendant la période transitoire, il faut faire intervenir les réactances subtransitoires et transitoire des machines pour effectuer les calculs, celles-ci interviennent pour tous les phénomènes dynamiques.

III.4.3.2 La dynamique des variations autour d'un état d'équilibre

Elle fait intervenir les fonctions de transfert des régulateurs de vitesse et d'excitation.

III.4.3.3 Mécanique

Il s'agit de savoir si la vitesse des machines est maintenue ou non, en utilisant les équations mécaniques de chaque machine.

$$J \frac{dw}{dt} = C_m - C_e \quad (\text{III} - 5)$$

J : Moment d'inertie de l'alternateur et de sa machine d'entraînement ou du moteur et de sa charge.

C_m : Couple moteur (mécanique pour un alternateur, électrique pour un moteur).

C_e : Couple résistant (électrique pour un alternateur, mécanique pour un moteur) [15].

III.5 Synthèse des méthodes utilisées

Une variété d'approche permettant l'évaluation de la stabilité des réseaux d'énergie électrique ont été proposée dans la littérature avec les avantages et les inconvénients qui les caractérisent. On citera ici quelques unes des plus utilisées.

III.5.1 Méthode directe de Lyapunov

Afin d'obtenir l'évaluation plus rapide de la stabilité, les recherches orientées vers les méthodes directes n'ont jamais cessé. Ces méthodes essentiellement fondées sur des concepts énergiques, se sont concentrées à trouver la meilleure fonction d'énergie de type Lyapunov dépendant des variables d'état représentant le modèle.

Malgré l'avantage de la rapidité présenté par cette méthode, les inconvénients et les limites existent toujours dont :

- 1- L'élaboration d'une fonction de Lyapunov impose un modèle mathématique simplifié et peu réaliste.
- 2- Les résultats des méthodes directes sont conservatifs, on ne peut pas se prononcer sur la stabilité en dehors du domaine estimé.

III.5.2 Méthode des valeurs propres

La stabilité des phénomènes de faibles perturbations peut être analysée en utilisant la technique conventionnelle basée sur les valeurs propres.

Les points forts de cette méthode sont :

- 1- Tous les modes sont clairement séparés et identifiés.
- 2- Les formes et relation entre les différents modes et les paramètres du système sont identifiés par le biais des valeurs propres.
- 3- La facilité de programmation.
- 4- Obtention des résultats précis permettant de conclure quand à la stabilité du système.

Les inconvénients sont :

- 1- Les équations décrivant le modèle doivent être linéarisées.
- 2- Un temps de calcul important.
- 3- Le calculateur doit avoir une grande capacité de stockage.

Des méthodes de détermination des valeurs propres ont été développées dans le but de surmonter ses inconvénients :

- 1- La méthode d'évaluation d'un système sélectionné de valeurs propres associées à la réponse complète. Elle consiste à analyser les oscillations principales spontanées dans les réseaux : AESOPS (Analysis of Essentially Spontaneous Oscillation in power Systems) utilisant une approche basée sur une nouvelle réponse fréquentielle combinée avec les modes des angles rotoriques.
- 2- La méthode S permet de trouver les méthodes instables.
- 3- L'analyse sélective modèle (SMA : Selective Modal Analysis) permet le calcul des valeurs propres associées à des modes sélectionnés moyennant des techniques d'identification des variables utiles. Ceci permet d'obtenir un modèle d'ordre réduit englobant seulement ces variables [14].

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la stabilité dynamique dans l'objectif de connaissance, l'influence des différentes charges caractérisées par la puissance active P et le facteur de puissance FP et quelques méthodes de détermination la stabilité dynamique d'une machine synchrone.