

Stabilité et dynamique des réseaux électriques

I. Notions et définitions

I.1 Introduction

Les réseaux électriques sont exploités plus près de leur limite physique qu'il faut donc connaître de plus en plus précisément pour assurer leur bonne marche. L'étude du comportement dynamique des réseaux devient une étape obligée de la planification à long terme, du développement de nouveaux composants et de leurs régulations, de l'exploitation des réseaux et de la formation des opérateurs.

Un réseau électrique en fonctionnement peut subir une grande variété de perturbations ou d'incidents, tels que :

- la variation de la charge au cours de la journée ;
- la manœuvre d'un ouvrage de couplage ;
- le déclenchement d'une unité de production ou d'une charge ;
- la foudre atteignant une ligne ;
- un court-circuit en réseau.

Ces perturbations provoquent des phénomènes physiques très variés au sein du réseau, tels que :

- la propagation d'ondes de surtension ;
- la ferrorésonance ;
- la circulation de courants de court-circuit ;
- les oscillations rotoriques des alternateurs et la perte du synchronisme ;
- les phénomènes d'écroulement de la fréquence ou de la tension.

Ces divers phénomènes mettent en jeu des constantes de temps très différentes allant de la microseconde à l'heure, comme indiqué à la figure 1.

Pour l'exploitant, ces phénomènes sont pris en considération prioritairement dans des domaines différents de son activité, même si la séparation de ces domaines est souvent bien perméable.

On distingue (voir figure 1) :

- la protection, qui vise à prévenir les risques physiques des personnes, les dégâts au matériel tout en minimisant l'impact de la perturbation sur la marche du système ;

- le réglage automatique ou manuel qui vise à maintenir le système, en dépit des perturbations, autour d'un point de fonctionnement ou d'une trajectoire définie en fonction de critères économiques, de qualité de service ou de sécurité ;
- la conduite, qui garantit la disponibilité des ouvrages, aligne les moyens de réglages, afin de permettre à tout moment l'équilibre production-consommation et de maintenir au niveau requis les marges de sécurité tout en minimisant les coûts d'exploitation. L'analyse en ligne de la sécurité dynamique est dans ce domaine une application nouvelle qui permet au personnel de conduite d'agir sur le risque d'instabilité du réseau.

Enfin, on retrouve la problématique du fonctionnement dynamique dans la planification des investissements sur des horizons de plusieurs années, et dans la gestion prévisionnelle.

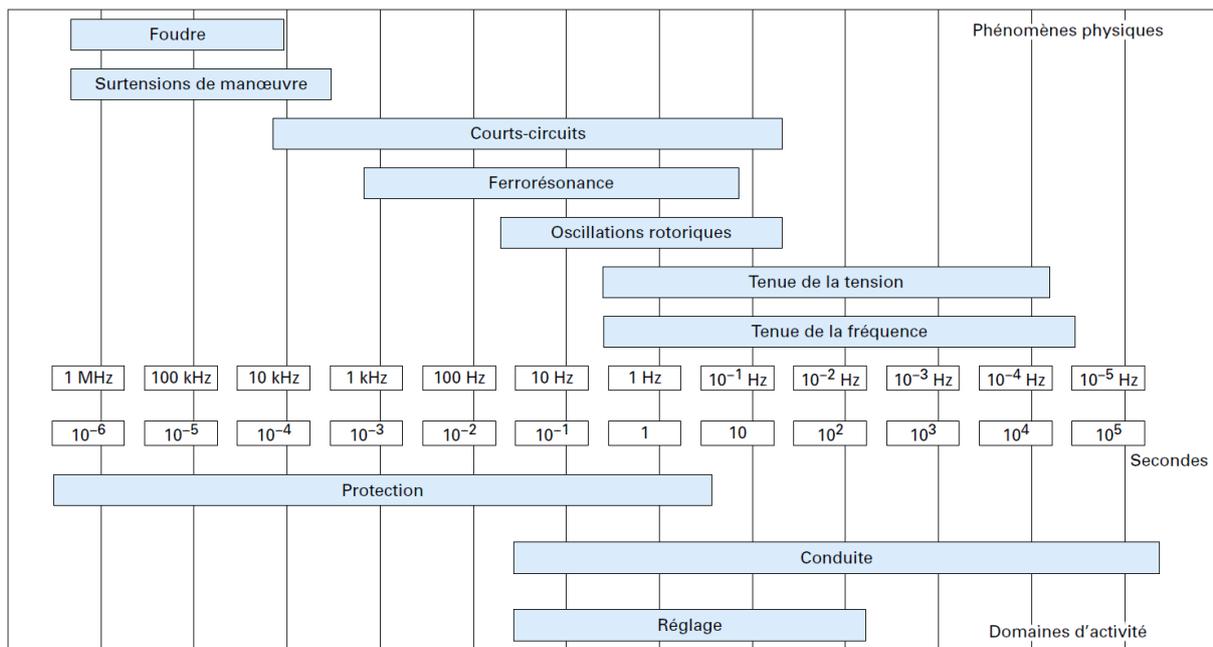


Figure 1. Représentation des différents phénomènes physiques par échelle de temps et correspondance avec les grands domaines d'activité : protection, réglage et conduite des réseaux

I.2 Classification des phénomènes

I.2.1 Pourquoi classe-t-on les phénomènes ?

On a vu dans l'introduction que les phénomènes physiques pouvant se produire dans un réseau sont nombreux et caractérisés par des fréquences ou des constantes de temps très variables. Il a été montré que des simulations précises de tous les phénomènes sont nécessaires. Que le simulateur utilisé soit analogique ou numérique, la première étape de l'élaboration d'une simulation consiste à établir le modèle mathématique du système. Un modèle, complet, apte à reproduire tous les phénomènes aurait les caractéristiques suivantes :

- le nombre de variables serait proportionnel :

- à la taille du système (nombre de postes et lignes, nombre de centrales, de charges). Les réseaux synchrones géants actuels, couvrant jusqu'à tout un continent, contiennent des dizaines de milliers d'ouvrages et bien plus encore si l'on considère les réseaux de distribution ;
- à la plage de fréquence des phénomènes représentés qui détermine la complexité du modèle des constituants ;

- le volume des calculs nécessaires à la simulation serait proportionnel :

- au nombre de variables ;
- à la fréquence d'échantillonnage (l'inverse du pas de calcul) de l'algorithme d'intégration, elle-même directement liée aux fréquences propres les plus élevées du système.

Si l'on arrête l'analyse à ce niveau, la simulation numérique de la dynamique d'un réseau serait pratiquement impossible, même avec les ordinateurs les plus puissants.

Heureusement, à un deuxième niveau de l'analyse, les choses s'améliorent. On observe par exemple que la propagation de la perturbation est d'autant plus limitée dans l'espace que la réponse du système est à fréquence élevée, ou encore que certaines perturbations excitent préférentiellement certaines fréquences propres de manière telle qu'un découplage plus ou moins marqué peut être observé entre différents phénomènes. Ce sont sur ces caractéristiques physiques que s'appuie l'ingénieur pour développer des modèles spécifiques à l'étude de certains phénomènes. Il mettra en œuvre sa compréhension du comportement des réseaux pour définir le modèle nécessaire et suffisant pour résoudre son problème, qu'il aura a priori parfaitement identifié. Ainsi, l'approche classique de la simulation des réseaux repose sur une classification des phénomènes en fonction de leur

fréquence caractéristique et développe pour chaque classe de phénomènes un modèle mathématique particulier auquel sera associé un outil de simulation. On notera que l'amplitude des phénomènes joue également un rôle dans la spécification d'un modèle particulier si des non-linéarités (butée, saturation,...) risquent d'entrer en jeu.

Donc, la classification des phénomènes n'est pas qu'un mal nécessaire. Elle est aussi très utile à la compréhension du comportement des réseaux et structure de façon très efficace tout exposé sur la dynamique des systèmes électriques.

Le grand nombre de phénomène pouvant impacter un réseau électrique à toute les échelles rend impossible la création d'un unique modèle. Heureusement, suivant l'objectif recherché, les phénomènes à prendre en compte ne sont pas les mêmes, notamment en fréquences propres, comme le montre la figure (1). Les ingénieurs ont donc créé 4 grandes classes de perturbations basées sur la fréquence caractéristique et l'amplitude des phénomènes observés :

I.2.2 Phénomènes quasi stationnaires

Nous entendons par là les phénomènes qui peuvent être décrits par une succession d'états du réseau supposés stationnaires. Cela sous-entend que l'on a l'assurance que les transitoires se sont éteints entre deux états successifs, et qu'aucune bifurcation du système ne se soit produite au long de la trajectoire reliant ces deux états. De plus, on fait l'hypothèse implicite qu'aucune valeur propre du système complet n'atteigne progressivement le demi-plan réel positif, ce qui provoquerait l'apparition d'oscillations divergentes spontanées.

Pour étudier les phénomènes quasi stationnaires, on utilise un modèle algébrique du système, où certaines variables de commande dépendent explicitement du temps.

Cette approche s'est, par exemple, révélée utile dans l'étude des écroulements de la tension. Dans ce cas, elle consiste à effectuer un calcul de répartition de la puissance active et réactive après chaque modification de la topologie du réseau, d'un réglage discret, de la production ou de la consommation. Il faut s'assurer que les productions réactives des groupes restent dans les plages admissibles. Dans le cas où une limite est atteinte par un groupe, il faut imposer le courant rotorique à une valeur correspondant à cette limite et non plus la tension statorique qui ne peut plus être réglée.

Pour représenter une prise de charge ou une perte de production, le calcul de répartition est modifié pour tenir compte :

- du régime final de l'action du réglage primaire de vitesse des groupes ou du réglage secondaire fréquence-puissance lorsqu'il existe ;

- des régleurs en charge des transformateurs ;
- du régime final du réglage secondaire de tension s'il existe.

On notera qu'en poursuivant la simulation vers des conditions instables (l'écroulement de la tension), le modèle mathématique simplifié présentera des singularités provoquant l'arrêt du processus de calcul. Dans la pratique, il faut toutefois se méfier de conclusions hâtives en assimilant instabilité physique, instabilité d'un modèle simplifié et non-convergence d'un algorithme !

De plus, ce modèle ne tenant pas compte des phénomènes transitoires, on pourrait trouver un régime qui, compte tenu des constantes de temps, des seuils, des délais de réponse des divers éléments du système, ne représenterait pas celui du réseau réel. Dans celui-ci des excursions transitoires pourraient en effet entraîner des réactions d'équipements propres à modifier l'évolution du système tels que : déclenchements d'éléments par surcharge, délestages ou îlotages par baisse de fréquence, déclenchements de groupes de production par les protections d'auxiliaires à baisse de tension ou de fréquence, etc.

I.2.3 Phénomènes dynamiques lents

On qualifie de dynamiques lents les phénomènes présentant des constantes de temps de plusieurs dizaines de secondes, voire de minutes ou de dizaines de minutes, tels les échanges thermiques dans les chaudières, l'échauffement du rotor des alternateurs ainsi que l'action des régulateurs des prises des transformateurs, des réglages secondaires de tension et de fréquence-puissance, etc.

Lorsqu'on étudie ces phénomènes, la fréquence est considérée comme égale en tout point du réseau. Compte tenu de leur rapidité (fréquence de l'ordre du hertz), on néglige les oscillations entre les rotors des différentes machines qui ont de ce fait même vitesse et même accélération (hypothèse dite des rotors liés).

Aux équations du calcul de répartition de charge décrivant le réseau, on ajoute les équations différentielles représentant le fonctionnement dynamique des chaudières et turbines, l'équation mécanique simplifiée des masses tournantes et les régulations locales ou centralisées qui interagissent avec les phénomènes simulés. La régulation primaire de tension, rapide, est traitée algébriquement.

Le modèle de simulation des phénomènes dynamiques lents apporte, par rapport à l'approche quasi stationnaire, une amélioration importante concernant le calcul de l'évolution de la fréquence traduisant l'équilibre dynamique production-consommation. Ce modèle peut aussi être utilisé pour la simulation des écroulements de tension.

Les phénomènes dynamiques lents étant directement observables par les opérateurs des réseaux, au travers du système d'acquisition, le modèle de simulation correspondant est généralement utilisé pour le développement du moteur de simulation des simulateurs d'entraînement. Encore une fois, négliger les phénomènes dynamiques plus rapides n'est acceptable que dans la mesure où ceux-ci sont stables et qu'aucun seuil (de protection) n'est dépassé durant les transitoires négligés, provoquant une bifurcation de la trajectoire à long terme du système.

I.2.4 Phénomènes transitoires électromécaniques

Cette classe de phénomènes est liée au comportement des générateurs quant à leur marche synchrone. Elle concerne au premier chef le comportement mécanique oscillatoire des générateurs autour de leur position d'équilibre correspondant au régime synchrone.

Il n'est plus question ici, comme pour les phénomènes dynamiques lents, de simplifier le mouvement des rotors : la vitesse de rotation d'une machine est une variable qui lui est propre. Les grandeurs électriques resteront supposées suivre un régime sinusoïdal établi (représentation sous forme de phaseurs, variables complexes définies par un module et une phase) et une fréquence moyenne sera définie pour décrire les tensions et courants dans le réseau qui restent des variables algébriques.

De façon générale, on distingue deux grandes classes de transitoires électromécaniques.

I.2.4.1 Phénomènes de faible amplitude

Ces phénomènes concernent le comportement oscillatoire résultant de fluctuations normales, de faible amplitude, des grandeurs électriques ou mécaniques.

Il est bien connu que les oscillations rotoriques sont souvent peu amorties. D'autres comportements oscillatoires peuvent trouver leur origine dans les régulations (de tension en particulier). Un amortissement insuffisant ou inexistant peut apparaître pour certaines conditions d'exploitation rendant celles-ci non viables. L'étude de l'amortissement des oscillations de réseau est une activité usuelle des ingénieurs au niveau de la planification et de la conception et du réglage des régulations.

On définit la **stabilité en petit mouvement** d'un système électrique, ou sa stabilité statique, comme sa capacité de retrouver, après avoir subi n'importe quelle « petite perturbation », un état d'équilibre identique ou très proche de son état initial.

La 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. La simulation numérique constitue également un moyen efficace d'étude pour autant que l'algorithme d'intégration ait la précision requise en ce qui concerne la restitution de l'amortissement.

I.2.4.2 Phénomènes de grande amplitude

Ces phénomènes se produisent lors de perturbations majeures du régime de fonctionnement tels un court-circuit dans le réseau, un déclenchement d'ouvrage, provoquant un déséquilibre important entre le couple moteur et le couple résistant des alternateurs.

On définit la **stabilité transitoire** d'un système électrique face à une perturbation ou un cycle de perturbations comme étant sa capacité à retrouver un point d'équilibre où toutes les machines sont au synchronisme.

I.2.5 Phénomènes électromagnétiques

Ces phénomènes électromagnétiques se manifestent sous forme de propagation des ondes de tension en cas de manœuvre d'ouvrage, de court-circuit, de foudre ou lors du fonctionnement classique....