

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux Electriques

Présenté par
BELLIL Cylia
TOMO Cremildo Calisto

Thème

ETUDE PAR MATLAB DE LA STABILITE TRANSITOIRE D'UN SYSTEME ENERGETIQUE PAR LE CRITERE D'EGALITE DES AIRES

Mémoire soutenu publiquement le 08 Juillet 2018 devant le jury composé de :

M Arezki DICHE

Maitre Assistant Classe A, UMMTO Président

M Karim HADJ SAID

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Rapporteur

M Azzouz MIOUAT

Maitre Assistant Classe A, UMMTO Examineur

Remerciements

Avant tout propos, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force physique et intellectuelle pour mener a terme le présent travail.

Nous remercions notre promoteur Mr HADJ Saïd pour sa disponibilité, son soutien et ses orientations pour l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions également tous les enseignants du département d'électrotechnique de l'université Mouloud MAMMERRI de Tizi- Ouzou, pour les efforts qu'ils fournissent pour promouvoir le niveau de formation des étudiants.

Nous sommes très heureux de pouvoir exprimer toute notre gratitude envers le président du jury et tous les membres pour nous avoir fait honneur d'examiner ce mémoire.

Touts ceux qui nous ont soutenus le long de notre cursus, de prés et de loin.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents.

A mes frères et sœurs.

A tout mes amis.

Cyflia

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A mes grands parents, mon père, ma mère
et ma famille en générale*

*A mes amis, qui sont avec moi dans les
moments les plus difficiles*

*A tous les personnes qui me donnent des
conseils même si cela me blesse*

A tous ceux qui croient a ma réussite

Cremildo

TABLE DE MATIERE

Introduction générale.....	Error! Bookmark not defined.
Chapitre I:Généralités sur les réseaux électriques	
1.1 Introduction	3
1.2 Système électrique	3
Définition	3
Principaux éléments d'un réseau.....	3
Stabilité des systèmes électriques	7
1.3 Conclusion	10
Chapitre II:Théorie sur la stabilité transitoire des systèmes électriques	
2.1 Introduction.....	12
2.2 Stabilité d'un système électrique	12
2.3 Stabilité transitoire d'un système mono-machine.....	15
2.3.1. Définitions.....	15
2.3.2. H : Constante d'inertie	15
2.3.3. Angle interne (δ).....	15
2.3.4. Distance électrique	15
2.3.5. Flux de charge(load flow)	15
2.3.6. Plan de tension	15
2.3.7. Puissance synchronisante	15
2.3.8. Réactance transitoire	16
2.3.9. Réactance subtransitoire	16
2.3.10. Réseau infini(jeu de barres infini)	16
2.4 Charge de l'alternateur en régime transitoire	16
2.5 Critère d'égalité des aires	18
2.5.1 Angle et temps critiques	26
2.5.2 Les aires A1 et A2	26
2.5.3 Angle critique	27
2.5.4 Temps critique	27
2.6 Modélisation	27
2.6.1 Modèle de Park de l'alternateur	27
2.6.2 Modèle en π de la ligne	29
2.7. Régulation conventionnelle	29
2.7.1. Régulation de la tension.....	30

2.8. Conclusion	32
Chapitre III:Simulation par Matlab d'un système énergétique	
3.1. PARTIE CALCUL	34
3.1.1.CAS 1 : Quand il y a une augmentation soudaine de la puissance absorbée.....	34
3.1.2.CAS: 2 : Quand il y a apparition de défaut.....	38
PARTIE	
3.2. PARTIE SIMULATION	46
3.2.1.CAS 1 : Quand il y a une augmentation soudaine de la puissance absorbée.....	46
3.3. PARTIE INTERPRETATION	50
3.3.1.Cas 1 : Etude de la stabilité lors d'une augmentation soudaine de la puissance absorbée	50
3.3.2.Cas 2 : Etude de la stabilité lors d'apparition d'un défaut triphasé (court-circuit)..	52
Conclusion générale	
Bibliographie	
Annexes.	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La demande en électricité double à chaque décennie, pour satisfaire cette demande, les réseaux électriques sont exploités à leurs limites, ce qui rend les réseaux électriques vulnérables sur le plan de sa stabilité et sécurité. L'étude de la stabilité des réseaux électriques est devenue indispensable pour les exploitants des réseaux.

Les générateurs synchrones sont considérés comme la principale source de production d'énergie dans les réseaux électriques. De plus, les machines synchrones sont très répandues dans l'industrie. Dans la pratique, les études de stabilité se consacrent à l'analyse dynamique du comportement de ces machines à la suite d'une perturbation.

Pour un réseau électrique en fonctionnement stable, la puissance mécanique de la turbine entraînant un générateur et la puissance électrique fournie par celui-ci sont équilibrées (en négligeant les pertes) pour toute machine. Lorsque le réseau subit une perturbation importante lié aux phénomènes transitoires, la différence entre les puissances mécanique et électrique induit une accélération ou une décélération pouvant entraîner la perte de synchronisme d'un ou de plusieurs générateurs. Les angles rotoriques commencent à osciller jusqu'à l'intervention des systèmes de régulation de tension et de vitesse afin de restituer la marche en synchronisme et mener le réseau à un nouvel état de fonctionnement stable.

Pour l'étude ou l'analyse de la stabilité des réseaux, plusieurs méthodes sont utilisées, dans ce travail nous avons appliqué le critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion) qui est une méthode classique très simple à implémenter qui permet l'analyse de la stabilité transitoire des réseaux électriques.

Pour entamer notre travail, nous avons donné les généralités des réseaux électriques où nous avons décrit les différents moyens qui le constituent, les perturbations, les phénomènes engendré par ces perturbations et les notions de la stabilité.

Le Second chapitre est consacré à l'étude d'un système électro-énergique qui consiste en une machine synchrone liée par une ligne de transmission à un jeu de barre infini soumis à des perturbations et aussi le critère d'égalité des aires pour l'étude de la stabilité.

Dans le troisième chapitre des programmes Matlab ont été élaboré afin d'analyser la stabilité d'un générateur synchrone relié à un jeu de barres infini par l'intermédiaire de ligne

de transmission de l'énergie électrique lors de perturbations : augmentation soudaine de la puissance mécanique, et court-circuits dans une ligne électriques.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

1.1 Introduction

L'énergie électrique est devenue de plus en plus indispensable dans les activités humaines, sa demande ne cesse d'augmenter. L'énergie électrique est produite dans des sites particuliers (barrages, centrales nucléaires...) et elle est utilisée dans des centres de consommation souvent éloignés des sites de production (agglomérations urbaines, concentrations industrielles,...). Il faut donc produire, transporter et distribuer aux différents consommateurs par intermédiaire des différents éléments qui constituent les réseaux électriques. Pour que l'énergie soit consommable il est nécessaire qu'elle respecte quelques normes représentant sa qualité telle que la constance de la fréquence et de la tension. Ces réseaux sont souvent le siège de diverses perturbations qu'influencent sur la stabilité. Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu sur les différents éléments constituent le réseau électrique ainsi que les différents perturbations sur le réseau, vers la fin nous avons défini quelques notions de la stabilité des réseaux électriques.

1.2 Système électrique

Définition

Un système électrique est un ensemble des moyens qui assurent la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique vers les différents consommateurs. Cette énergie doit présenter une qualité telle que la constance de la tension et de la fréquence.

L'énergie électrique est produite dans les centrales électriques à partir des générateurs électriques (machines synchrones), les générateurs sont entraînés par des turbines qui peuvent être à vapeur ou hydraulique. A la sortie de la centrale électrique, la tension est élevée par des transformateurs et acheminée par intermédiaire des lignes électriques de très haute tension (THT) pour minimiser les pertes par affect joule.[1]

Principaux éléments d'un réseau

Les principaux constituants d'un système électrique sont:

- Les unités de production,
- Les liaisons du réseau,
- Les dispositifs de réglage de la tension et de la compensation de l'énergie réactive,
- Les dispositifs de réglage de la fréquence et de la compensation de l'énergie active,
- Les charges.[1]

1.2.1.1 La turbine

La turbine est un dispositif mécanique, relié à l'arbre de l'alternateur, son rôle est de transformer la puissance de l'énergie primaire en puissance mécanique transmise à l'alternateur.[1][2][3]

1.2.1.2 L'alternateur

1.2.1.2.1 Définition

L'alternateur est une machine électromagnétique destinée à fournir des tensions alternatives. Il se compose d'un induit au stator et d'un inducteur au rotor. Le stator est un cylindre creux comportant sur sa face intérieure des encoches parallèles à l'axe, dans lesquelles sont longés les conducteurs des trois phases (enroulements identiques a, b et c) décalés de $2\pi/3$. [3]

Ces enroulements sont le siège d'une force électromotrice (f.é.m.) créée par la variation de flux due à la présence d'un champ tournant dans l'entrefer de la machine [2][3][4]. Le rôle du rotor est de réaliser, dans l'entrefer, un champ tournant à partir des enroulements en courant continu (enroulement d'excitation). Il est entraîné par une turbine à vapeur ou hydraulique, qui fournit l'énergie mécanique.

1.2.1.2.2 Hypothèses simplificatrices

On prend en considération certaines hypothèses simplificatrices que nous énumérons comme suit [3] :

- La machine est supposée non saturée ;
- La constante d'inertie est supposée fixe, puisque les variations de la vitesse du rotor sont petites ;
- Le flux tournant est supposé constant durant les premiers instants qui suivent l'apparition de la perturbation ;
- Les amortissements sont négligés.

1.2.1.3 Transformateur

Le transformateur est une machine électrique statique à courant alternatif qui permet de modifier la tension et le courant dans un circuit électrique, selon le besoin sur le réseau, grâce aux transformateurs, l'énergie électrique est transportée à des très hautes tensions pour minimiser les pertes.[1][3]

1.2.1.4 Les lignes électriques

Les lignes électriques sont définies comme étant la route de l'électricité, elles sont caractérisées par sa résistance, une réactance inductive, réactance capacitive et leurs admittances. Ces impédances sont uniformément réparties sur la ligne.[1][3][5]

1.2.1.5 Les dispositifs de protection

L'exploitation des réseaux électriques nécessite l'emploi de nombreux appareils classés selon leur utilisation. L'acheminement de l'énergie électrique est réalisées par des câbles isolés par différents types d'isolants sur le chemin de ces conducteurs on dispose un ensemble d'appareils pour adapter l'énergie aux contraintes de sécurité et d'utilisation.[5]

1.2.1.5.1 Les sectionneurs

Sont disposées pour couper ces réseaux aux différents endroits, cette coupure est réalisée hors tension.

1.2.1.5.2 Les interrupteurs

Présentent un pouvoir de coupure sont également utilisés pour commander et couper les circuits en charge.

1.2.1.5.3 Les fusibles

Les fusibles protègent par fusion de l'élément conducteur.

1.2.1.5.4 Les disjoncteurs

Ils on pour fonction de couper rapidement des courants intenses (court-circuits) suit à un incident.

1.2.1.6 Les charge

Il existe différents types de charges électriques, les inductives, résistives, capacitives. Elles sont divisées en charges passives et charges d'électronique de puissance.[6]

1.2.1.6.1 Charges passives

Ces sont des consommateurs tels que l'éclairage, le chauffage, les machines asynchrones, machines synchrones dont les lois de variation électrique sont du type : $P =$

$$\left[\frac{V}{V_n}\right]^\alpha * P_n , \quad Q = \left[\frac{V}{V_n}\right]^\beta * P_n ; \text{ avec } \alpha \text{ et } \beta \text{ caractéristiques de la charge.}[6]$$

1.2.1.6.2 Charges « électronique de puissance »

Un grand nombre de récepteurs : cuves à électrolyse, moteurs à vitesse variable, chauffage à gradateur, etc., entrent dans cette famille de charges. Ces récepteurs ont en général en commun une forte sensibilité aux variations de tension. Par exemple, un moteur à vitesse variable peut être arrêté complètement pour une variation de tension de l'ordre de $\pm 15\%$. A cela, peut se rajouter une sensibilité aux variations de fréquence, donc ces appareils font partie des récepteurs sensibles aux problèmes de stabilité des grandeurs électriques. Il en est de même pour les matériels informatiques.[6]

1.2.1.7 Perturbations

Les réseaux électriques sont le siège de diverses contraintes et perturbations qui rend l'exploitation des réseaux électriques complexes, telle que le fait que l'énergie électrique ne pas stockable en grande quantité, donc il faut produire à tout moment la puissance demandée et maintenir l'équilibre entre la production et la consommation, ces réseaux sont également le siège des perturbations qui peuvent être classées par des petites et des grandes perturbations, en ce qui concerne les grandes perturbations (les courts-circuits, l'ouverture d'une ligne de transport à haute puissance, la perte d'un ou plusieurs générateurs, l'augmentation soudaine de la puissance demandée...), ces perturbations peuvent influencer sur la stabilité des réseaux électriques.[1][3]

1.2.1.7.1 Définition d'une perturbation

Une perturbation est un événement non planifié qui provoque un fonctionnement anormal du réseau électrique.[1]

1.2.1.7.2 Catégories de perturbations sur un réseau

Le réseau peut être confronté à diverses perturbations regroupées en quatre familles, à savoir [1] [3] :

- Les variations de la consommation,
- Les perturbations climatiques (coups de foudre, les variations importantes de la température, la neige...etc.),
- Les défaillances des protections, d'automates et des régulations,
- Les défaillances humaines dans la maintenance et les circonstances particulières d'exploitation (les fausses manœuvres dans la maintenance, les défauts d'isolation, les mauvaises prévisions de la consommation...etc.).

1.2.1.7.3 Phénomènes engendrés par les perturbations

- Les pertes d'éléments,
- Les grandes oscillations,
- Les déséquilibres entre les couples électriques et mécaniques de la turbine
- Les court-circuits,
- Les variations de la tension,
- Les variations de la fréquence.

L'ensemble de ces phénomènes causés par les perturbations peut provoquer l'instabilité du réseau, qui est pour le cas des grandes perturbations, la perte de synchronisme entre les générateurs et le réseau ou stabilité transitoire.[1][3]

Stabilité des systèmes électriques

1.2.1.8 Définition

La stabilité d'un système fait référence à la capacité d'un système à revenir à son état stable lorsqu'il est soumis à une perturbation; Comme mentionné précédemment, la puissance est générée par des générateurs synchrones fonctionnant en synchronisme avec le reste du système. Un générateur est synchronisé avec un bus lorsque les deux ont la même fréquence, la même tension et la même séquence de phase. Nous pouvons donc définir la stabilité du système de puissance comme la capacité du système de puissance à revenir à l'état d'équilibre sans perdre le synchronisme. Habituellement, la stabilité du système d'alimentation est catégorisée en Stabilité Statique, Transitoire et Stabilité dynamique.[1][2][7][8]

La figure suivante représente les différentes catégories de stabilité des réseaux électrique.[4][6][7]

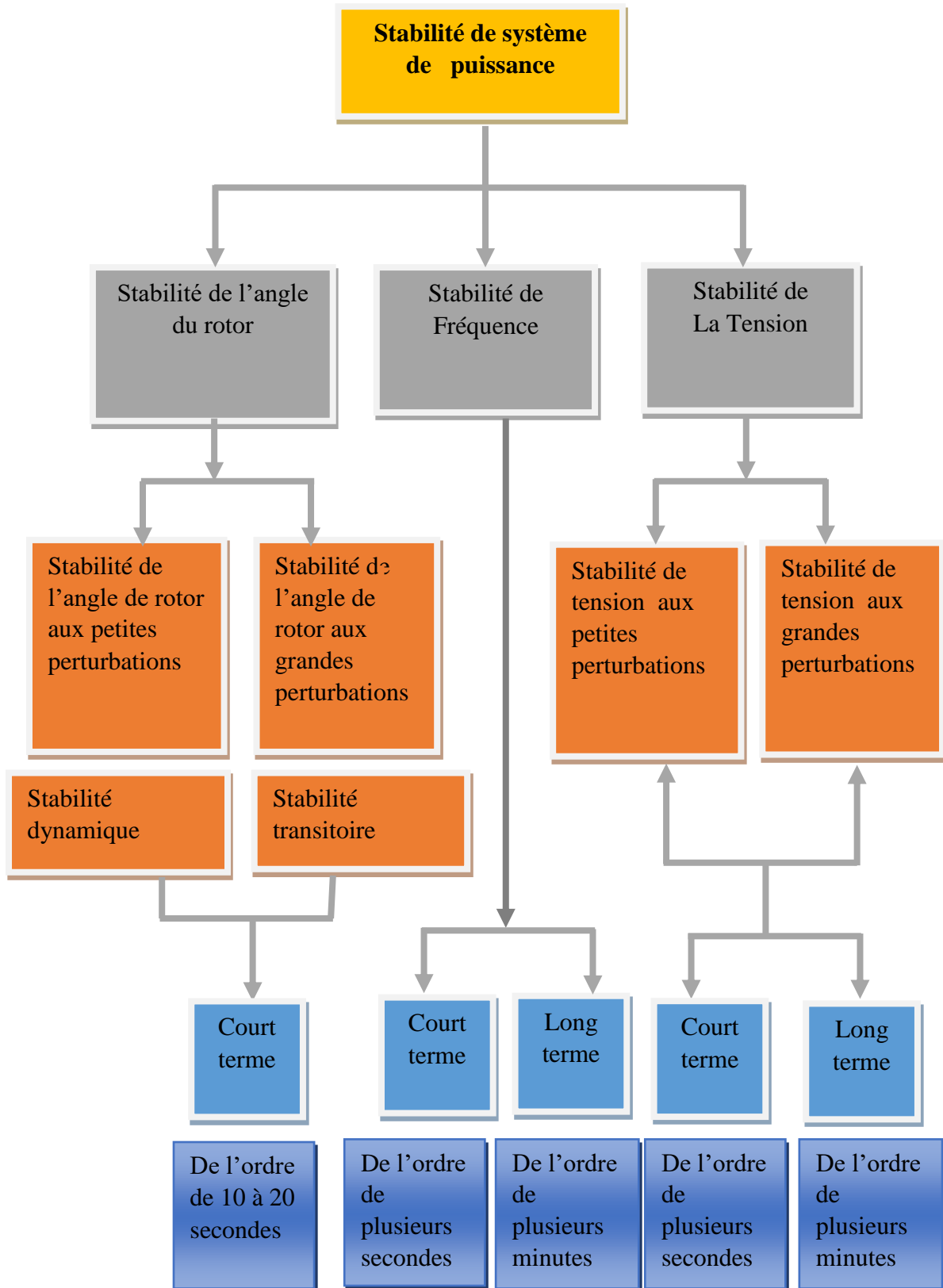


Fig. I.1. Classification de différents types de stabilité d'un système de puissance

1.2.1.9 Stabilité statique

La stabilité statique se limite à des changements mineurs et graduels dans les conditions de fonctionnement du système. Dans ce domaine, concentrez-vous essentiellement sur la limitation des tensions de bus près de leurs valeurs nominales. Nous veillons également à ce que les angles de phase entre deux bus ne soient pas trop grands et à vérifier la surcharge de l'équipement électrique et des lignes de transmission. Ces vérifications sont généralement effectuées à l'aide d'études de flux d'énergie.[4][6][7]

1.2.1.10 Stabilité Dynamique

La capacité d'un système de puissance à maintenir sa stabilité sous de petites perturbations continues est étudiée sous le nom de **Stabilité Dynamique** (également connue sous le nom de stabilité de petit signal). Ces petites perturbations se produisent en raison des fluctuations aléatoires des charges et du niveau des générations.[4][6][7]

1.2.1.11 La stabilité de l'angle de rotor (transitoire)

« 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 ».

Etant donné que la génération de puissance électrique dépend principalement des machines synchrones, un aspect important est le fonctionnement de ces générateurs au synchronisme [7]. Au synchronisme, les rotors de chaque machine synchrone du système tournent à la même vitesse électrique et les angles entre les champs magnétiques, rotoriques et statoriques, restent constants.

En fonctionnement nominal équilibré, la puissance électrique fournie par le générateur aux charges est égale à la puissance mécanique fournie par la turbine en négligeant les pertes. Quand le système est perturbé, la puissance électrique de la machine varie rapidement, mais la variation de puissance mécanique fournie à la machine est relativement lente. En raison de cette différence de vitesse de réponse, un écart temporaire d'équilibre de puissance a lieu. Par conséquent, ce déséquilibre de puissance entraîne une variation des couples agissant sur le rotor. Ceci entraîne une accélération ou décélération du rotor selon le sens du déséquilibre, voire un glissement du champ de synchronisme en entraînant une perte de synchronisme du générateur avec le reste du système [8][10]. Si l'équilibre de puissance n'est pas rétabli, la machine est

mise hors service par une protection de survitesse ou de perte de synchronisme, et la stabilité du système est mise en danger.

Suite à une perturbation au système, le facteur principal qui détermine l'évolution de l'état du système est l'écart entre les angles de rotor. (Les angles sont mesurés par rapport à une référence tournante au synchronisme). Nous pouvons dire que les angles de rotor d'un système de puissance peuvent évoluer selon deux scénarios:

- Soit, les angles de rotor s'accroissent ensemble et oscillent à l'unisson. Ils peuvent éventuellement atteindre de nouvelles valeurs stables. Tant que les écarts entre les angles de rotor restent constants, le système reste stable et il demeure au synchronisme.
- Soit, un ou plusieurs angles de rotor s'accroissent plus rapidement que les autres. Alors, les écarts entre les angles de rotor divergent dans le temps. Le système devient par conséquent instable et il perd le synchronisme.

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 aperiodique de certains angles de rotor. Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation (First Swing Instability). 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). La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes.[8][10][11]

L'étude de la stabilité des systèmes électriques est devenue d'une importance capitale, puisque les réseaux électriques sont dans les dernières années exploités presque dans leurs limites de stabilité voire même dans leurs limites de stabilité, pour ce faire plusieurs méthodes permettent l'étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques, dans ce présent travail nous allons nous intéresser à la méthode d'égalité des aires qui sera l'objet du chapitre suivant.

1.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différents éléments qui constituent les réseaux électriques, les différentes perturbations qui affectent le réseau et sa stabilité avec plus de détails

sur la stabilité transitoire qui représente le phénomène de perte de synchronisme des générateurs et le réseau après avoir subis une perturbation.

CHAPITRE II

THEORIE SUR LA STABILITE TRANSITOIRES DES SYSTEMES ELECTRIQUES

2.1 Introduction

Nous avons rappelé dans ce chapitre les concepts de la stabilité transitoire, les équations classiques des réseaux, la représentation des équations des machines dans le repère de Park qui permet d'étudier leur stabilité transitoire.

Nous avons également étudié les équations du mouvement des machines et établi l'équation de la puissance électrique fournie au réseau.

Le critère d'égalité des aires fait l'objet de ce chapitre, c'est une méthode classique très efficace que nous permet d'étudier et de comprendre le phénomène de la stabilité transitoire.

Pour achever ce chapitre nous avons présenté deux régleurs, celle de la tension et de la vitesse qui jouent un rôle très important dans la stabilisation des réseaux électriques.

2.2 Stabilité d'un système électrique

La stabilité d'un système électrique est son aptitude, à partir d'une situation initiale de fonctionnement donnée, à revenir à un état d'équilibre de fonctionnement après avoir subi une perturbation physique, la plupart des variables du système étant liées de façon que pratiquement l'ensemble du système reste intact.[1][10][13]

Le système considéré est :

$$\dot{x} = f(t, x)$$

Où :

x , est le vecteur d'état fonction du temps,

\dot{x} , est sa dérivée,

f , est suffisamment différentiable et son domaine inclut l'origine.

Le système est dit autonome si $f(t, x)$ est indépendante de t , et non autonome dans le cas contraire.

Le concept de stabilité partielle est utile pour classer dans différentes catégories de stabilité des systèmes électriques.

Une des classifications possibles de la stabilité d'un système électrique peut s'appuyer sur les considérations suivantes :

- La nature physique du mode d'instabilité constatée, indiquée par la principale variable du système affectée par l'instabilité.
- L'importance de la perturbation considérée.
- Les appareils, les processus et la durée à prendre en compte pour évaluer la stabilité.

La fig.II.1 donne une vue d'ensemble du problème de stabilité des réseaux électriques avec identification des catégories et sous catégories [4].

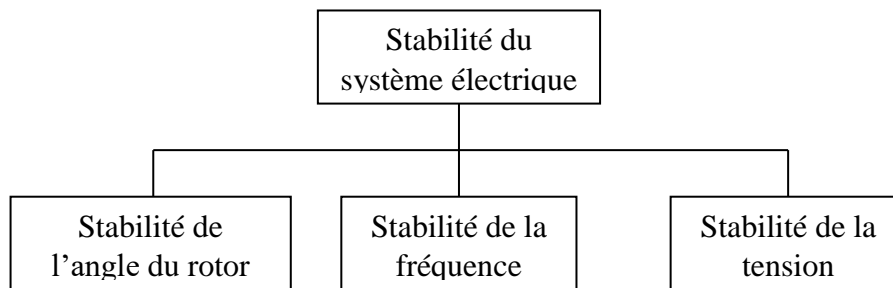


Fig.II.1 classification de la stabilité d'un système électrique

La classification facilite l'identification des causes d'instabilité, l'application des outils d'analyse adaptés et la mise au point de mesures correctives. Une situation donnée peut toutefois ne pas provoquer l'apparition d'une seule et même forme d'instabilité. Ce point se vérifie en particulier dans les réseaux soumis à de très fortes contraintes et dans le cas d'événements en cascade. En cas de défaillance, une certaine forme d'instabilité peut en amener une autre.[4][6][13]

Il est cependant important de savoir distinguer les différentes formes pour comprendre les causes sous-jacentes des problèmes et élaborer des procédures de conception et d'exploitation de réseaux.

Si efficace et commode que soit cette classification pour traiter les complexités du problème, il convient de garder toujours à l'esprit le souci de la stabilité globale du système. Les solutions apportées aux problèmes d'une catégorie ne doivent pas l'être au détriment d'une autre. Il est essentiel de prendre en compte tous les aspects des phénomènes d'instabilité, et ce de plusieurs points de vue.

L'analyse de la stabilité fait donc partie intégrante de l'évaluation de la sécurité et de la fiabilité d'un réseau.

La fiabilité d'un système électrique désigne la probabilité de fonctionnement satisfaisant qu'il offre à long terme. Elle caractérise son aptitude à fournir, de façon quasi continue, une alimentation électrique adéquate, avec peu d'interruptions sur une longue durée.

La sécurité d'un système électrique désigne le niveau de risque pouvant affecter son aptitude à surmonter des perturbations imminentes (imprévue) sans interruption de service au client. Elle caractérise sa résistance à ces perturbations, elle dépend donc de la probabilité de ces dernières et des conditions d'exploitation du réseau.

La fiabilité est le principal objectif de la conception et de l'exploitation d'un système électrique. Pour être fiable, ce dernier doit être sûr la plupart du temps. Pour être sûr, il doit non seulement être stable, mais encore offrir une sécurité contre des imprévus n'entrant pas dans la catégorie des problèmes de stabilité, à savoir des dommages subis par les équipements.

On peut encore distinguer la sécurité d'un réseau de sa stabilité du point de vue des conséquences d'un incident. Par exemple, deux réseaux peuvent avoir des marges de stabilité égales, alors que l'un d'eux présentera une plus grande sécurité en raison des conséquences moins graves qu'aurait son instabilité [4].

Une étude de stabilité consiste donc à analyser le comportement électrique et mécanique des alternateurs entre le moment où la perturbation apparaît et le moment où elle est éliminée, et déduire en fonction des conditions de perturbation et de l'équipement du réseau si celui-ci retrouve ou pas les conditions normales de fonctionnement. Les principaux aspects des performances d'un alternateur sont les suivants :

- l'aspect électrique fait intervenir les équations classiques des réseaux, les machines étant représentées par les équations dans le repère de Park qui permet d'étudier leurs régimes transitoires [3][12] ;
- l'aspect dynamique est décrit par les variations des caractéristiques du réseau autour d'un état d'équilibre. Il fait intervenir les fonctions de transfert des régulations de vitesse et de tension ;
- l'aspect mécanique est lié à la vitesse des machines, les équations mécaniques de chaque machine prenant en compte son moment d'inertie J et les caractéristiques du couple de la charge.

2.3 Stabilité transitoire d'un système mono-machine

2.3.1. Définitions

Avant d'entamer l'étude de la stabilité transitoire nous allons donner quelques définitions [5]

2.3.2. H : Constante d'inertie

Homogène à un temps, qui caractérise la sensibilité de la vitesse d'une machine à des variations de la puissance électrique.

Noter : L'importance de l'inertie des masses tournantes (moteur plus machine entraînée) caractérisée par sa constante d'inertie H qui exprime la sensibilité de la vitesse de la machine à des variations de tension ou de charge :

$$H = \frac{\text{énergie cinétique tournante nominale}}{\text{puissance électrique apparente nominale}}$$

2.3.3. Angle interne (δ)

Angle entre le vecteur représentant la tension d'alimentation d'une machine et le vecteur représentant sa force électromotrice.

2.3.4. Distance électrique

Impédance de liaison. Deux liaisons électriques de même longueur pourront avoir des distances électriques très différentes.

2.3.5. Flux de charge (load flow)

Bilan des puissances actives et réactives échangées sur les liaisons d'un réseau.

2.3.6. Plan de tension

Ensemble des procédures automatiques et manuelles prévues pour maintenir le réseau dans les plages de tension de fonctionnement qui lui sont assignées.

2.3.7. Puissance synchronisante

Caractérise le point de fonctionnement d'un générateur : Rapport entre variation de puissance fournie et variation d'angle interne. Plus il est faible, plus on risque une perte de synchronisme en survitesse.

2.3.8. Réactance transitoire

Impédance d'une machine intervenant dans la première seconde suivant une perturbation.

2.3.9. Réactance subtransitoire

Impédance d'une machine intervenant dans les 100 premières millisecondes suivant une perturbation.

2.3.10. Réseau infini (jeu de barres infini)

Est défini comme étant un réseau pour laquelle on peut supposer que le débranchement d'un générateur au système n'a aucune influence ou bien une influence minimale sur le plan de la tension et de la fréquence.

2.4 Charge de l'alternateur en régime transitoire

Un réseau électrique est dit en régime de stabilité transitoire relativement à un cycle de défauts "grandes" si à la suite de ce cycle de défauts, il trouve un état de régime permanent de marche synchrone.

La fig.II.2 représente le schéma simple d'un alternateur connecté par un transformateur de réactance X_T et une ligne de réactance X_L à un réseau de puissance infinie. Ce type de réseau est caractérisé par une tension \bar{V}_r constante en module et en phase quels que soient les phénomènes affectant le réseau situé en amont qui lui est raccordé. Dans le système mono-machine de la fig.II.2 ci-dessous, toutes les résistances (induit de l'alternateur et ligne) et les admittances transversales sont négligées.[11][13]

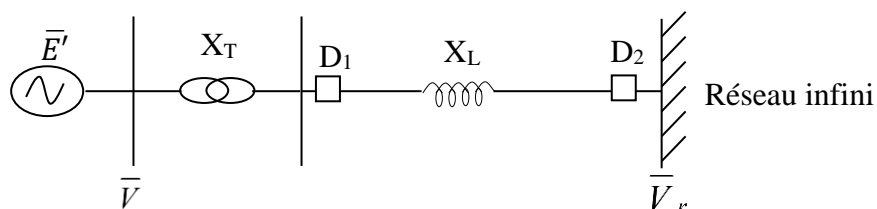


Fig.II.2 Réseau mono-machine

V est la tension aux bornes de l'alternateur, D_1 et D_2 sont les disjoncteurs d'extrémité de la ligne, X_T est la réactance de court-circuit du transformateur et X_L la réactance de la ligne. En notant X_d' la réactance transitoire de la machine et \bar{E}' sa f.e.m derrière cette réactance, on a le schéma équivalent de la fig.II.3.

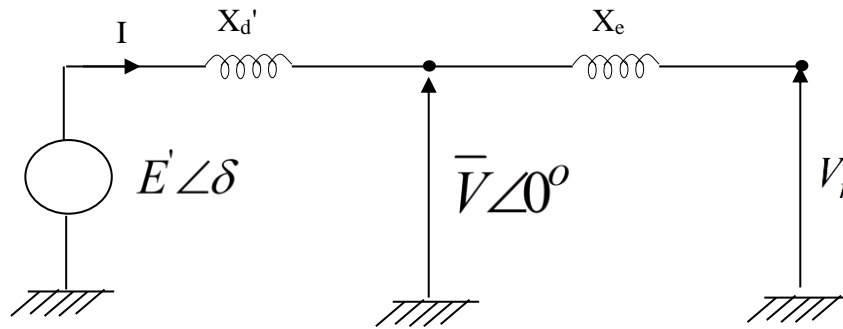


Fig.II.3 Schéma équivalent de la machine en régime transitoire

$$X_e = X_T + X_L$$

La puissance électrique active fournie par la machine [10] :

$$P_e = \frac{E'V}{X_d'} \sin \delta \tag{2.1}$$

Le schéma vectoriel des tensions, dans ce cas, est celui de la figure 1.4.

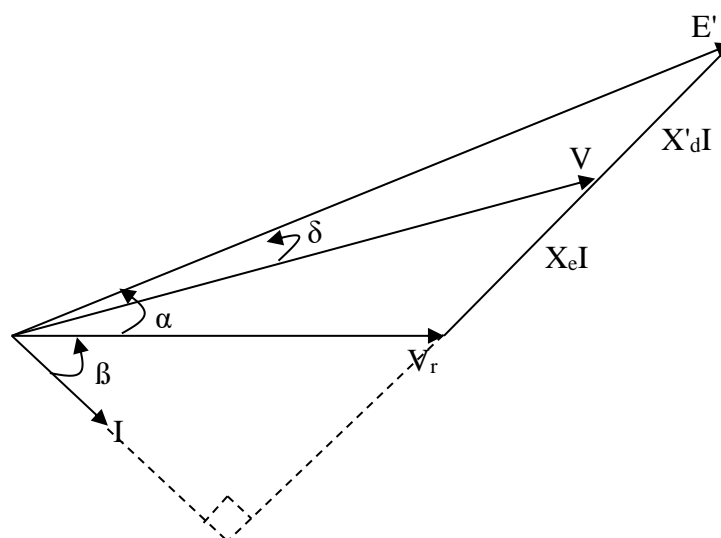


Fig.II.4 Schéma vectoriel de tensions en régime transitoire

En posant :

$$P_{\max} = \frac{E'V}{X_d'} \quad (2.2)$$

L'expression (1.3) s'écrit :

$$P_e = P_{\max} \sin \delta \quad (2.3)$$

D'où la courbe de charge de la figure 1.5.

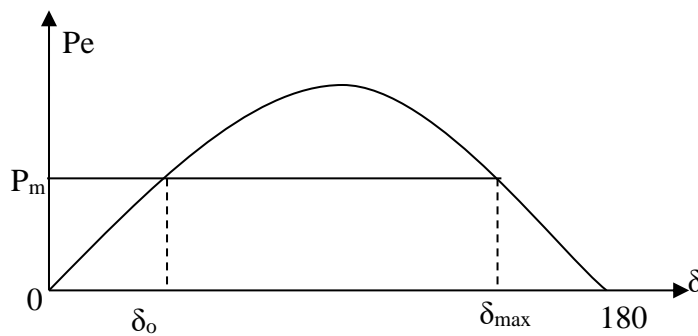


Fig.II.5 Courbe de charge

2.5 Critère d'égalité des aires

L'équation de mouvement du rotor de la machine considérée sans amortissement est donnée par la relation:[9][10][14]

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.4)$$

On désigne par ω_s et ω_m (fig.II.4) les pulsations mécaniques des champs statorique et rotorique.

Avec :

J : moment d'inertie de l'ensemble des masses rotorique en kg.m^2 ;

θ_m : Position angulaire du rotor par rapport à un axe de référence fixe lié au stator en radians mécaniques;

t : temps en secondes;

T_m : couple mécanique d'entraînement de la machine sans les pertes dues à la rotation en N.m;

T_e : couple électromagnétique en N.m;

T_a : couple d'accélération en N.m.

La fig.II.6 représente la disposition vectorielle des champs statorique et rotorique. On désigne respectivement par ω_{sm} et ω_m les pulsations mécaniques des champs statorique et rotorique.

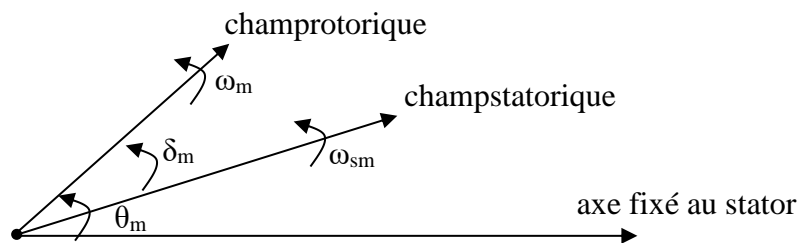


Fig.II.6. Disposition vectorielle des champs statorique et rotorique

θ_m : étant mesuré par rapport à un axe fixe, c'est donc une mesure absolue de l'angle rotorique.

Par conséquent, cet angle croît d'une manière continue avec le temps même à la vitesse synchrone. Comme c'est la vitesse relative du rotor par rapport à la vitesse synchrone (autrement dit la vitesse du champ rotorique par rapport à celle du champ statorique) qui nous intéresse, il est plus commode de mesurer la position angulaire du rotor par rapport à un axe de référence tournant à la vitesse synchrone. Ce sera l'angle δ_m .

Dans ce cas, θ_m est tel que :

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.5)$$

Avec:

ω_{sm} : vitesse de synchrone de la machine en radians mécaniques par seconde

δ_m : position angulaire du champ rotorique par rapport à celle du champ statorique en radians mécaniques.

En utilisant (2.5), on peut écrire (2.4) sous la forme :

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.6)$$

En définissant la vitesse angulaire du rotor par :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.7)$$

On peut écrire (2.4) sous la forme :

$$J\omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.8)$$

Avec :

$P_m = T_m \cdot \omega_m$ est la puissance mécanique fournie par la turbine;

$P_e = T_e \cdot \omega_m$ est la puissance électromagnétique en watts;

On désigne par l'énergie cinétique de la machine à la vitesse synchrone :

$$W_c = \frac{1}{2} J\omega^2 = \frac{1}{2} J\omega_{sm}^2 \quad (9.9)$$

On définit la constante d'inertie de la machine par :

$$H = \frac{W_c}{S_{mach}} \quad (2.10)$$

Où :

W_c est l'énergie cinétique de la machine;

S_{mach} désigne la puissance apparente nominale de la machine synchrone en VA;

H est exprimé en secondes.

En remplaçant dans (2.8) $J\omega_m$ par son expression tirée de (2.9) et en utilisant (2.10), on peut écrire (2.8) sous la forme:

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_m}{S_{mach}} - \frac{P_e}{S_{mach}} \quad (2.11)$$

L'angle et la pulsation électriques sont liés aux grandeurs mécaniques de même nom par les relations suivantes:

$$\delta = p \delta_m$$

$$\omega = p \omega_m$$

$$\omega_s = p \omega_{sm}$$

Où : p est le nombre de paires de pôles de la machine;

δ est l'angle rotorique électrique en rad;

ω est la pulsation rotorique électrique en rad/s;

ω_s est la pulsation synchrone électrique en rad/s.

En tenant compte des expressions ci-dessus, l'équation (2.11) s'écrit :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.12)$$

P_m et P_e sont exprimés en p.u.

Il est clair que l'expression (2.11) est analogue à l'expression (2.12). Ceci montre que l'angle et la vitesse peuvent être exprimés dans l'équation du mouvement indifféremment en grandeurs électriques ou en grandeurs mécaniques.

La différentiation de (2.5) donne:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.13)$$

En passant aux grandeurs électriques, on obtient:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \tag{2.14}$$

Les équations (1.12) et (1.14) constituent le système d'équations différentielles liées au mouvement de la machine.

Si on tient compte des pertes par frottement dues à la rotation, l'équation (2.12) est modifiée et peut s'écrire alors :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} + D\omega = P_m - P_e \tag{1.15}$$

Avec : ω en p.u.
 D en p.u.

A l'instant initial (t=0) avant la perturbation, l'alternateur tourne à la vitesse synchrone, la position angulaire du rotor est δ_0 et la puissance mécanique d'entraînement P_m est égale à la puissance électrique P_e telle que la montre la figure 1.5. En cas de court-circuit tel que montré sur la figure 1.7 (défaut latéral) où D_1 et D_2 représentent des disjoncteurs aux extrémités de la ligne, P_e devient nulle et P_m reste constante.

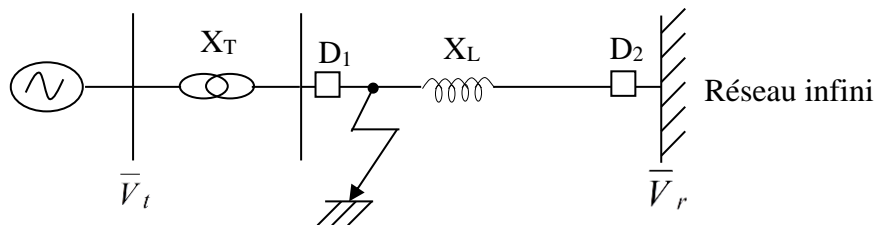


Fig.II.7 Court circuit latéral

Durant le défaut c'est-à-dire pour $t < t_c$, t_c étant l'instant d'élimination du court-circuit, on a d'après l'expression (2.12) :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \tag{2.16}$$

Et par suite la vitesse angulaire est :

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} P_m dt = \frac{\omega_s}{2H} P_m t \quad (2.17)$$

D'où la variation de la position angulaire rotorique en fonction de t :

$$\delta = \frac{\omega_s}{4H} P_m t^2 + \delta_o \quad (2.18)$$

A l'instant d'élimination du défaut t_c , on a :

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right)_{t=t_c} = \frac{\omega_s}{2H} P_m t_c \quad (2.19)$$

$$\delta_c = \frac{\omega_s}{4H} P_m t_c^2 + \delta_o \quad (2.20)$$

Quand le défaut est éliminé ($\delta=\delta_c$), la puissance électrique augmente brusquement à la valeur correspondant au point d de la courbe de charge de la figure 1.8.

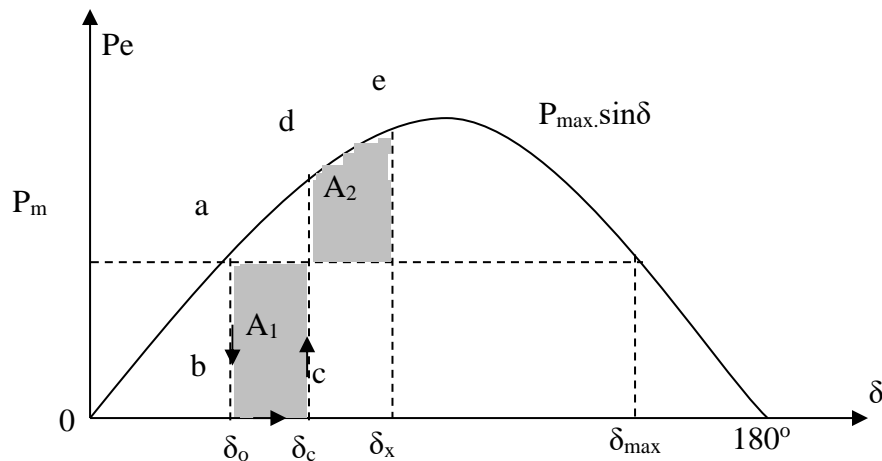


Fig.II.8 Courbe de charge pour $\delta=\delta_{cr}$

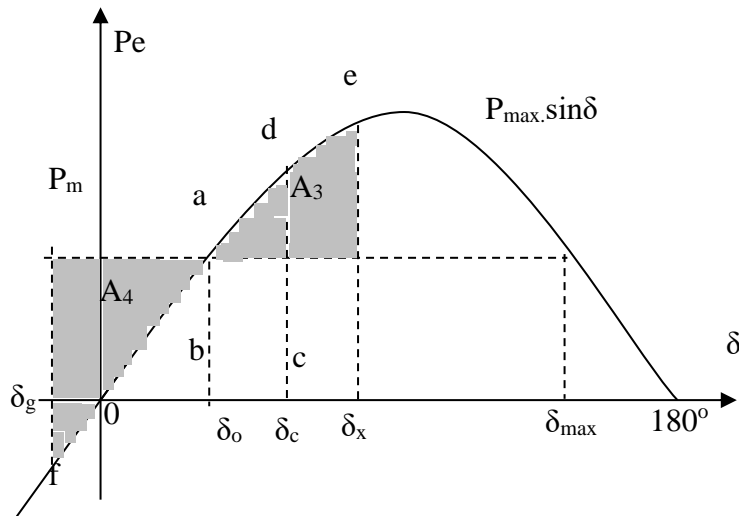


Fig.II.9 Courbe de charge correspond à la période durant le défaut

Au point d, P_e est supérieur à P_m donc l'accélération est négative. Par conséquent, le rotor ralentit pour atteindre la vitesse synchrone en e et la position rotorique δ_x . En ce point, l'énergie accumulée (aire A_1) a été restituée (aire A_2). Mais l'accélération est toujours négative, donc la vitesse du rotor ne sera pas maintenue à la vitesse synchrone et continuera à diminuer jusqu'au point a où de nouveau, il y a l'accumulation d'énergie représentée par l'aire A_3 (Figure 1.9).

Au-delà du point a, P_m est de nouveau supérieur à P_e et donc la vitesse du rotor augmente pour atteindre la vitesse de synchronisme en f où il y a de nouveau accumulation d'énergie qui sera restituée au point e, ... En l'absence d'amortissement, le rotor oscillera suivant la séquence f-a-e, e-a-f, etc... ; avec des vitesses égales à la vitesse synchrone en e et f (fig.II.9).

En définissant la vitesse relative du rotor par :

$$\omega_r = \omega - \omega_s \tag{2.21}$$

Les équations (2.12) et (2.13) s'écriront :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega_r}{dt} = P_m - P_e \tag{2.22}$$

$$\omega_r = \frac{d\delta}{dt} \quad (2.23)$$

En multipliant les 2 membres de (2.22) par (2.23), on obtient :

$$\frac{H}{\omega_s} 2\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (2.24)$$

D'où, par intégration entre 2 points correspondant aux positions δ_1 et δ_2 où la vitesse du rotor est synchrone :

$$\frac{H}{\omega_s} (\omega_{r2}^2 - \omega_{r1}^2) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.25)$$

Aux points de synchronisme, $\omega_{r1} = \omega_{r2} = 0$

On aura :

$$\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (1.26)$$

Les positions rotoriques δ_1 et δ_2 correspondent au synchronisme. On déduit à partir de la figure 1.8 où a et e sont atteintes pour la vitesse synchrone et correspondent à δ_o et δ_x :

$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (1.27)$$

Soit

$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_m - P_e) d\delta \quad (1.28)$$

L'intégrale de gauche de (2.28) correspond à la période durant le défaut, et celle de droite à la période après élimination du défaut correspondant respectivement aux aires hachurées A₁ et A₂ (fig.II.8) qui sont donc égales. La même approche permet de montrer que A₃ est égale à A₄ (fig.II.9).

2.5.1 Angle et temps critiques

Si le défaut est éliminé pour un angle rotorique supérieur à δ_{\max} , alors le synchronisme est perdu. Donc, il existe un angle critique δ_{cr} (figure 1.10) correspondant à un temps limite d'élimination du défaut (appelé aussi temps critique) t_{cr} qui est le temps maximal pendant lequel un défaut donné peut être maintenu sans que le réseau ne devienne instable après son élimination.[10][12][13]

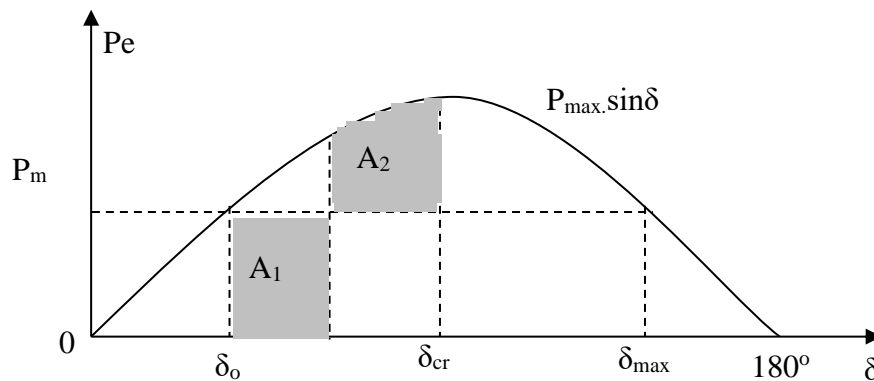


Fig.II.10 Perte de synchronisme

2.5.2 Les aires A_1 et A_2

Dans ce cas, l'aire A_1 est telle que :

$$A_1 = \int_{\delta_o}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m (\delta_{cr} - \delta_o) \quad (2.29)$$

L'aire A_2 est telle que :

$$A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{\max}} [P_{\max} \sin \delta - P_m] d\delta = P_{\max} [\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{\max}] - P_m [\delta_{\max} - \delta_{cr}] \quad (2.30)$$

De l'égalité des aires A_1 et A_2 , on déduit :

$$\cos \delta_{cr} = \cos \delta_{\max} + \frac{P_m}{P_{\max}} (\delta_{\max} - \delta_o) \quad (1.31)$$

Or d'après la courbe de charge de la fig.II.10,

$$\delta_{\max} = \pi - \delta_o \quad (1.32)$$

Et

$$P_m = P_{\max} \sin \delta_o \quad (1.33)$$

2.5.3 Angle critique

En remplaçant δ_{\max} et P_m dans (2.31) par leurs expressions (2.32) et (2.33), on obtient :

$$\delta_{cr} = Ar \cos[(\pi - 2\delta_o) \sin \delta_o - \cos \delta_o] \quad (2.34)$$

2.5.4 Temps critique

En utilisant (2.18), on obtient :

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_o)}{\omega_s P_m}} \quad (2.35)$$

2.6 Modélisation

2.6.1 Modèle de Park de l'alternateur

L'alternateur du système étudié est une machine synchrone constituée de trois enroulements statoriques identiques déphasés de $2\pi/3$ et couplés en étoile, d'un enroulement rotorique d'excitation et de deux circuits amortisseurs représentés par deux enroulements en court circuit en quadrature. L'utilisation de la transformation de Park permet une représentation bipolaire équivalente de la machine synchrone triphasée, dont les nouvelles inductances deviennent indépendantes de la rotation. La fig.II.11 montre la représentation de la machine dans le repère de Park [2][3].

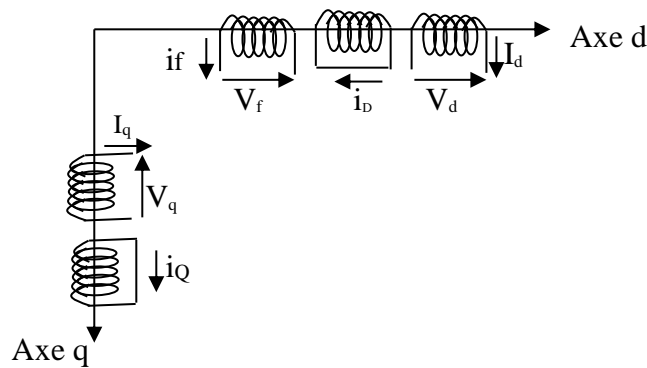


Fig.II.11 Modèle de Park de l'alternateur

En considérant les termes de transformation négligeables devant ceux liés à la rotation et en supposant la pulsation de rotation ω voisine de la pulsation synchrone ω_s , on obtient les équations du modèle à deux axes de la machine. Les composantes de la tension aux bornes de la machine suivant les axes q et d sont telles que

$$V_q = E'_q - rI_q + X'_d I_d \tag{2.36}$$

$$V_d = E'_d - rI_d - X'_q I_q \tag{2.37}$$

Où $X'_d = \omega L'_d$ et $X'_q = \omega L'_q$ sont respectivement les réactances transitoires directe et en quadrature de l'alternateur.

La variation de la f.e.m derrière la réactance transitoire selon les axes d et q est donnée par :

$$T'_{do} \dot{E}'_q = -E'_q + (X_d - X'_d)I_d + E_{fd} \tag{2.38}$$

$$T'_{qo} \dot{E}'_d = -E'_d - (X_q - X'_q)I_q \tag{2.39}$$

Où $X_d = \omega L_d$ et $X_q = \omega L_q$ sont les réactances synchrones directe et en quadrature.

La fig.II.12 représente les schémas blocs du modèle de Park.

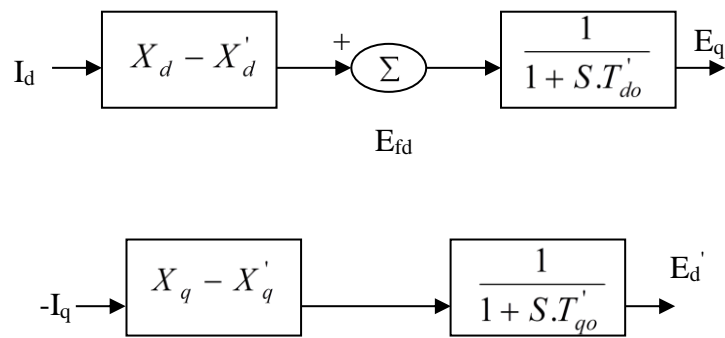


Fig.II.12 Schémas blocs du modèle de Park

2.6.2 Modèle en π de la ligne

La fig.II.13 est la représentation en π de la ligne i-j. r_{ij} , x_{ij} et b_{ij} sont respectivement la résistance, la réactance et la demi-susceptance transversale (coté i) de la ligne i-j. [2][3]

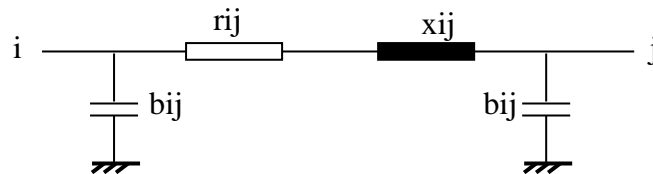


Fig.II.13 Schéma en π d'une ligne de transmission

2.7.Régulation conventionnelle

La régulation a pour but de permettre un fonctionnement correct [11] :

- stabilité de l'amplitude de la tension,
- stabilité de la fréquence du réseau lors de variations de la charge ou de la puissance entraînant.
- Répartition des puissances électriques active et réactive.
- Régulation fréquence/puissance active

2.7.1. Régulation de la tension

La régulation de tension peut améliorer la stabilité transitoire et empêcher la perte du synchronisme de l’alternateur. Lors d’un défaut, la tension à la sortie de l’alternateur diminue induisant un écart ΔV entre la valeur réelle de la tension V aux bornes de la machine et une valeur de consigne V_{ref} . La régulation de tension consiste alors à détecter cet écart et construire une chaîne d’action sur la tension d’excitation E_{fd} et ce par augmentation du courant d’excitation. Les éléments principaux sont constitués par un étage amplificateur et une excitatrice. [3][11] La figure 1.14 schématise un régulateur de tension type IEEE indique, en outre, la configuration de chaînes tenant compte des systèmes de stabilisation et de saturation, la fonction de saturation est de la forme :

$$S_e = A_{ex} e^{B_{ex} E_{fd}} \tag{2.40}$$

A_{ex} et B_{ex} sont des coefficients constants.

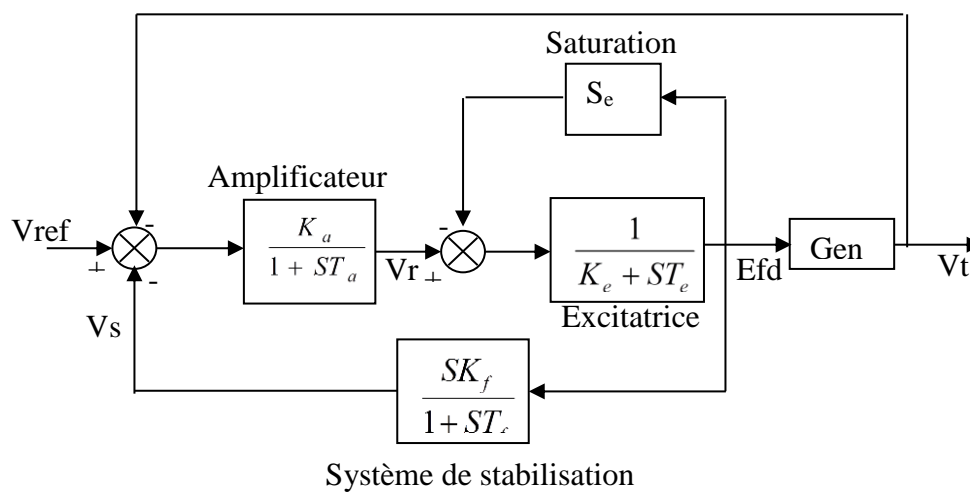


Fig.II.14 Schéma de la régulation de tension type IEEE

Les équations différentielles liées à ce type de régulation s'écrivent:

$$\dot{V}_r = -\frac{1}{T_a} V_r - \frac{K_a}{T_a} V_s - \frac{K_a}{T_a} V_t + \frac{K_a}{T_a} V_{ref} \tag{1.41}$$

$$\dot{E}'_{fd} = \frac{1}{T_e} V_r - \frac{S_e - K_e}{T_e} E_{fd} \tag{1.42}$$

$$\dot{V}_s = -\frac{K_f}{T_f T_e} V_r - \frac{K_f(S_e - K_e)}{T_f T_e} E_{fd} - \frac{1}{T_a} V_s \quad (1.43)$$

2.7.1.1. Régulation de vitesse

A la suite d'une perturbation, le régulateur de vitesse des machines agit sur les organes d'admission du fluide afin de rétablir l'équilibre du réseau. La réserve de puissance permet d'assurer la correction de l'écart entre la fréquence de référence et la fréquence réelle. La puissance mécanique développée par la turbine est essentiellement fonction de la position des soupapes d'admission du fluide, elles mêmes sous le contrôle du régulateur de vitesse dont le schéma fonctionnel est celui de la figure 1.15 qui suppose le régulateur de vitesse sans zone d'insensibilité.

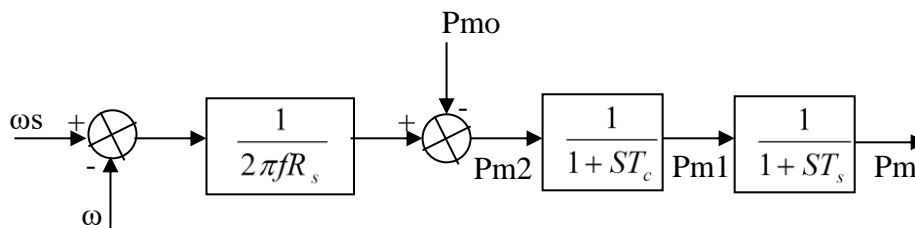


Figure 1.15 Schéma de régulation de vitesse

Où : R_s Désigne le statisme ;

P_{mo} Désigne la puissance mécanique d'entraînement à l'équilibre ;

T_c Est le temps de réponse du circuit de commande ;

T_s Est le temps de réponse du circuit vapeur.

Les équations régissant la puissance mécanique liée à la régulation de vitesse sont données ci-dessous:

$$\dot{P}_m = \frac{1}{T_s} P_{m1} - \frac{1}{T_s} P_m \quad (1.44)$$

$$\dot{P}_{m1} = \frac{1}{T_c} P_{m2} - \frac{1}{T_c} P_{m1} \quad (1.45)$$

P_{m2} Exprimé par la relation ci-après :

$$P_{m2} = P_{mo} - \frac{\omega_s - \omega}{2\pi f R_s} \quad (1.46)$$

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différents éléments qui nous permettent d'étudier la stabilité transitoire qui fait l'objet du chapitre III, les équations classiques des réseaux et des machines, le critère d'égalité des aires qui nous permettent d'étudier la stabilité transitoire des réseaux.

CHAPITRE III

SIMULATION PAR MATLAB D'UN SYSTÈME ÉNERGETIQUE

3. Introduction

Dans ce chapitre nous avons étudié la stabilité transitoire d'un réseau électrique dans deux cas différents, augmentation soudaine de la puissance absorbée et lors d'apparition d'un défaut triphasé (court-circuit) en deux points de la ligne en utilisant le critère d'égalité des aires, qui consiste à comparer deux aires. L'aire correspondant à la période d'accélération du rotor et l'aire durant laquelle la machine peut décélérer. La stabilité est considérée comme étant assurée si la machine peut retrouver un fonctionnement de synchronisme.

Pour ce faire nous avons considéré un générateur qui fournit une puissance à un jeu de barres infini à travers un transformateur et deux lignes de transmission en parallèle.

Ce chapitre contient trois parties :

La partie A, concerne les calculs on utilisant le critère d'égalité des aires

La partie B, concerne la simulation du système on utilisant Matlab

La partie C, est consacrée à l'interprétation des résultats et à la conclusion

PARTIE A

PARTIE CALCUL

3.1.PARTIE CALCUL

Dans cette partie nous avons étudié la stabilité transitoire d'un système de puissance en cas d'augmentation soudaine de la puissance absorbée et de l'apparition d'un défaut, en appliquant le critère d'égalité des aires.

3.1.1. CAS 1 : Quand il y a une augmentation soudaine de la puissance absorbée

Un générateur synchrone est connecté à des jeux de barres infinis comme le montre la figure 1.0 (toutes les réactances sont en p.u.). Il délivre une puissance réelle de **0,6 p.u.** avec un facteur de puissance **0,8** en retard par rapport à la tension **V = 1,0 p.u.**

a) On déterminera la puissance maximale qui peut être transmise sans perte de synchronisme.

b) Répéter a) avec une puissance initiale nulle.

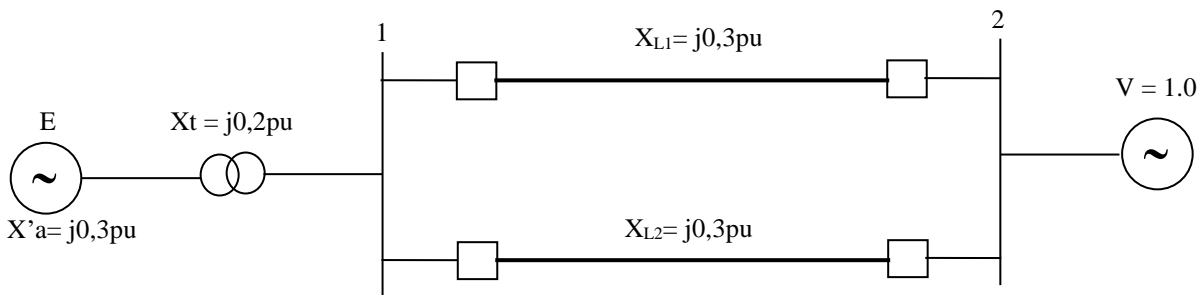


Fig.III.1 Schema du système électrique

3.1.1.1. Données du système

$$P_0 = 0.6 \text{ pu}$$

$$\cos \varphi = 0.8 \text{ en retard}$$

$$\varphi = \cos^{-1} 0.8 = -36.87^\circ$$

3.1.1.2. Expression du courant

$$\bar{I} = I_0 (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

$$\bar{I} = 0.8 - j0.6 \text{ pu}$$

3.1.1.3. Détermination de tension de la source E

$$\bar{E} = \bar{V}_1 + jX\bar{I}$$

$$\bar{E} = 1.0 + j0.5(0.8 - j0.6)$$

$$E = |\bar{E}| = 1.35 \text{ pu}$$

3.1.1.4. Calcul de la réactance équivalente de système

$$X = X'_a + X_t + \left(\frac{X_{L1} X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} \right)$$

$$X = 0.3 + 0.2 + \left(\frac{0.3 * 0.3}{0.3 + 0.3} \right) = \mathbf{0.65 pu}$$

3.1.1.5. Puissance électrique transmise aux jeux de barres infinis

$$P_{e1} = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (2)$$

A Partir de l'équation (2) on a

$$P_e = \frac{1.35 * 1}{0.65} \sin \delta$$

Cette équation représente la puissance électrique transmise aux jeux de barres infinis en fonction de l'angle δ .

$$P_e = P_{e \max} \sin \delta$$

$$P_{e \max} = \frac{EV}{X_1} = \frac{1.35 * 1.0}{0.65} = \mathbf{2.0769 pu} \quad (4)$$

$$\delta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{1.35 * 0.6}{0.65} \right) = 16.791^\circ$$

L'expression (4) représente la puissance électrique maximale qui peut être transmise par le réseau aux jeux de barres infinis.

3.1.1.6. Application du critère d'égalité des aires

Pour trouver la stabilité transitoire en cas d'augmentation soudaine de la puissance absorbée, on applique le critère d'égalité des aires comme la montre la figure (2).

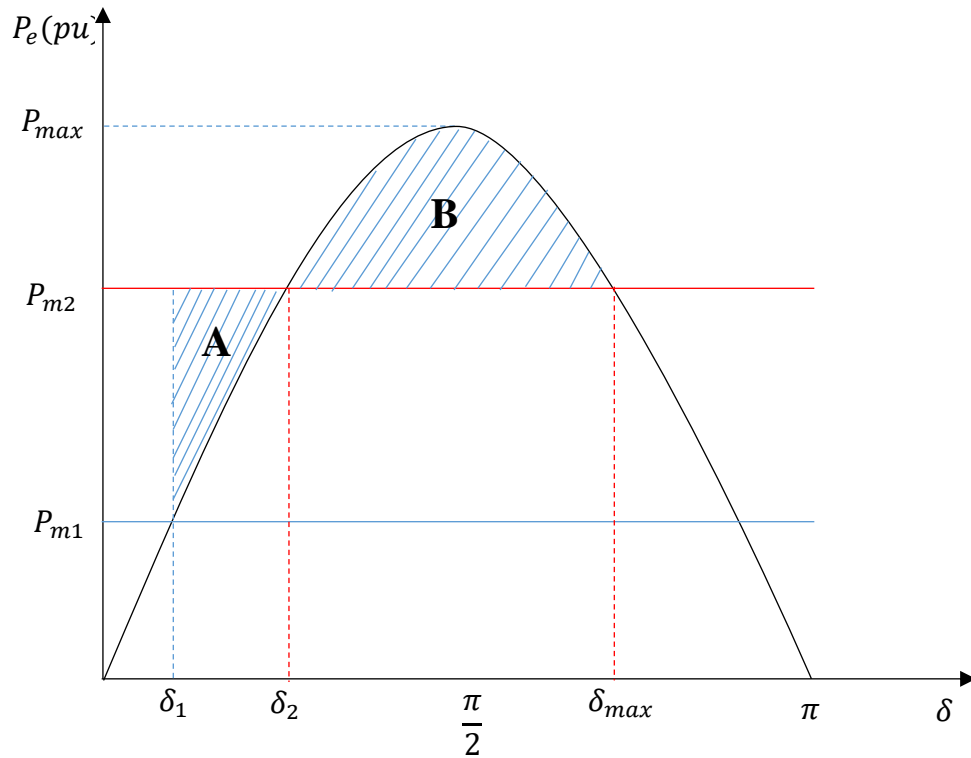


Fig. III.2 Schéma représentatif du critère des aires pour l'augmentation soudaine de puissance consommée

Pour que le système soit stable, l'aire **d'accélération A** doit être inférieure ou égale à l'aire de **décélération B**.

3.1.1.7. Calcul des aires A et B

3.1.1.7.1. L'aire d'accélération A

$$A = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_{m2} - P_{max} \sin \delta) d\delta$$

$$= P_{m2} \delta + P_{max} \cos \delta \Big|_{\delta_1}^{\delta_2}$$

$$A = P_{m2} \delta_2 + P_{max} \cos \delta_2 - P_{m2} \delta_1 - P_{max} \cos \delta_1$$

$$A = P_{m2} (\delta_2 - 16.791) \frac{\pi}{180} + 2.0769 (\cos \delta_2 - \cos 16.791)$$

3.1.1.7.2. L'aire de décélération B

$$\begin{aligned}
 B &= \int_{\delta_2}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_{m2}) d\delta \\
 &= -P_{max} \cos \delta - P_{m2} \delta \Big|_{\delta_2}^{\delta_{max}} \\
 B &= P_{max} \cos \delta_2 + P_{m2} \delta_2 - P_{max} \cos \delta_{max} - P_{m2} \delta_{max} \\
 \delta_{max} &= \pi - \delta_2 \\
 \cos \pi - \delta_2 &= -\cos \delta_2 \\
 B &= P_{max} (\cos \delta_2 - (-\cos \delta_2)) - P_{m2} (\pi - 2\delta_2) \\
 B &= P_{max} (\cos \delta_2 - (-\cos \delta_2)) - P_{m2} (\pi - 2\delta_2) \\
 \mathbf{B} &= \mathbf{2P_{max}(\cos \delta_2) - P_{m2}(\pi - 2\delta_2)}
 \end{aligned}$$

En remplaçant les valeurs dans l'équation précédente on a :

$$\mathbf{B = 4.1538(\cos \delta_2) - P_{m2}(\pi - 2\delta_2)}$$

3.1.1.8. Détermination de l'expression de la puissance maximale à partir de la puissance initiale

$$\mathbf{A = B \rightarrow A - B = 0}$$

$$\begin{aligned}
 f(P_{m2}, \delta_2) &= P_{m2} \delta_2 + P_{max} \cos \delta_2 - P_{m2} \delta_1 - P_{max} \cos \delta_1 - P_{max} \cos \delta_2 - P_{m2} \delta_2 \\
 &\quad + P_{max} \cos \delta_{max} + P_{m2} \delta_{max}
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{f(P_{m2}, \delta_2) = P_{m2}(180 - \delta_1 - \delta_2) \frac{\pi}{2} - P_{max}(\cos \delta_1 + \cos \delta_2) = 0}$$

En remplaçant les valeurs dans l'équation précédente on a :

$$\mathbf{f(P_{m2}, \delta_2) = P_{m2}(\delta_2 - 2.848) - 2.0769(\cos \delta_2) + 1.988 = 0} \quad (5)$$

L'équation (5) est une équation non linéaire qu'on ne peut résoudre que par les méthodes itératives.

Nous remplacerons les paramètres P_{m2} et δ_2 par leurs valeurs trouvées par la simulation dans la partie programmation et nous vérifierons si ces valeurs sont les solutions de cette équation non linéaire.

Avec :

P_{max} : Puissance maximale transmissible aux jeux de barres infinis

δ_1 : Angle initial de fonctionnement correspondent à P_{m1}

δ_2 : Angle de fonctionnement correspondent à P_{m2}

P_{m2} : Nouvelle puissance de fonctionnement après l'augmentation soudaine de la puissance consommée.

On comparera les résultats donnés par cette équation trouvés par calcul, en remplaçant les valeurs de δ_2 et P_{m2} trouvés par simulation par le programme MATLAB.

3.1.2. CAS: 2 : Quand il y a apparition de défaut.

Un générateur synchrone est connecté à un jeu de barres infini comme le montre la figure 2.0 (toutes les réactances sont en p.u). Puissance réelle de livraison **$P_o = 0,8 \text{ p.u}$** ,

$Q = 0,074 \text{ p.u}$ à une tension de **$1,0 \text{ p.u}$** .

- a) Un défaut temporaire triphasé se produit au début de la ligne 2 au point F1. Lorsque le défaut est assaini les deux lignes redeviennent intactes.

Déterminons l'angle critique d'annulation de défaut et le temps critique nécessaire.

- b) Un défaut triphasé se produit au milieu de la ligne, le défaut est supprimé et la ligne défectueuse est isolée. Trouvons l'angle critique d'annulation de défaut.

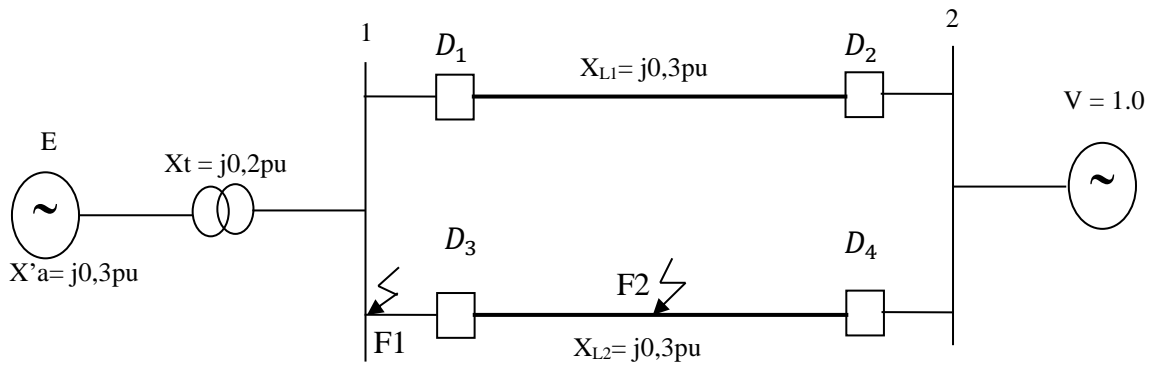


Fig. III.3. Schéma représentatif d'un réseau lors d'un court-circuit au point F1 et F2

3.1.2.1. Données du système

$$P_0 = 0.8 \text{ pu}$$

$$Q = 0.074 \text{ pu}$$

$$V_s = 1.0 \text{ pu}$$

$$E = 1.7 \text{ pu}$$

3.1.2.2. Différents régimes pour l'étude de la stabilité transitoire

Pour étudier la stabilité du système, il faut considérer 3 étapes

3.1.2.3. Régime normal (première étape)

Calcul de la réactance équivalente de système :

$$X_1 = X'_a + X_t + \left(\frac{X_{L1} X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} \right)$$

$$X_1 = 0.3 + 0.2 + \left(\frac{0.3 * 0.3}{0.3 + 0.3} \right) = 0.65 \text{ pu}$$

A Partir de l'équation (2) on a :

$$P_{e1} = \frac{EV}{X_1} \sin \delta$$

$$P_{e1} = \frac{1.17 * 1}{0.65} \sin \delta$$

$$\delta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{1.17 * 0.8}{0.65} \right) = 26.38779^\circ$$

$$P_{e1} = P_{e1 \max} \sin \delta \quad P_{e1 \max} = \frac{EV}{X_1} = \frac{1.17 * 1.0}{0.65} = 1.8 \text{ pu}$$

$$P_{1 \max} = 1.8 \text{ pu}$$

$$P_{e1} = 1.8 \sin \delta$$

3.1.2.4. Régime de défaut

3.1.2.4.1. Apparition d'un court circuit en F1 (deuxième étape)

Un défaut triphasé se produit au début de la ligne L_2 au point F_1 . Obtenir l'équation de la puissance transmise pendant la panne, l'équation de mouvement ainsi que l'angle critique.

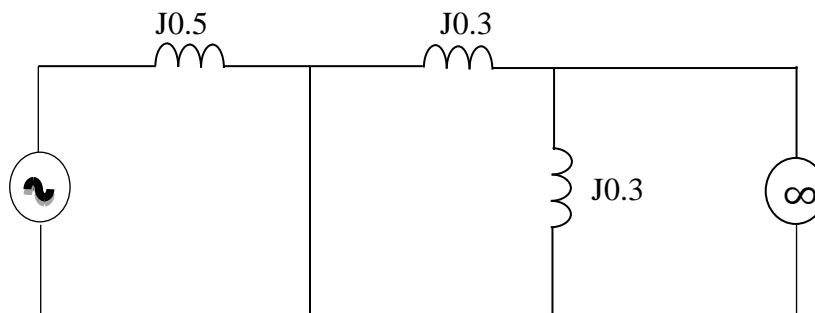


Fig. III.4 Schéma du régime pendant défaut F1

Pour trouver la réactance pendant défaut il faut passer par les transformations $\Delta \rightarrow Y$ et $Y \rightarrow \Delta$. Après cette transformation on obtient :

$$X_2 = \infty$$

$$\lim_{X_2 \rightarrow \infty} P_{e2} = \lim_{X_2 \rightarrow \infty} \frac{EV}{X_2} \sin \delta = 0$$

$$P_{e2} = 0 \text{ pu}$$

L'équation d'oscillation pendant le défaut avec δ en radians est

$$\frac{H}{\pi F} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 0.8$$

3.1.2.4.2. Apparition d'un court circuit en F2 (deuxième étape)

Un défaut triphasé se produit au milieu de la ligne L_2 au point F_2 . Obtenir l'équation de la puissance transmise pendant la panne, l'équation de mouvement ainsi que l'angle critique.

Pour trouver la réactance pendant défaut il faut passer par les transformations $\Delta \rightarrow Y$ et $Y \rightarrow \Delta$. Après cette transformation on obtient :

$$X_2 = 1.8 \text{ pu}$$

$$P_{e2} = P_{e2 \max} \sin \delta$$

$$P_{e2 \max} = \frac{E V}{X_2} = \frac{1.7 * 1.0}{1.8} = 0.65 \text{ pu}$$

$$P_{e2 \max} = 0.65 \text{ pu}$$

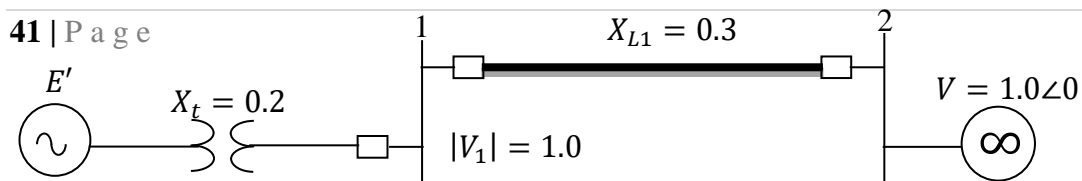
$$P_{e2} = 0.65 \sin \delta$$

L'équation d'oscillation pendant le défaut avec δ en radians est

$$\frac{H}{\pi F} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 0.8 - 0.65 \sin \delta$$

3.1.2.5. Régime de fonctionnement après défaut (troisième étape)

Après défaut, la ligne en défaut est éliminée par les disjoncteurs **D3** et **D4**, le circuit du système devient le circuit de la fig.5.



La réactance après défaut X_3 est donnée par :

$$X_3 = 0.3 + 0.2 + 0.3 = \mathbf{0.8 pu}$$

Puissance maximal après défaut :

$$P_{e3} = \frac{E V}{X_3} \sin \delta$$

$$P_{e3 \max} = \frac{E V}{X_3} = \frac{1.17 * 1.0}{0.8} = 1.4625 pu$$

$$P_{3 \max} = \mathbf{1.4625 pu}$$

$P_{e3} = \mathbf{1.4625 \sin \delta}$
--

L'équation d'oscillation pendant le défaut avec δ en radians est

$$\frac{H}{\pi F} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \mathbf{0.8 - 1.4625 \sin \delta}$$

3.1.2.6. Courbes $P_e(\delta)$ pour les différents points de défaut

Les figures 6 et 7 représentent la variation de la puissance en fonction de l'angle δ , $P_e(\delta)$ suit à l'apparition d'un défaut triphasé (court-circuit) sur la ligne 2 respectivement au point F1 et F2.

3.1.2.6.1. Cas de défaut au point F1

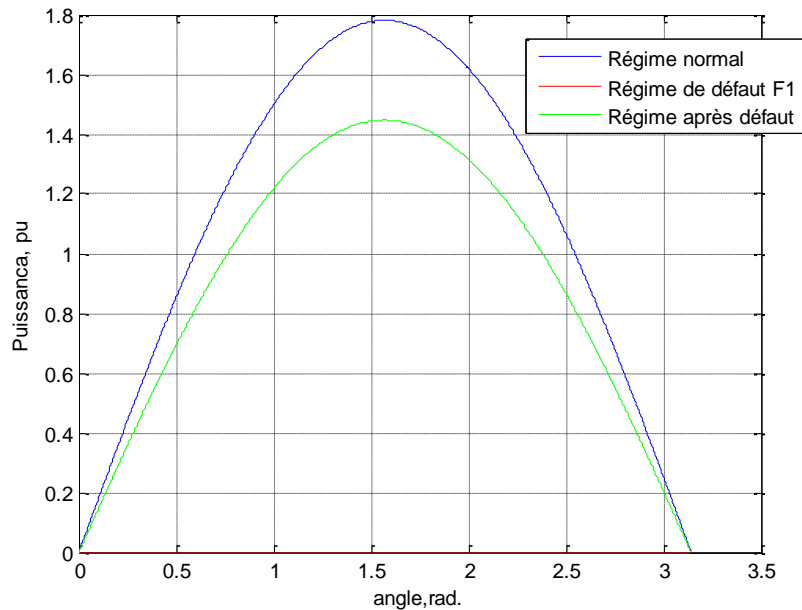


Fig.III.6. Courbes de la avant, pendant et après défaut F1

La **fig. III .6** représente la variation de la puissance en fonction de l'angle δ pendant le régime de fonctionnement normal, fonctionnement de défaut et après défaut.

- Fonctionnement normal

Pendant le fonctionnement normal le système fournit une puissance maximale $P_{1max} = 1.8 pu$.

- Fonctionnement de défaut

Suite à un défaut triphasé la réactance de la ligne augmente ce qui résulte une diminution de la puissance transmise, $P_{e2max} = 0 pu$ pour le cas de défaut au point F1.

- Fonctionnement après défaut

Après défaut le disjoncteur **D3** et **D4** éliminent la ligne en défaut après un temps de retard. Alors le système fonctionne avec une seule ligne de transmission qui transmet une puissance $P_{e3max} = 1.4625 pu$ qui est relativement inférieure à la puissance maximale. $P_{1max} = 1.8 pu$

3.1.2.6.2. Cas de défaut au point F1

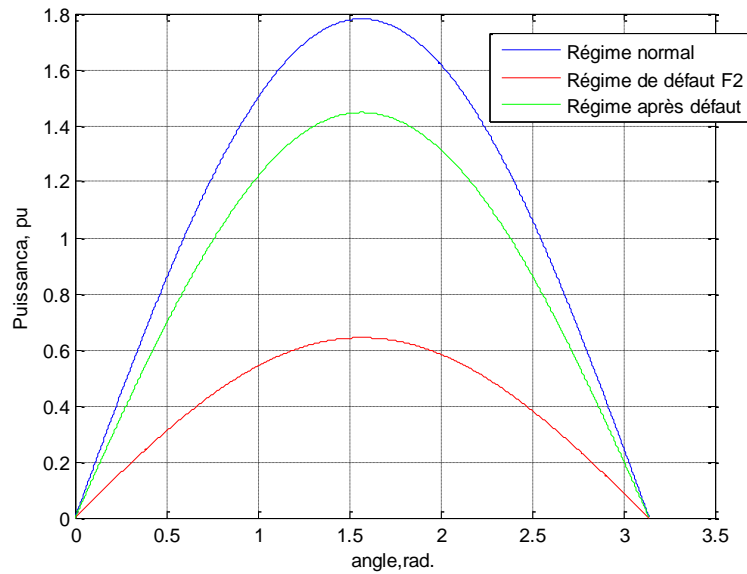


Fig.III.7. Courbes de la puissance avant, pendant et après défaut F2

La **fig. III .7** représente la variation de la puissance en fonction de l'angle δ pendant le régime de fonctionnement normal, fonctionnement de défaut et après défaut.

- Fonctionnement normal

Pendant le fonctionnement normal le système fournit une puissance maximale $P_{1max} = 1.8 pu$.

- Fonctionnement de défaut

Suite à un défaut triphasé la réactance de la ligne augmente ce qui résulte d'une diminution de la puissance transmise, $P_{e2max} = 0.65 pu$ pour le cas de défaut au point F2.

- Fonctionnement après défaut

Après défaut les disjoncteurs D3 et D4 isolent la ligne en défaut après un temps de retard. Alors le système fonctionne avec une seule ligne de transmission qui transmet une puissance $P_{e3max} = 1.4625 pu$ qui est relativement inférieure à la puissance maximale $P_{1max} = 1.8 pu$.

3.1.2.7. Détermination de l'angle critique pour les deux cas étudiés

L'angle critique δ_{cr} peut être défini comme étant l'angle tel que les zones A et B sont égales. L'angle d'élimination critique a une grande importance, puisque la machine devient instable si le défaut n'est pas éliminé au moment où la machine atteint cet angle. Le temps pour lequel la machine atteint cet angle est appelé temps d'élimination critique

L'angle critique δ_{cr} est donné par l'expression suivante :

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \left[\frac{P_m(\delta_{max} - \delta_0) \frac{\pi}{180} + P_{3\ max} \cos \delta_{max} - P_{2\ max} \cos \delta_0}{P_{3\ max} - P_{2\ max}} \right]$$

3.1.2.7.1. Pour un court-circuit au point F_1

$$\delta_{cr} = 71.771^\circ$$

3.1.2.7.2. Pour un court-circuit au point F_2

$$\delta_{cr} = 98.834^\circ$$

PARTIE B

SIMULATION PAR MATLAB

3.2.PARTIE SIMULATION

Pour étudier notre système, en utilisant un autre moyen qui validera nos résultats, nous allons procéder à une simulation par Matlab.

3.2.1. CAS 1 : Quand il y a une augmentation soudaine de la puissance absorbée

3.2.1.1.Cas 1 :a) puissance initial $P_1 = 0.6 pu$

Puissance maximale qui peut être transmissible sans perte de synchronisme si le système fonctionne avec une puissance initiale $P_1 = 0.6 pu$ qui correspond à un angle de fonctionnement $\delta_1 = 16.791^\circ$

Après simulation du programme sur Matlab on obtient :

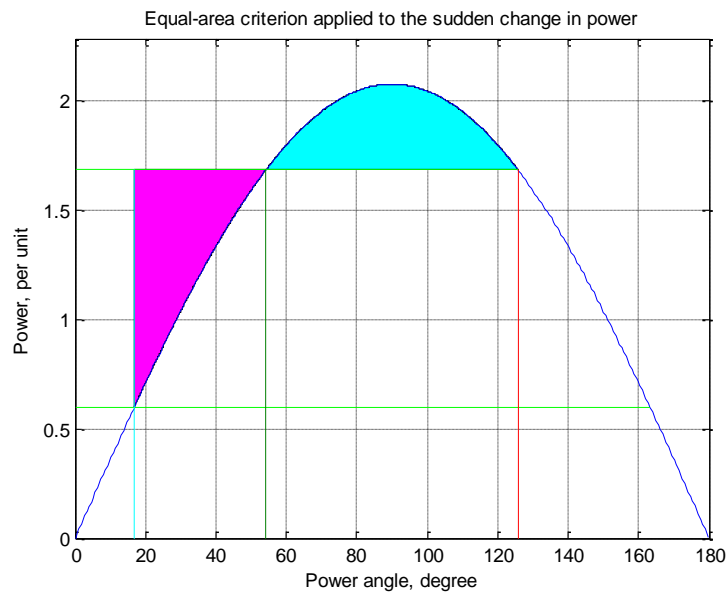


Fig.III.8. puissance maximale à puissance initial $P_1 = 0.6 pu$

$$\delta_2 = 54.160 \text{ degrés}$$

$$\delta_{max} = 125.840 \text{ degrés}$$

$$P_{m2} = 1.684 pu$$

En remplaçant les valeurs obtenues par simulation dans l'expression (5) on obtient :

$$f(1.684, 54.160) = 1.684(180 - 54.160 - 125.840) - 2.0769(\cos 16.791 + \cos 54.160)$$

$$f(1.684, 54.160) = 0$$

3.2.1.2.Cas 1 :b) Avec la puissance initial $P_1 = 0.0 pu$

Puissance maximale qui peut être transmissible sans perte de synchronisme si le système fonctionne avec une puissance initiale $P_1 = 0.0 pu$ qui correspond à un angle de fonctionnement $\delta_1 = 0^\circ$

Après simulation du programme sur Matlab on obtient :

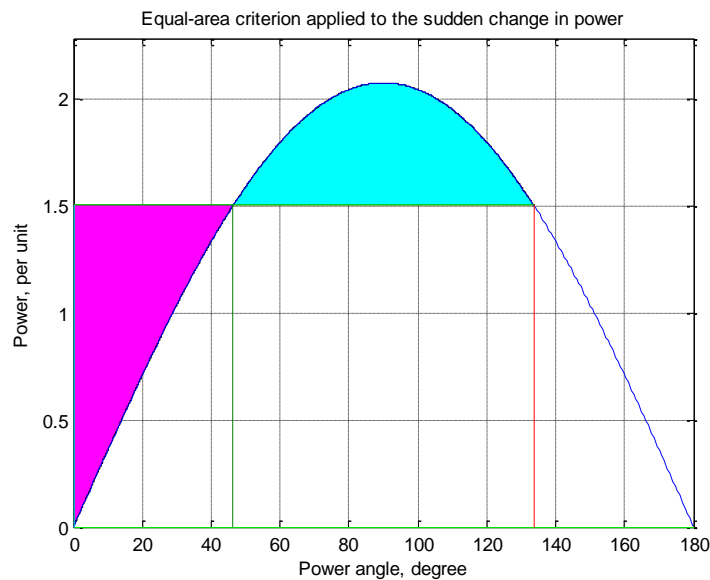


Fig.III.9. puissance maximale à puissance initiale $P_1 = 0.0 pu$

$$\delta_2 = 46.437 \text{ degrés}$$

$$\delta_{max} = 133.563 \text{ degrés}$$

$$P_{m2} = 1.505 pu$$

En remplaçant les valeurs obtenues par simulation dans l'expression (5) on obtient :

$$f(1.505, 46.437) = 1.505(180 - 46.437) - 2.0769(\cos 0 + \cos 46.437)$$

$$f(1.505, 46.437) = 0$$

Conclusion

En remplaçant les résultats obtenue par simulation pour le cas 1 a) et b) dans l'équation (5), on a trouvé que l'aire d'accélération A est égale à l'aire de décélération B ou bien $f(P_{m2}, \delta_2) = 0$, ce qui vérifie l'équation (5).

3.2.1.3. Stabilité transitoire lors d'un défaut au début de la ligne L2.

3.2.1.3.1. Pour un court-circuit au point F₁

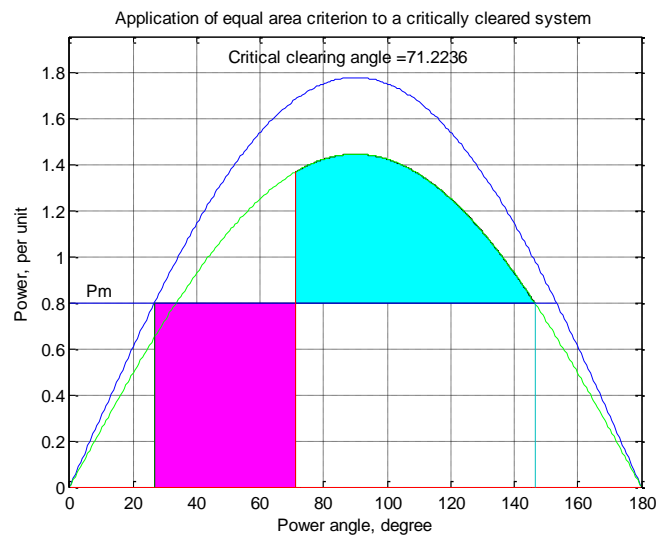


Fig.III.10. Courbes de puissances à l'apparition d'un défaut F1

3.2.1.4. Résultats du programme

Pour ce cas, t_c peut être trouvé de la formule analytique.

Pour trouver t_c entrer la constante d'inertie H, (ou 0 pour l'ignorer)

Pour H = 0, on a :

L'angle de fonctionnement initial $\delta_0 = 26.683^\circ$

L'angle maximum $\delta_{max} = 146.449^\circ$

L'angle critique de suppression de défaut est $\delta_{cr} = 71.224^\circ$

3.2.1.4.1. Pour un court-circuit au point F_2

Après simulation du programme sur Matlab on obtient :

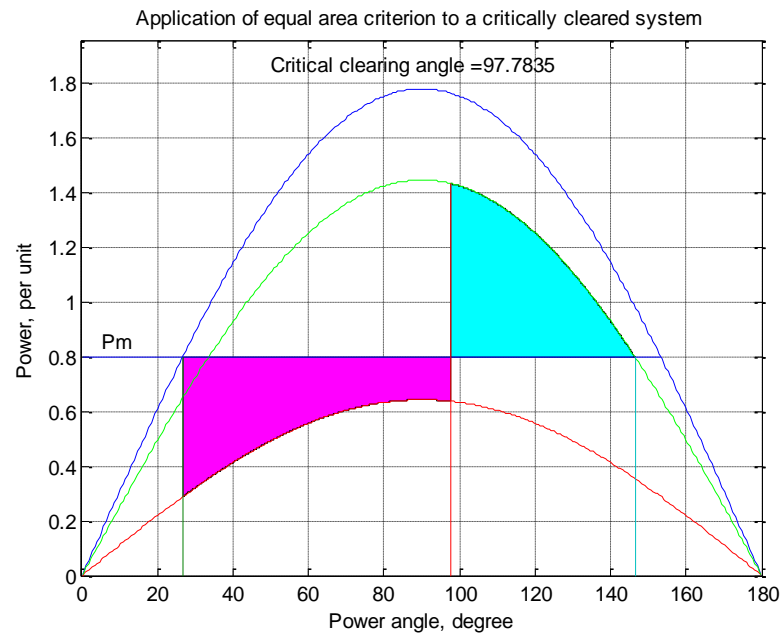


Fig.III.11. Coubes de puissances à l'apparition d'un défaut F2

Résultats de simulation

L'angle de fonctionnement initial $\delta_0 = 26.683^\circ$

L'angle maximum $\delta_{max} = 146.449^\circ$

L'angle critique de suppression de défaut est $\delta_{cr} = 97.783$

PARTIE C

INTERPRETATION DES RESULTATS

3.3.PARTIE INTERPRETATION

En comparant de résultats obtenus par calcul et ceux trouvés par simulation, on peut dire que le programme Matlab élaboré a confirmé l'exactitude des calculs faits précédemment.

3.3.1. Cas 1 : Etude de la stabilité lors d'une augmentation soudaine de la puissance absorbée

Comme on a déjà vu aux chapitres précédents, les réseaux électriques sont assujettis à diverses perturbations, l'augmentation soudaine de la puissance est une perturbation fréquente dans les réseaux électriques, c'est pourquoi nous avons jugé utile voire indispensable de présenter ce cas dans ce travail.

Dans le deuxième cas, le but de l'étude est de déterminer la puissance maximale qui peut être transmise aux jeux de barres infinis à partir d'un fonctionnement initial sans qu'il y'ait une perte de synchronisme.

3.3.1.1.Cas 1.a) Fonctionnement

Dans ce cas, le système fonctionne avec une puissance initiale $P_{m1} = P_1 = 0.6 pu$, correspondant à un angle de fonctionnement $\delta_1 = 16.791^\circ$.

D'après les calculs effectués dans la partie A et la simulation du programme dans la partie B, la puissance maximale qui peut être transmise par le système lors d'augmentation soudaine de la puissance sans qu'il ait perte de synchronisme est dite puissance de stabilité critique est $P_{m2} = 1.684 pu$ qui correspond à un angle de fonctionnement $\delta_2 = 54.160^\circ$ et la puissance ajoutée est $P_{m2} - P_{m1} = 1.068 pu$.

3.3.1.2.Cas 1.b) Fonctionnement

Dans ce cas, le système fonctionne avec une puissance initiale $P_{m1} = P_1 = 0.0 pu$, correspondant à un angle de fonctionnement $\delta_1 = 0.0^\circ$.

D'après les calculs effectués dans la partie A et la simulation du programme dans la partie B, la puissance maximale qui peut être transmise par le système lors d'augmentation

soudaine de la puissance sans qu'il ait perte de synchronisme est dite puissance de stabilité critique est $P_{m2} = 1.505 pu$ qui correspond à un angle de fonctionnement $\delta_2 = 46.437^\circ$ et la puissance ajoutée est $P_{m2} - P_{m1} = 1.505 pu$.

3.3.1.3. Analyse des deux cas

On remarque que la puissance maximale augmentée (ajutée) dans le cas où la puissance initiale $P_{m1} = P_1 = 0.0 pu$ qui est de $1.505 pu$ est plus élevée par rapport à la puissance ajoutée lors du fonctionnement initial $P_{m2} = 1.684 pu$ qui est de $1.068 pu$.

3.3.2. Cas 2 : Etude de la stabilité lors d'apparition d'un défaut triphasé (court-circuit)

Dans le cas 2, nous avons étudié la stabilité d'un système électrique lors de l'apparition d'un court-circuit dans deux points du réseau à savoir, au début de la ligne au point F1 et au milieu de la ligne au point F2. L'objectif de cette étude est d'analyser la sévérité d'un défaut aux différents points du réseau.

3.3.2.1. Etude de la stabilité du réseau suite à un défaut triphasé au début de la ligne au point F1

La figure.III.10 représente les courbes de la puissance électrique transmise à un jeu de barres infini avant défaut, pendant défaut et après défaut.

3.3.2.1.1. Régime de fonctionnement normal

Pendant le régime normal le système fonctionne avec deux lignes en parallèle à une réactance $X = 0.65 pu$ et fournit une puissance maximale $P_{e1 max} = 1.8 pu$.

3.3.2.1.2. Régime de défaut au point F1

Suit à l'apparition d'un défaut (court-circuit triphasé) au point F1, la réactance de la ligne augmente infiniment, $X_{cc F1} = \infty$ et la puissance transmise est nulle $P_{e2 max} = 0 pu$.

3.3.2.1.3. Régime après défaut

Après défaut, la ligne en défaut est éliminée par intervention des disjoncteurs D1 et D2 et le réseau fonctionne avec une seule ligne de transmission avec une réactance $X_3 = 0.8 pu$ et donc une puissance maximale $P_{e3 max} = 1.4625 pu$ qui est inférieure à la puissance en régime de fonctionnement normal et supérieure à la puissance en régime de fonctionnement pendant défaut

$$P_{e2 max} < P_{e3 max} < P_{e1 max}$$

3.3.2.1.4. Analyse de l'angle critique

L'angle critique d'élimination de défaut pour un court-circuit au début de la ligne, point F1 est $\delta_{cr F1} = 71.224^\circ$.

3.3.2.2. Etude de la stabilité du réseau suite à un défaut triphasé au milieu de la ligne, point F2

La **figure.III.11** représente les courbes de la puissance électrique transmise à un jeu de barres infini avant défaut, pendant défaut et après défaut.

3.3.2.2.1. Régime de fonctionnement normal

Pendant le régime normal le système fonctionne avec deux lignes en parallèle à une réactance $X = 0.65 pu$ et fournit une puissance maximale $P_{e1 max} = 1.8 pu$.

3.3.2.2.2. Régime de défaut au point F2

Suit à l'apparition d'un défaut (court-circuit triphasé) au point F1, la réactance de la ligne augmente, $X_{cc F2} = 1.8 pu$ et la puissance transmise est nulle $P_{e2 max} = 0.65 pu$.

3.3.2.2.3. Régime après défaut

Après défaut, la ligne en défaut est éliminée par intervention des disjoncteurs **D1** et **D2** et le réseau fonctionne avec une seule ligne de transmission avec une réactance $X_3 = 0.8 pu$ et donc une puissance maximale $P_{e3 max} = 1.4625 pu$ qui est inférieure à la puissance en régime de fonctionnement normal et supérieure à la puissance en régime de fonctionnement pendant défaut

$$P_{e2 max} < P_{e3 max} < P_{e1 max}$$

3.3.2.3. Analyse de l'angle critique

L'angle critique d'élimination de défaut pour un court-circuit au début de la ligne, point F1 est $\delta_{cr F2} = 97.783^\circ$.

Cet exemple d'étude nous montre bien que l'angle critique d'élimination d'un système lors d'un défaut triphasé (court-circuit) au début de la ligne $\delta_{cr F1} = 71.771^\circ$ est inférieur à l'angle critique au milieu de la ligne $\delta_{cr F2} = 98.834^\circ$ ce qui veut dire que l'apparition d'un défaut au début de la ligne est plus sévère par rapport à un défaut au milieu de la ligne et on remarque encore que l'angle critique diminue avec l'augmentation de la réactance de la ligne. Pour que le système soit stable il faut que les disjoncteurs agissent à un angle inférieur ou égal à l'angle critique le plus sévère du système qui est dans notre cas d'étude $\delta_{cr F1} = 71.224^\circ$.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif le plus important des études de stabilité est de trouver le comportement dynamique des principales variables qui déterminent le fonctionnement des générateurs ainsi que l'angle, la vitesse, le courant, la tension et la puissance. Même, grâce à ces variables, il est possible de déterminer le temps critique d'élimination de défaut ou la marge de stabilité. Autrement dit, la stabilité transitoire vise à répondre à la question suivante : quel est le temps maximum de libération du défaut pour lequel le réseau reste stable.

Notre étude est axée sur la méthode d'égalité des aires dans l'étude de la stabilité transitoire d'une machine synchrone reliée à un réseau infini. Cette méthode classique est très simple à implémenter, donne des réponses simples (stable ou instable) mais ne permet pas de mesurer la marge ou le degré de stabilité ou l'instabilité du réseau, d'autres techniques pour l'évaluation de la stabilité transitoire d'une façon plus rapide et offrant la possibilité de mesurer le degré de stabilité sont nécessaires.

Les programmes Matlab établis sont d'une efficacité remarquable, ils donnent des résultats d'une grande précision avec une rapidité phénoménale, contrairement à la méthode d'analyse classique qui doit être laborieuse et qui nécessite des calculs mathématiques longs et complexes.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : F.MADANI et A.STITI : « **Etude des grands incidents sur le réseau électrique** » Mémoire d'ingénieur université M.MAMMERI TIZI -OUZOU -2008
- [2] : A.HADDAD et M.AMERANE : « **Etude de la stabilité d'une machine synchrone reliée a un réseau de puissance infinie** » Mémoire de master académique université M.MAMMERI TIZI -OUZOU -2014
- [3] : T.WILDY et G.SYBILLE : « **Electrotechnique** » Quatrième Edition « **DE BOECK** » - 2005.
- [4]: P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, « **Power System Stability and Control** »: McGraw-Hill Professional, 1994.
- [5]:Christophe PREVE et Robert JEANNOT: « **guide de conception des réseaux électriques industriels** » ,1997.
- [6] : B.De Metz-Noblat et G.Jeanjean : « **Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels** » - 1997.
- [7] :Anderson, P. M, A. A. Fouad et al. (2003). “**Power system control and stabilité**”
- [8]: Rabah BENABID : « **Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques** » UAT, Laghouat 2007,
- [9] : A. BOUSSAHOUA, « **Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique par les méthodes énergétiques** », mémoire magister, ENP, juillet 2004.
- [10] : M. Crapp, « **Stabilité et sauvegarde des réseaux d'énergie électrique** » Bernes sciencepublication, LAVOISIER, 2003.
- [11] : EskandarGHOLIPOURSHAHRAKI « **Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques** », p15 , l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.
- [12]: Fouad, A. A. and V. Vittal « **Power system transient stability analysis using the transient energy function method** ». Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall 1992
- [13] :Grainger, J. J. and W. D. Stevenson (1994). « **Power system analysis** ». New York ; Montréal, McGraw-Hill.
- [14] : James K.Robinson : « **Power system stability – computaton of critical clearing time and stability margin index** » 1976

ANNEXES

Programme pour calculer l'angle critique lorsque la puissance initiale augmente subitement

1 - Avec la puissance initiale égale à 0.6 p.u

```
clc;
clearall;
closeall;
P0=0.6;
E=1.35;
V=1.0;
X=0.65;
% This program obtains the power angle curve for a one-machine system
% during normal operation. Using equal area criterion the maximum input
% power that can be suddenly applied for the machine to remain critically
% stable is obtained.
if exist('P0')~=1
P0 = input('Generator initial power in p.u. P0 = '); else, end
if exist('E')~=1
E = input('Generator e.m.f. in p.u. E = '); else, end
if exist('V')~=1
V = input('Infinite bus-bar voltage in p.u. V = '); else, end
if exist('X')~=1
X = input('Reactance between internal emf and infinite bus in p.u. X = '); else, end
Pemax= E*V/X;
if P0 >= Pemax
fprintf('\nP0 must be less than the peak electrical power Pemax = %5.3fp.u. \n', Pemax)
fprintf('Try again. \n\n')
return, end
d0=asin(P0/Pemax);
delta = 0:.01:pi;
Pe = Pemax*sin(delta);
dmax=pi;
Ddmax=1;
while abs(Ddmax) > 0.00001
Df = cos(d0) - (sin(dmax)*(dmax-d0)+cos(dmax));
J=cos(dmax)*(dmax-d0);
Ddmax=Df/J;
dmax=dmax+Ddmax;
end
dc=pi-dmax;
Pm2=Pemax*sin(dc);
Pmx=[0 pi-d0]*180/pi; Pmy=[P0P0];
Pm2x=[0 dmax]*180/pi; Pm2y=[Pm2Pm2];
x0=[d0d0]*180/pi; y0=[0 Pm2]; xc=[dc dc]*180/pi; yc=[0 Pemax*sin(dc)];
xm=[dmaxdmax]*180/pi; ym=[0 Pemax*sin(dmax)];
d0=d0*180/pi; dmax=dmax*180/pi; dc=dc*180/pi;
x=(d0:.1:dc);
```

Annexes

```
y=Pemax*sin(x*pi/180);
% y1=Pe2max*sin(d0*pi/180);
% y2=Pe2max*sin(dc*pi/180);
x=[d0 x dc];
y=[Pm2 y Pm2];
xx=dc:.1:dmax;
h=Pemax*sin(xx*pi/180);
xx=[dc xx dmax];
hh=[Pm2 h Pm2];
delta=delta*180/pi;
%clc
fprintf('\nInitial power           =%7.3fp.u.\n', P0)
fprintf('Initial power angle       =%7.3f degrees \n', d0)
fprintf('Sudden additional power       =%7.3fp.u.\n', Pm2-P0)
fprintf('Total power for critical stability =%7.3fp.u.\n', Pm2)
fprintf('Maximum angle swing           =%7.3f degrees \n', dmax)
fprintf('New operating angle           =%7.3f degrees \n\n', dc)
fill(x,y,'m')
hold;
fill(xx,hh,'c')
plot(delta, Pe,'-', Pmx, Pmy,'g', Pm2x,Pm2y,'g', x0,y0,'c', xc,yc, xm,ym,'r'), grid
title('Equal-area criterion applied to the sudden change in power')
xlabel('Power angle, degree'), ylabel(' Power, per unit')
axis([0 180 0 1.1*Pemax])
hold off;
```

2 - Avec la puissance initiale égale à 0.0p.u:

```
Pm=0.0;
E=1.35;
V=1.0;
X=0.65;
% This program obtains the power angle curve for a one-machine system
% during normal operation. Using equal area criterion the maximum input
% power that can be suddenly applied for the machine to remain critically
% stable is obtained.
if exist('P0')~=1
P0 = input('Generator initial power in p.u. P0 = '); else, end
if exist('E')~=1
E = input('Generator e.m.f. in p.u. E = '); else, end
if exist('V')~=1
V = input('Infinite bus-bar voltage in p.u. V = '); else, end
if exist('X')~=1
X = input('Reactance between internal emf and infinite bus in p.u. X = '); else, end
Pemax= E*V/X;
if P0>= Pemax
fprintf('\nP0 must be less than the peak electrical power Pemax = %5.3fp.u. \n', Pemax)
fprintf('Try again. \n\n')
return, end
d0=asin(P0/Pemax);
delta = 0:.01:pi;
Pe = Pemax*sin(delta);
dmax=pi;
Ddmax=1;
while abs(Ddmax) > 0.00001
Df = cos(d0) - (sin(dmax)*(dmax-d0)+cos(dmax));
J=cos(dmax)*(dmax-d0);
Ddmax=Df/J;
dmax=dmax+Ddmax;
end
dc=pi-dmax;
Pm2=Pemax*sin(dc);
Pmx=[0 pi-d0]*180/pi; Pmy=[P0P0];
Pm2x=[0 dmax]*180/pi; Pm2y=[Pm2Pm2];
x0=[d0d0]*180/pi; y0=[0 Pm2]; xc=[dc dc]*180/pi; yc=[0 Pemax*sin(dc)];
xm=[dmaxdmax]*180/pi; ym=[0 Pemax*sin(dmax)];
```

```
d0=d0*180/pi; dmax=dmax*180/pi; dc=dc*180/pi;
```

-05-

```
x=(d0:.1:dc);
y=Pemax*sin(x*pi/180);
%y1=Pe2max*sin(d0*pi/180);
%y2=Pe2max*sin(dc*pi/180);
x=[d0 x dc];
y=[Pm2 y Pm2];
xx=dc:.1:dmax;
h=Pemax*sin(xx*pi/180);
xx=[dc xx dmax];
hh=[Pm2 h Pm2];
delta=delta*180/pi;
%clc
fprintf('\nInitial power           =%7.3fp.u.\n', P0)
fprintf('Initial power angle       =%7.3f degrees \n', d0)
fprintf('Sudden additional power      =%7.3fp.u.\n', Pm2-P0)
fprintf('Total power for critical stability =%7.3fp.u.\n', Pm2)
fprintf('Maximum angle swing          =%7.3f degrees \n', dmax)
fprintf('New operating angle           =%7.3f degrees \n\n', dc)
fill(x,y,'m')
hold;
fill(xx,hh,'c')
plot(delta, Pe, '-', Pmx, Pmy, 'g', Pm2x, Pm2y, 'g', x0, y0, 'c', xc, yc, xm, ym, 'r'), grid
title('Equal-area criterion applied to the sudden change in power')
xlabel('Power angle, degree'), ylabel(' Power, per unit')
axis([0 180 0 1.1*Pemax])
hold off;
```

Résultats du programme

Puissance initiale = 0.000 p.u.
Angle de fonctionnement initial = 0.000 degrés
Puissance ajoutée = 1.505 p.u.
Puissance totale de la stabilité critique = 1.505 p.u.
Angle maximum δ_{max} = 133.563 degrés
Nouveau angle de fonctionnement = 46.437 degrés

ETUDES DE STABILITÉ TRANSITOIRE: DÉFAUT

Programme pour calculer l'angle critique nécessaire quand un défaut triphasé s'est subitement produit au début de la ligne 2 au point F1.

```
clc;
clearall;
closeall;
Pm=0.8;
E=1.17;
V=1.0;
X1=0.65;
X2=inf;
X3=0.8;
% This program obtains the power angle curves for a one-machine system
% before fault, during fault and after the fault clearance.
% The equal area criterion is applied to find the critical clearing angle
% for the machine to stay synchronized to the infinite bus bar
if exist('Pm')~=1
Pm = input('Generator output power in p.u. Pm = '); else, end
if exist('E')~=1
E = input('Generator e.m.f. in p.u. E = '); else, end
if exist('V')~=1
V = input('Infinite bus-bar voltage in p.u. V = '); else, end
if exist('X1')~=1
X1 = input('Reactance before Fault in p.u. X1 = '); else, end
if exist('X2')~=1
X2 = input('Reactance during Fault in p.u. X2 = '); else, end
if exist('X3')~=1
X3 = input('Reactance after Fault in p.u. X3 = '); else, end
Pe1max = E*V/X1; Pe2max=E*V/X2; Pe3max=E*V/X3;
delta = 0:.01:pi;
Pe1 = Pe1max*sin(delta); Pe2 = Pe2max*sin(delta); Pe3 = Pe3max*sin(delta);
d0 =asin(Pm/Pe1max); dmax = pi-asin(Pm/Pe3max);
cosdc = (Pm*(dmax-d0)+Pe3max*cos(dmax)-Pe2max*cos(d0))/(Pe3max-Pe2max);
if abs(cosdc) > 1
fprintf('No critical clearing angle could be found.\n')
fprintf('system can remain stable during this disturbance.\n\n')
return
else, end
dc=acos(cosdc);
if dc > dmax
fprintf('No critical clearing angle could be found.\n')
fprintf('System can remain stable during this disturbance.\n\n')
return
```

Annexes

```
else, end
Pmx=[0 pi-d0]*180/pi; Pmy=[Pm Pm];
x0=[d0d0]*180/pi; y0=[0 Pm]; xc=[dc dc]*180/pi; yc=[0 Pe3max*sin(dc)];
xm=[dmaxdmax]*180/pi; ym=[0 Pe3max*sin(dmax)];
d0=d0*180/pi; dmax=dmax*180/pi; dc=dc*180/pi;
x=(d0:.1:dc);
y=Pe2max*sin(x*pi/180);
y1=Pe2max*sin(d0*pi/180);
y2=Pe2max*sin(dc*pi/180);
x=[d0 x dc];
y=[Pm y Pm];
xx=dc:.1:dmax;
h=Pe3max*sin(xx*pi/180);
xx=[dc xx dmax];
hh=[Pm h Pm];
delta=delta*180/pi;
ifX2 == inf
fprintf('\nFor this case tc can be found from analytical formula. \n')
H=input('To find tc enter Inertia Constant H, (or 0 to skip) H = ');
if H ~= 0
    d0r=d0*pi/180; dcr=dc*pi/180;
    tc = sqrt(2*H*(dcr-d0r)/(pi*60*Pm));
else, end
else, end
%clc
fprintf('\nInitial power angle = %7.3f \n', d0)
fprintf('Maximum angle swing = %7.3f \n', dmax)
fprintf('Critical clearing angle = %7.3f \n\n', dc)
ifX2==inf & H~=0
fprintf('Critical clearing time = %7.3f sec. \n\n', tc)
else, end
h = figure; figure(h);
fill(x,y,'m')
hold;
fill(xx,hh,'c')
plot(delta, Pe1,'-', delta, Pe2,'r-', delta, Pe3,'g-', Pmx, Pmy,'b-', x0,y0, xc,yc, xm,ym), grid
title('Application of equal area criterion to a critically cleared system')
xlabel('Power angle, degree'), ylabel(' Power, per unit')
text(5, 1.07*Pm, 'Pm')
text(50, 1.05*Pe1max,['Critical clearing angle = ',num2str(dc)])
axis([0 180 0 1.1*Pe1max])
hold off;
```

Résultats du programme

Pour ce cas, t_c peut être trouvée de la formule analytique.
Pour trouver t_c en fonction de la constante d'inertie H , (ou 0 pour l'ignorer)

Pour $H = 0$, on a :

L'angle de fonctionnement initial $\delta_0 = 26.388^\circ$

L'angle maximum $\delta_{\max} = 146.838^\circ$

L'angle critique de suppression de défaut est $\delta_{cr} = 71.771$

Annexes

Programme pour calculer l'angle critique nécessaire quand un défaut triphasé s'est subitement produit au début de la ligne 2 au point F1.

```
Pm=0.8;
E=1.17;
V=1.0;
X1=0.65;
X2=1.8;
X3=0.8;
% This program obtains the power angle curves for a one-machine system
% before fault, during fault and after the fault clearance.
% The equal area criterion is applied to find the critical clearing angle
% for the machine to stay synchronized to the infinite bus bar
if exist('Pm')~=1
Pm = input('Generator output power in p.u. Pm = '); else, end
if exist('E')~=1
E = input('Generator e.m.f. in p.u. E = '); else, end
if exist('V')~=1
V = input('Infinite bus-bar voltage in p.u. V = '); else, end
if exist('X1')~=1
X1 = input('Reactance before Fault in p.u. X1 = '); else, end
if exist('X2')~=1
X2 = input('Reactance during Fault in p.u. X2 = '); else, end
if exist('X3')~=1
X3 = input('Reactance after Fault in p.u. X3 = '); else, end
Pe1max = E*V/X1; Pe2max=E*V/X2; Pe3max=E*V/X3;
delta = 0:.01:pi;
Pe1 = Pe1max*sin(delta); Pe2 = Pe2max*sin(delta); Pe3 = Pe3max*sin(delta);
d0 = asin(Pm/Pe1max); dmax = pi-asin(Pm/Pe3max);
cosdc = (Pm*(dmax-d0)+Pe3max*cos(dmax)-Pe2max*cos(d0))/(Pe3max-Pe2max);
if abs(cosdc) > 1
fprintf('No critical clearing angle could be found.\n')
fprintf('system can remain stable during this disturbance.\n\n')
return
else, end
dc=acos(cosdc);
if dc > dmax
fprintf('No critical clearing angle could be found.\n')
fprintf('System can remain stable during this disturbance.\n\n')
return
else, end
Pmx=[0 pi-d0]*180/pi; Pmy=[Pm Pm];
x0=[d0d0]*180/pi; y0=[0 Pm]; xc=[dc dc]*180/pi; yc=[0 Pe3max*sin(dc)];
xm=[dmaxdmax]*180/pi; ym=[0 Pe3max*sin(dmax)];
```

Annexes

```
d0=d0*180/pi; dmax=dmax*180/pi; dc=dc*180/pi;
x=(d0:.1:dc);
y=Pe2max*sin(x*pi/180);
y1=Pe2max*sin(d0*pi/180);
y2=Pe2max*sin(dc*pi/180) ;
x=[d0 x dc];
y=[Pm y Pm];
xx=dc:.1:dmax;
h=Pe3max*sin(xx*pi/180);
xx=[dc xx dmax];
hh=[Pm h Pm];
delta=delta*180/pi;
ifX2 == inf
fprintf('\nFor this case tc can be found from analytical formula. \n')
H=input('To find tc enter Inertia Constant H, (or 0 to skip) H = ');
if H ~= 0
    d0r=d0*pi/180; dcr=dc*pi/180;
    tc = sqrt(2*H*(dcr-d0r)/(pi*60*Pm));
else, end
else, end
%clc
fprintf('\nInitial power angle    = %7.3f \n', d0)
fprintf('Maximum angle swing    = %7.3f \n', dmax)
fprintf('Critical clearing angle = %7.3f \n\n', dc)
ifX2==inf& H~=0
fprintf('Critical clearing time = %7.3f sec. \n\n', tc)
else, end
h = figure; figure(h);
fill(x,y,'m')
hold;
fill(xx,hh,'c')
plot(delta, Pe1,'-', delta, Pe2,'r-', delta, Pe3,'g-', Pmx, Pmy,'b-', x0,y0, xc,yc, xm,ym), grid
title('Application of equal area criterion to a critically cleared system')
xlabel('Power angle, degree'), ylabel(' Power, per unit')
text(5, 1.07*Pm, 'Pm')
text(50, 1.05*Pe1max,['Critical clearing angle = ',num2str(dc)])
axis([0 180 0 1.1*Pe1max])
hold off
```

