

ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE DU RESEAU IEEE-5 NŒUDS PAR LE CRITERE DES AIRES EGALES ET LA METHODE DU PLAN DE PHASE

Walid Rahmouni, Lahouaria Benasla

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Algérie, Département d'Electrotechnique

Corresponding author: Lahouaria Benasla, jbenasla@yahoo.fr

RÉSUMÉ: L'objectif de cet article est d'analyser la stabilité transitoire (ST) du réseau IEEE- 5 nœuds par deux méthodes différentes, suite à un défaut triphasé. Les méthodes proposées sont le critère des aires égales (CAE) et la méthode du plan de phase (pp).

Pour analyser cette stabilité, nous avons fait appel au modèle classique dans lequel les machines sont représentées électriquement, par des f.e.ms constantes en module en série avec leurs réactances transitoires d'axe direct.

Nous avons procédé essentiellement à la réduction de l'ensemble des nœuds du réseau aux seuls nœuds producteurs par la méthode de Kron. Les résultats de simulations obtenus sont validés par comparaison avec ceux obtenus en utilisant l'intégration numérique.

MOTS CLÉS: Stabilité transitoire, Méthode de Kron, Méthode du Plan de phase, Critère des aires égales.

1. INTRODUCTION

Les réseaux électriques modernes continuent de croître en termes de taille et de complexité, et cela est dû à la grande demande en électricité. Les exigences de fonctionnement des réseaux électriques sont extrêmement élevées, c'est pourquoi les réseaux électriques doivent continuellement fonctionner tout en maintenant leur fiabilité et leur sécurité. Parmi les diverses analyses de la sécurité dynamique, la stabilité transitoire est l'une des évaluations les plus essentielles et importantes. Récemment, les ingénieurs et chercheurs ont prêté une très grande attention à l'étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques [SS14].

L'étude de la stabilité transitoire fournit des informations relatives aux variations dans le temps des angles internes, des vitesses rotoriques,... avant, pendant et après la perturbation. Cette analyse permet d'une part de juger si le système est en fonctionnement stable ou non et d'autre part de dimensionner les protections censées éliminer le défaut avant d'atteindre le temps critique [Oua08].

Pour l'évaluation de ce temps critique, des méthodes conventionnelles basées sur la résolution numérique des systèmes d'équations différentielles algébriques ont été utilisées. Ces méthodes numériques sont précises. Cependant, leur solution numérique exige

un temps de calcul trop long [ZLM07].

Pour pallier aux faiblesses de ces méthodes, d'autres méthodes ont été développées dans les années 60 telles que la méthode directe de Lyapunov et la méthode directe qui applique le critère des aires égales [SAS12]. Des méthodes hybrides ont été ensuite développées [Z+97].

Les résultats obtenus par les méthodes directes sont restreints à un modèle spécifique et valables dans certains cas et donne des résultats limités en temps réel [VP12].

Dans cet article, nous appliquons le critère des aires égales et la méthode du plan de phase pour l'évaluation de la stabilité transitoire du réseau IEEE 5 nœuds, réduit aux seuls nœuds générateurs en appliquant la méthode de Kron.

Les résultats de simulations obtenus en appliquant les deux méthodes sont comparés en termes de temps et angles critiques.

2. CRITERE DES AIRES EGALES

Le critère des aires égales est une méthode graphique adoptée pour la résolution du problème de la stabilité transitoire d'un système à deux machines ou d'une machine raccordée à un réseau infini. Il permet de trouver le temps critique d'élimination du défaut, sans passer par la résolution de l'équation d'oscillations.

La figure 1 représente le graphe $P_e - \delta$ (Puissance électrique/angle rotorique) pour les différentes topologies du système machine-réseau infini [Saa99]. Les indices 1, 2 et 3 se réfèrent respectivement aux situations avant défaut, pendant défaut et après défaut.

L'évaluation de la stabilité transitoire par le critère des aires égales se base sur le calcul des surfaces d'accélération A_a représentant l'énergie cinétique emmagasinée par le rotor durant le défaut et de décélération A_d représentant l'énergie restituée après l'élimination du défaut.

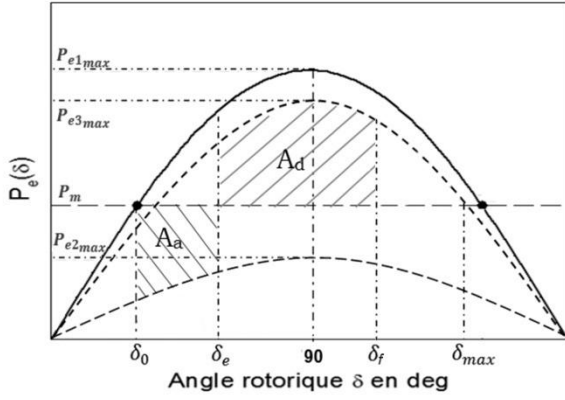


Fig. 1. Présentation graphique du (CAE)

Ces deux surfaces sont exprimées par:

$$A_a = \int_{\delta_0}^{\delta_e} (P_m - P_{e2max} \sin(\delta)) d\delta \quad (1)$$

$$A_d = \int_{\delta_e}^{\delta_f} (P_{e3max} \sin(\delta) - P_m) d\delta \quad (2)$$

Le critère d'égalité des aires indique que le système en défaut est capable de récupérer la stabilité tant que la surface A_a est plus petite que la surface A_d . L'angle critique est obtenu en résolvant l'équation:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{e2max} \sin(\delta)) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{e3max} \sin(\delta) - P_m) d\delta \quad (3)$$

- δ_0 Angle rotorique initial.
- δ_e Angle rotorique d'élimination du défaut.
- P_m Puissance mécanique.
- $P_{e_{max}}$ Puissance électrique maximale.

Le système incluant deux machines d'inerties finies H_a et H_b peut être étudié via un système machine-réseau infini équivalent [AF94].

Les équations de mouvement pour deux machines interconnectées s'écrivent comme suit [Saa99]:

$$\frac{H_a}{\pi f} \frac{d^2 \delta_a}{dt^2} = P_{ma} - P_{ea}(\delta_a) \quad (4)$$

$$\frac{H_b}{\pi f} \frac{d^2 \delta_b}{dt^2} = P_{mb} - P_{eb}(\delta_b) \quad (5)$$

On a successivement:

$$\frac{1}{\pi f} \left(\frac{d^2 \delta_a}{dt^2} - \frac{d^2 \delta_b}{dt^2} \right) = \frac{P_{ma} - P_{ea}(\delta_a)}{H_a} - \frac{P_{mb} - P_{eb}(\delta_b)}{H_b} \quad (6)$$

Posant:

$$\begin{cases} \delta_{ab} = \delta_a - \delta_b \\ H = \frac{H_a H_b}{H_a + H_b} \\ P_M = \frac{H_b P_{ma} - H_a P_{mb}}{H_a + H_b} \\ P_E = \frac{H_b P_{ea}(\delta_a) - H_a P_{eb}(\delta_b)}{H_a + H_b} \end{cases}$$

L'équation (6) s'écrit:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta_{ab}}{dt^2} = P_M - P_E(\delta_{ab}) \quad (7)$$

On peut décomposer l'équation (7) en un système de deux équations non-linéaires du premier ordre comme suit:

$$\begin{cases} 2H \frac{d\omega_{ab}}{dt} = P_M - P_E(\delta_{ab}) \\ \frac{d\delta_{ab}}{dt} = \omega_{ab} - \omega_s = \Delta\omega_{ab} \end{cases} \quad (8)$$

$\Delta\omega_{ab}$ est l'écart de la vitesse rotorique ω_{ab} par rapport à la vitesse de synchronisme ω_s .

L'expression du critère des aires égales est donnée par:

$$\frac{\pi f}{H} \int_{\delta_{ab20}}^{\delta_{abmax}} (P_M - P_E(\delta_{ab})) d\delta_{ab} = 0 \quad (9)$$

Les surfaces d'accélération A_{aeq} et de décélération A_{deq} sont respectivement données par:

$$A_{aeq} = \int_{\delta_{ab0}}^{\delta_{abcr}} (P_M - P_{E2}(\delta_{ab})) d\delta_{ab} \quad (10)$$

$$A_{deq} = \int_{\delta_{abcr}}^{\delta_{abmax}} (P_{E3}(\delta_{ab}) - P_M) d\delta_{ab} \quad (11)$$

P_E et P_M sont respectivement les puissance électrique et mécanique équivalentes, δ_{ab} est l'écart angulaire et H est la constante d'inertie équivalente.

3. METHODE DU PLAN DE PHASE

La méthode du plan de phase qui est une technique utilisée pour l'étude des solutions des équations différentielles non linéaires, a été introduite par Henri Poincaré au XIX^{ème} siècle [Gra14].

Considérons un système du second ordre:

$$f = \left(\frac{d^2 x(t)}{dt^2}, \frac{dx(t)}{dt}, x(t), t \right) \quad (12)$$

Cette équation peut se ramener à un système de deux équations différentielles du premier ordre :

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = f_1(x_1(t), x_2(t)) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = f_2(x_1(t), x_2(t)) \end{cases} \quad (13)$$

Où $x_1(t)$ et $x_2(t)$ désignent les variables d'état ou de phase du système, f_1 et f_2 sont des fonctions scalaires non linéaires des variables d'état.

Le point $x(0) = x_0 = x_1(0) = x_2(0)$ est dit point singulier ou critique ou centre. C'est un point d'équilibre dans le plan de phase ou un point où la trajectoire coïncide avec la condition initiale.

Ce point singulier sera stable si toutes les trajectoires de phase concourent vers ce point, instable dans le cas contraire [Jut06].

Il existe de nombreuses méthodes de construction des trajectoires de phase pour les systèmes linéaires ou non linéaires (méthode analytique, méthode des isoclines, méthode delta, ...). Du fait de sa simplicité, nous n'étudierons que la méthode analytique. Il existe deux techniques pour générer analytiquement les trajectoires de phase [Ngu02] :

Première technique: Cette technique consiste par intégration du système d'équations exprimé par l'équation (13) à trouver deux solutions fonction du temps:

$$x_1(t) = g_1(t) \text{ et } x_2(t) = g_2(t) \quad (14)$$

En éliminant ensuite le temps, il est possible d'établir une représentation implicite des trajectoires dans le plan de phase sous la forme:

$$g(x_1(t), x_2(t), c) = 0 \quad (15)$$

Où c est une constante qui dépend des conditions initiales.

Deuxième technique: Une deuxième approche consiste à éliminer la variable temps en calculant le rapport:

$$\frac{dx_2(t)}{dx_1(t)} = \frac{f_2(x_1(t), x_2(t))}{f_1(x_1(t), x_2(t))} \quad (16)$$

Puis par intégration, on établit une relation en $x_1(t)$ et $x_2(t)$.

Pour l'analyse de la stabilité transitoire par la méthode du plan de phase, nous considérons l'équation 7 qui exprime la dynamique de deux machines synchrones.

Les points d'équilibre du système dynamique régi par l'équation 8 sont déterminés en imposant les conditions suivantes:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_{ab}}{dt} = 0 \\ \frac{d\Delta\omega_{ab}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

L'équation (17) montre que chaque état d'équilibre possible correspond à un écart $\Delta\omega_{ab}$ nul. Graphiquement, cela signifie que chaque état d'équilibre sera situé sur l'axe $\Delta\omega_{ab} = 0$ du plan de phase.

Pour analyser la stabilité transitoire d'un réseau électrique, il faut construire les trajectoires de phase pour les étapes avant, pendant et après défaut (pour différentes conditions initiales). La méthode analytique utilisant la deuxième technique a été choisie dans cet article pour la construction de ces trajectoires.

Les étapes avant, pendant et après défaut sont mathématiquement décrites comme suit :

1. Etape avant défaut

Le point d'équilibre est donné par:

$$P_1 = (\delta_{ab01}, \Delta\omega_{ab} = 0)$$

La trajectoire avant défaut est le point P_1

2. Etape pendant défaut

Le mouvement pendant le défaut commence à $(\delta_{ab01}, 0)$. Le modèle pendant le défaut est représenté par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_{ab}}{dt} = \omega_{ab} - \omega_s = \Delta\omega_{ab} \\ \frac{d\Delta\omega_{ab}}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (p_M - p_{E2}(\delta_{ab})) \end{cases} \quad t_a \leq t \leq t_e \quad (18)$$

t_a et t_e sont respectivement le temps d'application et d'élimination du défaut.

Pour tracer la trajectoire de cette phase, on élimine la variable temps et on calcule le rapport:

$$\frac{d\delta_{ab}}{d(\Delta\omega_{ab})} = \frac{\Delta\omega_{ab}}{\frac{\pi f}{H} (p_M - p_{E2}(\delta_{ab}))} \quad (19)$$

Puis par intégration,

$$\frac{\pi f}{H} \int_{\delta_{ab0}}^{\delta_{ab}} (p_M - p_{E2}(\delta_{ab})) d\delta_{ab} = \int_0^{\Delta\omega_{ab}} \Delta\omega_{ab} d\Delta\omega_{ab} \quad (20)$$

On établit une relation en $\Delta\omega_{ab}$ et δ_{ab} :

$$\Delta\omega_{ab} = + \sqrt{\frac{2\pi f}{H} \int_{\delta_{ab0}}^{\delta_{ab}} (P_M - P_{E2}(\delta_{ab})) d\delta_{ab}} \quad (21)$$

On ne prend que le radical positif car le système accélère pendant le défaut.

3. Etape après défaut

Après l'élimination du défaut du modèle est représenté par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_{ab}}{dt} = \omega_{ab} - \omega_s = \Delta\omega_{ab} \\ \frac{d\Delta\omega_{ab}}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (P_M - P_{E3}(\delta_{ab})) \quad t > t_e \end{cases} \quad (22)$$

Le point d'équilibre est donné par:

$$(\delta_{ab03}, \Delta\omega_{ab} = 0)$$

Le point de selle est donné par:

$$(\delta_{ab\max 3}, \Delta\omega_{ab} = 0)$$

Pour tracer la trajectoire de cette phase, on élimine la variable temps et on calcule le rapport:

$$\frac{d\delta_{ab}}{d(\Delta\omega_{ab})} = \frac{\Delta\omega_{ab}}{\frac{\pi f}{H} (P_M - P_{E3}(\delta_{ab}))} \quad (23)$$

Puis par intégration,

$$\frac{\pi f}{H} \int_{\delta_{ab}}^{\delta_{ab\max}} (P_M - P_{E3}(\delta_{ab})) d\delta_{ab} = \int_{\Delta\omega_{ab}}^0 \Delta\omega_{ab} d\Delta\omega_{ab} \quad (24)$$

On établit une relation en $\Delta\omega_{ab}$ et δ_{ab} :

$$\Delta\omega_{ab} = \pm \sqrt{\frac{2\pi f}{H} \int_{\delta_{ab}}^{\delta_{ab\max}} (P_M - P_{E3}(\delta_{ab})) d\delta_{ab}} \quad (25)$$

L'équation (25) donne la trajectoire après la perturbation.

4. METHODE DE KRON

Pour mener une étude de stabilité transitoire, il est intéressant de faciliter les calculs tout en utilisant une technique analytique simple qui consiste à réduire un système multi-machines en un réseau comportant seulement les nœuds producteurs. Cette réduction est basée sur une propriété importante qui stipule que les courants injectés aux nœuds sont nuls sauf pour les nœuds machines [ZG13].

L'équation du réseau [DB13] s'écrit:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_p \\ \vec{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{Y}_{pp} & \vec{Y}_{pi} \\ \vec{Y}_{ip} & \vec{Y}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_p \\ \vec{V}_i \end{bmatrix} \quad (26)$$

\vec{I}_i Vecteur des courants injectés.

\vec{I}_p Vecteur des courants générés.

\vec{E}_p Vecteur des tensions générées.

\vec{V}_i Vecteur des tensions nodales.

\vec{I}_i est nul, par conséquent,

$$\begin{cases} \vec{I}_p = \vec{Y}_{pp}\vec{E}_p + \vec{Y}_{pi}\vec{V}_i \\ \vec{0} = \vec{Y}_{ip}\vec{E}_p + \vec{Y}_{ii}\vec{V}_i \end{cases} \Rightarrow \vec{V}_i = -\vec{Y}_{ii}^{-1}\vec{Y}_{ip}\vec{E}_p \quad (27)$$

En éliminant V_i nous obtenons:

$$\vec{I}_p = (\vec{Y}_{pp} - \vec{Y}_{pi}\vec{Y}_{ii}^{-1}\vec{Y}_{ip})\vec{E}_p = \vec{Y}_{red}\vec{E}_p \quad (28)$$

La matrice $(\vec{Y}_{pp} - \vec{Y}_{pi}\vec{Y}_{ii}^{-1}\vec{Y}_{ip})$ est la matrice réduite ou matrice de Kron. Elle donne une description du réseau réduit à ses nœuds machines.

5. SIMULATIONS

Le réseau considéré est le réseau IEEE-5 nœuds [KB16]. Son schéma unifilaire est illustré par la figure 2. Ce réseau est représenté en pu utilisant une base commune de 100 MVA.

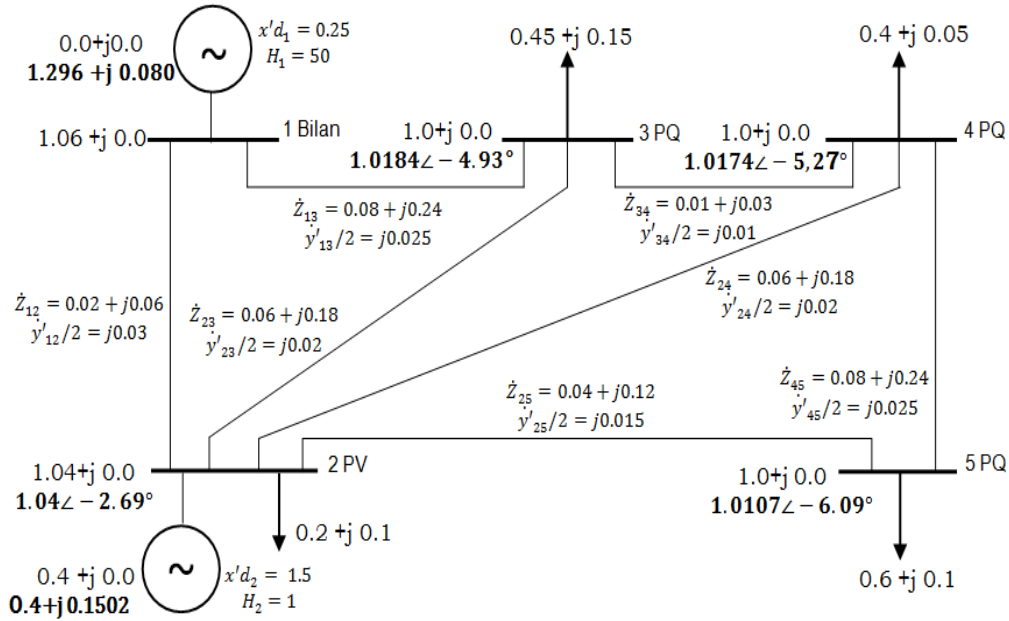


Fig. 2. Schéma unifilaire du réseau IEEE-5 nœuds

Les caractéristiques du réseau (valeurs des impédances, des admittances shunts et des tensions nodales estimées), les valeurs planifiées des puissances générées et consommées et les valeurs relatives des paramètres des alternateurs sont indiquées sur la figure 2. Pour représenter les générateurs, nous avons choisi le modèle classique [AF94].

Les résultats du calcul de l'écoulement de puissance sont obtenus à partir d'un programme utilisant la méthode de Gauss-Seidel [SE68]. Ce programme converge en 15 itérations avec une précision de 10^{-6} et un coefficient d'accélération de 1,4. Ces résultats sont donnés par la figure 2 (valeurs en gras). Ces résultats représentent les valeurs des tensions nodales de la dernière itération (module et la phase de la tension) et les valeurs des puissances générées. De là nous avons pu calculer les valeurs initiales (module des f.e.m $|\vec{E}_i|$ et leurs angles initiaux δ_{i0}) des deux machines et des admittances des charges [AF94]. Ces admittances sont supposées constantes. Ces valeurs sont mentionnées sur la figure 3.

En incluant les réactances transitoires x'_d des machines, le schéma unifilaire du réseau sera illustré par la figure 3.

Si les réactances transitoires des machines x'_d et les admittances des charges sont incluses dans la matrice des admittances, la matrice de Kron ou la matrice réduite en régime de fonctionnement normal (avant défaut) sera la suivante:

$$[\vec{Y}'_{red1}] = \begin{bmatrix} 0.893 - j0.957 & 0.163 + j0.468 \\ 0.163 + j0.468 & 0.037 - j0.574 \end{bmatrix}$$

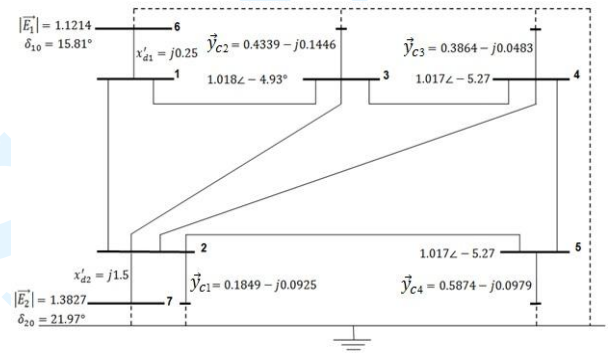


Fig. 3. Schéma unifilaire du réseau incluant les réactances transitoires

Si les réactances transitoires des machines x'_d et les admittances des charges sont incluses dans la matrice des admittances, la matrice de Kron ou la matrice réduite en régime de fonctionnement normal (avant défaut) sera la suivante:

$$[\vec{Y}'_{red1}] = \begin{bmatrix} 0.893 - j0.957 & 0.163 + j0.468 \\ 0.163 + j0.468 & 0.037 - j0.574 \end{bmatrix}$$

Le schéma unifilaire du réseau réduit à ses nœuds machines en appliquant la méthode de Kron est illustré par la figure 4.

Le réseau fonctionnant normalement en régime établi, nous supposons qu'à l'instant $t = 0,1s$ un court-circuit triphasé symétrique se produit au début de la ligne 1-2, près du nœud 1. Ce défaut est éliminé avec déclenchement de la ligne en défaut.

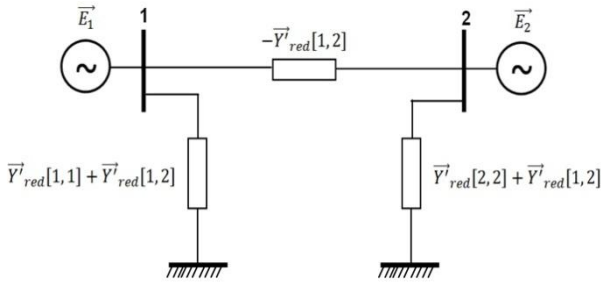


Fig. 4. Schéma unifilaire du réseau réduit à ses nœuds machines

Aux deux étapes consécutives caractérisant la modification de la structure du réseau correspondent les deux matrices réduites $[\vec{Y}_{red2}]$ pendant défaut et $[\vec{Y}_{red3}]$ après défaut :

$$[\vec{Y}_{red2}] = \begin{bmatrix} -j4 & 0 \\ 0 & 0.008 - j0.646 \end{bmatrix}$$

$$[\vec{Y}_{red1}] = \begin{bmatrix} 0.628 - j0.804 & 0.16 + j0.335 \\ 0.16 + j0.335 & 0.08 - j0.542 \end{bmatrix}$$

Aux trois étapes consécutives caractérisant la modification de la structure du réseau correspondent les trois équations de la puissance électrique équivalente, $p_{E1}(\delta_{ab})$ avant défaut, $p_{E2}(\delta_{ab})$ pendant défaut et $p_{E3}(\delta_{ab})$ après défaut.

$$p_{E1}(\delta_{ab}) = 2.41 + 12.39 \cos(\delta_{ab}) + 36.99 \sin(\delta_{ab})$$

$$p_{E2}(\delta_{ab}) = 0.76 p_u$$

$$p_{E3}(\delta_{ab}) = 6.81 + 12.13 \cos(\delta_{ab}) + 26.46 \sin(\delta_{ab})$$

La puissance mécanique équivalente: $p_M = 18.70 p_u$
Remarque : La puissance électrique et la puissance mécanique de chaque machine sont calculées en utilisant les équations suivantes [AF94]:

$$p_{ei}(t) = \sum_{j=1}^{ng} |E_i| |E_j| |\vec{Y}_{ijred}| \cos(\delta_i(t) - \delta_j(t) - \theta_{ij})$$

$$p_{mi}(t) = \sum_{j=1}^{ng} |E_i| |E_j| |\vec{Y}_{ijred}| \cos(\delta_{i0}(t) - \delta_{j0}(t) - \theta_{ij}) = P_{ei0}$$

Pour l'évaluation de la stabilité transitoire du réseau (détermination du temps et de l'angle critiques), nous allons appliquer le critère des aires égales et la méthode du plan de phase.

5.1. Critère des Aires Egales

La présentation graphique du critère des l'aires égales est illustrée par la figure 5.

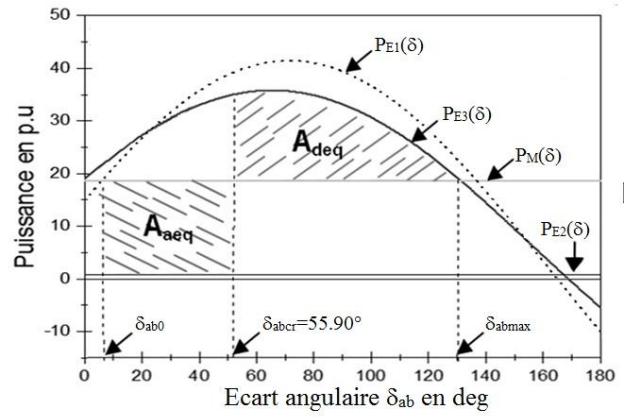


Fig. 5. Présentation graphique du (CAE)

À l'occurrence d'un défaut électrique, en δ_{ab0} , la puissance électrique $p_{E1}(\delta_{ab})$ tombe à $p_{E2}(\delta_{ab})$ jusqu'au point δ_{abcr} . Ici, le défaut est enlevé et la puissance électrique $p_{E3}(\delta_{ab})$ devient plus grande que la puissance mécanique jusqu'au point maximal δ_{abmax} . A l'état critique, l'énergie d'accélération représentée par (A_{aeq}) est égale à l'énergie de décélération représentée par (A_{deq}).

Pour la détermination du temps critique, nous avons appliqué la méthode pas-à-pas [Sha14]. Les variations de l'angle rotorique en fonction du temps, en appliquant cette dernière, sont reportées sur la figure 6. Ce temps est évalué à 0.160 s.

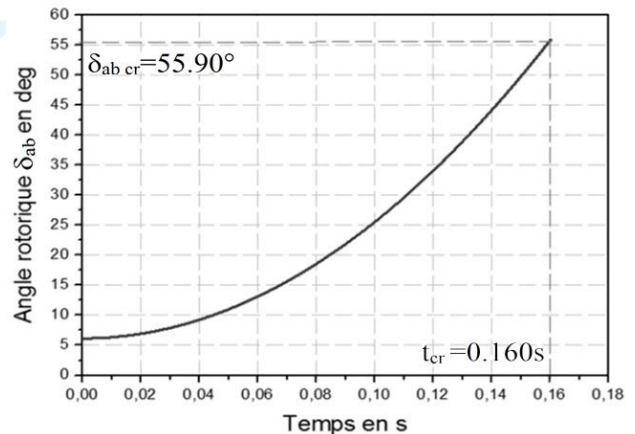


Fig. 6. Variations de $\delta_{ab}(t)$ -Méthode pas à pas

5.2. Plan de phase

Le point d'équilibre du système après défaut est donné par:

$$\begin{cases} \Delta\omega_{ab} = 0 \\ \delta_{ab03} = -0.50^\circ = -0.009rad \end{cases}$$

Le point de selle est donné par:

$$(\delta_{abmax}, \Delta\omega_{ab}) = (2.29rad, 0rad/s) = (131.25^\circ, 0)$$

δ_{ab03} et δ_{abmax} sont obtenus en résolvant l'équation :

$$p_{E3}(\delta_{ab}) = p_M$$

$$6.81 + 12.13\cos(\delta_{ab}) + 26.46\sin(\delta_{ab}) = 18.70p.u$$

La figure 7 illustre les variations de $\Delta\omega_{ab}$ en fonction de δ_{ab} pour les étapes avant, pendant et après le défaut.

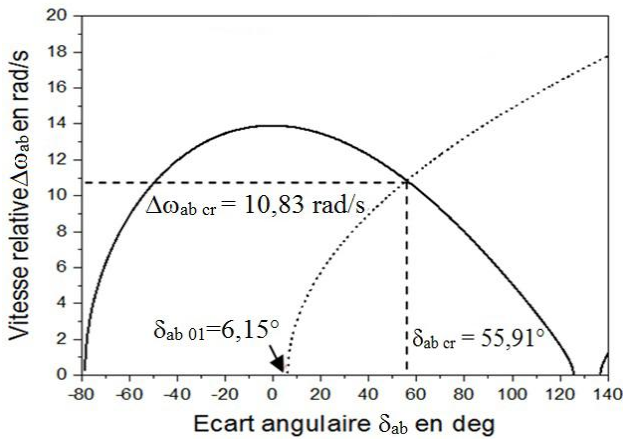


Fig. 7. Plan de phase

La figure 7 illustrant les variations de $\Delta\omega_{ab}$ en fonction de δ_{ab} pour les étapes avant, pendant et après le défaut, montre le point d'équilibre avant défaut $(\delta_{ab01}, 0) = (6.15^\circ, 0 \text{ rad/s})$, la trajectoire pendant défaut, qui démarre à $(\delta_{ab01}, 0)$ et se termine à $(\delta_{abcr}, \Delta\omega_{abcr})$ et la trajectoire après défaut correspondante au cas critique stable. Ce contour correspond au temps critique d'élimination du défaut.

Les coordonnées du point d'intersection entre la trajectoire pendant défaut et la trajectoire après défaut, représentent l'écart angulaire et l'écart de la vitesse relative critiques.

Pour calculer les temps critique, nous avons utilisé la méthode pas à pas. Ce temps est évalué à 0.160 s.

5.3. Comparaison

Pour valider nos résultats, nous avons choisi de les comparer avec ceux obtenus par application d'une méthode numérique. La méthode choisie est celle de Runge-Kutta d'ordre 4. C'est la méthode la plus précise, raison pour laquelle elle est la plus utilisée dans les études de la stabilité transitoire des réseaux électriques pour évaluer le temps critique d'élimination du défaut. L'application de cet algorithme permet de résoudre aisément l'équation de mouvement de la machine et par suite de représenter la courbe d'évolution dans le temps de l'angle interne.

En l'appliquant, les variations de l'écart angulaire δ_{ab} en fonction du temps sont illustrées par la figure 8.

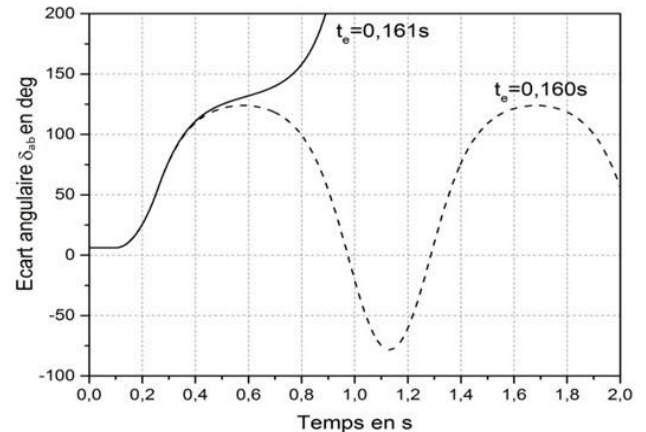


Fig. 8. Variations de l'écart angulaire en fonction du temps

Le temps et l'angle critique sont évalués à 0,160 s et $55,76^\circ$.

Les résultats (δ_{abcr} et t_{cr}) obtenus par le critère des aires égales et la méthode du plan de phase sont presque identiques. Ces mêmes résultats sont en bon accord avec ceux trouvés en appliquant la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

6. CONCLUSIONS

Nous avons considéré le défaut triphasé qui est dicté par sa sévérité et son influence néfaste sur le comportement dynamique du réseau, dans l'étude de la stabilité transitoire du réseau multi-machines IEEE 5 nœuds. Nous avons procédé essentiellement à la réduction de l'ensemble des nœuds du réseau aux seuls nœuds producteurs (deux nœuds) par la méthode de Kron.

Les résultats obtenus par le critère des surfaces égales sont restreints à un modèle spécifique. Il permet d'analyser graphiquement la stabilité du réseau, et a l'avantage de ne pas résoudre les équations d'oscillation pour statuer sur la stabilité transitoire du réseau.

La méthode du plan de phase permet de visualiser comment un système non-linéaire débute pour différentes conditions initiales, sans résoudre les équations non-linéaires analytiquement. Elle combine la force de la méthode numérique d'intégration classique et la simplicité et la représentation graphique de la méthode du critère des surfaces égales.

Nous pouvons affirmer que, d'une façon générale, les deux méthodes offrent les mêmes résultats. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par la résolution numérique des équations différentielles par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

REFERENCES

- [AF94] **P. M. Anderson, A. A. Fouad** - *Power system control and stability*, IEEE Press, Marketing, 1994, p. 13-52.
- [DB13] **F. Dörfler, F. Bullo** - *Kron Reduction of Graphs With Applications to Electrical Networks*, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, vol. 60, n°1, 2013.
- [Gra14] **M. J. Grayling** - *phaseR: An R Package for Phase Plane Analysis of Autonomous ODE Systems*, The R Journal, Vol. 6 numero 2, 2014.
- [Jut06] **C. Jutten** - *Systèmes asservis non linéaires*, Cours de troisième année du département 3i Options Automatique, Université Joseph Fourier-Polytech, Grenoble, 2006.
- [KB16] **A. K. Kailay, Y. S. Brar** - *FACTS Based Power System Optimization by Using Newton Raphson Technique*, International Journal of Emerging Research in Management & Technology, Vol 5, Issue 1, pp. 1-7, January 2016.
- [Ngu02] **T. T. Nguyen** - *Phase Plane Analysis*, (2002). [Online]. Available: <http://www4.hcmut.edu.vn/~nttien/Lectures/Applied%20nonlinear%20control/C.2%20Phase%20Plane%20Analysis.pdf>. [Accessed:11-May-2017].
- [Oua08] **A. Ouali** - *Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences*, Thèse de Magister soutenue à l'USTHB, Algérie, 2008.
- [Saa99] **H. Saadat** - *Power system analysis*, New York: WCB/McGraw-Hill, p. 486-501, 1999.
- [Sha14] **C. S. Sharma** - *Stability Analysis of Single Machine Infinite Bus System by Numerical Method*, International Journal of Electrical and Electronics Research, vol. 2, no. 3, 2014.
- [SE68] **G. W. S. Stagg, El Abiad** - *Computer methods in power system analysis*, Mc.Graw Hill Book Company, Second Edition, 1968, p.261-265.
- [SS14] **A. Shrivastava, H. M. Siddiqui** - *A Simulation Analysis of Optimal Power Flow using Differential Evolution Algorithm for IEEE-30 Bus System*, International Journal of Recent Development in Engineering and Technology, Vol.2, Issue 3, 2014.
- [SAS12] **I. B. Sulistiawati, M. Abdillah, A. Soeprijanto** - *Prediction of Critical Clearing Time of Java-Bali 500 kv Power System Under Multiple Bus Load Changes Using Neural Network Based Transient Stability Model*, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol.4, Number 1, 2012.
- [VP12] **A. P. Vaidya, Rohit V. Patil** - *Comparison of different types of transient stability assessments during congestion*, IEEE - International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012.
- [ZG13] **X. Zhang, S. Grijalva** - *Multi-Area ATC Evaluation Based on Kron Reduction*, 2013 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), 2013.
- [ZLM07] **H. Zaier, S. Leulmi, M. Mordjaoui** - *Utilisation de la technique de catastrophe dans l'évaluation de la stabilité des réseaux électriques*, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP' 2007, Sétif, Algérie, 2007.
- [Z+97] **Y. Zhang, L. Wehenkel, P. Rousseaux, M. Pavella** - *SIME: A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection*, Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 3, Elsevier Science Ltd, 1997.