

Amélioration de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS : UPFC

B. Ayachi, A. Boukadoum, S. Leulmi, A. Bahri
Laboratoire d'Electrotechnique de Skikda « LES »
Département d'Electrotechnique
Université du 20 Août 1955 – Skikda, Algérie

ay_bilel@yahoo.fr, boukadoum2003@yahoo.fr, salah.leulmi@yahoo.fr, bahridoc@yahoo.fr,

مقدمة - التصنيع و النمو الديمغرافي يعتبران العوامل التي من أجلها يتزايد استهلاك الطاقة الكهربائية . لتحقيق توازن بين الإنتاج و الاستهلاك ، يبدو لأول وهلة ، يتم بإضافة محطات توليد الطاقة الكهربائية ، الخطوط الكهربائية ، المحولات الكهربائية... إلخ . هذه الطريقة ينجم عنها زيادة في التكلفة العامة و تدني في الوسط الطبيعي. لهذا يجب استعمال شبكات لربط و نقل الطاقة الكهربائية حلقية و العمل بالقرب من حدود الاستقرار وذلك لتلبية هذه الشروط الجديدة.

الشبكات الحلقية، تحت ظروف عبور الطاقات الحلقية غير المرغوب فيها في مناطق الربط، تتعرض لزيادة في الحمل و مشاكل في الاستقرار و تزايد في الضياعات. من بين الطرق الكلاسيكية لمراقبة الشبكات، نذكر : محولات قابلة للتحكم ، محولات طورية ، معوضات بالتسلسل أو بالتفرع متحكم فيها بالقواطع، تغيير شروط الإنتاج، تغيير بنية و هيكل الشبكة، التحكم في تحريض المولدات. هذه الطرق تعتبر بطيئة و غير كافية، خاصة، عند وجود اضطرابات في الشبكة الكهربائية و إجهادات جديدة.

يجب إكمال عملها باستعمال أجهزة مرنة مثل الـ FACTS للمراقبة و التحكم و خاصة في استقرار الشبكة. تطور أجهزة الـ FACTS أدى إلى الاستغلال الأمثل للشبكات الكهربائية بطريقة مستمرة و سريعة للتحكم في مختلف عوامل الشبكة الكهربائية (فرق الطور، التوتر، الممانعة) . وبالتالي نستطيع التحكم بشكل جيد في سريان الطاقة و توفير ثبوت التوتر و التردد معا و بالتالي حدود الاستقرار تكون أفضل .

دراسة الاستقرار العابر يهتم ، أكثر، بالاضطرابات الكبيرة كالأعطال ، فقدان جزء من المنشآت ، محطة أو مجموعة من مولدات الطاقة... إلخ . نتائج هذه الأعطال قد تكون خطيرة جدا . مما ، قد يؤدي حتى إلى الانهيار الكامل للشبكة . الهدف من هذا العمل هو معالجة مشاكل الاستقرار العابر في الشبكات الكهربائية بوجود أجهزة الـ FACTS، بالاختيار الأحسن و المفضل لها و الذي يتوقع أن يكون الـ UPFC .

تعزيز و تنمية النتائج ، و التأكد من صحتها يكون بتطبيق الطرق المقترحة على شبكة مرجعية و مقارنتها بنتائج بعض المراجع الأخرى. البرمجة أو الخواريزم المستعمل يكون عن طريق الـ MATLAB .

Abstract - The main goal of this study is to deal with the problem of transient stability in the presence of intelligent FACTS, by justifying the best and powerful choice among them. We anticipate to be the UPFC.

The validation of the suggested methods will be carried out by simulation based on the MATLAB software. The obtained results will be compared to certain chosen references.

Résumé - Le but de notre travail consiste à traiter le problème de la stabilité transitoire dans les réseaux électriques en présence des FACTS, par un choix meilleur et justifié du plus puissant d'entre eux. Nous anticipons qu'il soit l'UPFC.

La validation des méthodes proposées sera effectuée par simulation basée sur le logiciel MATLAB. Les résultats obtenus seront validés par comparaison avec ceux obtenus dans certaines références bien choisies.

Mots clés - Stabilité transitoire, FACTS, UPFC, réseaux électriques, méthodes itératives.

1. ACRONYMES UTILISES

cct	Critical clearing time
EP	Ecoulement de puissance
EPRI	Electric power research institute
FACTS	Flexible alternating current transmission systems

JdB	Jeux de barres
MATLAB	Matrix laboratory
RE	Réseaux électriques
RK4	Runge-Kutta d'ordre 4
UPFC	Unified power flow controller

2. INTRODUCTION

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs ... etc.

Ceci implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel (construction de nouvelles lignes et de nouvelles centrales). En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Le monde de l'énergie électrique enregistre des changements sans précédent ou préavis dans sa structure et son exploitation. La libération du marché de l'énergie électrique et son ouverture à la concurrence nécessite une nouvelle conception dans son exploitation et sa planification.

La bonne exploitation d'un système électrique exige l'introduction de l'analyse de la sécurité dans l'étude de l'évaluation de l'aptitude du système de résister aux perturbations brusques et sévères [1].

Les études de la stabilité transitoire et de la stabilité en petits mouvements sont des composantes essentielles dans la détermination de la sécurité des systèmes énergétiques. De grands efforts sont mis en évidence afin d'étudier ces 2 types de stabilité pour assurer la fiabilité et la sécurité de fonctionnement dans la planification et le contrôle des systèmes électriques. Les études de la stabilité s'inscrivent, généralement, dans le cadre de la préservation de la qualité de service rendue aux consommateurs [1] - [2].

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et très souvent, un accroissement des pertes. Parmi, les moyens classiques de contrôle des réseaux, on cite :

- Transformateurs à prises réglables en charge.
- Transformateurs déphaseurs.
- Compensateurs série ou parallèle commutés par des disjoncteurs.
- Modifications des consignes de production.
- Changements de topologie du réseau.

- Actions sur l'excitation des générateurs.

Ces moyens sont considérés comme trop lents et insuffisants pour répondre, efficacement, aux perturbations du réseau, compte tenu, notamment, des nouvelles contraintes et de la dérégulation du marché « marché libre ».

Il faut, vraisemblablement, compléter leur action par la mise en œuvre des FACTS pour le contrôle, le réglage et surtout pour la stabilité des réseaux [3].

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions seront, elles-aussi, mieux tenues. Par conséquent, les marges de stabilité seront meilleures.

Les études de stabilité transitoire concernent les grandes perturbations comme les courts - circuits, la perte d'ouvrages ou la perte de groupes de production ... etc. La conséquence de ces défauts peut être très grave, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau.

3. FORMULATION DU PROBLEME

Un réseau électrique moderne typique est considéré comme un système multi variable d'ordre élevé dont la réponse dynamique est influencée par une grande sélection des dispositifs avec différentes caractéristiques et taux de réponse. La stabilité est un état d'équilibre entre les forces d'opposition. Ces forces dépendent de la topologie du réseau, des conditions de fonctionnement du système, de la nature et de la forme de la perturbation. Pratiquement, différents ensembles de forces d'opposition peuvent éprouver un déséquilibre dans le réseau électrique soutenu, menant ainsi, à de différentes formes d'instabilité [1].

Ces perturbations sont à l'origine de l'apparition d'une différence entre la puissance mécanique (la production) et la puissance électrique (la consommation). Cet écart en termes de puissance va se traduire par une modification de la vitesse de rotation de l'alternateur ou en d'autres termes par des variations de sa vitesse autour de la vitesse de synchronisme [3]. Il se pose, alors, le problème de la stabilité du réseau après élimination de la perturbation [2]

4. MODELISATION D'UPFC

Le principe de fonctionnement d'un UPFC est présenté par un modèle d'injection proposé par Ghandhari [3] Nous considérons le schéma équivalent d'un UPFC connecté entre le JdB i et j comme illustré sur la figure 1. L'UPFC injecte une tension \vec{V}_{se} en série avec la ligne de transmission via un transformateur série et sa réactance X_s . Celui-ci fournit ou consomme des puissances active et réactive P_{se}, Q_{se}, P_{sh} et Q_{sh} , par l'intermédiaire de ses onduleurs.

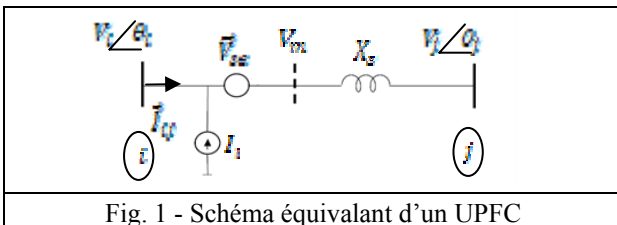


Fig. 1 - Schéma équivalent d'un UPFC

La tension injectée en série est modélisée par une source de tension idéale \vec{V}_{se} , laquelle est contrôlable en amplitude et en phase. Nous pouvons, alors, représenter \vec{V}_{se} comme suit :

$$\vec{V}_{se} = rV_i e^{j\gamma} \quad (1)$$

$$\text{avec } 0 < r \leq r_{\max} \quad \& \quad 0 < \gamma \leq 2\pi \quad (2)$$

Le modèle d'injection est obtenu, en remplaçant la tension \vec{V}_{se} par une source de courant \vec{I}_{inj} en parallèle avec X_s , comme illustré sur la figure 2 [4].

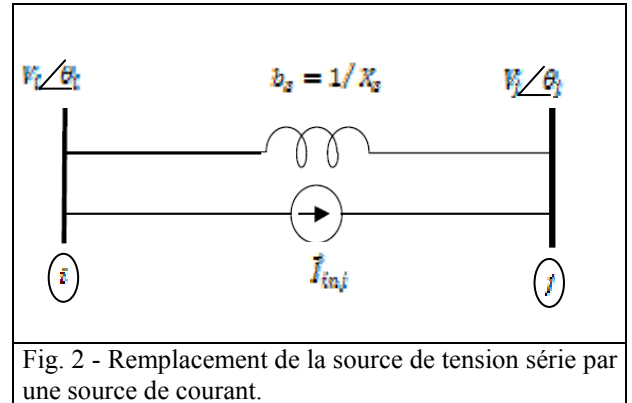


Fig. 2 - Remplacement de la source de tension série par une source de courant.

La source de courant \vec{I}_{inj} correspond aux puissances complexes injectées \vec{S}_i et \vec{S}_j aux JdB i et j qui sont définies par les équations suivantes :

$$\vec{I}_{inj} = -jQ_s \vec{V}_{se} \quad (3)$$

$$\vec{S}_i = \vec{V}_i (-\vec{I}_{inj})^* = -rb_s V_i^2 \sin \gamma - jr b_s V_i^2 \cos \gamma \quad (4)$$

$$\vec{S}_j = \vec{V}_j (\vec{I}_{inj})^* = rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) + jr b_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \quad (5)$$

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \quad (6)$$

Le modèle d'injection de l'UPFC est montré par la figure 3.

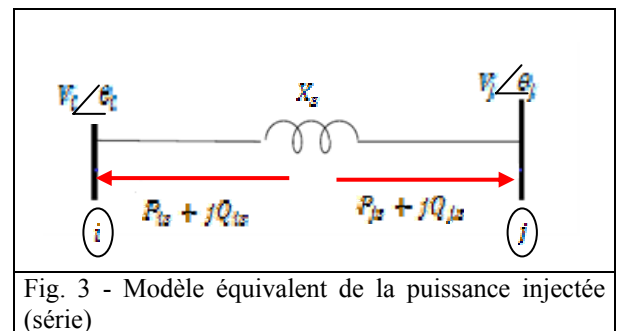


Fig. 3 - Modèle équivalent de la puissance injectée (série)

On estime que toutes les pertes de commutation des 2 convertisseurs sont égales à 0. Pour un UPFC sans pertes, on a :

$$P_{sh} = P_{se} \quad (7)$$

La puissance apparente fournie par la branche série est :

$$S_{se} = V_{se} I_{inj}^* = r e^{j\gamma} V_i \left(\frac{V_i^m - V_j}{j X_s} \right)^* \quad (8)$$

Les puissances active et réactive correspondantes à la puissance apparente fournie par la branche série sont données par :

$$S_{se} = r e^{j\gamma} V_i \left(\frac{r e^{j\gamma} V_i + V_i - V_j}{j X_s} \right)^* \quad (9)$$

$$S_{se} = r V_i e^{j(\theta_i + \gamma)} \left(\frac{r V_i e^{-j(\theta_i + \gamma)} + V_i e^{-j\theta_i} - V_j e^{-j\theta_j}}{j X_s} \right)^* \quad (10)$$

$$s_{se} = j b_s r^2 V_i^2 + j b_s r V_i^2 e^{j\gamma} - j b_s V_i V_j e^{j(\theta_i + \gamma)} \quad (11)$$

$$s_{se} = j b_s r^2 V_i^2 + j b_s r V_i^2 (\cos \gamma + j \sin \gamma) - j b_s V_i V_j (\cos(\theta_i + \gamma) + j \sin(\theta_i + \gamma)) \quad (12)$$

Les équations finales sont :

$$s_{se} = P_{se} + j Q_{se} \quad (13)$$

$$P_{se} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) - r b_s V_i^2 \sin \gamma \quad (14)$$

$$Q_{se} = -r b_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) + r b_s V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_s V_i^2 \quad (15)$$

Dans ce modèle, la puissance réactive fournie ou absorbée par le convertisseur shunt n'est pas considérée. Mais, son effet peut être modélisé comme source réactive séparée contrôlable. Dans ce cas, la fonction principale de la puissance réactive est de maintenir le niveau de tension au JdB i dans des limites acceptables. En raison des explications ci-dessus, on peut assumer que Q_{sh} est égale à 0 (la branche shunt fournie, seulement, la puissance active). Cette dernière est injectée au réseau par l'intermédiaire de la branche série. En conséquence, le modèle mathématique équivalent de l'UPFC est représenté comme le montre la figure 4. Les puissances active et réactive de l'UPFC sont données par les équations (16) – (19).

$$P_{i,upfc} = -r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (16)$$

$$P_{j,upfc} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (17)$$

$$Q_{i,upfc} = -r b_s V_i^2 \cos \gamma \quad (18)$$

$$Q_{j,upfc} = r b_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \quad (19)$$

Enfin, le modèle d'injection équivalent de l'UPFC est illustré par la figure 5.

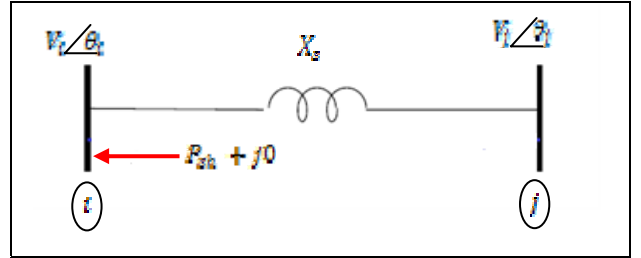


Fig. 4 - Modèle équivalent de la puissance injectée (shunt)

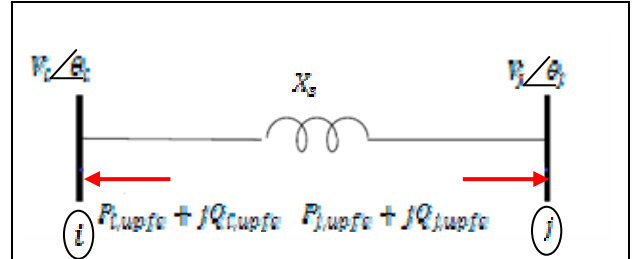


Fig. 5 - Modèle d'injection équivalent de l'UPFC

Les équations nodales générales de l'EP peuvent être exprimées en forme rectangulaire par les équations suivantes :

$$P = f_P(V, \theta, G, B) \quad (20)$$

$$Q = f_Q(V, \theta, G, B) \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (22)$$

P et Q sont des vecteurs de la puissance active et réactive, qui sont fonction des tensions nodales $V \angle \theta$, des conductances G et des susceptances B . Les vecteurs de divergence de la puissance active et celui de la divergence de la puissance réactive sont, respectivement, données par $\Delta P = P_{spe} - P_{cal}$ et par $\Delta Q = Q_{spe} - Q_{cal}$.

Le modèle d'injection peut être incorporé, facilement, dans le programme de l'EP. Dans le cas de l'utilisation de la méthode de N-R, la matrice du Jacobien est modifiée par l'addition des puissances injectées et appropriées, où l'indice o dénote les éléments du Jacobien sans UPFC [2] - [5].

$$\begin{bmatrix} H_{ii} = H_{ii}^o + Q_{i,upfc} & N_{ij} = N_{ij}^o + P_{j,upfc} \\ H_{ij} = H_{ij}^o - Q_{j,upfc} & N_{ii} = N_{ii}^o + P_{i,upfc} \\ H_{ji} = H_{ji}^o - Q_{i,upfc} & N_{jj} = N_{jj}^o - P_{j,upfc} \\ H_{jj} = H_{jj}^o + Q_{j,upfc} & N_{jj} = N_{jj}^o - P_{j,upfc} \\ J_{ii} = J_{ii}^o & L_{ii} = L_{ii}^o - 2Q_{i,upfc} \\ J_{ij} = J_{ij}^o & L_{ij} = L_{ij}^o \\ J_{ji} = J_{ji}^o + P_{j,upfc} & L_{jj} = J_{jj}^o - Q_{j,upfc} \\ J_{jj} = J_{jj}^o - P_{j,upfc} & L_{jj} = L_{jj}^o - Q_{j,upfc} \end{bmatrix} \quad (23)$$

5. MODÉLISATION D'UN SYSTÈME MULTIMACHINE

Les réseaux d'énergie électrique comprennent plusieurs JdB. Mais, les JdB où sont raccordées les

génératrices sont au nombre limité. Les génératrices ne sont pas toutes de la même puissance, pour l'ensemble du réseau. Cependant, dans une centrale donnée, elles sont ordinairement de même capacité. Si les génératrices d'une centrale sont de même capacité et qu'elles sont raccordées en parallèle, on peut, comme première analyse, supposer qu'elles sont équivalentes à une très grosse génératrice et qu'elles oscilleront conjointement (ensemble) [6]. Considérons une centrale avec 2 générateurs reliés au même JdB, les équations dynamiques en [pu] sont :

$$\frac{2H_1}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = (P_{m1} - P_{e1}) \quad (24)$$

$$\frac{2H_2}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = (P_{m2} - P_{e2}) \quad (25)$$

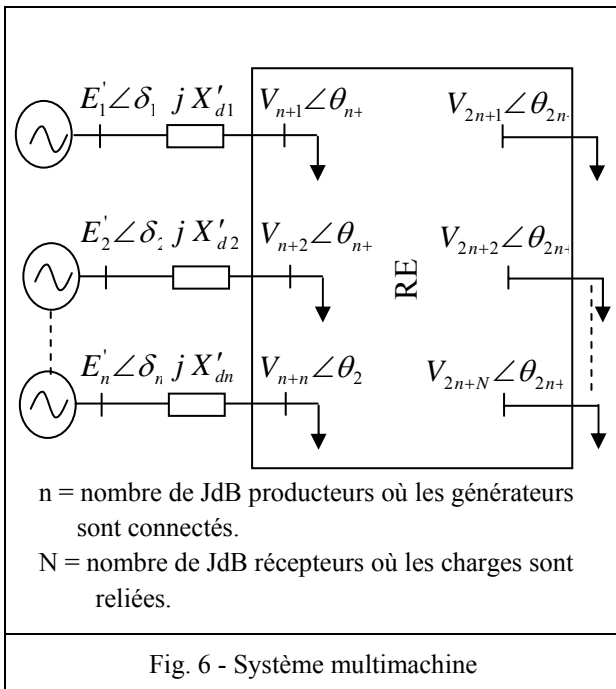
L'addition des équations (24) et (25), avec $\delta_1 \cong \delta_2 \cong \delta$, donne :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = (P_m - P_e) \quad (26)$$

avec $H = (H_1 + H_2)$; $P_m = (P_{m1} + P_{m2})$ & $P_e = (P_{e1} + P_{e2})$

L'équation (26) est simple. Elle peut, donc, être résolue facilement [7].

Dans le cas d'un système à plusieurs centrales et spécialement dans un réseau très maillé, certaines machines accélèrent plus que d'autres pendant une perturbation. Comment traiter un tel problème ? La figure 6 montre la structure d'un système multi machine.



Nous pourrions solutionner ce genre de problème, en utilisant la méthodologie suivante :

- Convertir toutes les données à une base commune.
- Faire entrer toutes les données du réseau.

- Calculer l'EP par l'utilisation de la matrice d'admittance nodale \bar{Y}_{bus} et la méthode de N-R, pour obtenir les différentes tensions et les différentes puissances générées & demandées.
- Calculer les impédances ou les admittances équivalentes, par l'utilisation de l'équation suivante :

$$\bar{y}_{Li} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{V_i^2} \quad \text{avec } i = n+1 \dots n+N \quad (27)$$

- Ajouter ces admittances équivalentes comme des éléments shunts à la matrice \bar{Y}_{bus} .
- Calculer les tensions de tous les générateurs, par l'utilisation de l'équation suivante :

$$\bar{E}'_i = \bar{V}_{n+i} + jX'_{di} \frac{P_{Gi} - jQ_{Gi}}{\bar{V}_{n+i}^*} \quad \text{avec } i = 1 \dots n \quad (28)$$

- Déterminer la matrice d'admittance nodale \bar{Y}_{red} pour le réseau réduit.
- Éliminer les nœuds qui ne sont pas des points d'injection ou de retrait d'énergie. S'il n'y a aucun courant injecté dans les JdB du réseau, le système peut être réduit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_A & \bar{Y}_B \\ \bar{Y}_C & \bar{Y}_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_G \\ \bar{V}_L \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_G = (\bar{Y}_A - \bar{Y}_B \bar{Y}_D^{-1} \bar{Y}_C) \bar{E}_G = \bar{Y}_{red} \bar{E}_G \quad (29)$$

- Choisir un défaut à analyser.
- Recalculer la matrice d'admittance nodale \bar{Y}_{red} , pendant le défaut.
- Calculer la puissance injectée par la machine i , par l'utilisation de l'équation suivante :

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j [B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (30)$$

avec $i = 1, 2, \dots, n$

- Écrire les équations dynamiques de tous les générateurs.

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - \left[E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \right] \quad (31)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad \text{avec } i = 1, 2, \dots, n$$

L'équation (31) présente l'état d'un système de n équations différentielles non linéaires couplées. On peut l'écrire sous la forme :

$$X = f(X, X_0, t) \quad (32)$$

tel que x est un vecteur qui contient $(2n \times 1)$ grandeurs données par :

$$x^t = [\omega_1 \ \delta_1 \ \omega_2 \ \delta_2 \ \dots \ \omega_n \ \delta_n] \quad (33)$$

- Résoudre, par une méthode itérative les équations en assumant un temps d'élimination de défaut.
- Changer ce temps jusqu'à ce que la stabilité soit atteinte, dans notre cas, la méthode de RK4 est utilisée [1] - [2] & [6] - [8].

6. SIMULATION & RESULTATS

a - Choix du réseau test

Nous avons choisi le réseau de WSCC « Western Systems Coordinating Council » USA [8]. Le réseau compose 9 JdB dont 3 sont des nœuds générateurs, 3 nœuds consommateurs et 3 nœuds de connexion. Ce réseau est utilisé dans la littérature par les chercheurs concernant l'étude de la stabilité transitoire des réseaux de transport. Son choix nous permet de comparer ou compléter des résultats obtenus avec certaines références.

b - Stabilité transitoire sans FACTS (UPFC)

Bloc 1 : Etat avant défaut.

Un calcul d'EP initial avant défaut a été réalisé en utilisant la matrice admittance nodale \bar{Y}_{JdB} et la méthode de N- R pour obtenir les différentes tensions et les puissances dans les JdB. Le tableau 1 présente les résultats obtenus. Ces derniers sont conformes avec ceux présentés dans la référence [8].

J d B	\bar{V} [pu]	Puissances de génération		Puissances de charge	
		P_g [pu]	Q_g [pu]	P_d [pu]	Q_d [pu]
1	1.0400 $\angle 0^\circ$	0.7164	0.2705	0	0
2	1.0250 $\angle 9.2800^\circ$	1.6300	0.0665	0	0
3	1.0250 $\angle 4.6648^\circ$	0.8500	-0.1086	0	0
4	1.0258 $\angle -2.2168^\circ$	-	-	-	-
5	0.9956 $\angle -3.9888^\circ$	0	0	1.25	0.50
6	1.0127 $\angle -3.6874^\circ$	0	0	0.90	0.30
7	1.0258 $\angle 3.7197^\circ$	-	-	-	-
8	1.0159 $\angle 0.7275^\circ$	0	0	1.00	0.35
9	1.0324 $\angle 1.9667^\circ$	-	-	-	-

Bloc 2 : Etat pendant défaut.

À l'instant $t_d = 1$ [s], un défaut triphasé - terre se produit à la fin de la ligne 5 - 7, près du JdB 7. Pendant ce défaut, la puissance est égale à 0. Le défaut est simulé en annulant la ligne et la colonne de la matrice d'admittance nodale. Cette étape est valable, seulement, pour le défaut triphasé.

Bloc 3 : Etat après défaut.

L'élimination de la perturbation a été simulée par un déclenchement de la ligne en défaut, dans ce cas la ligne 5 - 7. Par conséquent, après la perturbation, la matrice d'admittance nodale a été reconstruite sans la ligne en défaut.

Bloc 4 : Résolution numérique « Test de stabilité du système ».

Maintenant, on a les tensions internes derrière leurs réactances transitoires pour chaque générateur et les matrices d'admittances réduites pour chaque réseau. Ainsi, tous les coefficients de l'équation (30) sont déterminés.

La dernière étape consiste de résoudre cette équation. La solution est accomplie par une méthode d'intégration numérique basée sur la méthode de RK4 selon les étapes suivantes.

- Exécuter l'intégration numérique en variant le temps.
- Choisir un temps d'élimination t_e , un temps maximum t_{max} et un pas d'intégration Δt .
- Injecter ces nouvelles données pour résoudre le système à 2 équations du premier ordre pour obtenir les variations des angles internes δ_i et la vitesse de chaque générateur ω_i pour les 4 estimées de RK4.
- Faire varier le temps d'élimination t_e jusqu'à l'instant où le système devient instable.
- Recorder la dernière valeur maximale de t_e pour laquelle le système est stable. Ce temps caractérise le temps critique d'élimination de défaut.

Si l'allure d'angles d'une seule machine ou de plusieurs machines divergent, plus loin, par rapport aux autres, le système est, alors, dit instable.

Après plusieurs simulations répétitives, on a trouvé que le cct est de 248 [ms] avec un pas d'intégration égal à 1 [ms].

c - Stabilité transitoire avec FACTS (UPFC)

D'après les résultats de simulation, le cas le plus faible «le plus petit cct» correspond au défaut dans le JdB 7 au niveau de la ligne L_{5-7} . Pour cette situation faible, nous allons montrer la possibilité d'améliorer la marge de la stabilité transitoire en termes de temps critique en installant l'UPFC.

1 – Installation d'un seul UPFC

Le tableau 2 montre l'apport de l'UPFC installé dans différents endroits du réseau test considéré.

2 – Installation de 2 UPFC

Le tableau 3 présente les résultats de simulation des 2 UPFC, installés dans des endroits différents du réseau en même temps pour un défaut demeurent dans la ligne L_{5-7} au JdB 7. Le tableau représente, respectivement, le numéro de la simulation, les lieux d'installations des 2 UPFC « numéro du JdB & nom de la ligne », paramètres à commander des 2 UPFC « r & T » et le temps critique d'élimination du défaut « cct ».

Simulation	Lieu d'installation		Paramètres de commande		cct [ms]
	JdB	Ligne	r [pu]	γ [rad]	
	1	Sans UPFC			
2	5	L_{5-7}	0.15	$3\pi/2$	251
	7			$\pi/2$	
3	7	L_{7-8}	0.15	$3\pi/2$	250
	8			$\pi/2$	
4	8	L_{8-9}	0.15	$\pi/2$	252
	9			$3\pi/2$	
5	6	L_{6-9}	0.15	$3\pi/2$	249
	9			$\pi/2$	
6	4	L_{4-5}	0.15	$\pi/2$	249
	6			$3\pi/2$	
7	4	L_{4-1}	0.15	$\pi/2$	249
	5			$3\pi/2$	
8	1	L_{1-4}	0.15	$\pi/2$	250
	4			$3\pi/2$	
9	3	L_{3-9}	0.15	$\pi/2$	250
	9			$3\pi/2$	
10	2	L_{2-7}	0.15	$3\pi/2$	250
	7			$\pi/2$	

Simulation	Lieux d'installations				Paramètres de commande				cct [ms]
	UPFC 1		UPFC 2		UPFC 1		UPFC 2		
	JdB	Ligne	JdB	Ligne	r_1 [pu]	γ_1 [rad]	r_2 [pu]	γ_2 [rad]	
1	Sans UPFC								248
2	5	L_{5-7}	6	L_{6-9}	0.15	$3\pi/2$	0.15	$3\pi/2$	253
3	5	L_{5-7}	9	L_{9-9}	0.15	$3\pi/2$	0.15	$3\pi/2$	255
4	5	L_{5-7}	7	L_{7-8}	0.15	$3\pi/2$	0.15	$\pi/2$	255
5	8	L_{7-8}	6	L_{6-9}	0.15	$\pi/2$	0.15	$3\pi/2$	251
6	8	L_{7-8}	8	L_{8-9}	0.15	$\pi/2$	0.15	$3\pi/2$	263
7	6	L_{6-9}	8	L_{8-9}	0.15	$3\pi/2$	0.15	$\pi/2$	260

d - Comparaison & commentaires

Les valeurs du cct dans notre étude est, très proche à ceux présentés dans la référence [9] (Tab. 4). Les différences sont, principalement, dues aux choix des modèles des UPFC.

Lieux d'installations	cct [ms]	
	Notre cas	Référence
Sans UPFC	248	246
Un seul UPFC installé dans L_{2-7}	250	247
Deux 2 UPFC installés dans L_{5-7} & L_{7-8}	255	254

L'utilisation des UPFC a permis d'améliorer d'une façon remarquable la marge de la stabilité.

7. CONCLUSIONS

L'implantation des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques nécessite de nouvelles méthodes d'études et d'analyses des réseaux électriques. Nous avons présenté les résultats d'une analyse de stabilité transitoire accomplie en présence des UPFC. L'utilisation des UPFC nous a permis d'améliorer d'une façon remarquable la marge de la stabilité. L'amélioration apportée par ces dispositifs en terme de temps critique d'élimination du défaut, dépend des lieux d'installations et des paramètres d'entrées des UPFC. Le cct est augmenté de 0.248 [s] jusqu'à 0.263 [s]. Les résultats de simulation sont présentés dans les tableaux 2 & 3.

8. REFERENCES

- [1] H. Zaier, S. Leulmi, « Stabilité transitoire des systèmes multimachines par différentes techniques mathématiques », Mémoire de magister, Département d'électrotechnique, Université du 20 Août 55, skikda, Algérie, 2006.
- [2] S. S. S. Diaboun, S. Leulmi, « Renforcement de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS », Mémoire de magister, Département d'électrotechnique, Université du 20 Août 55, Skikda, Algérie, 2005.
- [3] E. G. Shahraki, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2003.
- [4] M. H. Namin, « Using UPFC in order to power flow control », IEEE, International conference, Tehran, Iran, 2006.
- [5] A. M. Vural, M. Tumay, « Mathematical modeling and analysis of a unified power flow controller : A comparison of 2 approaches in power flow studies and effects of UPFC location », Article, Science direct, Electrical power and energy systems 29, Turkey, 2007.
- [6] C. Aumuller, « Power system stability », Cours EE 4400, Power engineering 3, Discipline of Electrical & Computer Engineering, 2002.
- [7] W. D. Stevenson. Jr, « Elements of power system analysis », McGraw-Hill Companies, 4th edition, USA, 1982.
- [8] P. M. Anderson, A. A. Fouad, « Power system control and stability », IEEE Press, USA, 1993.
- [9] V. Azbe, U. Gabrijel, D. Povh, R. Mihalic, « The energy function of a general multimachine system with a unified power flow control », IEEE, Transactions on power systems, Vol. 20, No. 3, Slovenia, 2005.