

## UN INDICE GLOBAL POUR EVALUER LA STABILITE STATIQUE DE LA TENSION

Lahouaria BENASLA<sup>1</sup>, Sselugo Ibrahim KIZZA<sup>2</sup>, Mohammed Adel DJARI<sup>3</sup>

*Voltage stability has become a very important issue in electrical systems. To avoid this instability, a relatively accurate estimation of the system operating conditions is necessary.*

*This article discusses some important aspects related to the most significant voltage stability indices in the literature and introduces a new index, based on the results of conventional power flow. A comparison of the performance of these indices is presented. Their efficiency is demonstrated through simulations, by increasing the load, and the performance of the proposed voltage stability index is compared with that of the other indices.*

*La stabilité de tension est devenue une question très importante dans les systèmes électriques. Pour éviter cette instabilité, une estimation relativement précise des conditions de fonctionnement du système est nécessaire.*

*Cet article aborde certains aspects importants liés aux indices de stabilité de tension les plus importants dans la littérature et présente un nouvel indice, basé sur les résultats d'écoulement de puissance conventionnel. Une comparaison des performances de ces indices est présentée. Leur efficacité est démontrée par des simulations, en augmentant la charge et la performance de l'indice de stabilité de tension proposé est comparée avec celle des autres indices.*

**Mots clés:** Stabilité de tension, écoulement de puissance, indice de ligne, charge.

### 1. Introduction

Les deux dernières décennies, le stress soumis aux réseaux électriques à cause de l'augmentation de la charge, le transit des puissances sur des grandes distances, les fortes demandes dans les régions où la génération est techniquement impossible,... a provoqué un nouveau phénomène dans les réseaux appelé «stabilité de tension» [1].

La stabilité de tension devient de plus en plus un sujet d'intérêt pour l'opération en sécurité des réseaux électriques d'aujourd'hui. Plusieurs problèmes

---

<sup>1</sup> Dept d'Electrotechnique, Université des sciences et de la technologie d'Oran, BP 1505 El Mnaouar, Oran, Algeria, e-mail: lahouaria.benasla@univ-usto.dz

<sup>2</sup> Dept d'Electrotechnique, Université des sciences et de la technologie d'Oran, BP 1505 El Mnaouar, Oran, Algeria, e-mail: Ibrahimkayz10@gmail.com

<sup>3</sup> Dept d'Electrotechnique, École Supérieure en Génie Électrique et Énergétique d'Oran, Oran 31000, Algeria, e-mail: Djari\_adel@esgee-oran.dz:

d'instabilité de tension conduisant à l'effondrement de tension, ont été observés dans différents endroits du monde tels que la France (1987), Japon (1987), Suède (1983), Italie (2003) [2].

Généralement, il y a deux types d'analyse de la stabilité de tension : dynamique et statique. L'analyse dynamique se base sur des simulations dans le temps afin de résoudre des équations non linéaires différentielles/algébriques du système. Par contre, l'analyse statique est basée sur la solution des équations conventionnelles ou modifiées du problème d'écoulement de puissance [3- 5].

Pour évaluer la stabilité statique, plusieurs méthodes d'analyse de tension ont été développées, parmi lesquelles, nous citons les indices de stabilité de tension (VSI : Voltage Stability Index) [6]

Ces indices jouent un rôle très important dans la surveillance de l'état des réseaux électriques. Ils aident à prévoir les changements dans le futur et évaluer l'opération globale du système. De plus, les VSI ont un rôle de l'identification de la meilleure taille et endroit préféré pour l'installation de la génération dispersée et les FACTS en précisant les jeux de barres et les lignes les plus critiques dans le système. La valeur de 0 veut dire que le système est stable (pas de charge) et la valeur de 1 signifie l'effondrement de tension [7].

Les VSI donnent des informations fiables sur la distance entre le point de fonctionnement et le point d'effondrement de tension, c'est-à-dire la marge de stabilité de tension. Ils donnent une idée sur la proximité de l'instabilité de la tension. Il existe plusieurs VSI dont certains seront étudiés dans cet article. Les VSI sont classifiés entre 2 catégories ; les indices des jeux de barres et ceux des lignes. Parmi les indices des jeux de barres sont VCPI, ISI, SVSI... et parmi ceux des lignes sont FVSI, Lmn, Lqp...[8, 9].

Toute ligne dans le système qui donne une valeur proche de l'unité est prise comme la ligne la plus critique et qui peut provoquer l'instabilité du système entier.

Dans cet article, les différents résultats de simulations obtenus en utilisant différents indices sont présentés. Les indices choisis sont FVSI, NLSI, LCPI et l'indice proposé IRST. Ces résultats de simulation concernent un réseau multi-machines. Le réseau choisi est le réseau IEEE-9 nœuds, comportant neuf nœuds dont trois sont des nœuds producteurs.

## 2. Formulation des indices

La condition de stabilité de tension dans un système électrique peut être évaluée à l'aide d'indices de stabilité de tension. Ces indices peuvent soit révéler le nœud critique d'un réseau électrique, soit la stabilité de chaque ligne électrique. Dans cette section, certains indices de lignes utilisés dans cette étude sont brièvement décrits.

## 2.1 L'indice rapide de la stabilité de la tension FVSI [10, 11]

L'indice rapide de stabilité de la tension (FVSI : Fast Voltage Stability Index), est pris comme l'indice de la ligne. La Fig. 1 montre le modèle d'un système de deux jeux de barres.

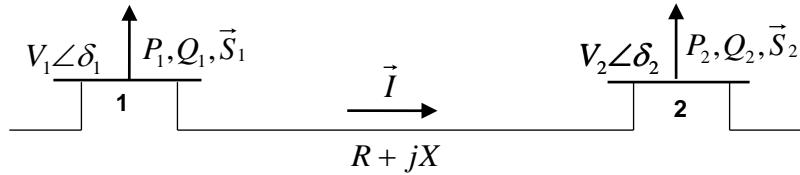


Fig. 1. Modèle d'un système de deux jeux de barres

En choisissant la source comme la référence,  $\delta_1=0$  et  $\delta_2=\delta$ , l'équation quadratique de  $V_2$  sera exprimée par:

$$V_2^2 - \left( \frac{R \sin \delta}{X} - \cos \delta \right) V_1 V_2 + \left( \frac{R^2}{X} + X \right) Q_2 = 0, \quad (1)$$

Les racines de  $V_2$  seront:

$$V_2 = \frac{\left( \frac{R \sin \delta}{X} + \cos \delta \right) V_1 \pm \sqrt{\left[ \left( \frac{R \sin \delta}{X} + \cos \delta \right) V_1 \right]^2 - 4 \left( \frac{R^2}{X} + X \right) Q_2}}{2} \quad (2)$$

Pour trouver les racines réelles de l'équation (1), le discriminant doit être supérieur ou égal à zéro, comme exprimé par l'équation (3):

$$\sqrt{\left[ \left( \frac{R \sin \delta}{X} + \cos \delta \right) V_1 \right]^2 - 4 \left( \frac{R^2}{X} + X \right) Q_2} \geq 0, \quad (3)$$

$$\frac{4Z^2 Q_2 X}{(V_1)^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)^2} \leq 1, \quad (4)$$

L'angle  $\delta$  est très faible ( $\delta=0$ ) donc  $R \sin \delta \approx 0$  et  $X \cos \delta \approx X$

En utilisant la lettre « i » pour désigner la source et « j » pour désigner le récepteur, le FVSI est exprimé par l'équation (5):

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X}, \quad (5)$$

## 2.2 L'indice de stabilité de la tension LCPI

Cet indice [12] n'est pas seulement basé sur le modèle de transmission exacte de la ligne, mais il prend en compte aussi l'influence de la puissance réactive et le débit de la puissance active sur la stabilité de la tension du système. Cet indice est donc développé en utilisant les paramètres ABCD de la ligne modélisée en  $\pi$  [13].

La tension de la source  $\vec{V}_i$  peut être exprimée par:

$$V_i \angle \delta_i = A \angle \alpha * V_j \angle \delta_j + B \angle \beta * I_j, \quad (6)$$

Ou

$$V_i \angle \delta_i = A \angle \alpha * V_j \angle \delta_j + B \angle \beta * \left( \frac{P_j - jQ_j}{V_i \angle -\delta_j} \right), \quad (7)$$

A et B sont les modules et  $\alpha$  et  $\beta$  sont les déphasages de  $\vec{A}$  et  $\vec{B}$  respectivement.

Réarrangeant l'équation (7), en posant  $\delta = \delta_i - \delta_j$

$$V_i V_j \angle \delta = A \angle \alpha * V_j^2 + B \angle \beta * (P_j - jQ_j), \quad (8)$$

La partie réelle de l'équation (8) s'exprime par l'équation quadratique (9).

$$V_j^2 (A \cos \alpha) + V_j (V_i \cos \delta) + (P_j B \cos \beta + Q_j B \sin \beta) = 0, \quad (9)$$

Les racines de l'équation (9) sont:

$$V_j = \frac{-V_i \cos \delta \pm \sqrt{(V_i \cos \delta)^2 - 4 A \cos \alpha (P_j B \cos \beta + Q_j B \sin \beta)}}{2 A \cos \alpha}, \quad (10)$$

Pour avoir les racines réelles de l'équation(9), son discriminant doit être supérieur ou égale à zéro, ce qui donne:

$$(V_i \cos \delta)^2 - 4 A \cos \alpha (P_j B \cos \beta + Q_j B \sin \beta) \geq 0, \quad (11)$$

La condition de l'équation (11) doit être vérifiée pour éviter l'effondrement de la tension du système.

$$\frac{4 A \cos \alpha (P_j B \cos \beta + Q_j B \sin \beta)}{(V_i \cos \delta)^2} \leq 1, \quad (12)$$

L'indice LCPI est exprimé par l'équation (13):

$$\frac{4A\cos\alpha(P_jB\cos\beta+Q_jB\sin\beta)}{(V_i\cos\delta)^2}, \quad (13)$$

Pour éviter l'effondrement de la tension du système, la valeur du LCPI doit être inférieure à 1.

### 2.3 L'indice de stabilité de la tension NLSI [13]

La Fig. 1 montre un système de transmission formé par deux jeux de barres. En choisissant la source comme la référence,  $\delta_1=0$  et  $\delta_2=\delta$ , l'équation de la puissance au jeu de barre 2 est donnée par:

$$\vec{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \vec{V}_2 \vec{I}^*, \quad (14)$$

Le courant de jeu de barre 1 vers 2 peut s'écrire aussi comme dans l'équation (15)

$$\vec{I} = \frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX}, \quad (15)$$

En remplaçant l'équation (15) dans (14), on obtient les équations suivantes :

$$V_1 V_2 \sin \delta - R Q_2 + X P_2 = 0, \quad (16)$$

$$V_2^2 - V_1 V_2 \cos \delta - R P_2 + X Q_2, \quad (17)$$

Les racines de l'équation (17) sont données par l'équation (18).

$$V_2 = \frac{V_1 \cos \delta \pm \sqrt{V_1^2 \cos^2 \delta - 4(RP_2 + XQ_2)}}{2}, \quad (18)$$

Le discriminant doit être égal ou supérieur à zéro. Cette condition est exprimée par l'équation (19):

$$\frac{RP + XQ}{0.25V_1^2 \cos^2 \delta} \leq 1, \quad (19)$$

L'angle de tension entre la source et le récepteur est considéré petit, donc  $\cos \delta \approx 1$ .

En utilisant la lettre « i » pour désigner la source et « j » pour désigner le récepteur, le NLSI est exprimé par l'équation (20):

$$NLSI_{ij} = \frac{R_{ij}P_j + X_{ij}Q_j}{0.25V_1^2}, \quad (20)$$

### 3. L'indice réel de stabilité de la tension IRST

La puissance transmise par une ligne modélisée en  $\pi$  et dont le schéma est illustré par la Fig. 2, s'exprime par l'équation suivante [15]:

$$\vec{S}_{ij}^* = \vec{V}_i \vec{I}_{ij}, \quad (21)$$

Avec :

$$\vec{I}_{ij} = (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \vec{y}_{ij} + \vec{V}_i \frac{\vec{y}_{ij}}{2}, \quad (22)$$

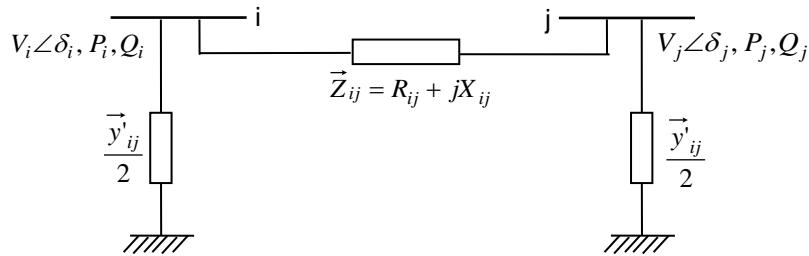


Fig. 2. Ligne de transmission en  $\pi$

En remplaçant l'équation (22) dans (21), les puissances transmises active et réactive seront donc données par:

$$\vec{S}_{ij}^* = P_{ij} - jQ_{ij} = \vec{V}_i^* (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \vec{y}_{ij} + \vec{V}_i^* \vec{V}_i \frac{\vec{y}_{ij}}{2}, \quad (23)$$

Avec  $\vec{y}_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}}$ , nous obtenons :

$$\vec{Z}_{ij} \vec{S}_{ij}^* = |\vec{V}_i|^2 \left( 1 + \frac{\vec{y}_{ij}}{2} \vec{Z}_{ij} \right) - |\vec{V}_i| |\vec{V}_j| \angle \delta_j - \delta_i, \quad (24)$$

Posons:

$$V_i = |\vec{V}_i| \angle \delta_i, \quad (25)$$

$$V_j = |\vec{V}_j| \angle \delta_j, \quad (26)$$

$$Z_{ij} = |\vec{Z}_{ij}| \angle \theta_{ij}, \quad (27)$$

$$\left( 1 + \frac{\vec{y}_{ij}}{2} \vec{Z}_{ij} \right) = X_{ij} \angle \alpha_{ij}, \quad (28)$$

En remplaçant les équations (25), (26), (27) et (28) dans (24), nous aurons:

$$|\vec{Z}_{ij}| (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) (P_{ij} - j Q_{ij}) = |\vec{V}_i|^2 X_{ij} \angle \alpha_{ij} - |\vec{V}_i| |\vec{V}_j| \angle \delta_j - \delta_i, \quad (29)$$

Par identification, des parties réelles et imaginaires, nous obtenons:

$$\cos(\delta_i - \delta_j) = \frac{|\vec{V}_i|^2 X_{ij} \cos \alpha_{ij} - |\vec{Z}_{ij}| (P_{ij} \cos \theta_{ij} + j Q_{ij} \sin \theta_{ij})}{|\vec{V}_i| |\vec{V}_j|}, \quad (30)$$

$$\sin(\delta_i - \delta_j) = \frac{|\vec{Z}_{ij}| (P_{ij} \sin \theta_{ij} - j Q_{ij} \cos \theta_{ij}) - |\vec{V}_i|^2 X_{ij} \sin \alpha_{ij}}{|\vec{V}_i| |\vec{V}_j|}, \quad (31)$$

Sachant que  $\cos^2(\delta_i - \delta_j) + \sin^2(\delta_i - \delta_j) = 1$ , nous aurons:

$$|\vec{V}_i|^4 X_{ij}^2 + |\vec{V}_i|^2 \left\{ 2 X_{ij} |\vec{Z}_{ij}| (Q_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \theta_{ij}) - P_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \theta_{ij})) - |\vec{V}_j|^2 \right\} + |\vec{Z}_{ij}|^2 (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) = 0 \quad (32)$$

L'équation (32) est une équation de la forme:

$$A |\vec{V}_i|^4 + B |\vec{V}_i|^2 + C = 0, \quad (33)$$

Avec,

$$A = X_{ij}^2, \quad (34)$$

$$B = -2 X_{ij} |\vec{Z}_{ij}| (P_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \theta_{ij}) - Q_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \theta_{ij})) + |\vec{V}_j|^2, \quad (35)$$

$$C = |\vec{Z}_{ij}|^2 (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2), \quad (36)$$

Les solutions existent si  $\Delta \geq 0$ , ce qui donne:

$$\frac{4AC}{B^2} \leq 1, \quad (37)$$

En remplaçant les équations (34), (35) et (36) dans (37), nous obtenons:

$$IRST = \frac{4X_{ij}^2 |\vec{Z}_{ij}|^2 (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)}{\left[ -2X_{ij} |\vec{Z}_{ij}| (P_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \theta_{ij}) - Q_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \theta_{ij})) + |\vec{V}_j|^2 \right]^2} \quad (38)$$

#### 4. Simulation

Le réseau IEEE-9 nœuds 230 kV, 60 Hz [16] est choisi comme réseau test pour analyser la stabilité de tension. Ce réseau comporte trois nœuds de connexion et trois de production qui sont respectivement les nœuds 1, 2, et 3. Ces nœuds alimentent trois charges à travers six lignes électriques. Son schéma unifilaire est illustré par la Fig. 3. Ce réseau est représenté en p.u utilisant une base commune de 100 MVA.

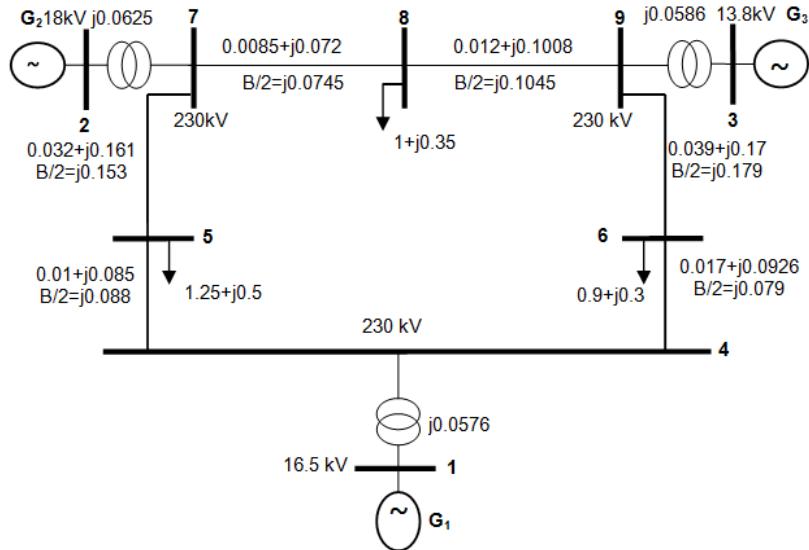


Fig. 3. Topologie du réseau étudié

Les résultats du calcul de l'écoulement de puissance sont obtenus à partir du programme utilisant la méthode de Newton-Raphson. Ce programme converge en 3 itérations avec une précision de  $10^{-5}$ . En régime normal ( $\lambda=1$  p.u) et en régime critique ( $\lambda_{\max}=2.6411$  p.u), ces résultats, qui représentent les valeurs des tensions nodales de la dernière itération (le module et la phase de la tension), sont représentés par le tableau 1.

*Table 1*  
**Amplitudes des tensions nodales**

Amplitude (p.u)	$\lambda=1$ p.u	$\lambda_{\max}$	Amplitude (p.u)	$\lambda=1$ p.u	$\lambda_{\max}$
$ \vec{V}_1 $	1,040	1,040	$ \vec{V}_6 $	1,013	0,737
$ \vec{V}_2 $	1,025	1,025	$ \vec{V}_7 $	1,026	0,839
$ \vec{V}_3 $	1,025	1,025	$ \vec{V}_8 $	1,016	0,797
$ \vec{V}_4 $	1,026	0,828	$ \vec{V}_9 $	1,032	0,912
$ \vec{V}_5 $	0,996	0,591			

Le tableau 1 montre que lors d'une augmentation des charges active et réactive, les tensions aux nœuds  $PQ$  ont diminué jusqu'à atteindre une valeur  $V_{5cri} = 0,591 \text{ p.u}$  qui correspond à la puissance maximale consommée par la charge  $\lambda_{\max} = 2,6411 \text{ p.u}$ . Ce point est appelé point de bifurcation de tension ou point d'effondrement de tension. Les valeurs des tensions nodales données par le tableau 1 et des puissances transmises et injectées correspondantes, nous permettent de calculer les indices FVSI, LCPI, NLSI et notre indice IRST en utilisant les équations (5), (13), (20) et (37).

Les valeurs des indices en régime normal et en régime critique sont regroupées dans le tableau 2.

*Table 2*  
**Les valeurs des indices en régime normal et en régime critique**

	Régime normal: $\lambda = 1 \text{ p.u}$				Régime critique: $\lambda_{\max} = 2,6411 \text{ p.u}$			
Ligne i-j	$FVSI_{i-j}$	$NLSI_{i-j}$	$LCPI_{i-j}$	$IRST_{i-j}$	$FVSI_{i-j}$	$NLSI_{i-j}$	$LCPI_{i-j}$	$IRST_{i-j}$
4-5	0,1638	0,2091	0,2077	0,0059	0,6644	0,8481	0,8865	0,1838
4-6	0,1085	0,1631	0,1620	0,003	0,4401	0,6615	0,6659	0,7945
7-5	0,3181	0,4581	0,455	0,0746	1,2554	1,8077	2,7901	0,089
7-8	0,0971	0,1281	0,1278	0,0111	0,3833	0,5056	0,5294	0,3691
9-6	0,2015	0,3232	0,3164	0,0448	0,6814	1,0928	1,230	0,4575
9-8	0,1343	0,1771	0,1753	0,0022	0,4540	0,5988	0,595	0,0671
Régime			$IRST_{5-4}$	$IRST_{6-4}$	$IRST_{5-7}$	$IRST_{8-7}$	$IRST_{6-9}$	$IRST_{8-9}$
Régime normal: $\lambda = 1 \text{ p.u}$			0,0095	0,0041	0,0801	0,0117	0,0447	0,0046
Régime critique: $\lambda_{\max}$			0,6237	0,1224	<b>0,9869</b>	0,2038	0,6453	0,1098

Les indices FVSI, NLSI et LCPI ont été démontrés pour un transit positif de la puissance dans un réseau. Pour le réseau IEEE 9-nœuds, ce transit est positif pour les sens suivants: 1-4, 2-7, 3-9, 4-5, 4-6, 7-5, 7-8, 9-6 et 9-8. Notre indice, a été démontré pour les deux sens du transit.

D'après les valeurs regroupées dans le tableau 2, nous pouvons dire que la ligne 5-7 est la ligne la plus sensible à l'effondrement du réseau ou la ligne la plus critique. Cette ligne présente le plus grand indice.

Les indices correspondant à cette ligne en régime normal et en régime permanent sont représentés par la Fig. 4.

Fig. 4. Valeurs des indices de la ligne 5-7 en régime normal et en régime critique

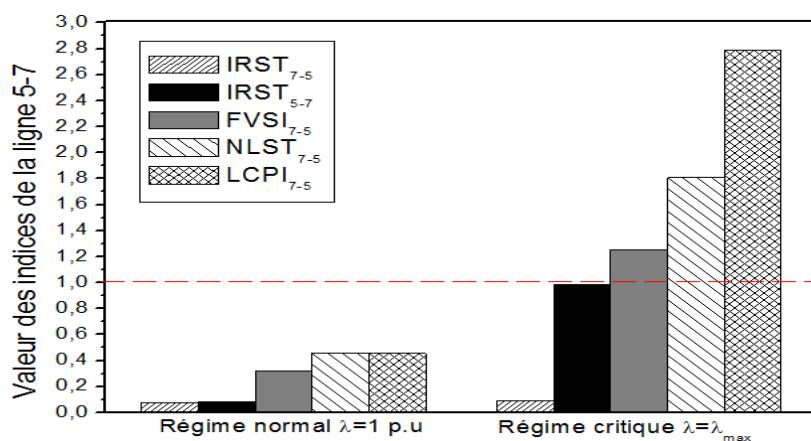


Fig. 4. Valeurs des indices de la ligne 5-7 en régime normal et en régime critique

D'après la Fig. 4, il est clair que la ligne 5-7 détient les valeurs des indices les plus élevées en régime critique, donc elle est considérée comme la ligne la plus sensible à l'effondrement de tension.

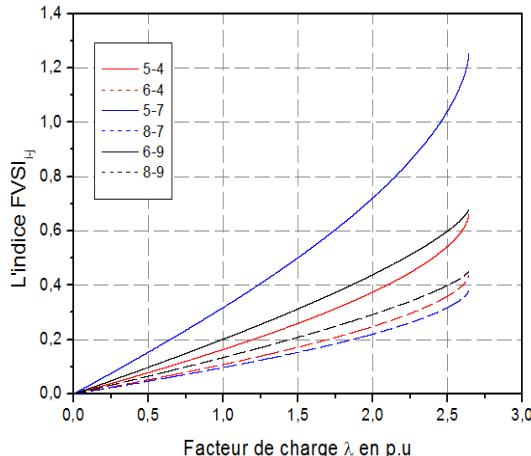
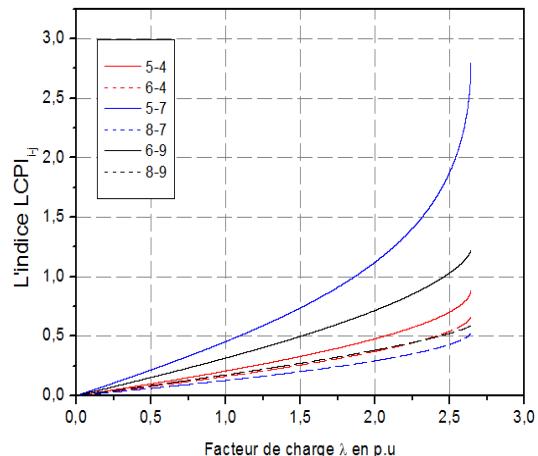
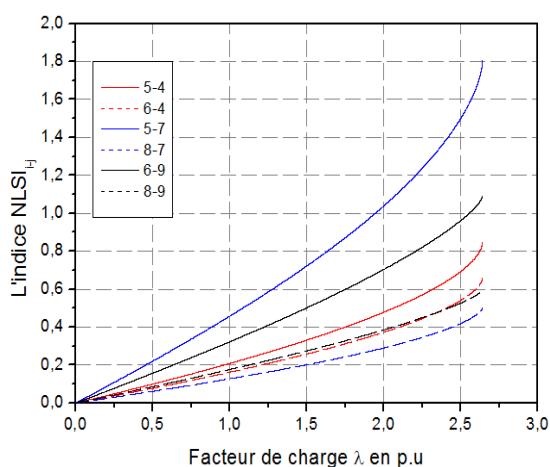
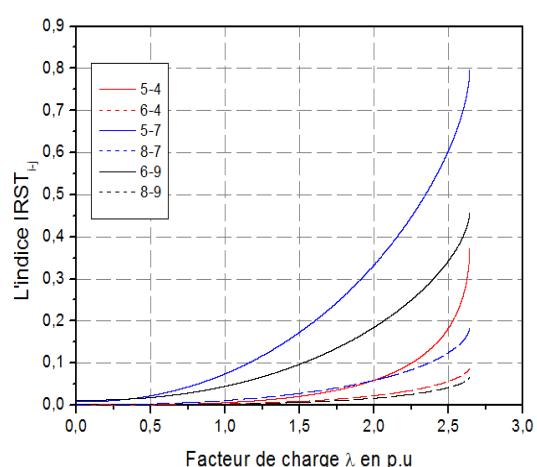
Les valeurs des indices FVSI, NLSI et LCPI dépassent la valeur de 1.0 pour  $\lambda_{\max} = 2.6411$  p.u. Ce résultat n'est pas tout à fait concluant puisque, les développeurs de ces indices ont démontré que pour une charge inférieure ou égale à la puissance demandée maximale, la valeur de ces indices est toujours inférieure ou égale à 1.00.

Ce résultat, peut être expliqué par le fait qu'en développant ces indices, plusieurs données importantes étaient négligées, comme par exemple, les admittances shunts, le sens du transit de la puissance, l'interconnexion du réseau, etc.

L'indice, que nous avons développé, donne un bon résultat, puisque à l'état critique sa valeur maximale atteint le 1.00 sans le dépasser.

A l'état normal, les valeurs de tous les indices de la ligne 5-7 sont inférieures à 0.5, ceci dénote que la puissance consommée est très inférieure à la puissance maximale.

Les Figs. 5 à 9 montrent l'évolution des différents indices en fonction du facteur de charge. Ces courbes sont obtenues en faisant un calcul d'écoulement de puissances classique à chaque incrémentation de la charge (active et réactive), jusqu'à la divergence du programme à cause de la singularité de la matrice jacobienne autour du point d'effondrement.

Fig. 5. Variations du FVSI en fonction de  $\lambda$ Fig. 6. Variations du LCPI en fonction de  $\lambda$ Fig. 7. Variations du NLSI en fonction de  $\lambda$ Fig. 8. Variations du IRST en fonction de  $\lambda$

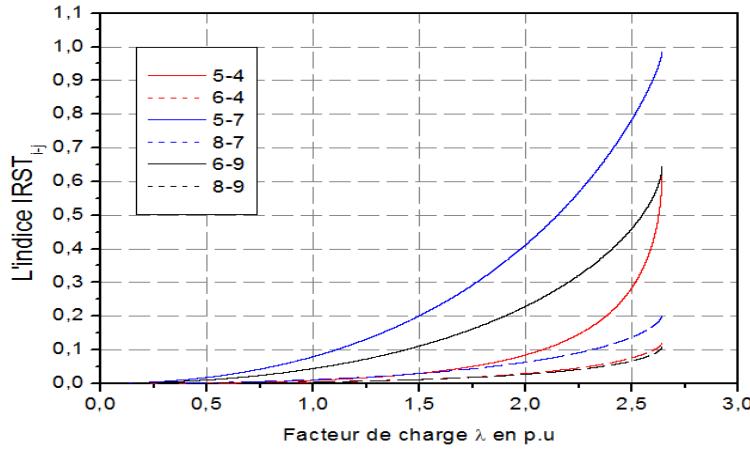


Fig. 9. Variations du IRST en fonction de  $\lambda$  (transit négatif)

A travers les Figs. 5 à 9, nous pouvons remarquer que lorsque les puissances active et réactive demandées s'accroissent, les indices augmentent progressivement. Il est clair que les évolutions des indices sont différentes, ce qui explique qu'ils donnent des réponses différentes en termes de stabilité de tension.

L'évolution des indices *FVSI*, *NLST* et *LCPI* dépassent la valeur de 1 ce qui ne nous permet pas de définir avec exactitude le point d'effondrement. Par contre, l'indice *IRST* varie bien d'une valeur nulle ( $\lambda=0$ ) à 1 ( $\lambda_{\max} = 4.8147 \text{ p.u}$ ).

La Fig. 10 montre l'évolution de la tension du nœud critique (nœud 5) et des indices de la ligne 5-7 en fonction du facteur de charge. Cette ligne est donc déterminée comme la ligne la plus critique. Toute augmentation supplémentaire de la charge amènera la ligne à avoir un indice *IRST* supérieure à 1,00, ce qui entraînera l'instabilité de l'ensemble du système.

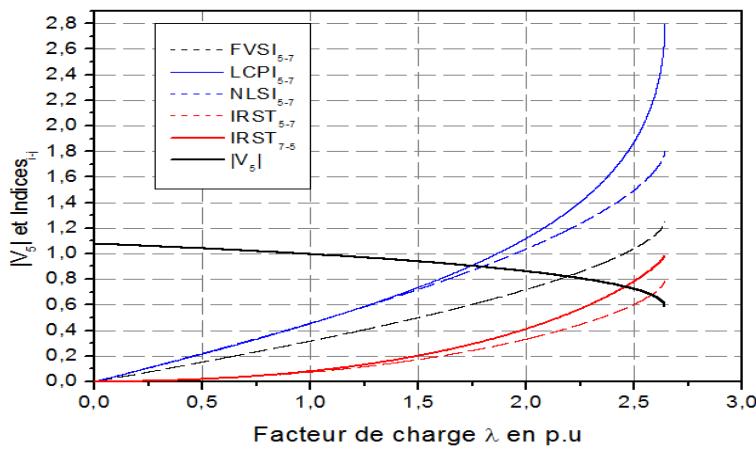


Fig. 10. Variations de  $|\vec{V}_5|$  et des indices en fonction de  $\lambda$

## 5. Conclusion

Cet article présente une étude comparative et une analyse des performances de certains indices de ligne pour évaluer la stabilité statique de tension.

Les principaux résultats de simulations que nous avons effectuées, concernent l'évaluation la stabilité statique de la tension d'un réseau multi-machines (réseau IEEE 9-nœuds), en appliquant l'écoulement de puissance conventionnel pour calculer les différents indices de stabilité.

Les simulations présentées indiquent que la ligne 5-7 est considérée comme la ligne la plus critique du système.

Nous avons pu montrer que notre indice est capable de déterminer avec exactitude la ligne critique. Le point d'instabilité de tension est indiqué par la valeur proche de 1,0.

## R E F E R E N C E S

- [1] *J. Hossain, H. Roy Pota*, Robust control for grid voltage stability: high penetration of renewable energy, Interfacing conventional and renewable power generation resources, Singapore, Springer, 2014
- [2] *Z. Lim, M.W. Mustafa\* and J.J. Jamian*, "Voltage Stability Prediction on Power System Network via Enhanced Hybrid Particle Swarm Artificial Neural Network", Journal of Electrical Engineering & Technology., **vol. 10**, no. 3, pp. 877-887.
- [3] *Christine E. Doig Cardet*, Analysis on Voltage Stability Indices, Master Thesis, Institute for Automation of Complex Power Systems ERC | E. ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2024
- [4] *V. Bharathi, C.R. Atla, M.R. Shivakumar*, "Power System Voltage Collapse Mitigation Employing Optimization Based Dynamic Voltage Stability Analysis", in U.Porto Journal of Engineering, **vol. 9**, no. 3, 2023, pp. 41-54
- [5] *M.A. Djari, L. Benasla, et W. Rahmouni*, "Une nouvelle méthode de construction de la courbe PV pour l'analyse de la stabilité de tension", in U.P.B. Sci. Bull., Series C, **vol. 80**, no. 3, 2018, pp. 141-152.
- [6] *T.T. Wondie et T.G. Tella*, "Voltage Stability Assessments and Their Improvement Using Optimal Placed Static Synchronous Compensator (STATCOM)", Hindawi Journal of Electrical and Computer Engineering, **vol. 2022**, 2022, 12 p.
- [7] *H.S. Salama et I. Vokony*, "Voltage stability indices—A comparison and a review", Computers & Electrical Engineering, **vol. 98**, 2022, pp 107743.
- [8] *L. Neerugattu et G.S. Raju*, "New criteria for voltage stability evaluation in interconnected power system", Indian Institute of Technology Kanpur, Conf. 2012.
- [9] *P.K. Kala et P.R. Bhavsar*, "Voltage stability analysis using voltage stability indices", IRJET, **vol. 5**, 2018.
- [10] *Musirin et T.K.A. Rahman*, "On-line voltage stability based contingency ranking using fast voltage stability index", dans Actes de la Conference: Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES, **vol. 2**, 2002.
- [11] *I. Musirin et T.K.A. Rahman*, "Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system", Conference: Research and Development, Scored 2002. Student Conference on, 2002.

- [12] *R. Tiwari, K.R. Niazi, et V. Gupta*, "Line collapse proximity index for prediction of voltage collapse in power systems", dans International Journal of Electrical Power & Energy Systems, **vol. 41**, no. 1, 2012, pp. 105-111.
- [13] *Hadi Saadat*, "Power system analysis", Mc Graw Hill International Edition, 1999.
- [14] *A. Yazdanpanah-Goharrizi et R. Asghari*, "A novel line stability index for voltage stability assessment of power systems", Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Power Systems, Beijing, China, September 15-17, 2007, pp. 164-167.
- [15] *Stagg and El-Abiad*, "Computer methods in power system analysis", Mc Graw-Hill Inc, 1968.
- [16]. *P. Anderson et A. Fouad*, "Power system control and stability", IEEE Press, Piscataway, N.J., 2003.