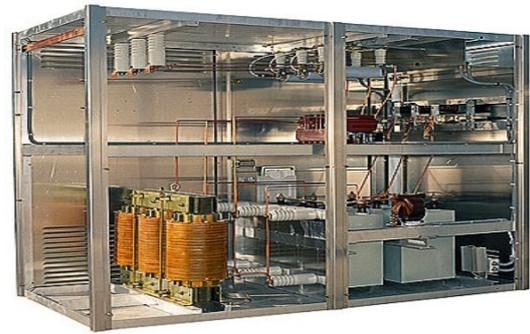


Cours : Compensation d'Energie Réactive



Mme AITOUARET Née CHEKKAL Samira

Table des matières



Objectifs	3
I - chapitre II : Études Paramétriques de la stabilité de tension	4
1. Introduction	4
2. Courbe d'effondrement de tension	4
3. Influence des composants du réseau sur la stabilité de tension	8
3.1. Influence du facteur de puissance de la charge sur la stabilité de tension	9
3.2. Influence de la nature de charge	9
II - Exercice	11
III - Activité d'auto-évaluation	13
Solution des exercices	15
Bibliographie	16

Objectifs



- Acquérir des notions sur les phénomènes de l'instabilité de tension ;
- La compréhension des phénomènes ayant lieu sur le réseau lors du fonctionnement normal et critique

chapitre II : Études Paramétriques de la stabilité de tension



Introduction	4
Courbe d'effondrement de tension	4
Influence des composants du réseau sur la stabilité de tension	8

1. Introduction

L'effondrement de tension intervient généralement suite à une perturbation majeure ou à une augmentation importante de la charge sur un réseau électrique soumis à de fortes contraintes. Ce réseau s'affaiblit et sa consommation réactive s'accroît. Le phénomène est alors caractérisé par une baisse progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices, et qui va en s'accroissant au bout de quelques minutes. La dégradation de la tension au niveau des charges est alors telle qu'elle entraîne des interruptions de service dont les causes directes peuvent être :

manque de tension, augmentation des pertes réactive du réseau. La défaillance du réglage de la tension, au niveau des bornes des groupes, a pour conséquence une accélération de la dégradation du plan de la tension qui peut aller jusqu'à des déclenchements, en cascade, de groupes et de lignes et un effondrement général du réseau.

Afin d'illustrer quelques aspects de l'analyse, le phénomène d'instabilité de tension peut être analysé à l'aide d'un système simple constitué d'un générateur alimentant une charge électrique à travers une ligne électrique.

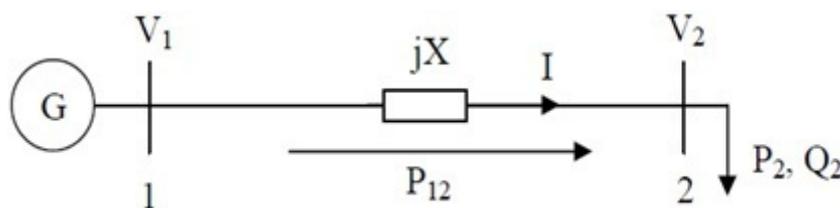


Fig.II.1: Réseau électrique à deux nœuds

2. Courbe d'effondrement de tension

La courbe d'effondrement de tension (Courbe PV) est considérée parmi les techniques les plus utilisées dans l'étude et l'analyse de la stabilité statique de tension.

Elle trace l'évolution de la tension en fonction de l'augmentation de la charge dans le nœud. Dans ce qui suit, nous essayons d'élaborer et développer le modèle mathématique qui décrit la variation de la tension en fonction de la charge.

D'après la figure II.1, on peut exprimer la puissance apparente au nœud 2 suivant l'équation :

Dans ce circuit, l'alternateur alimente une charge à travers une ligne de transmission.

Avec :

V_1 : tension au début de la ligne

V_2 : tension à l'extrémité de la ligne

X : réactance de la ligne

Θ : angle de charge

$$\vec{S} = P_2 + jQ_2$$

math

En considérant la figure II.1, on peut écrire :

$$I = \frac{V_1 - V_2}{jX}$$

math_02

On aura alors

$$S^* = (V_2 I^*)^* = V_2^* I = V_2^* \frac{V_1 - V_2}{jX}$$

math_03

Avec

$$V_2^* = (V \angle \theta)^* = V \angle -\theta$$

math_04

On aura

$$S^* = P_2 - jQ_2 = \frac{-V_1 V_2}{X} \sin \theta + j \left(\frac{V_2^2}{X} - \frac{V_1 V_2}{X} \cos \theta \right)$$

math_05

Les puissances active et réactive qui transitent dans la ligne s'écrivent alors

$$P_{12} = -P_{21} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\theta)$$

math_06

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{-V_2^2}{X} + \frac{V_1 V_2}{X} \cos(\theta)$$

math_07

On élimine l'angle θ par l'utilisation de l'équation:

$$\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2 = 1$$

math_08

donc on trouve:

$$P^2 + \left(Q + \frac{V_2^2}{X}\right)^2 = \frac{V_1^2 V_2^2}{X_2^2}$$

math_09

L'équation précédente peut s'écrire sous la forme d'une équation quadratique en fonction de V_2

$$V_2^4 + (2QX - V_1^2)V_2^2 + (P^2 + Q^2)X^2 = 0$$

math_11

$$V_2^2 = \frac{1}{2} \left[V_1^2 - 2QX \pm V_1 \left(V_1^2 - \frac{4P^2 X^2}{V_1^2} - 4QX \right)^{1/2} \right]$$

math_12

$$Q = \operatorname{tg} \theta \times P = B \times P$$

math_13

On remplace Q par son expression. Donc la solution est:

$$V_2^2 = \left[\frac{V_1^2}{2} - BPX \pm \left(\frac{V_1^4}{4} - PX(PX + BV_1^2) \right)^{1/2} \right]$$

math_14

D'après l'équation précédente, on peut conclure que, la tension au nœud 2 est une fonction de la puissance active, de la réactance de la ligne, et du facteur de puissance.

La figure II.2 présente la courbe de bifurcation du système étudié. La courbe montre l'évolution de la tension en fonction de la puissance active. La charge est considérée purement active ($Q = 0$ donc $B = 0$), la réactance de la ligne $X = 0.5\text{pu}$.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{mp} ; Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{mq}$$

math_10

D'après la figure II.2, on peut remarquer que lorsque la puissance demandée augmente, la tension diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur critique V_{crit} qui correspond à la puissance maximale transmissible par la ligne P_{max} . Ce point est appelé point de bifurcation de tension (ou point d'effondrement de tension). Au-delà de ce point, la tension chute d'une façon brusque et incontrôlable ; c'est le phénomène d'effondrement de tension. Ce phénomène peut s'expliquer comme suit : lorsque la charge croît, le courant circulant dans la ligne croît ; entraînant une chute de tension d'autant plus importante que le courant est plus grand, donc la tension aux bornes de la charge décroît.

De la figure II.2 une notion très importante et très utilisée dans l'étude et l'évaluation de la stabilité de tension est la marge de stabilité de tension, laquelle est considérée comme un indice efficace de l'évaluation de la stabilité de tension. Elle est définie comme étant la quantité de charge additionnelle de la charge nominale qui conduit le réseau électrique à un effondrement de tension.

Autrement dit, c'est la distance entre le point de fonctionnement nominal du réseau et le point d'effondrement de tension. Dans la conduite et l'exploitation des réseaux électrique, on essaye toujours de garder une marge de stabilité de tension la plus grande possible.

On peut remarquer aussi que, pour une valeur donnée P de la puissance demandée par la charge, il existe deux solutions de tension. La solution supérieure V_H correspondant à la valeur qui peut être atteinte en pratique et l'autre solution V_L est juste mathématiquement ; mais qui ne représente pas une valeur pratique. La justification de cette analyse est présentée comme suit :

On suppose une augmentation incrémentale de la charge qui déplace le point de fonctionnement à droite de la courbe. On peut voir que : la solution supérieure V_H devient plus faible, ce qui semble naturel ; Donc cette solution correspond à un point de fonctionnement normal ou stable. Par contre la solution inférieure V_L augmente simultanément avec la charge, ce qui n'est pas naturel. Donc cette solution correspond à un point de fonctionnement dégradé ou instable.

En outre, le courant correspondant à la solution V_L est beaucoup plus grand que celui correspondant à la solution V_H . De ce fait les pertes actives sont plus élevées. Par ailleurs, la tension V_L est beaucoup plus petite que V_H .

Finalement, on peut conclure que la partie supérieure de la courbe donne la région de fonctionnement stable. En conséquence, dans toute analyse consacrée aux problèmes de la stabilité statique de tension, l'intérêt est porté sur cette partie de la courbe.

3. Influence des composants du réseau sur la stabilité de tension

On a évalué la stabilité de tension en utilisant la courbe de bifurcation de tension, sous l'influence de plusieurs composants du réseau, récapitulés dans ce qui suit :

- Influence du facteur de puissance
- Influence de la nature de la charge.

Réseau d'application

La figure II.3, illustre le schéma synoptique du système d'application utilisée dans cette étude. Le réseau est composé d'un générateur qui alimente une charge via une ligne électrique d'une réactance de 0.15 pu. Le réseau comprend aussi des équipements de contrôle à savoir les dispositifs FACTS et d'un transformateur régleur en charge. La tension à la sortie du générateur est considérée fixe égale à 1pu.

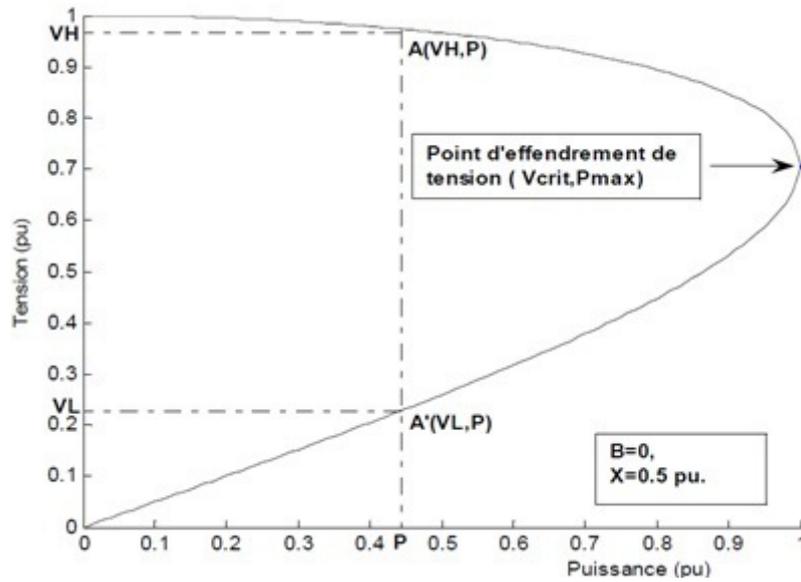


Fig II.2 Courbe de bifurcation de tension.

3.1. Influence du facteur de puissance de la charge sur la stabilité de tension

La figure II.4, représente la courbe de bifurcation de la tension pour différentes valeurs de $B = \tan \vartheta$. Il est clair que lorsque le facteur B diminue (c'est-à-dire ϑ diminue) la puissance maximale transmise par la ligne augmente. Cette situation semble très logique, car lorsque la compensation de l'énergie réactive de la charge augmente (c'est-à-dire ϑ diminue) ; la puissance maximale transmissible (marge de stabilité) augmente. La courbe en pointillé de la figure II.4 représente l'évolution du point critique (point d'effondrement de tension) en fonction du facteur B . Il est clair que la tension critique augmente quand le facteur B diminue ; de ce fait, une surcompensation de l'énergie réactive risque d'amener la valeur de la tension critique dans la région de fonctionnement normale. Ainsi on peut conclure que le facteur de puissance a un impact très significatif sur la caractéristique PV et donc sur la stabilité de tension. La puissance maximale transmissible par la ligne augmente avec le facteur de puissance. Donc la charge, qui possède un facteur de puissance relativement élevé, offre une marge de stabilité de tension satisfaisante.

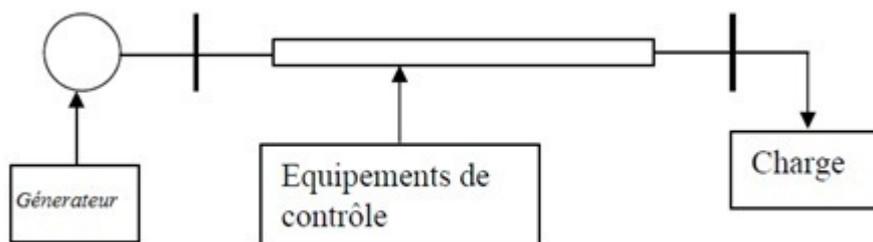


Fig II.3 Schéma synoptique du réseau d'application.

3.2. Influence de la nature de charge

Comme déjà mentionné précédemment, la stabilité de tension est très sensible à la nature de la charge. La modélisation standard des charges par le modèle PQ (puissance active et réactive constante) ne représente pas les caractéristiques réelles de celle-ci. Il existe d'autres modèles statiques (modèle du courant constant et d'impédance constante) qui représentent les puissances active et réactive consommées par la charge en fonction de la tension aux bornes de celle-ci.

Les trois modèles statiques sont réunis dans les deux équations :

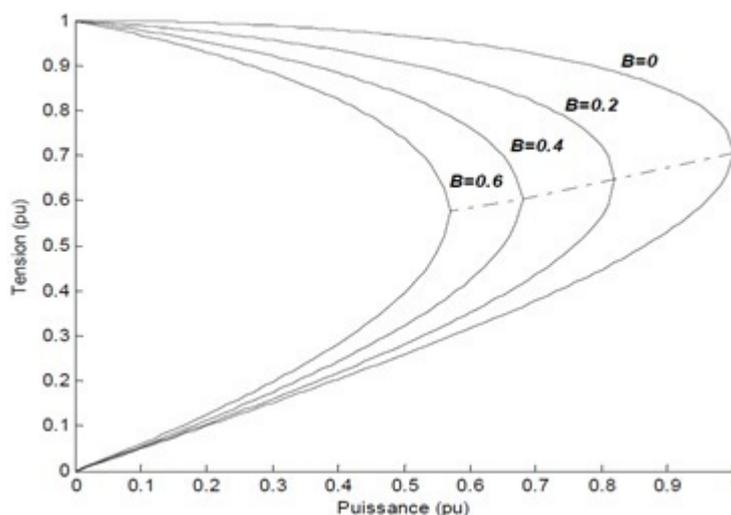


Fig II.4 Caractéristique PV pour différentes valeurs de $B = \tan \vartheta$

Suivant les valeurs de n_p et n_q , on peut citer les trois modèles statiques suivants :

3.2.1. Modèle à puissance constante

C'est le modèle classique utilisé dans le calcul d'écoulement de puissance. Dans ce modèle, les puissances active et réactive sont considérées constante, elle ne dépend pas de la tension ($n_p = n_q = 0$). La charge électrique est modélisée par les deux équations suivantes :

3.2.2. Modèle à courant constant

Dans ce modèle de charge, les puissances active et réactive dépendent directement de la tension. De ce fait, les exposants n_p et n_q sont égaux à 1. Les équations deviennent :

3.2.3. Modèle à admittance constante

Les puissances consommées par la charge sont fonction du carré de la tension, en remplaçant n_p et n_q , on trouve :

La figure II.5 montre la sensibilité de la courbe de bifurcation de la tension vis-à-vis de la nature de la charge. Le modèle à puissance constante ($n=0$) est le cas le plus néfaste sur la stabilité statique de tension. Il possède le point d'effondrement le plus critique parmi les trois cas de simulation.

Les charges à courant constant ($n=1$) ont un point critique plus éloigné que les charges à puissance constante. Avec ces charges, la probabilité d'occurrence d'un effondrement de tension est faible.

Pour les charges à admittance constante, il n'existe pas un point d'effondrement de tension. Donc il y a toujours un point de fonctionnement théoriquement stable.

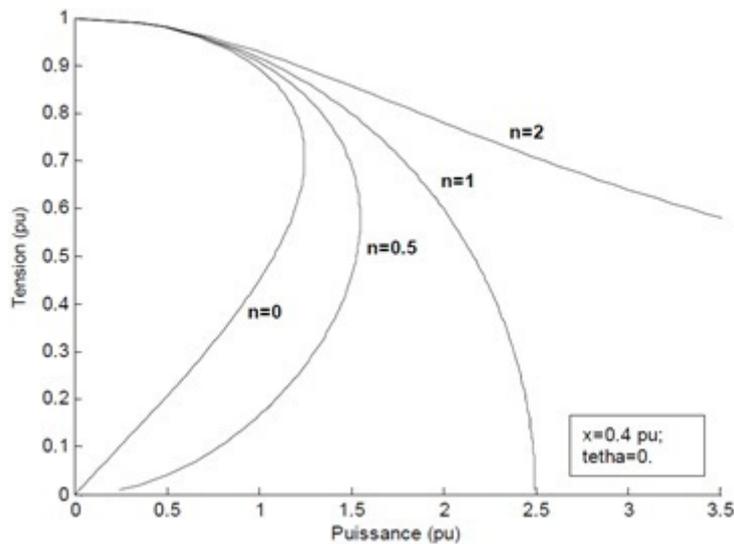


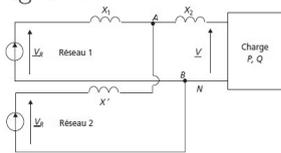
Fig II.5 Influence des modèles de charge sur la caractéristique PV

L'étude paramétrique de la stabilité de tension a montré que la nature de la charge est un paramètre essentiel dans l'étude de la stabilité de tension. Une charge de puissance constante ($P=Q=\text{cte}$) est la plus pessimiste sur la stabilité de tension.

Afin de palier le phénomène d'effondrement de la tension du réseau, il est nécessaire d'interconnecter au maximum les différents réseaux de distribution. Cette partie permet de justifier cette nécessité et présente quelques caractéristiques de sa réalisation. On considère à présent le réseau conforme au schéma de la figure 3 où on voit apparaître une connexion à mi-distance du réseau 2 sur le réseau 1. On note encore les réactances de lignes X (subdivisée en X_1 et X_2) et X' .

1. Le réseau 1 étant celui de l'exo1, quelle relation relie X_1 , X_2 et X ?
 2. Représenter le schéma équivalent de Thévenin du circuit situé à gauche des points A et B.
- Représenter alors le schéma équivalent total du circuit. On notera X_T la réactance totale équivalente aux imperfections des réseaux.
3. Quelle est l'expression littérale de X_T en fonction de X_1 , X_2 et X .

Figure 3



4. Calculer alors l'expression de la puissance maximale que peut fournir cette installation.
5. Que valent les puissances maximales que peuvent fournir les réseaux seuls, c'est à-dire s'ils n'étaient pas connectés. Comparer alors la puissance maximale disponible en réseaux connectés par rapport aux réseaux indépendants.

Activité d'auto-évaluation



Exercice 1

[Solution p 15]

L'effondrement de tension intervient généralement suite à une perturbation majeure ou à une augmentation importante de la charge sur un réseau électrique soumis à de fortes contraintes

- Vraie
- Faux

Exercice 2

[Solution p 15]

Le phénomène de l'effondrement de tension est caractérisé par une augmentation progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices.

- Vraie
- Faux

Exercice 3

[Solution p 15]

Le phénomène de l'effondrement de tension est caractérisé par une augmentation progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices

- Vraie
- Faux

Exercice 4

[Solution p 15]

La figure suivante présente la courbe de bifurcation du système étudié. La courbe montre l'évolution de la tension en fonction de la puissance active.

D'après la figure on peut remarquer que lorsque la puissance demandée augmente, la tension augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur critique V_{crit}

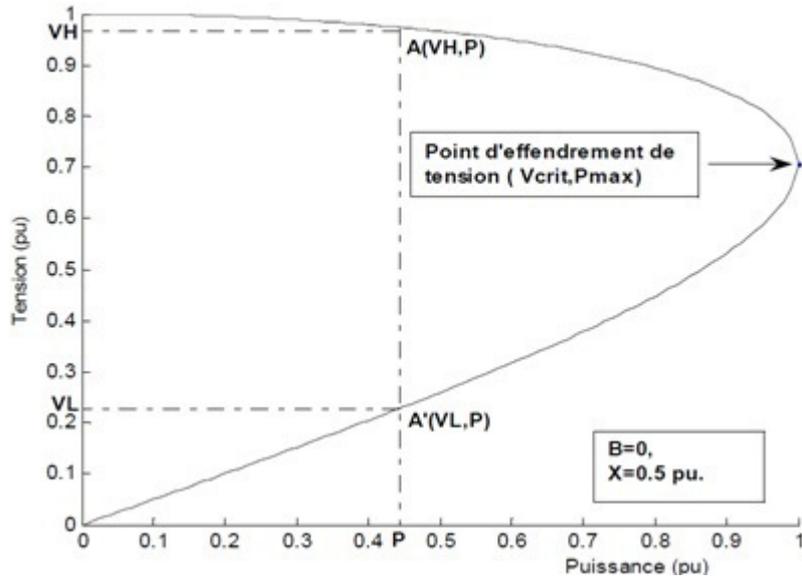


Fig II.2 Courbe de bifurcation de tension.

- Vraie
- Faux

Exercice 5

[Solution p 15]

L'étude paramétrique de la stabilité de tension a montré que la nature de la charge est un paramètre essentiel dans l'étude de la stabilité de tension.

- Vraie
- Faux

Exercice 6

[Solution p 15]

La dégradation de la tension au niveau des charges est alors telle qu'elle entraîne des interruptions de service dont les causes directes peuvent être :

- Manque de tension
- Diminution des pertes réactive du réseau.

Solution des exercices



> Solution n° 1

- Vraie
- Faux

> Solution n° 2

- Vraie
- Faux

> Solution n° 3

- Vraie
- Faux

> Solution n° 4

- Vraie
- Faux

> Solution n° 5

- Vraie
- Faux

> Solution n° 6

- Manque de tension
- Diminution des pertes réactive du réseau.

Bibliographie



- [1] Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations Part 2 : Voltage Dips and Short Interruptions Working Group UIE Power Quality 1996
- [2] A. Kusko, M-T. Thompson, Power Quality in Electrical Systems, Mc Graw Hill, 2007.
- [3] F. Ewald Fuchs, M.A.S. Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Elsevier Academic Press, 2008
- [4] R.C. Dugan, Mark F. Granaghan, Electrical Power System Quality, McGraw Hill, 2001
- [5] Cahiers techniques Schneider N° CT199, CT152, CT159, CT160 et CT1
- [6] Qualité de l'énergie, Cours de Delphine RIU, INP Grenoble
- [7] Marceau, R.J., Sirandi, M., Soumaré, S., Do, X.-D., Galiana, F., Mailhot, R., , A review of signal energy analysis for the rapid determination of dynamic security limits (Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering - IEEE Canada - October 1996, Volume 21, Number 4)
- [8] Kundur, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, ERPI Power System Engineering Series, ISBN 007035958X

