
Table des matières

2	Contrôle de la puissance réactive et réglage de la tension	3
	Reactive power and voltage control	3
2.1	Chute de tension dans le réseau-Formulation mathématique du problème	3
2.1.1	Régulation de la tension	4
2.2	Cas particulier	4
2.3	Puissances active, réactive et angle de charge	5
2.3.1	Effets de la puissance réactive sur la tension et le transfert de puissance	6
2.4	Réglage de la tension	9
2.4.1	Méthodes et moyens de réglage de la tension	9
2.5	Caractéristiques des compensateurs série et shunt	10
2.5.1	Condensateur	10
2.5.2	Inductance	10
2.5.3	Compensateurs FACTS	10
2.6	Effets des différents moyens de réglage sur la tension et la puissance	13
2.6.1	Réglage shunt	13
2.6.2	Réglage série	14
2.7	Réglage de la tension par compensation de puissance réactive	15
2.7.1	Cas particulier, correction du facteur de puissance	16
2.7.2	Calcul de la puissance de réglage	17
2.8	Réglage de la tension par compensation de la réactance de ligne	20
2.9	Stabilité de la tension	23
2.9.1	Classification des instabilité de la tension	24
2.10	Dynamique de charge et stabilité de la tension	25
2.10.1	Charge non compensée	25
2.10.2	Effets des différents moyens de réglage sur stabilité	27
2.11	Plan globale de réglage de la tension	31
2.11.1	Réglage primaire, Primary control	31
2.11.2	Réglage secondaire, secondary control	32
2.11.3	Réglage tertiaire, Tertiary control	32
2.12	Points à retenir	32

Contrôle de la puissance réactive et réglage de la tension Reactive power and voltage control

Le réglage et le contrôle de la tension dans les réseaux électriques consiste à maintenir en régime permanent des tensions stables et dans des plages spécifiques à chaque niveau. Ce réglage est d'une importance capitale pour garantir un bon fonctionnement des différents équipements du réseau (lignes, transformateurs, systèmes de protection, charges...etc). En effet, une tension plus élevée conduit souvent à une usure prématurée du matériel, alors qu'une tension plus basse par rapport à la plage spécifiée conduit à un mauvais fonctionnement des équipements et des charges.

Les variations de tension sont inévitables à cause des variations permanentes des puissances active et réactive demandées, ainsi que des changements de topologie du réseau. Ces variations peuvent être courtes (du ms à 1 min) causées principalement par le démarrage de grosses charges ou des défauts dans le réseau, ou lentes dues essentiellement aux variations de la consommation de puissance active et surtout réactive sur une période longue (des minutes ou des heures).

Nous allons formuler dans ce chapitre le problème des chutes de tensions et du réglage de celle-ci par les différents moyens existants. Nous allons voir également la relation entre le réglage de la tension et le transit des puissances, ainsi que la stabilité.

2.1 Chute de tension dans le réseau-Formulation mathématique du problème

Soit le réseau de la Figure. 2.1, représentant une charge alimentée par un poste de distribution via une ligne d'impédance $\bar{Z}_s = R_s + jX_s$. La charge absorbe une puissance active P_L et une puissance réactive Q_L . La tension au poste de distribution est supposée constante et elle est notée \bar{E} , tandis que la tension aux bornes de la charge est notée par \bar{V} . Si on note par \bar{I} le courant absorbé par la charge sous tension \bar{V} , alors la chute de tension dans la ligne sera donnée par

$$\Delta \bar{V} = \bar{E} - \bar{V} = \bar{Z} \bar{I} \quad (2.1)$$

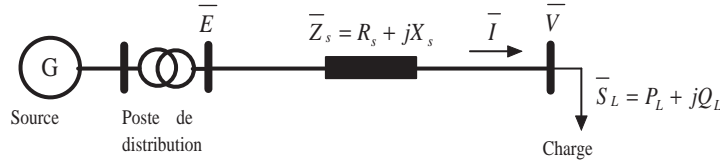
Or, le courant peut être écrit en fonction des puissances absorbées comme

$$\bar{I} = \frac{S_L^*}{\bar{V}} = \frac{P_L - jQ_L}{\bar{V}} \quad (2.2)$$

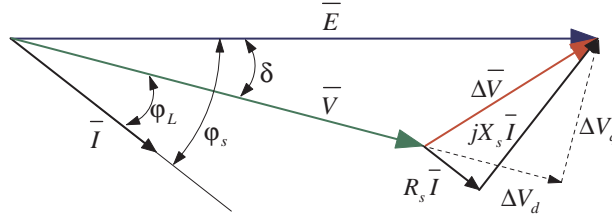
En remplaçant dans l'équation (2.1), la chute de tension s'écrit

$$\Delta \bar{V} = (R_s + jX_s) \left(\frac{P_L - jQ_L}{\bar{V}} \right) = \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{\bar{V}} + j \frac{X_s P_L - R_s Q_L}{\bar{V}} \quad (2.3)$$

Cette équation montre que la chute de tension dépend de deux paramètres ;



(a) Réseau radial alimentant une charge.



(b) Diagramme vectoriel des tension.

FIGURE 2.1 – Chute de tension dans une ligne.

1. Les puissances active et réactive absorbées par la charge ;
2. L'impédance de la ligne.

D'après le diagramme vectoriel sur la Figure. 2.1(b), cette chute de tension a une composante directe par rapport à \bar{V} , notée ΔV_d (en phase avec \bar{V}) et une composante en quadrature ΔV_q (déphasée de 90° par rapport à \bar{V}). Ainsi, on peut écrire

$$\Delta \bar{V} = \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{\bar{V}} + j \frac{X_s P_L - R_s Q_L}{\bar{V}} = \Delta V_d + j \Delta V_q \quad (2.4)$$

Ainsi, d'après l'équation (2.4), si on prend la tension de source \bar{E} comme référence on peut écrire

$$E = \sqrt{(V + \Delta V_d)^2 + \Delta V_q^2} = \sqrt{\left(V + \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{V}\right)^2 + \left(\frac{X_s P_L - R_s Q_L}{V}\right)^2} \quad (2.5)$$

2.1.1 Régulation de la tension

Une des mesures du niveau de tension est la régulation de la tension en %, (Percent Voltage Regulation) qu'on définit par

$$R_V(\%) = \frac{E - V}{V} \times 100\% \quad (2.6)$$

2.2 Cas particulier

Dans certains cas, notamment dans les réseaux de transport, la résistance de ligne est négligée devant la réactance, alors la tension de charge devient

$$\bar{V} = \bar{E} - \frac{X_s Q_L}{V} - j \frac{X_s P_L}{V} = E \left(1 - \frac{X_s Q_L}{EV} - j \frac{X_s P_L}{EV} \right) \quad (2.7)$$

Admettant que $EV \approx E^2$, la tension \bar{V} sera réécrite

$$\bar{V} \approx E \left(1 - \frac{Q_L}{S_{sc}} - j \frac{P_L}{S_{sc}} \right) \quad (2.8)$$

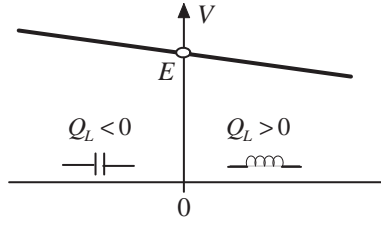
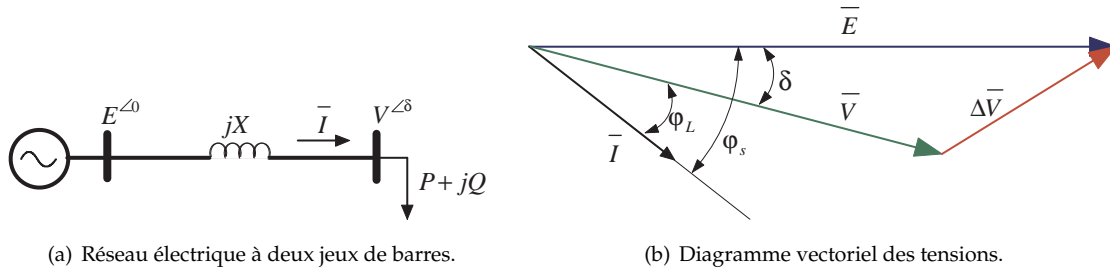


FIGURE 2.2 – Droite de Charge

FIGURE 2.3 – Chute de tension dans une ligne de réactance X .

Où S_{sc} représente la puissance de court-circuit du réseau. Comme on peut le voir sur le diagramme de la Figure. 2.1(b), La partie imaginaire P_L/S_{sc} qui représente la chute de tension en quadrature est responsable du déphasage entre la tension de charge \bar{V} , mais influence peu sur le module de \bar{V} . Ainsi

$$V \approx E \left(1 - \frac{Q_L}{S_{sc}} \right) \quad (2.9)$$

La tension V peut être alors représentée sous forme d'une droite dite *droite de charge* comme le montre la Figure. 2.2. On peut remarquer que lorsque $Q_L > 0$ la tension $V < E$, et lorsque $Q_L < 0$ $V > E$.

2.3 Puissances active, réactive et angle de charge

Le réseau de la Figure. 2.1(a) peut être généralisé à celui d'un réseau à deux jeux de barres, un jeu de barres source et un jeu de barres charge (sending end bus and receiving end bus). La ligne entre les jeux de barres est représentée par sa réactance X . La tension au jeu de barres source \bar{E} est prise comme référence, donc sa phase est égale 0° , et la tension au jeu de barres chargé \bar{V} est déphasée d'un angle δ par rapport à \bar{E} . Les puissances active et réactive au jeu de barres chargé sont P et Q . Le courant \bar{I} absorbé, supposé inductif, est déphasé de φ_L par rapport à \bar{V} et de φ_s par rapport à \bar{E} comme le montre le diagramme vectoriel sur la Figure. 2.3(b) La relation entre les tensions \bar{E} et \bar{V} peut être alors écrite comme

$$E \cos(\delta) = V + XI \sin(\varphi_L) \quad \text{et} \quad E \sin(\delta) = XI \cos(\varphi_L) \quad (2.10)$$

Par ailleurs, la puissance absorbée au jeu de barres de charge est donnée par

$$\bar{V} \bar{I}^* = P + jQ = VI \cos(\varphi_L) + jVI \sin(\varphi_L) \quad (2.11)$$

En faisant sortir les expressions du $\cos(\varphi_L)$ et $\sin(\varphi_L)$ de l'équation (2.10), et en remplaçant dans (2.11), on aboutit aux équations des flux de puissances suivantes

$$P = \frac{EV}{X} \sin(\delta) \quad (2.12)$$

$$Q = \frac{EV}{X} \cos(\delta) - \frac{V^2}{X} \quad (2.13)$$

Côté source, la puissance active débitée est égale à celle du jeu de barres de la charge donnée par (2.12), puisque la résistance de la ligne est négligée. Cependant, pour la puissance réactive, elle est différente du fait de la réactance de ligne qui consomme une partie de la puissance réactive débitée par la source. La puissance réactive de la source peut être écrite comme

$$Q_s = Q + XI^2 \quad \text{avec} \quad I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V} \quad (2.14)$$

En remplaçant P et Q par les expressions établies précédemment, la puissance réactive de la source s'écrit

$$Q_s = \frac{E^2}{X} - \frac{EV}{X} \cos(\delta) \quad (2.15)$$

D'après le digramme vectoriel de la Figure. 2.3(b), on peut écrire les chutes de tension directe (longitudinale), et en quadrature (transversale) comme suit

$$\Delta V_d = E \cos(\delta) - V, \quad \Delta V_q = E \sin(\delta) \quad (2.16)$$

Ainsi, les équations (2.12) et (2.13) peuvent être réécrites comme

$$P = \frac{V}{X} \Delta V_q, \quad Q = \frac{V}{X} \Delta V_d \quad (2.17)$$

Remarque que la puissance active P échangée entre les deux jeux de barres dépend des paramètres suivants :

1. Modules des tensions de source E , et de charge V ; Si on suppose une tension de source constante, alors une bonne régulation de la tension de charge augmentera la puissance P ;
2. La réactance de la ligne X ; En théorie, plus elle faible plus la puissance est grande, mais il ne faut perdre de vue qu'une trop faible réactance provoquera une instabilité du système.
3. L'angle de charge δ ; Plus il est large, plus la puissance est grande, mais il faut noter qu'un angle large peut affecter la stabilité du réseau.

La puissance réactive dépend aussi des tensions E , V et de la réactance de ligne X . De manière plus explicite, la puissance Q dépend de la chute de tension directe ΔV_d comme le montre l'équation (2.17). Si cette chute de tension est nulle, alors il n'y a aucune puissance réactive au jeu de barres de la charge, mais cela ne veut forcément pas dire que la charge n'absorbe pas de puissance réactive ! Par ailleurs, la chute de tension en quadrature ΔV_q ne peut pas être zéro, car il n'y aura aucun transfert de puissance active de la source à la charge, ce qui n'est pas pratique, (sauf si le jeu de barres est à vide).

Remarque importante

L'équation (2.17) montre qu'il ne peut pas y avoir de transfert de puissance entre les deux jeux de barres sans chute de tension.

2.3.1 Effets de la puissance réactive sur la tension et le transfert de puissance

Dans cette section, nous allons mettre en lumière l'effet de la puissance réactive sur la tension de charge \bar{V} et le transfert de puissance active de la source à la charge. Pour, cela reprenant les équations (2.12) et (2.13) qu'on peut mettre sous la forme

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{EV}{X} \right)^2 \quad (2.18)$$

La solution de cette équation pour V donne

$$V^2 = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm X \sqrt{\frac{E^4}{4X^2} - P^2 - Q \frac{E^2}{X}} \quad (2.19)$$

Donc, pour que l'équation (2.18) admet des solutions positives pour V , il faut que

$$P^2 + Q \frac{E^2}{X} \leq \frac{E^4}{4X^2} \quad (2.20)$$

Cette dernière équation permet d'identifier les puissances active et réactive que la ligne peut fournir à la charge. Ainsi, en introduisant la puissance de court-circuit du réseau donnée par

$$S_{sc} = \frac{E^2}{X} \quad (2.21)$$

on peut écrire la condition précédente comme

$$P^2 + QS_{sc} \leq \left(\frac{S_{sc}}{2} \right)^2 \quad (2.22)$$

Cette dernière condition permet de tirer les conclusions suivantes

1. Si la charge est purement active, $Q = 0$, alors la puissance active maximale transmissible par la ligne est égale $S_{sc}/2$;
2. Si la charge est purement réactive $P = 0$, alors la puissance réactive maximale transmissible par la ligne est égale $S_{sc}/4$;
3. Un facteur de puissance capacitif ($Q < 0$) au jeu de barre de la charge augmente la capacité de transfert de la puissance active ;
4. Un facteur de puissance inductif ($Q > 0$) au jeu de barre de la charge réduit la capacité de transfert de la puissance active.

Ainsi, il semble qu'il est plus difficile de transporter la puissance réactive que la puissance active. En outre, le transport de la puissance réactive réduit la capacité de la ligne à satisfaire la charge en puissance active. Pour le vérifier, soit une charge absorbant une puissance $P + jQ = P + jP \tan(\varphi)$ sous tension V . La charge en question est représentée par son admittance donnée par

$$\bar{G}_L = G + jG \tan(\varphi) \quad (2.23)$$

Ainsi, en utilisant le diviseur de tension, la tension de charge \bar{V} sera donnée en fonction de la tension de source \bar{E} , de l'admittance de charge et de la réactance de la ligne comme

$$\bar{V} = \frac{\bar{E}}{1 + XG \tan(\varphi) + jXG} \quad (2.24)$$

dont le module s'écrit

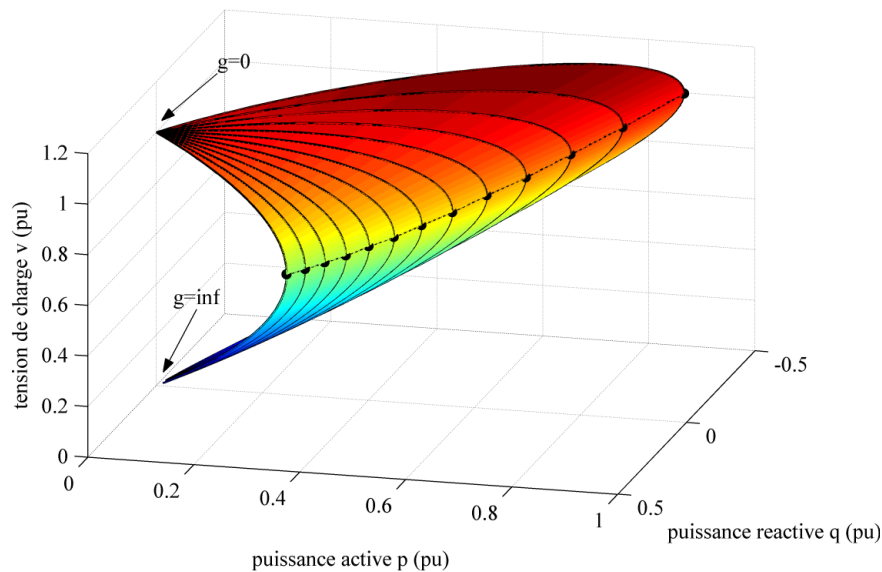
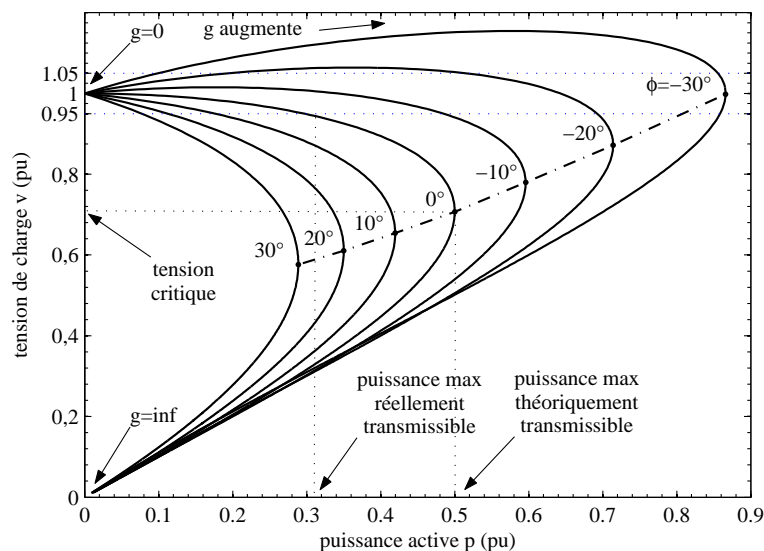
$$V = \frac{E}{\sqrt{(XG)^2 + (1 + XG \tan(\varphi))^2}} \quad (2.25)$$

Pour représenter la tension V de manière plus explicite, il est plus judicieux de passer aux grandeurs normalisées. Ainsi, on suppose E comme tension de base, i.e., $E = 1$ pu, et X comme impédance de base, i.e., $X = 1$ pu, alors $XG = g$ et la tension de charge v en pu s'écrit

$$v = \frac{1}{\sqrt{g^2 + (1 + g \tan(\varphi))^2}} \quad (2.26)$$

avec g , l'admittance de charge en pu.

Comme attendu, il n'y a pas de chute de tension dans la ligne s'il n'y a pas charge, c'est-à-dire lorsque l'admittance $g = 0$. Par contre la tension de charge v tend vers zéro lorsque l'admittance de charge tend vers l'infini. La solution de cette équation permet d'obtenir la surface dans le plan pqv sur la Figure. 2.4 qui montre la relation entre la tension v et les puissances active et réactive au jeu de barres de la charge. Chaque point sur la surface en question représente un point de fonctionnement (p, q, v) . Chaque courbe en trait continu représente les points de fonctionnement pour un facteur de puissance donné lorsque l'admittance varie de 0 à l'infini. Ainsi, en variant le facteur de puissance, plusieurs courbes sont obtenues. Finalement, la ligne en trait discontinu qu'on peut appeler *équateur* représente les limites de transfert de puissance pour chaque facteur de puissance.

FIGURE 2.4 – Surface pqv FIGURE 2.5 – Courbes pv pour différents facteurs de puissance.

Courbes pv

La Figure. 2.5 représente des courbes pv (pv curves) obtenues de l'équation (2.26), pour quelques valeurs de l'angle d'admittance φ . Le point le plus à droite de chaque courbe représente le point de fonctionnement où la puissance transmise est maximale pour une charge d'admittance g et de facteur de puissance $\cos(\varphi)$. La tension correspondante à ce point représente la *tension critique*. Cette puissance maximale est dite *puissance maximale théoriquement transmissible* ou *Limite théorique de transfert de puissance*. Cette limite est de 0.5 pu pour un facteur de puissance unitaire, mais elle augmente pour des facteurs de puissance capacitifs, cependant pour des facteurs de puissances inductifs, cette limite est inférieure à 0.5 pu.

À partir du point de fonctionnement à puissance maximale, si l'admittance augmente, on remarque que la puissance diminue et la tension chute considérablement et le tout tend vers zéro. On verra plus tard dans ce chapitre que le système devient instable à partir de ce point. Ainsi, la courbe pv peut être divisée en une *partie stable* c'est-à-dire la partie supérieure, et une *partie instable*, la partie inférieure.

Pour une charge active la tension critique est égale à $1/\sqrt{2} \approx 0.71$ pu qui n'est pas acceptable de point

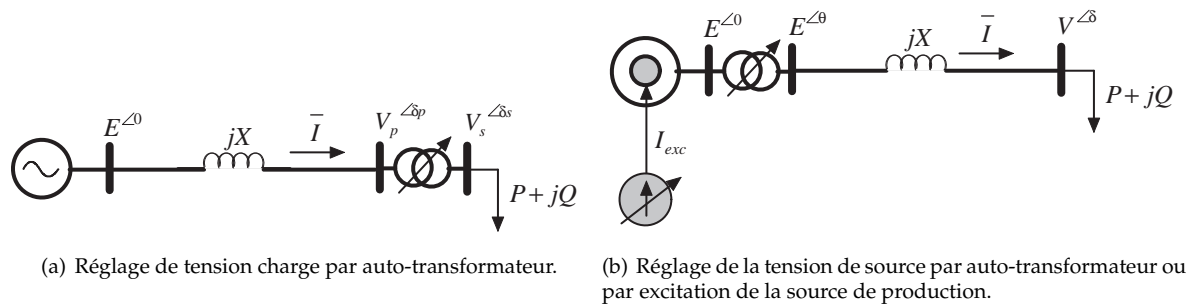


FIGURE 2.6 – Réglage direct de la tension.

de vue pratique. En effet la tension de charge doit être comprise autours de la valeur nominal, typiquement $\pm 5\%$ ¹ Par conséquent, la *limite de transfert réelle* ou *pratique* se situe à peu près à 0.31 pu, soit 31% de la puissance de court-circuit. Cette limite est plus basse encore pour des charges ayant un facteur de puissance inductif, mais elle est plus élevée pour des facteurs de puissance capacitifs. Ainsi, à première vue, on peut dire qu'il est possible de repousser la limite de transfert réelle de puissance en faisant en sorte que le facteur de puissance apparent (vu par le réseau) de la charge soit capacitif.

2.4 Réglage de la tension

Le réglage de la tension consiste à maintenir un niveau de tension acceptable aux niveaux de tous les jeux de barres du réseau.

L'équation (1.5) montre que le niveau de tension à un jeu de barres donné dépend de la tension de source qui l'alimente, de la réactance de ligne qui le sépare de cette source et des puissances active et réactive à son niveau. Ainsi, si la tension au jeu de barres en question n'est pas dans une limite acceptable, des modifications sur un ou plusieurs de ces paramètres sont alors nécessaires.

2.4.1 Méthodes et moyens de réglage de la tension

Les méthodes de réglage de la tension peuvent être divisées en deux catégories

Réglage direct, Qui consiste à agir directement sur la tension elle même (Figure. 2.6). Dans cette catégorie, le réglage de la tension de charge V est réalisé soit par la modification de la tension V elle même, soit par la modification de la tension de source E . Parmi les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie, il y a

1. La correction du niveau de la tension V , qui fait appel à un auto-transformateur (Tap-load changer) aux niveaux des postes de distribution ;
2. La correction du niveau de la tension E , soit par auto-transformateur s'il s'agit d'une tension à la sortie d'un poste source, soit par modification de l'excitation s'il s'agit de la tension à la sortie d'un alternateur.

Réglage indirecte : Dans cette catégorie on trouve un ensemble de solutions pour *modifier la chute de tension* en modifiant les caractéristiques des charges ou du réseau. Principalement, ces solutions consistent à utiliser des compensateur pour modifier l'écoulement de puissance réactive. Les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie sont

1. La compensation de puissance réactive ; d'après l'équation (2.5), la puissance réactive est en grande partie responsable des chutes de tension. Ainsi, la compensation d'une partie de la puissance réactive demandée par la charge permet de réduire ces chutes de tensions. Les compensateurs de puissance réactive peuvent être statique comme les batteries de condensateurs, les FACTS (Flexible Alternating Current Transmission systems), et parfois même des inductances. Le moteur synchrone peut être utilisé comme compensateur dynamique de puissance réactive.

1. Ce niveau peut être différent selon la sensibilité de la charge.

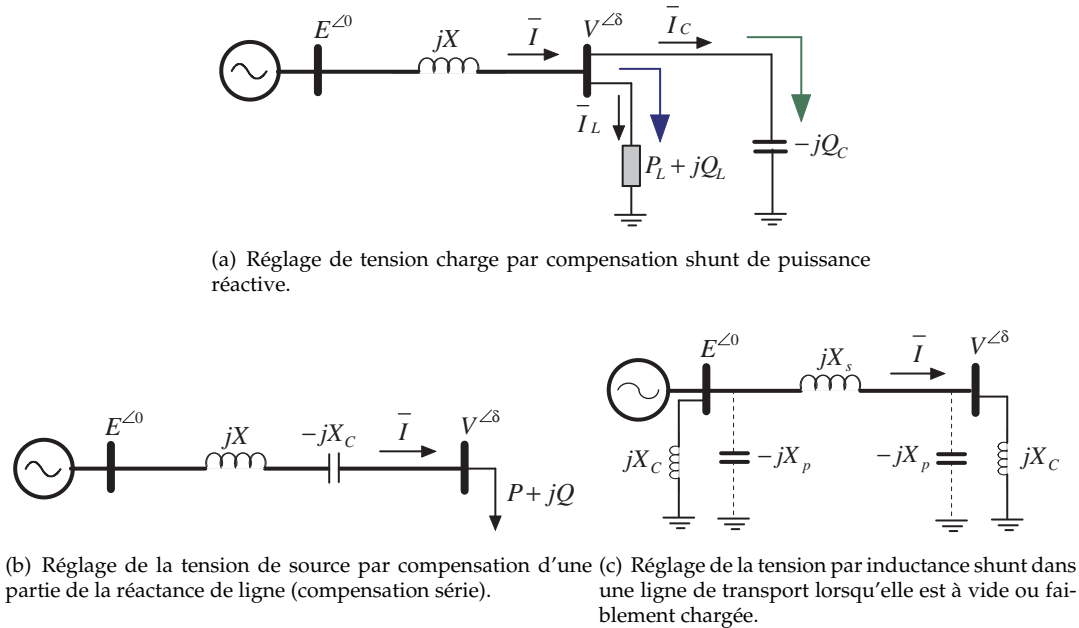


FIGURE 2.7 – Réglage indirecte de la tension par compensation en utilisant des condensateurs ou des inductances.

En effet, ce type de moteur produit de la puissance réactive quand il est sur-excité et en consomme lorsqu'il est sous-excité ;

2. Modification de la réactance de la ligne ; toujours d'après l'équation (2.5), on peut remarquer qu'il est possible de modifier les chutes de tension en modifiant la réactance de la ligne X .

2.5 Caractéristiques des compensateurs série et shunt

2.5.1 Condensateur

Le condensateur est le moyen le plus conventionnel pour la compensation de la puissance réactive. La puissance réactive fournie par le condensateur est directement proportionnelle au carré de la tension à ces bornes. Ainsi, s'il est connecté en parallèle (shunt) comme le montre la Figure. 2.7(a), la tension à ces bornes augmente et ça permet d'augmenter la puissance qu'il injecte au jeu de barre où il est connecté. Par ailleurs, lorsqu'il est mis en série (Figure. 2.7(b)), il permet aussi de compenser une partie de la puissance réactive absorbée par la réactance de la ligne, c'est pourquoi, on parle plutôt de la compensation de la réactance de ligne. En pratique, on utilise une batterie de condensateurs pour pouvoir varier la puissance réactive en cas de besoin. Les condensateurs sont un moyen simple mais, ils ne sont pas bien adaptés aux variations de charge.

2.5.2 Inductance

L'utilisation d'inductance pour le réglage de la tension trouve sa place dans les lignes de transport longues. Lorsque la ligne est ouverte ou faiblement chargée, la tension de ligne devient très élevée à cause des capacités naturelles de ligne qui génèrent trop de la puissance réactive. Ainsi, pour absorber cet excès de puissance réactive, on installe des inductances shunt au début et à la fin de la ligne (Figure. 2.7(c)).

2.5.3 Compensateurs FACTS

Les compensateurs FACTS sont des compensateurs modernes qui offrent la possibilité d'un réglage automatique de la tension. Parmi les compensateurs FACTS qui offrent cette possibilité, on trouve des compensateurs shunt comme le SVC, ou Static Var Compensator, le STATCOM, Static Compensator, et des

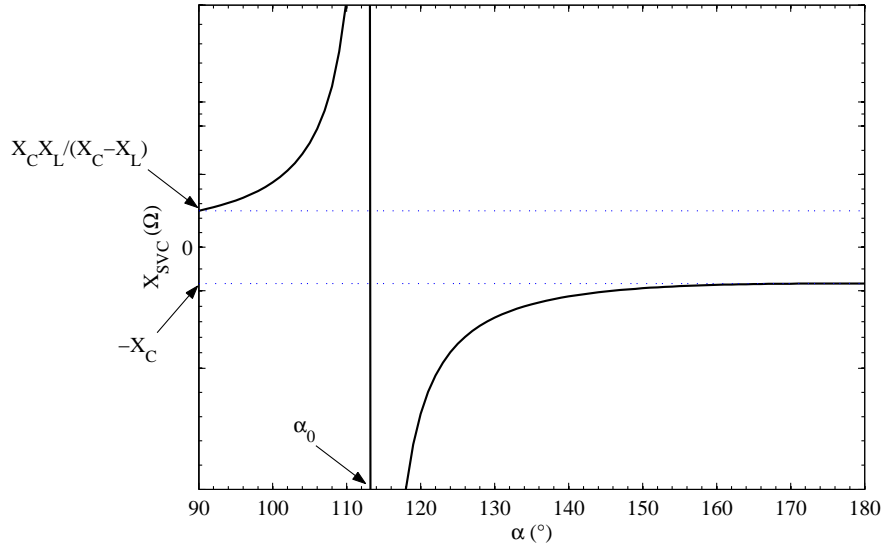
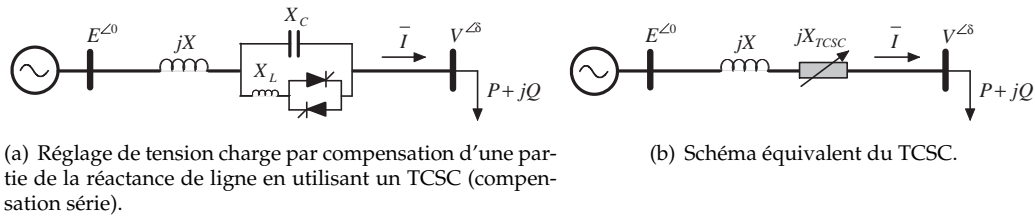
FIGURE 2.9 – Réactance du SVC en fonction de l'angle d'amorçage α .

FIGURE 2.10 – Réglage de la tension par un TCSC.

```

x0 = x_{k+1}
end

```

Où

$$f(x) = \sin(x) - x - \pi \left(\frac{X_L}{X_C} - 2 \right), \quad x = 2\alpha$$

Thyristor Controlled Series Compensator TCSC

C'est le même principe que le SVC mais cette fois, le dispositif est mis en série avec l'impédance du réseau. Ainsi, on obtient une réactance X_{TCSC} variable qui permet de compenser la réactance du réseau X (Figure. 2.10).

Le STATCOM

Le STATCOM est un compensateur actif, il s'agit d'un onduleur de tension (VSI) raccordé à un jeu de barres du réseau à travers une réactance inductive X_{STAT} (généralement un transformateur) comme le montre la Figure. 2.11. La commande de l'onduleur permet d'imposer une tension $\tilde{V}_{STAT} = V_{STAT}^{\angle\theta}$ à sa sortie. Ainsi, la puissance réactive échangée avec le réseau sera

$$Q_{STAT} = \frac{V^2}{X_{STAT}} - \frac{V V_{STAT}}{X_{STAT}} \cos(\delta - \theta) \quad (2.31)$$

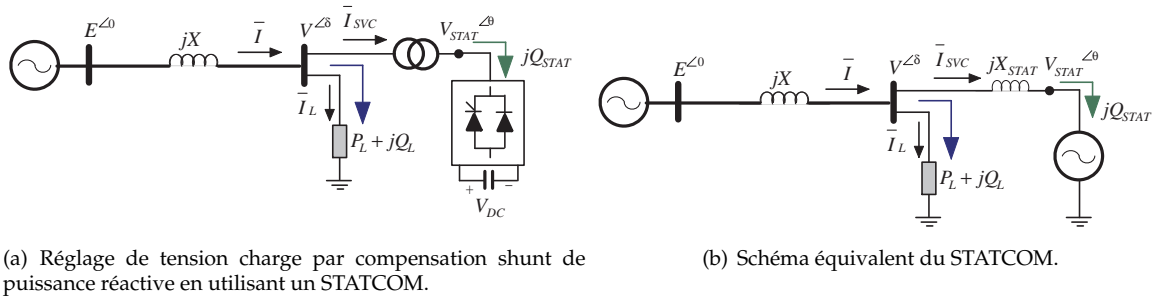


FIGURE 2.11 – Réglage de la tension par un STATCOM.

avec δ , l'angle de la tension au jeu de barre sur lequel est couplée le STATCOM. Pour un STATCOM idéal (sans pertes), $\delta = \theta$, alors

$$Q_{STAT} = \frac{V}{X_{STAT}}(V - V_{STAT}) \quad (2.32)$$

Donc, pour que le STATCOM puisse fournir une puissance réactive au réseau pour régler la tension, il faut que sa tension V_{STAT} soit supérieure à celle du jeu de barre V , sans oublier pour autant que cette dernière dépend aussi de Q_{STAT} .

2.6 Effets des différents moyens de réglage sur la tension et la puissance

Pour illustrer l'effet des différents moyens de réglage sur la tension et la puissance transmise, on prendra l'exemple typique d'une charge purement active pour laquelle on appliquera des réglages de tension shunt et série.

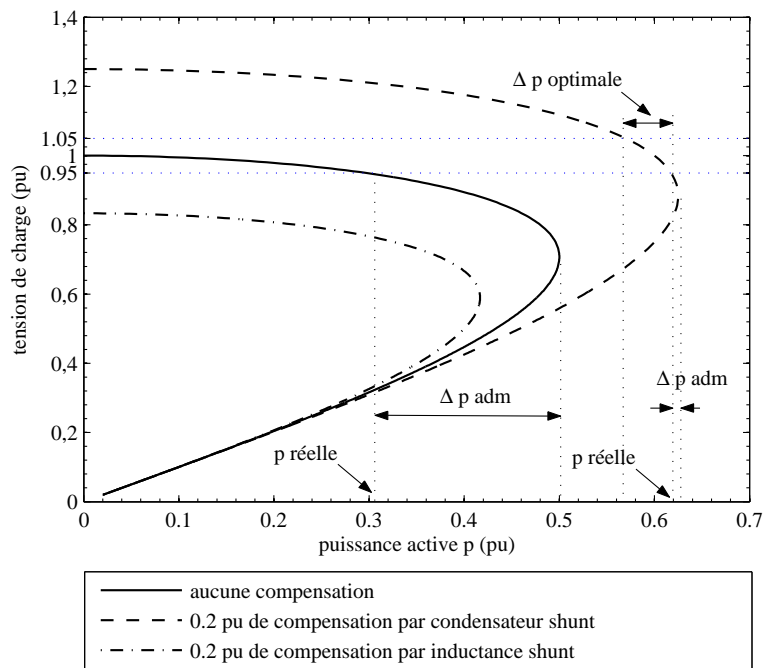
2.6.1 Réglage shunt

Le réglage shunt consiste à installer en parallèle au jeu de barres de la charge un compensateur de puissance réactive (condensateur ou dispositif FACTS). La Figure. 2.12(a) montre comment la courbe pv est modifiée lorsque on insère un condensateur² de puissance 0.2 pu. On remarque que

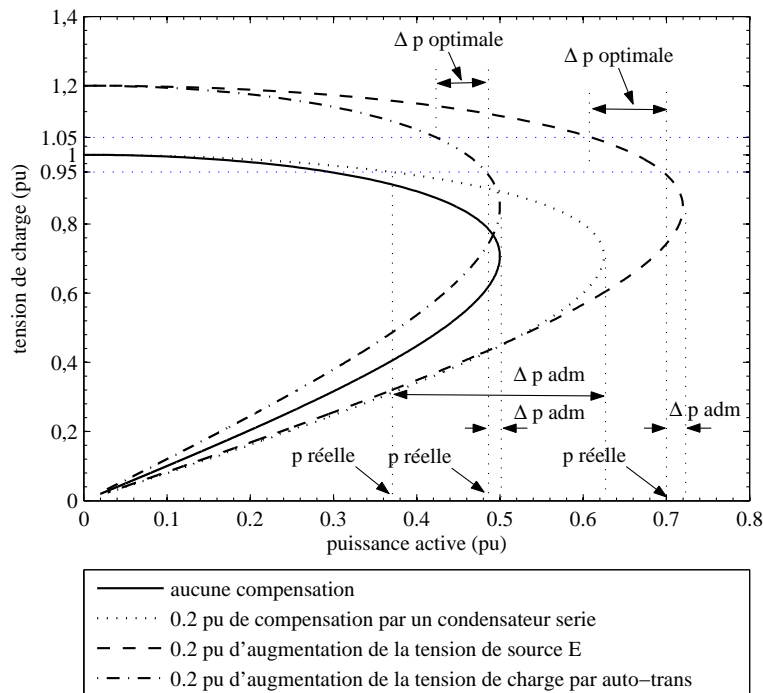
1. Les limites de transfert de puissance réelle et théorique sont repoussées au delà de 50% ;
2. Sous tension acceptable $\pm 5\%$, la marge de puissance est très réduite par rapport à la courbe non compensée ;
3. Les points de fonctionnement correspondant aux puissances maximales réelle (pratique) et théorique sont très proches ;

En résumé, on peut dire qu'avec un compensateur shunt de puissance réactive la puissance réelle transmise augmente. Cependant, ceci n'est pas un bon indicateur pour la stabilité du système comme on pourra le montrer dans les prochaines sections. En effet, le fait que les points de fonctionnement correspondant aux puissances maximales pratique et théorique sont proches fait que la tension critique s'approche de la tension limite pratique (0.95 pu), et qu'une faible augmentation de l'admittance g donc de la puissance demandée Δp_{adm} fait basculer la courbe dans sa partie instable. Comparativement à la courbe non compensée, on remarque que cette marge de puissance (Δp_{adm}) est fortement réduite. Par ailleurs, on remarque que pour un fonctionnement sous tension optimale, entre 0.95 et 1.05 pu, la marge de puissance optimale pour la courbe compensée est très réduite (entre 0.56 et 0.62 pu), alors qu'elle est de 0 à 0.31 pu pour la courbe non compensée.

2. Pour sa simplicité, on a choisit un condensateur mais un compensateur FACTS de même puissance aurait les mêmes effets sur la courbe pv



(a) Compensation shunt.



(b) Compensation série.

FIGURE 2.12 – Effets des différents moyens de réglage de la tension sur la courbe p_v .

2.6.2 Réglage série

Le réglage série consiste à régler soit la tension de charge par auto-transformateur, ou la tension de source par auto-transformateur ou par modification de l'excitation du générateur, soit par la compensation d'une partie de la réactance de la ligne. La Figure. 2.12(b) montre les effets suivants de chacun de ces moyens sur la courbe p_v

1. L'augmentation de la tension de source E fait augmenter les limites de transfert de puissances pra-

tique et théorique. La courbe a une allure semblable à celle compensée par un condensateur shunt mais les limites sont poussées d'avantage ;

2. L'augmentation de la tension de charge par un auto-transformateur repousse la limite de transfert pratique de puissance mais pas la limite théorique ;
3. La compensation d'une partie de la réactance de ligne repousse la limite de transfert théorique de puissance mais cette nouvelle limite reste inférieure à celle obtenue avec l'augmentation de la tension de source E . Par ailleurs, le déplacement de la limite de transfert pratique est aussi moins significatif ;
4. Les points de fonctionnement correspondant aux puissances maximales pratique et théorique sont proche lorsque on augmente la tension de source E . Ces points sont encore plus proche lorsqu'on augmente la tension de charge avec un auto-transformateur, mais ils sont suffisamment éloignés pour la courbe compensée avec un condensateur série.

En résumé, l'augmentation de la tension de source augmente les puissances transmises pratique et théorique. Même observation pour une compensation d'une partie de la réactance de ligne mais avec un degrés moins significatif. L'auto-transformateur permet d'augmenter la limite de transfert pratique à une valeur proche de 50%. De point de vue stabilité, on remarque que la marge Δp_{adm} pour la courbe compensée par l'augmentation de la tension de source est réduite, et elle est davantage réduite pour la courbe compensée par l'auto-transformateur. Ainsi, une faible augmentation de g basculera les courbes dans l'instabilité. Cependant, pour la courbe compensée avec un condensateur série, cette marge reste suffisamment large, donc accepte encore une augmentation de l'admittance g . Pour un fonctionnement sous tension optimale, la marge de puissance pour la courbe compensée en augmentant E est réduite (0.6-0.7 pu), et elle encore plus faible pour celle compensée avec auto-transformateur (0.42-0.48 pu), mais elle suffisamment large lorsqu'on compense une partie de la réactance de ligne (0-0.37) pu (Bien sur ces valeurs correspondent à une compensation de 0.2 pu!).

Conclusions importantes

1. Le réglage shunt permet d'augmenter la tension et la puissance transmise, mais le système devient très sensible lorsque on atteint la limite pratique, donc le système est moins robuste ;
2. Le réglage série par augmentation de la tension de source permet de régler la tension de charge et d'augmenter significativement la puissance transmise, mais le système devient très sensible lorsque on atteint la limite pratique. L'auto-transformateur permet de régler la tension et d'augmenter la puissance transmise, mais le système devient encore plus sensible à la limite de puissance transmise. Ainsi, pour les deux cas le système est moins robuste. La compensation d'une partie de la réactance de ligne augmente relativement la puissance transmise tout en maintenant une bonne robustesse du système.

2.7 Réglage de la tension par compensation de puissance réactive

Pour le réseau de la Figure. 2.3(a), supposant qu'un compensateur shunt de puissance réactive au jeu de barres de charge est installé pour régler la tension V (Figure. 2.13(a)). La charge maintenant absorbe une puissance active P_L et une puissance réactive Q_L et un courant \bar{I}_L sous tension \bar{V} . Le compensateur absorbe une puissance Q_C . Ainsi, la source voit une charge qui absorbe une puissance active $P = P_L$ et une puissance réactive $Q = Q_L + Q_C$.

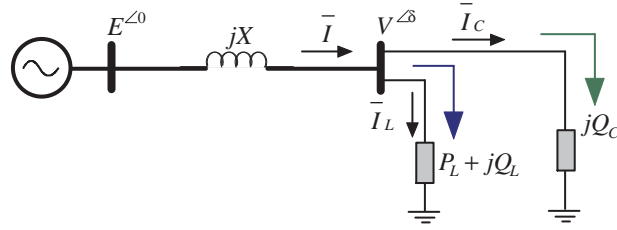
En reprenant les équations (2.12) et (2.13), on peut écrire que

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{EV}{X} \right)^2 \quad (2.33)$$

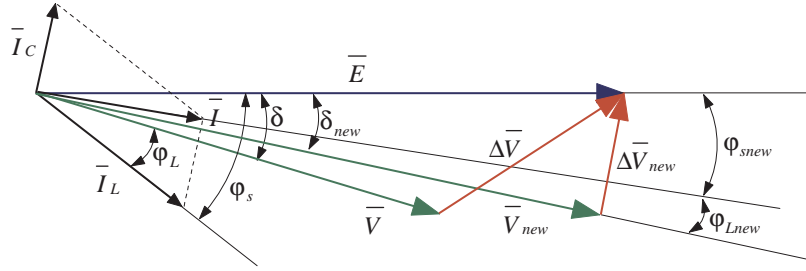
qui peut être reformulée comme

$$E^2 = \left(V + \frac{XQ}{V} \right)^2 + \left(\frac{XP}{V} \right)^2 \quad (2.34)$$

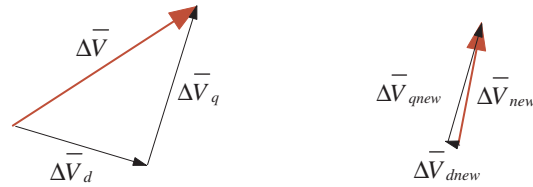
Cette équation montre qu'il est possible de choisir une puissance réactive Q , autrement dit une puissance Q_C afin régler la tension V à une valeur acceptable ou à la valeur de la tension de source E . Le diagramme vectoriel des tensions avant et après réglage de la tension est illustré sur la Figure. 2.13(b). D'après ce diagramme, on peut retenir les point suivants



(a) Insertion de compensateur de puissance réactive.



(b) Diagramme vectoriel des tensions et des courants avant et après réglage de la tension.



(c) Chutes de tension directe et en quadrature avant et après réglage de la tension.

FIGURE 2.13 – Réglage de la tension par compensation de puissance réactive au jeu de barres de charge.

1. La chute de tension est réduite après insertion du compensateur mais elle n'est pas nulle, et la tension de charge est maintenant égale à la tension de source.
2. Lorsque la tension de charge est égale à la tension de source, le facteur de puissance apparent de la charge devient AVANT, alors que celui de la source est toujours ARRIÈRE, mais amélioré ;
3. L'angle de charge δ est réduit après réglage de la tension ;
4. Sur la Figure. 2.13(c) on peut remarquer que ce type de réglage réduit fortement la chute de tension directe, mais réduit moins la chute de tension en quadrature ;
5. Pour régler la tension de charge V à celle de la source E , la chute de tension directe devient négative.

Remarque importante

Le réglage de la tension ne signifie en aucun cas l'annulation de la chute de tension, elle est juste modifiée en module et en phase.

2.7.1 Cas particulier, correction du facteur de puissance

Pour un facteur de puissance unitaire, il faut que $Q = 0$, c'est-à-dire $Q_C = -Q_L$. Dans ce cas l'équation (2.34) devient

$$E^2 = V^2 + \left(\frac{XP}{V} \right)^2 = V^2 + \Delta V_q^2 \quad (2.35)$$

Cette équation montre qu'un facteur de puissance unitaire implique que la chute de tension directe est nulle. Elle montre aussi que la tension V a augmenté mais impossible qu'elle soit égale à E .

Conclusion

1. La correction du facteur ne veut pas dire forcément réglage de la tension, mais elle améliore souvent le niveau de tension ;
2. Avec un compensateur de puissance réactive, il est impossible d'avoir un réglage parfait de la tension avec un facteur de puissance unitaire.

2.7.2 Calcul de la puissance de réglage

Reprenant le réseau de la Figure. 2.13(a). Le calcul de la puissance réactive qui permet le réglage de la tension V revient à résoudre l'équation (2.34) pour la variable Q . Admettant, qu'on veut régler la tension de charge à une valeur V_0 pratiquement acceptable, $\pm 5\%E$, alors les puissances P et Q représentent les puissances active et réactive au jeu de barres de la charge. Ainsi, la puissance P représente la puissance active absorbée par la charge sous tension V_0 . La puissance $Q = Q_C + Q_L$ représentent la somme des puissances réactives absorbées par la charge et le compensateur sous tension V_0 . En posant $V = V_0$, l'équation (2.34) se simplifie comme suit

$$Q^2 + \frac{2V_0^2}{X}Q + \frac{V_0^4 - E^2V_0^2}{X^2} + P^2 = 0 \quad (2.36)$$

Ainsi, le déterminant s'écrit comme

$$\Delta = 4\left(\frac{E^2V_0^2}{X^2} - P^2\right) > 0 \quad \text{si} \quad P < \frac{EV_0}{X} \quad (2.37)$$

On remarque que le déterminant est toujours positif tant que la puissance P reste inférieure à EV_0/X , qui est à peu près la puissance de court-circuit du réseau. Par ailleurs, puisque la puissance Q est une grandeur réelle, il n'y a pas de solutions si la puissance P est supérieure à cette limite. Les deux solutions de l'équation (2.36) vont s'écrire alors

$$Q_1 = -\frac{V_0^2}{X} + \sqrt{\frac{E^2V_0^2}{X^2} - P^2} \quad (2.38)$$

$$Q_2 = -\frac{V_0^2}{X} - \sqrt{\frac{E^2V_0^2}{X^2} - P^2} \quad (2.39)$$

Finalement, la puissance du compensateur sera égale à

$$Q_C = Q_1 - Q_L, \quad \text{ou} \quad Q_C = Q_2 - Q_L \quad (2.40)$$

Mais laquelle des deux valeurs est correcte de point de vue pratique ? Car mathématiquement les deux solutions permettent le réglage de la tension V à V_0 .

Afin d'illustrer la différence entre Q_1 et Q_2 sur le comportement du système, on va passer aux valeurs normalisées pour des raisons de simplification. On va supposer aussi que la charge est purement active, c'est-à-dire, $Q_L = 0$. Donc, en posant $E = 1$ pu, $X = 1$ pu, les deux solutions précédentes deviennent

$$q_1 = -v_0^2 + \sqrt{v_0^2 - p^2} \quad (2.41)$$

$$q_2 = -v_0^2 - \sqrt{v_0^2 - p^2} \quad (2.42)$$

Si on suppose un réglage de la tension de charge à celle de la source, la tension v_0 est égale à 1 pu, et les deux solutions sont réécrites

$$q_1 = -1 + \sqrt{1 - p^2} \quad (2.43)$$

$$q_2 = -1 - \sqrt{1 - p^2} = -2 - q_1 \quad (2.44)$$

Admettons une puissance de compensation q_c égale à q_1 ou q_2 , alors l'impédance équivalente entre la charge et le compensateur sera donnée par

$$\bar{z}_{eqL} = \frac{1}{p - jq_c} \quad (2.45)$$

L'impédance équivalente vue par la source est

$$\bar{z}_{eqs} = \bar{z}_{eqL} + j1 = \frac{1 + q_c + jp}{p - jq_c} \quad (2.46)$$

Ainsi, le courant absorbé par l'ensemble charge et compensateur sera donné par

$$\bar{i} = \frac{1}{\bar{z}_{eqs}} = \frac{p - jq_c}{1 + q_c + jp} \quad (2.47)$$

Le module et la phase de ce courant s'écrivent

$$i = \sqrt{\frac{p^2 + q_c^2}{(1 + q_c)^2 + p^2}}, \quad \varphi_i = \arctan\left(-\frac{q_c}{p}\right) - \arctan\left(\frac{p}{1 + q_c}\right) \quad (2.48)$$

La tension de charge v sera donnée par

$$v = \bar{z}_{eqL} \bar{i} = \frac{1}{1 + q_c + jp} \quad (2.49)$$

En module et phase

$$v = \frac{1}{\sqrt{(1 + q_c)^2 + p^2}}, \quad \delta_v = -\arctan\left(\frac{p}{1 + q_c}\right) \quad (2.50)$$

Or, on peut facilement vérifier que la phase du courant est égale simplement

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{q_c}{p}\right) \quad (2.51)$$

Ainsi, sachant que $\arctan(-x) = -\arctan(x)$, on peut facilement déduire que

$$\delta_v = 2 \times \arctan\left(\frac{q_c}{p}\right) = 2\varphi_i \quad (2.52)$$

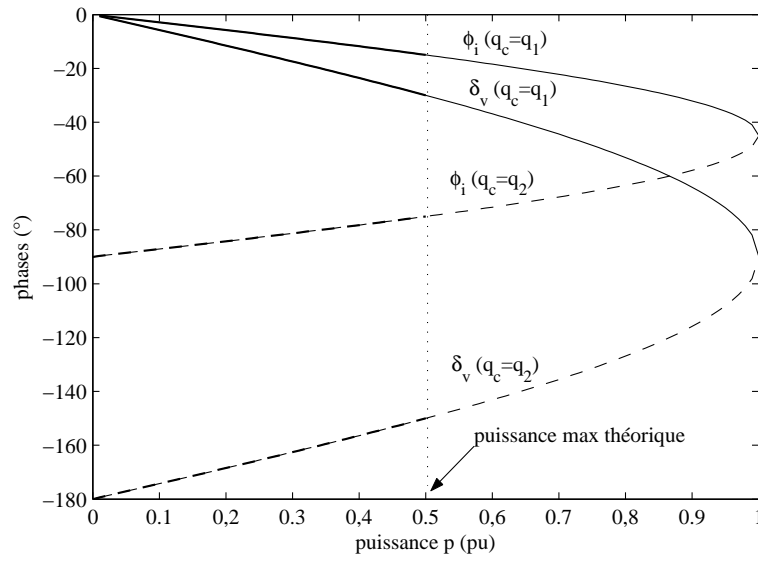
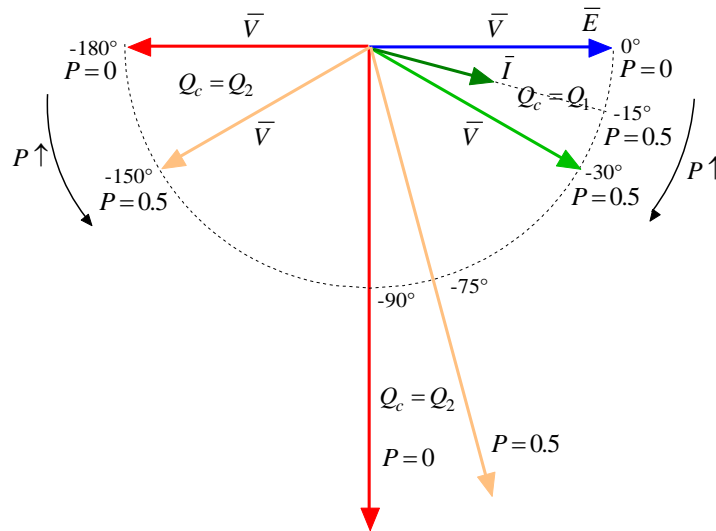
Les figures suivantes illustrent le comportement du système en fonction de la solution q_c et de la puissance active p demandée. On remarque sur la Figure. 2.14 que les phases des tensions et des courants varient de manières très différentes entre les deux solutions q_1 et q_2 . A vide ($p = 0$), la phase de la tension de charge v égale à celle de la tension de source E pour $q_c = q_1$ et elle est égale -180° pour $q_c = q_2$. Pour le courant, la phase est égale à 0° pour q_1 et -90° pour q_2 . Au fur et à mesure que la charge augmente, on remarque que les phases des tension et courant augmentent pour atteindre -30° et -15° à une puissance $p = 0.5$ pu pour $q_c = q_1$, et elles diminuent à -150° et -75° pour $q_c = q_2$, comme le montre le diagramme vectoriel de la Figure. 2.15. Les phases des tensions et des courants se coïncident théoriquement à -90° et -45° lorsque la puissance p est égale 1 pu.

Le courant absorbé est représenté sur la Figure. 2.16. Ce courant est égal à 0 lorsque $p = 0$ et augmente progressivement pour atteindre 0.517 pu à une puissance de 0.5 pu pour $q_c = q_1$. Cependant, ce courant est égal 2 fois le courant de court-circuit pour $q_c = q_2$ à vide est décroît avec l'augmentation de la puissance pour atteindre 0.931 pu à $p = 0.5$ pu comme le montre aussi le diagramme vectoriel. On remarque aussi que les deux courants convergent vers la valeur de $\sqrt{2}$ à $p = 1$ pu.

Les puissances réactives sont représentées sur la Figure. 2.17. On peut remarquer que la puissance réactive absorbée par la réactance X de la ligne est partagée équitablement entre la source et le compensateur. Ainsi, plus q_c augmente plus la puissance réactive que doit générer la source augmente, et plus la ligne consomme du réactif. En effet, lorsque la puissance réactive du compensateur augmente, celui-ci absorbe plus de courant provoquant plus de consommation réactive dans la ligne, que le compensateur ne peut satisfaire sans l'apport de la source.

Au final, on peut expliquer le comportement du système en fonction des deux solutions q_1 et q_2 comme suit

L'équation (2.44) montre que la puissance réactive du compensateur q_2 est égale à 2 pu même si $p = 0$, ceci dit que le compensateur est connecté au jeu de barres de la charge sans qu'il n'y ait aucune charge, par

FIGURE 2.14 – Variation des phases de tension et de courant en fonction de la puissance absorbée p .FIGURE 2.15 – Diagramme vectoriel des tensions et courants en fonction des solutions q_1 , q_2 et de la puissance p .

conséquent le réseau alimente une charge purement capacitive, dont le courant et la tension en fonction de la puissance absorbée sont représentés sur la Figure. 2.18. Or d'ordinaire une telle charge provoque une surtension, et même un risque de résonance si son l'impédance s'approche de celle du réseau. Pour éviter cette surtension et fixer la tension $v = 1$, la réactance du compensateur doit être égale $1/2$ de celle du réseau, et par conséquent le courant absorbé devient 2 fois le courant de court-circuit du réseau, de même pour la puissance réactive du compensateur, ce qui n'est pas tolérable. La solution q_1 suppose qu'il n'y a pas de compensateur s'il n'y a pas de charge. Dans ce cas le courant absorbé est nul et par conséquent la tension $v = 1$. Donc, en conclusion, la solution q_2 doit être exclue. Par ailleurs, il faut éviter d'installer un compensateur à un jeu de barres non chargé.

La solution acceptable $Q = Q_1$ peut être simplifiée si on fait intervenir la puissance de court-circuit. En effet remplaçant X par E^2/S_{sc} dans (2.38) et faisant sortir S_{sc}^2 de la racine

$$Q = S_{sc} \left(-\frac{V_0^2}{E^2} + \sqrt{\frac{V_0^2}{E^2} - \frac{P^2}{S_{sc}^2}} \right) = S_{sc} \left(-v_0^2 + \sqrt{v_0^2 - p^2} \right) \quad (2.53)$$

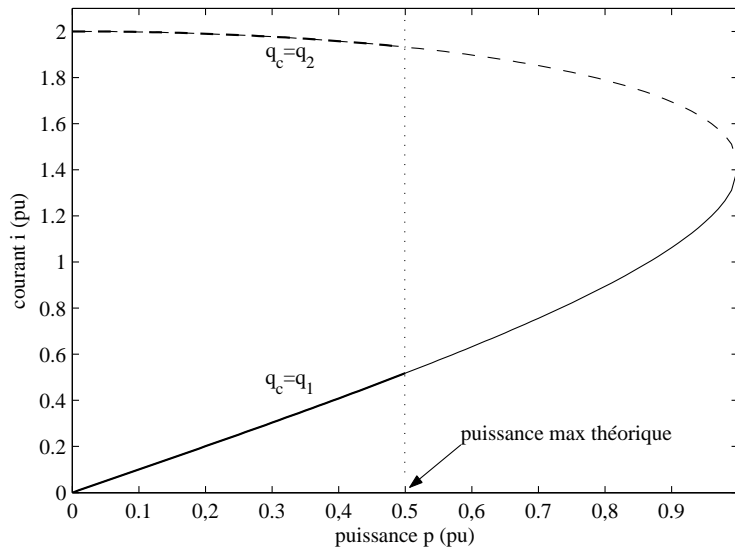


FIGURE 2.16 – Courant absorbé par l'ensemble charge-compensateur en fonction de la puissance p .

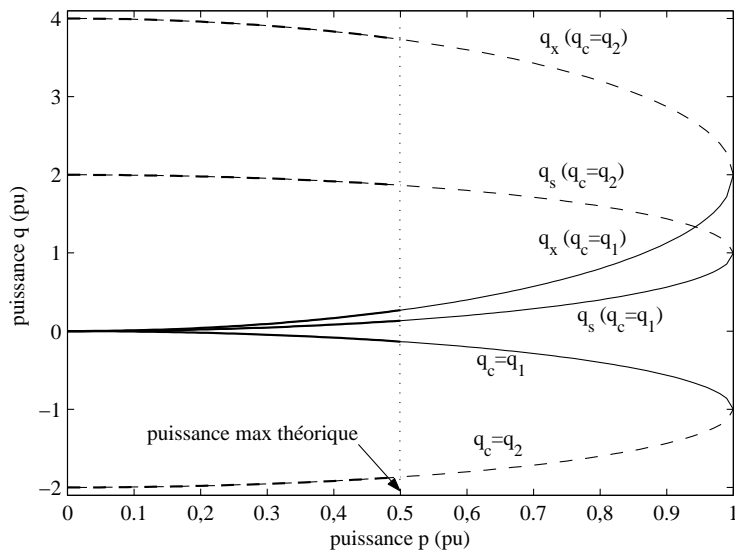


FIGURE 2.17 – Puissances réactives générées par le compensateur q_c , par la source q_s et absorbée par la réactance X , q_x en fonction de la puissance active p .

puisque $V_0/E = v$, $P/S_{sc} = p$. La puissance Q_C est maintenant déduite en prenant en compte le fait que $Q_L = qS_{sc}$ et $q = p \tan(\varphi)$

$$Q_C = S_{sc} \left(-v_0^2 + \sqrt{v_0^2 - p^2} - p \tan(\varphi) \right) \quad (2.54)$$

Finalement, en pu cette puissance sera simplement

$$q_C = -v_0^2 + \sqrt{v_0^2 - p^2} - p \tan(\varphi) \quad (2.55)$$

2.8 Réglage de la tension par compensation de la réactance de ligne

Le réglage de la tension à un jeu de barres charge peut être effectuée par compensation d'une partie de la réactance de ligne. Reprenons l'exemple précédent et supposons que la charge a besoin d'une puissance

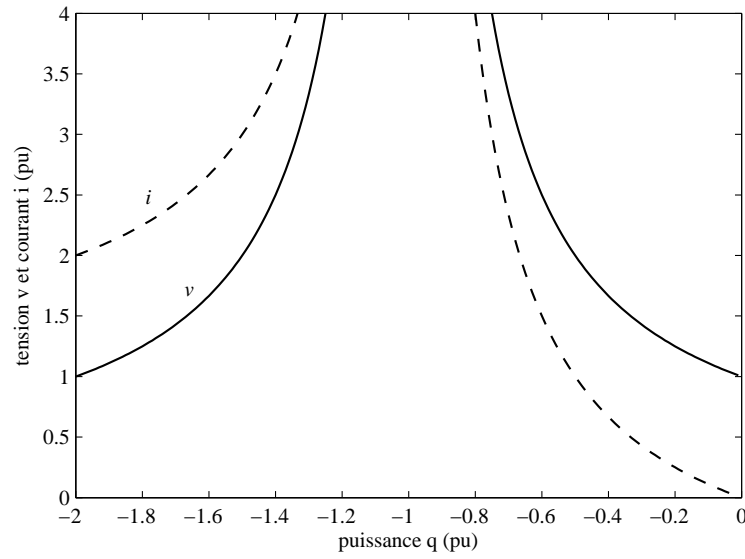
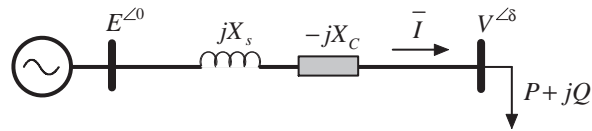
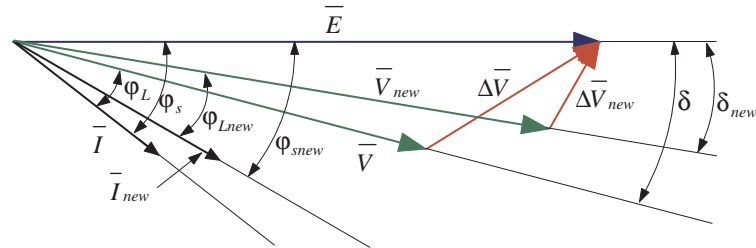


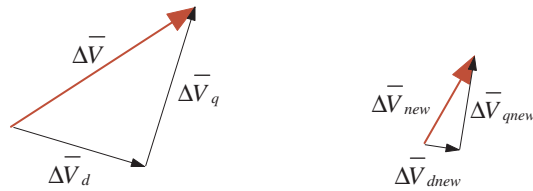
FIGURE 2.18 – Tension v et courant i en fonction de q_c pour une puissance $p = 0$, résonance à $q_c = -1$, c'est à dire à $X_c = X$.



(a) Compensation d'une partie de la réactance de ligne.



(b) Diagramme vectoriel des tensions et des courants avant et après réglage de la tension.



(c) Chutes de tension directe et en condature avant et après réglage de la tension.

FIGURE 2.19 – Réglage de la tension par compensation de la réactance de ligne.

active P et d'une puissance réactive Q , alors la réactance de ligne qu'il faut pour fournir la charge sous tension V sera donnée en solvant l'équation (2.34), mais cette fois pour X . Ainsi, cette équation peut être réécrite comme

$$X^2 + 2V^2 \frac{Q}{S^2} X + \frac{V^4 - E^2 V^2}{S^2} = 0 \quad \text{avec} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.56)$$

Il faut remarquer qu'en insérant un compensateur série la réactance de ligne devient $X = X_s - X_C$

$$\Delta = 4 \frac{V^2}{S^2} \left(\frac{Q^2}{S^2} V^2 + E^2 - V^2 \right) \quad (2.57)$$

Donc l'équation (2.56) admet des solutions positives si

$$S \neq 0 \quad \text{et} \quad \frac{Q^2}{S^2} V^2 > V^2 - E^2$$

Si ces deux conditions sont satisfaites, alors les deux solutions de (2.56) pour une tension souhaitée V_0 seront

$$X_1 = \frac{V_0}{S} \left(-\frac{V_0 Q}{S} + \sqrt{\frac{Q^2}{S^2} V_0^2 + E^2 - V_0^2} \right) \quad (2.58)$$

$$X_2 = \frac{V_0}{S} \left(-\frac{V_0 Q}{S} - \sqrt{\frac{Q^2}{S^2} V_0^2 + E^2 - V_0^2} \right) \quad (2.59)$$

$$X_1 = \frac{V_0^2}{S^2} Q \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{E^2 - V_0^2}{V_0^2} \frac{S^2}{Q^2}} \right) \quad (2.60)$$

$$X_2 = \frac{V_0^2}{S^2} Q \left(-1 - \sqrt{1 + \frac{E^2 - V_0^2}{V_0^2} \frac{S^2}{Q^2}} \right) \quad (2.61)$$

Passant aux valeurs normalisées, avec rappelons le

$$V_0 = v_0 E, \quad S = s S_{sc}$$

et sachant

$$E^2 / S_{sc} = X_s, \quad Q / S = \sin(\varphi)$$

Les deux solutions sont simplifiées après un développement élémentaire comme

$$X_1 = X_s \left(-\frac{v_0^2}{s} \sin(\varphi) + \frac{v_0}{s} \sqrt{1 - v_0^2 \cos(\varphi)^2} \right) \quad (2.62)$$

$$X_2 = X_s \left(-\frac{v_0^2}{s} \sin(\varphi) - \frac{v_0}{s} \sqrt{1 - v_0^2 \cos(\varphi)^2} \right) \quad (2.63)$$

En remplaçant s par $p / \cos(\varphi)$ et sachant $\cos(\varphi) \sin(\varphi) = \sin(2\varphi) / 2$, les de réactances s'écriront

$$X_1 = X_s \left[\frac{v_0^2}{p} \left(-\frac{\sin(2\varphi)}{2} + \cos(\varphi) \sqrt{\frac{1}{v_0^2} - \cos(\varphi)^2} \right) \right] \quad (2.64)$$

$$X_2 = X_s \left[\frac{v_0^2}{p} \left(-\frac{\sin(2\varphi)}{2} - \cos(\varphi) \sqrt{\frac{1}{v_0^2} - \cos(\varphi)^2} \right) \right] \quad (2.65)$$

En regardant ces solutions, on peut facilement exclure x_2 , car elle est négative, ce qui n'est pas normale puisqu'une réactance doit être positive. Donc, la réactance de la ligne doit être égale à X_1 . La réactance du compensateur série est alors

$$X_C = X_s - X_1 = X_s \left[1 - \frac{v_0^2}{p} \left(-\frac{\sin(2\varphi)}{2} + \cos(\varphi) \sqrt{\frac{1}{v_0^2} - \cos(\varphi)^2} \right) \right] \quad (2.66)$$

Finalement, en pu avec X_s comme base (1 pu) ;

$$x_C = 1 - \frac{v_0^2}{p} \left(-\frac{\sin(2\varphi)}{2} + \cos(\varphi) \sqrt{\frac{1}{v_0^2} - \cos(\varphi)^2} \right) \quad (2.67)$$

Pour le cas particulier d'un facteur de puissance unitaire

$$X_C = X_s \left(1 - \frac{v_0}{p} \sqrt{1 - v_0^2}\right), \quad x_C = 1 - \frac{v_0}{p} \sqrt{1 - v_0^2} \quad (2.68)$$

D'après cette équation, pour que la tension v soit égale à 1 pu, il faut que la réactance du compensateur soit égale à 1 pu, c'est-à-dire égale à x_s . En effet, en insérant une réactance capacitive en série avec x , l'admittance apparente de la charge augmente et la tension de charge v devient

$$v = \frac{1}{\sqrt{(g(1 - x_c))^2 + (1 + g(1 - x_c) \tan(\varphi))^2}} \quad (2.69)$$

D'après cette équation, on peut remarque que pour $x_c = 0$, la tension $v = 1$ uniquement lorsque $g = 0$, c'est-à-dire à vide. Remarque aussi, que la tension $v = 1$ quelque soit la charge si $x_c = 1$, mais ce cas n'est pas envisageable car il provoque une résonance de puissance comme on va le voir juste après. En outre, quelque soit l'admittance $g > 0$, la tension v est toujours inférieure à 1 pu tant que $\tan(\varphi)$ est positif.

La Figure. 2.20 illustre la réactance x_c qu'il faut pour régler la tension $v = 0.95$ pu pour différentes charges. On remarque que pour une charge purement active, cette réactance est nécessaire à partir de d'une puissance $p = 0.3$ pu. Pour des puissances inférieures, la tension v est supérieure à 0.95 pu, c'est pourquoi il n'est pas nécessaire d'insérer une compensation série. Plus la charge est réactive plus la tension chute pour des puissances inférieures plus on a besoins d'insérer une compensation série. Ainsi, pour une charge avec un $\tan(\varphi) = 0.3$ par exemple, la tension est sous 0.95 pu à partir d'une puissance $p = 0.12$ pu, d'où la nécessité de commencer à compenser à partir de ce point.

Les Figures. 2.21 et 2.22 montrent les courbes pv pour différentes réactance x_c pour une charge purement active et une charge inductive avec $\tan(\varphi) = 0.3$. Pour une charge active, on remarque que pour une tension v qui doit être supérieure ou égale à 0.95 pu, plus x_c augmente, plus la puissance p correspondante à cette tension augmente. On observe qu'il y a un phénomène de résonance lorsque pour des valeurs de x_c proche de 1. Les mêmes observations pour le cas d'une charge inductive. Cependant, dans ce cas, la charge absorbe moins de puissance pour la même tension et même réactance x_c , par ailleurs, il y a toujours une résonance pour x_c proche de 1 pu. Pour le cas ou $x_c = 1$ pu. Les deux courbes montre que la puissance tends vers l'infinie sous tension $v = 1$.

Conclusions

1. Avec un compensateur série seul, il est impossible que $v = 1$ pu, i.e., impossible de régler la tension de charge égale à la tension de source ;
2. Plus la réactance du compensateur x_c augmente, plus la puissance transmissible sous tension acceptable (0.95 pu) augmente. Mais cette puissance a des limites, c'est pourquoi, il n'est pas possible d'augmenter indéfiniment l'admittance de charge g ;
3. Il est impossible de compenser toute la réactance de ligne à cause de la résonance. On pratique, on peut aller au maximum à 80%.

2.9 Stabilité de la tension

La stabilité de la tension signifie la capacité du réseau à rétablir et maintenir un point d'opération stable après avoir fait l'objet d'une perturbation. Les tension post-perturbation en régime permanent aux différents jeux de barres sont à des niveaux acceptables.

L'instabilité de la tension signifie l'incapacité du réseau à maintenir un niveau de tension acceptable suite à une perturbation. Si cette instabilité persiste, elle finit par engendrer *effondrement*, *collapse* au jeu de barre instable, et cet effondrement peut être contagion en cas de non intervention de la protection.

Effondrement de la tension

L'effondrement de la tension (voltage collapse) est la phase transitoire durant laquelle le réseau progresse autour d'un point d'opération inacceptable, et qui finit souvent soit par un black-out total, soit par une séparation obligatoire de certaines zones du réseau.

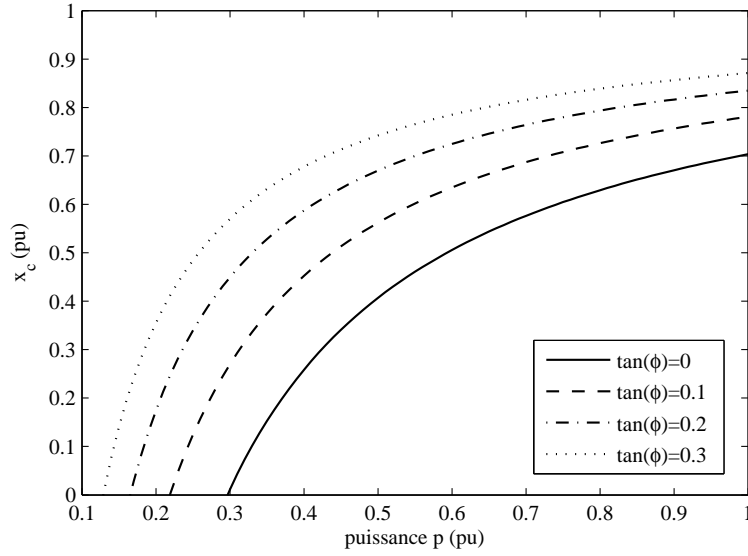


FIGURE 2.20 – Réactance capacitive x_c nécessaire pour régler la tension $v = 1$ pour différentes valeurs de $\tan(\varphi)$.

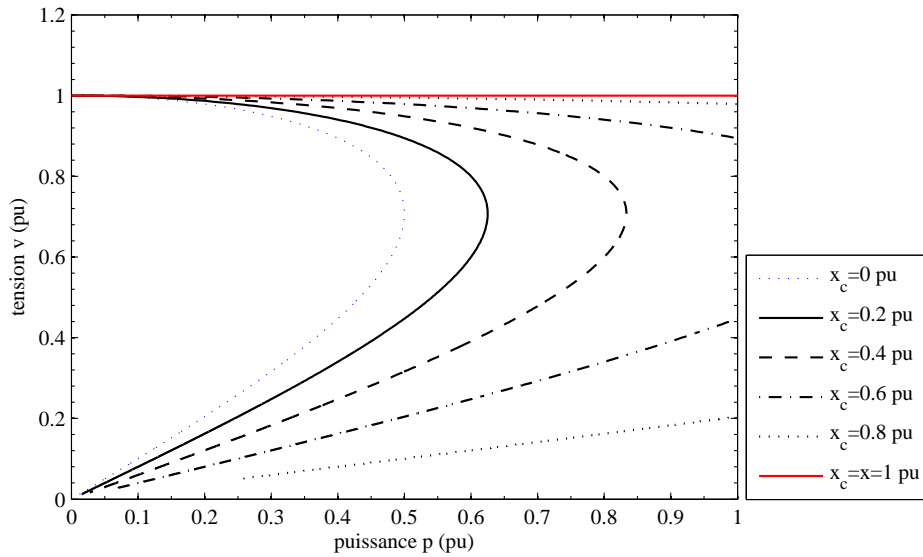


FIGURE 2.21 – Courbes pv pour différentes valeurs de la réactance x_c , pour une charge active ($\tan(\varphi) = 0$).

2.9.1 Classification des instabilité de la tension

Il y a deux types d'instabilité

Instabilité à long terme

Cette instabilité peut être de quelques dizaines de secondes à des heures. Elle se développe à partir d'un point du réseau suite à manque graduel de la puissance réactive demandée. Donc on peut dire que cette instabilité est à première vue la cause d'un déséquilibre entre la puissance réactive demandée et celle fournie. Cependant, la puissance active n'est pas en reste, car elle est aussi indirectement responsable. En effet, la majorité des charges connectées au réseau ont un facteur de puissance inductif, et par conséquent, une augmentation de puissance active engendre automatiquement une augmentation de la demande en puissance réactive, ainsi que les pertes dans les lignes. Comme les lignes ont des capacités de transport limitées par la puissance de court-circuit et la puissance active, il arrive que ces lignes ne puissent pas satisfaire la charge

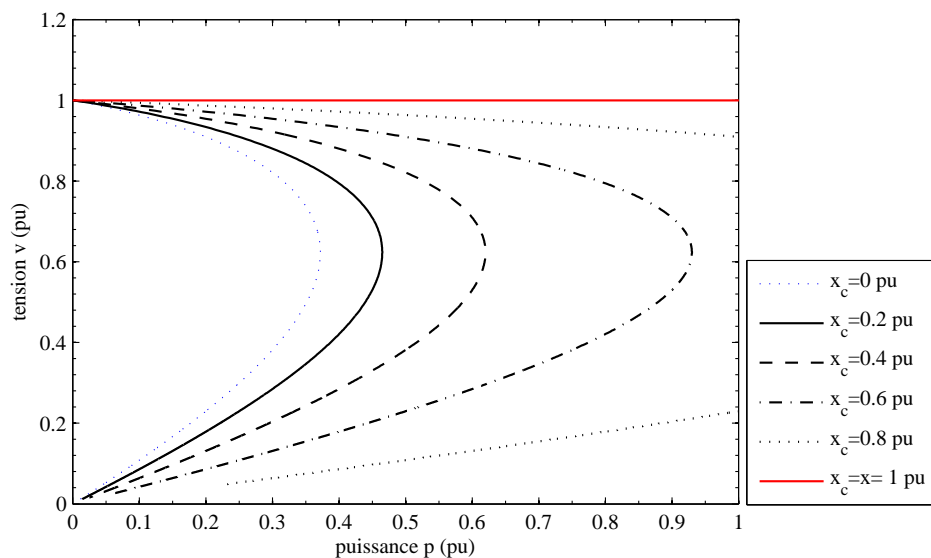


FIGURE 2.22 – Courbes pv pour différentes valeurs de la réactance x_c , pour une charge inductive ($\tan(\varphi) = 0.3$).

même s'il y a suffisamment de puissance réactive à la source. Dans certains cas le manque de puissance réactive est dû à un manque de production. Les dispositifs de production de puissance réactive comme les générateurs ou les systèmes FACTS peuvent fournir pendant quelques minutes plus que leurs puissances nominales pour maintenir l'équilibre. Cependant, si le manque persiste, la protection finit par intervenir pour éviter des dommages sur ces sources, ce qui accentue le déséquilibre et provoque inévitablement un effondrement de la tension.

Instabilité à court terme

Cette instabilité est très rapide, quelques secondes. Cette instabilité est généralement due à certaines charges ou équipements dont la puissance réactive suit une caractéristique spéciale, comme les moteurs à induction ou les systèmes de transmission HVDC.

Causes d'instabilité de la tension

Les principaux facteurs qui causent l'instabilité de la tension sont

- L'augmentation de la charge ;
- Redémarrage des charges après défaut ;
- Pertes réactive dans les lignes ;
- Perte de source de production de puissance réactive ;

2.10 Dynamique de charge et stabilité de la tension

Dans beaucoup de cas les charges sont contrôlées pour absorber leurs puissances nominales. Ainsi, en cas de chute de tension, la charge va essayer d'augmenter son admittance pour absorber plus de courant et ainsi, rétablir sa puissance. Nous allons voir dans cette section l'effet de la dynamique de la charge sur la stabilité de la tension, ainsi que l'apport des différents moyens de réglage précédemment exposés pour la stabilité de la tension.

2.10.1 Charge non compensée

Supposons une charge fonctionnant à un point donné sur la courbe pv et qui absorbe une puissance p_0 supposée différente de la puissance désirée p_1 . Si la charge en question est dotée d'un mécanisme de

contrôle qui doit rétablir la puissance p_1 et un temps T , ce mécanisme agira sur l'admittance de la charge selon le modèle suivant :

$$T \frac{dg}{dt} = p_1 - p \quad (2.70)$$

Supposons que la charge est purement active, alors

$$v = \frac{1}{\sqrt{g^2 + 1}}, \quad p = v^2 g \quad (2.71)$$

Remplaçant dans l'équation (2.70)

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{T} \left(p_1 - \frac{g}{g^2 + 1} \right) \quad (2.72)$$

La solution de cette équation de la forme

$$g = \left(\frac{1}{T} \int p_1 - \frac{g}{g^2 + 1} \right) + g_0 \quad (2.73)$$

Avec g_0 l'admittance de la charge au point de fonctionnement p_0 . Cette dernière équation admet deux solutions stationnaires données par

$$g^* = \frac{1}{2p_1} \pm \sqrt{\frac{1}{4p_1^2} - 1} \quad (2.74)$$

L'équation (2.74) montre donc qu'il y a deux points de fonctionnement, ou bien deux points d'équilibre possible lorsque la puissance désirée p_1 est inférieure à 0.5 pu. Ces deux points se coïncident à $g = 1$, c'est à dire pour $p_1 = 1$ pu. Pour $p_1 > 0.5$ pu, les deux solutions sont complexes, chose insensée puisque l'admittance est une grandeur réelle positive. Donc, on peut dire qu'il n'y a pas de points d'équilibre pour une puissance demandée supérieure à 0.5 pu.

Pour illustrer cette dynamique de rétablissement de puissance, supposons une charge purement active absorbant une puissance $p_0 = 0.3$ pu. A l'instant $t = 20$ sec, le contrôle de puissance agit de sorte à augmenter la puissance à $p_1 = 0.4$ pu en un temps de 0.2 sec. Les admittances initiales possibles sont données en pu par

$$g_0 = \frac{1}{2p_0} \pm \sqrt{\frac{1}{4p_0^2} - 1} = 0.3333 \quad \text{ou} \quad 3 \quad (2.75)$$

Nous allons considérer les deux conditions initiales pour g , et nous allons effectuer les simulations suivantes (voir schéma bloc sur la Figure. 2.23.)

1. Point de fonctionnement initial stable, et une demande de puissance inférieure à 0.5 pu ;
2. Point de fonctionnement initial instable, et une demande de puissance inférieure à 0.5 pu ;
3. Point de fonctionnement initial stable, et une demande de puissance supérieure à 0.5 pu ;
4. Point de fonctionnement initial instable, et une demande de puissance supérieure à 0.5 pu ;

Les résultats de simulations sont données sur les Figures. 2.24, 2.25 et 2.26. D'abord, pour le premier cas, $g_0 = 0.3333 < 1$ pu, le système est situé sur la partie supérieure de la courbe pv , soit sur le point d'équilibre stable ($p_0 = 0.3$, $v_0 = 0.948$ pu). Face à la demande de puissance, la charge réagit en augmentant son admittance de 0.3333 à 0.5 pu à l'instante $t = 20$ sec et reste constante après 0.2 sec. Ainsi, le système atteint un nouveau point d'équilibre stable ($p_1 = 0.4$, $v_1 = 0.9$ pu).

Pour le deuxième cas, l'admittance initiale, $g_0 = 3 > 1$ pu, le système est situé sur la partie supérieure de la courbe pv , soit sur le point d'équilibre instable ($p_0 = 0.3$, $v_0 = 0.316$ pu). Dans ce cas la charge réagit en augmentant indéfiniment son admittance, et la tension ainsi que la puissance de charge s'effondrent. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au point initiale, le courant absorbé est déjà très élevé pour une puissance de 0.3 pu, et par conséquent, la chute de tension est intolérable. En demandant plus de puissance, la charge réagit naturellement en augmentant son admittance g , ce qui augmentera le courant et accentuera d'avantage la chute de tension, et comme la puissance dépend du carré de la tension, elle chute à son tour au lieu d'augmenter et finit par s'effondrer.

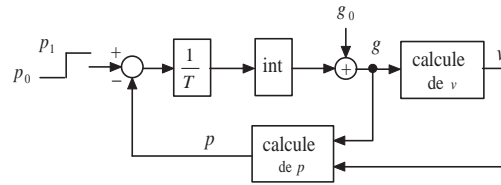


FIGURE 2.23 – Schéma de simulation de la dynamique de charge.

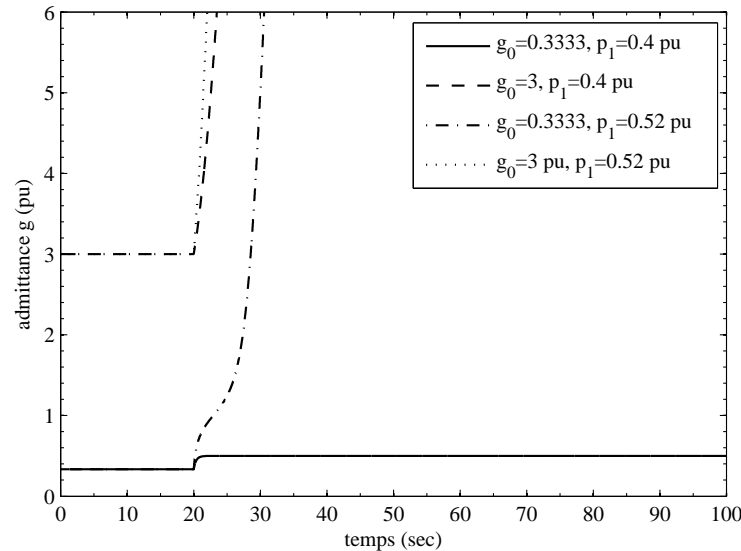


FIGURE 2.24 – Variation de l'admittance de charge en fonction de la demande de puissance et du point de fonctionnement initial.

Dans le troisième cas, le système fonctionne en un point d'équilibre stable, mais le contrôleur demande une puissance $p_1 = 0.52$ pu, supérieure à 0.5 pu, on remarque que la charge augmente son admittance à $g = 1$ pour atteindre le point un point de fonctionnement à la limite de stabilité, ($p = 0.5$, $v = 0.71$ pu), mais pour répondre à la demande de puissance, la charge augmente encore son admittance avec comme conséquence un basculement dans la partie instable de la courbe pv , la tension commence à chuter drastiquement, causant une chute de tension encore plus accentuée et le système finit par s'effondrer.

Finalement, pour le dernier cas, lorsque le système se trouve en un point de fonctionnement instable, l'augmentation de l'admittance de charge suite à une demande de puissance qui dépasse 0.5 pu, le système s'effondre comme le deuxième cas mais avec une cadence plus accentuée.

La Figure. 2.27 résume les différents cas traités ci-dessus. Si à l'instant de demander plus de puissance, le système se trouvait en un point a stable, c'est-à-dire sur la partie supérieure de la courbe pv , et que la puissance demandée reste inférieure à la puissance maximale théoriquement transmissible, alors le système se déplacera vers un autre point de fonctionnement a' toujours stable. Le système absorbe alors la puissance demandée mais sous tension légèrement inférieure. Cependant, si à l'instant de demander plus de puissance, le système se trouvait sur un point d'équilibre b instable, alors il se dirigera vers le point d'équilibre $(0,0)$, donc s'effondre, et ceci même si la puissance demandée est inférieure à 0.5 pu.

En conclusion, pour que le système soit stable, il faut que la puissance augmente quand l'admittance augmente.

2.10.2 Effets des différents moyens de réglage sur stabilité

Nous allons voir maintenant les effets des différents moyens de réglage de la tension sur la stabilité. Pour cela, on suppose une charge active qui fonctionne initialement en un point stable à $g_0 = 0.3333$ pu, et on considère une variation de charge sous forme $p_1 = 0.01t + p_0$. Les Figures. 2.28, 2.29 et 2.30 illustrent les réponses du système lorsqu'on introduit une compensation shunt à 20%, une élévation de 20% de la

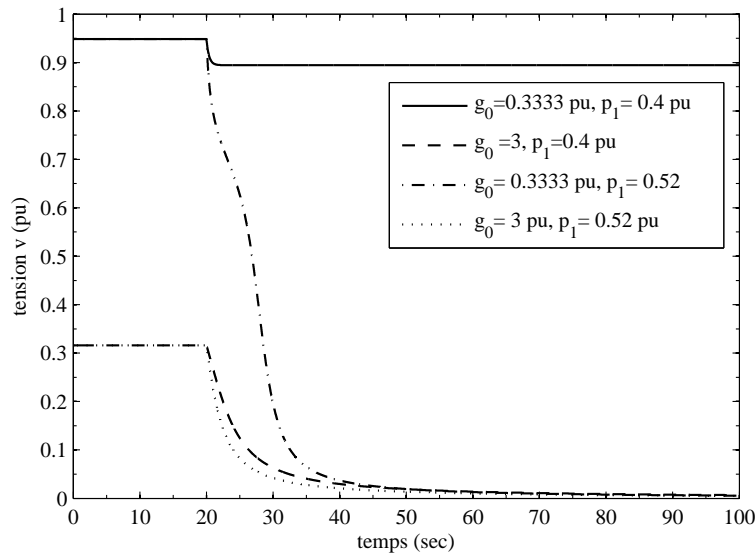


FIGURE 2.25 – Variation de la tension de charge en fonction de la demande de puissance et du point de fonctionnement initial.

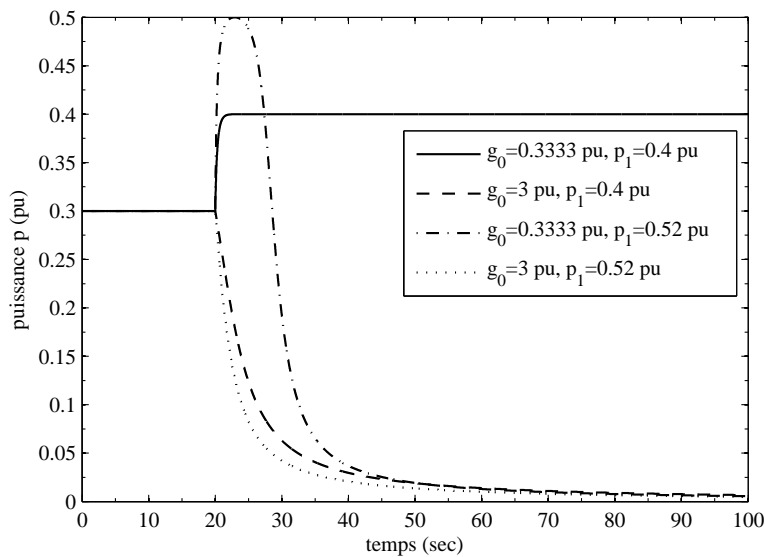


FIGURE 2.26 – Variation de la puissance de charge en fonction de la demande de puissance et du point de fonctionnement initial.

tension de source, une élévation de 20% de la tension de charge, et finalement, une compensation de 20% de la réactance de ligne (compensation série).

Les principales observations sont résumées dans le Tableau. 2.1. Avec l'augmentation de la tension de source, ainsi que l'augmentation de la tension de charge par auto-transformateur, l'admittance maximale de charge ne doit pas dépasser celle du réseau, soit 1 pu. Avec une compensation shunt, l'admittance maximale est encore plus faible et elle ne doit pas dépasser 0.76 pu. Avec un condensateur série, il est possible d'augmenter l'admittance de charge jusqu'à 1.25 pu, soit 25% de plus par rapport aux augmentations de E ou de V , et 65% de plus par rapport à la compensation shunt.

L'augmentation de l'admittance est plus rapide lorsqu'on augmente la tension de charge avec un auto-transformateur pour atteindre la puissance désirée, ce qui fait que la tension chute aussi rapidement. La puissance maximale possible est de 0.5 pu sous tension de 0.84 pu avec une admittance de 1 pu, signifie que ce type de réglage ne permet pas à la charge d'absorber des courants élevés.

Le condensateur série, fait que l'augmentation de l'admittance est moins rapide. La puissance maximale

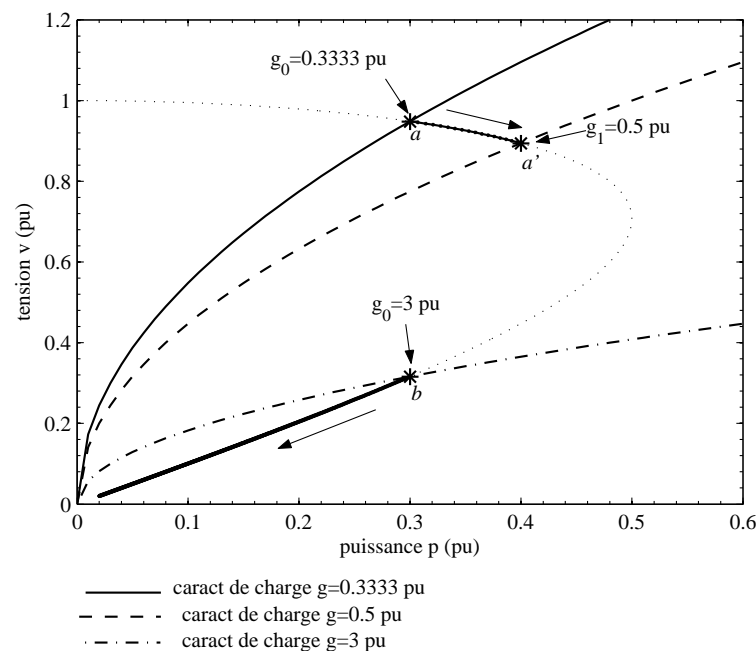


FIGURE 2.27 – Déplacement des points de fonctionnement sur la courbe pv en fonction de la demande de puissance et du point de fonctionnement initial.

TABLE 2.1 – Grandeurs critiques en pu pour différents moyens de réglage de la tension.

Moyen de réglage	Admittance critique	Tension critique	Puissance critique
Compensateur shunt	0.76	0.90	0.62
Augmentation de E	1.00	0.85	0.72
Augmentation de V	1.00	0.85	0.50
Compensateur série	1.25	0.71	0.62

étant de 0.62 pu sous tension de 0.71 pu, ce qui signifie que ce type de réglage supporte plus de chute de tension et par conséquent permet à la charge d'absorber des courants plus élevés.

Avec l'augmentation de la tension de source, la charge réduit son admittance au lieu de l'augmenter, et elle reste faible même lorsqu'on augmente relativement la demande de puissance. Ceci est dû au fait que lorsque la tension est relativement élevée pour des puissances relativement faibles, la charge n'a pas besoin de trop augmenter son admittance pour absorber plus de courant. Le même phénomène peut être observé lorsqu'on insère un compensateur shunt. Pour des puissances plus élevée, la charge commence à augmenter son admittance pour absorber plus de courant car la tension a commencé à chuter. Cette augmentation est plus rapide pour la compensation shunt, c'est pourquoi, la tension craque plus rapidement à 0.9 pu. Avec l'augmentation de E , l'admittance augmente moins rapidement est par conséquent la chute de tension aussi moins rapide, ce qui permet d'atteindre une puissance de 0.72 pu avant que la tension craque à son tour à 0.85 pu.

A la lumière des ces observations, on peut résumer les avantages et les inconvénients de ces différents réglages comme suit

Avantages d'une compensation shunt ;

1. Permet à la charge d'absorber des courants élevée ;
2. Permet à la charge d'absorber plus de puissance.

Inconvénients ;

1. Très sensible aux chutes de tension ;
2. Mauvaise robustesse.

Avantages d'une augmentation de la tension de source ;

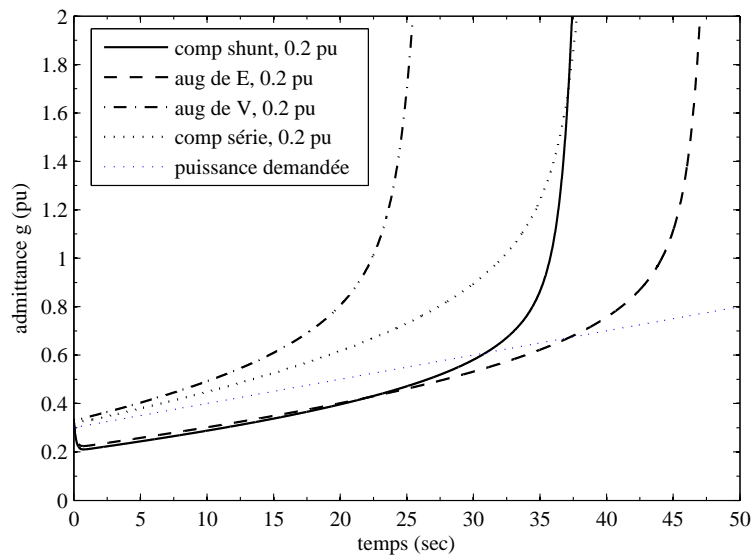


FIGURE 2.28 – Variation de l'admittance de charge en fonction de la puissance demandée.

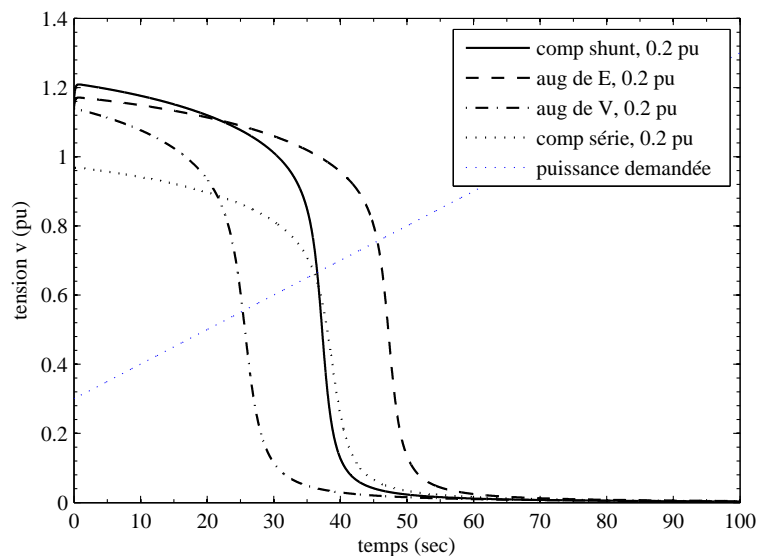


FIGURE 2.29 – Variation de la tension de charge en fonction de la puissance demandée.

1. Permet à la charge d'absorber des courants plus élevées ;
2. Permet à la charge d'absorber encore plus de puissance.

Inconvénients ;

1. Très sensible aux chutes de tension ;
2. Mauvaise robustesse.

Avantages d'une augmentation de la tension de charge par auto-transformateur ;

1. Permet à la charge d'augmenter relativement son courant ;
2. Permet à la charge d'absorber relativement plus de puissance.

Inconvénients ;

1. Trop sensible aux chutes de tension ;
2. Très mauvaise robustesse.

Avantages d'une compensation série ;

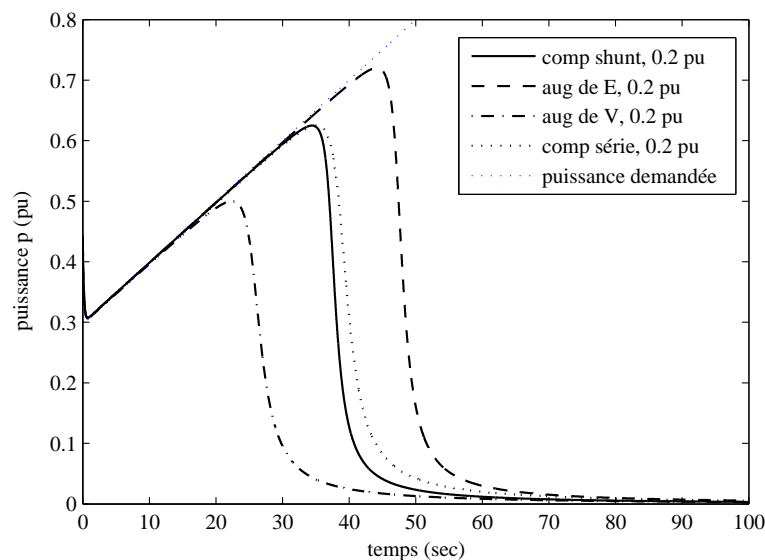


FIGURE 2.30 – Variation de la puissance de charge en fonction de la puissance demandée.

1. Permet à la charge d'absorber des courants encore plus élevés ;
2. Permet à la charge d'absorber plus de puissance ;
3. Moins sensible aux chute de tension ;
4. Bonne robustesse.

Inconvénients ;

1. Ne permet pas un bon réglage de tension pour des puissances élevées.

En résumé on peut dire pour la stabilité que

- Le compensateur shunt augmente le seuil de stabilité de la puissance mais réduit celui de la tension ;
- L'augmentation de la tension de source augmente également le seuil de stabilité de la puissance, mais réduit aussi celui de la tension ;
- L'augmentation de la tension de charge par un auto-transformateur n'augmente pas le seuil de stabilité de la puissance et réduit celui de la tension ;
- Le compensateur série augmente le seuil de stabilité de la puissance et augmente aussi le seuil de stabilité de la tension.

2.11 Plan globale de réglage de la tension

Dans les sections précédentes, on a vu les différents moyens mis en œuvre pour régler la tension. Néanmoins, en pratique, le contrôle et le réglage de la tension est souvent complexe nécessitant un concours et une coordinations de ces différents moyens selon un *plan global* bien établi et qui réparti sur trois étages comme le montre la Figure. 2.31.

2.11.1 Réglage primaire, Primary control

Le réglage primaire (RPT) est utilisé dans les réseaux afin de maintenir les tensions des générateurs égales à des valeurs prédéfinies par l'opérateur. Des régulateurs automatiques de tension (*Automatic voltage regulators AVR*) sont conçus pour agir immédiatement en cas de besoin sur l'excitation des alternateurs afin d'élever ou de baisser les tensions induites au stator. Le temps de réponse du réglage primaire est court, typiquement quelque fractions de secondes.

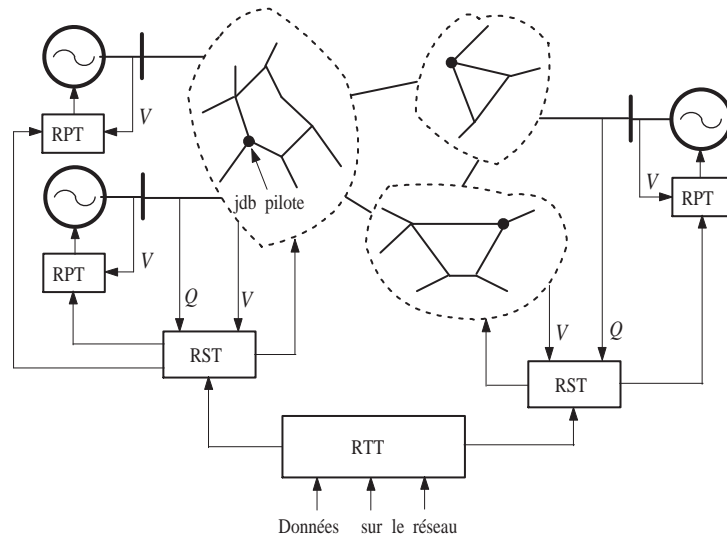


FIGURE 2.31 – Plan global de réglage de la tension.

2.11.2 Réglage secondaire, secondary control

Ce type de réglage (RST) est relativement plus lent (quelques secondes à 1 minute). Il sert à contrôler la tension au niveau régional afin d'isoler d'éventuelles perturbations du reste du réseau. Plusieurs zones de réglage peuvent ainsi être envisagées et elles sont censées être indépendantes. Dans chaque zone, les tensions aux *jeux de barres pilotes* doivent être maintenues à des niveaux acceptable. En générale, le RST agit aux niveau des ces jeux de barres (postes) en actionnant les auto-transformateurs, les compensateurs. ...

2.11.3 Réglage tertiaire, Tertiary control

Le réglage tertiaire (RTT) est plus lent, généralement de 10 à 30 min. La méthode traditionnelle pour ce type de réglage consiste à prévenir et puis optimiser l'écoulement de puissance réactive dans le réseau. Les variables principales de cette optimisation sont les niveaux de tensions aux bornes des générateurs ou aux jeux de barres pilotes régionaux et les ordres de coupure ou de mise en service les dispositifs de contrôle de puissance réactive (comme les compensateurs aux différentes régions et/ou les alternateurs eux mêmes grâce à l'action sur l'excitation, i.e., RPT). Néanmoins, lorsque ces moyens ne suffisent pas à combler une demande forte de puissance réactive, des mesures 'drastiques' peuvent être prise par RTT allant jusqu'à l'isolation de la partie ou de la région dont l'évolution de la tension est jugée dangereuse sur le reste du réseau.

2.12 Points à retenir

On a essayer dans ce chapitre de traiter le problème du réglage de la tension de manière exhaustive. Cependant les points importants à noter sont :

1. D'abord, il y a un lien très fort entre le niveau de la tension et la demande en puissance réactive ; Celle-ci n'est pas la seule mais la principale cause des variations de tension ;
2. Le réglage de la tension est réalisé par différents moyens shunt et série qui agissent principalement sur la puissance réactive. Chaque moyen de réglage a des avantages et des inconvénients ;
3. La stabilité de la tension est affectée par la puissance réactive, et les moyen de son réglage. Un mauvais réglage a des conséquences qui peuvent aller jusqu'à l'effondrement de la tension ;
4. En pratique, le réglage de la tension est une tâche complexe qui nécessite le concours des différents moyens selon un plan bien défini.