Chapitre 3
Réglage de tension

CHAPITRE 3 : Réglage de Tension

1. Puissance transmissible dans une ligne électrique

Suppositions:

1/ La résistance R est nulle (Elle est généralement très faible devant la réactance x)

2/ La puissance réactive Q_r de la charge est nulle.

On montre l'importance de réguler la tension aux bornes de la charge pour maximiser la puissance.

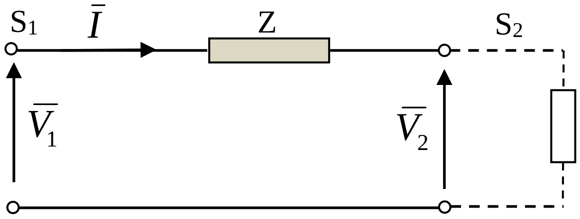


Figure 3.1 : Schéma monophasé équivalent

δ : L'angle de transport (de charge)

$\varphi = (\bar{I}, \bar{V}_2)$

Simplification :

$R \approx 0$ et le courant $\bar{I}$ en phase avec la tension $\bar{V}_2$

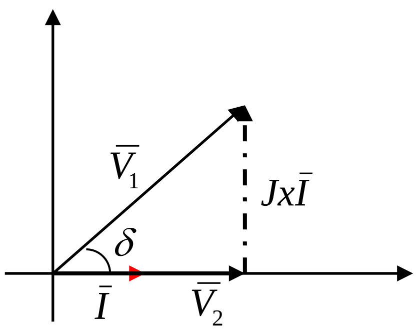


Figure 3.3 : Diagramme de tension simplifié

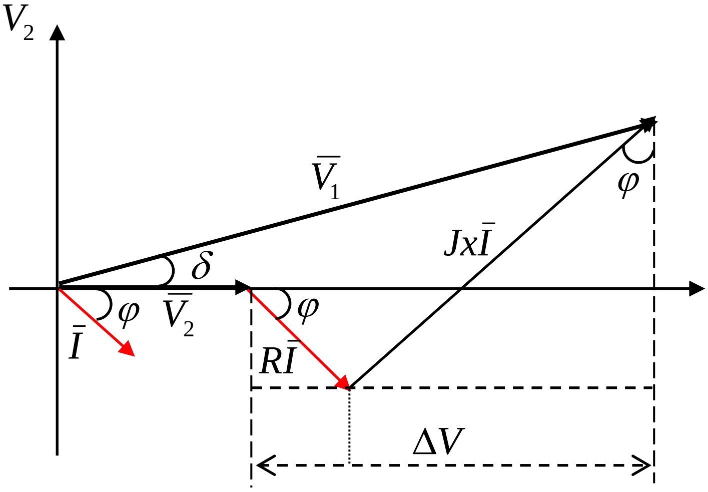


Figure 3.2 : Diagramme de tension (forme générale)

Du diagramme simplifié :

$$X.I = V_1 \times \sin\delta \qquad (3.1)$$

La puissance active :

$$P_1 = P_2 = IV_2\cos\varphi = \frac{X.I.V_2}{X} \qquad (3.2)$$

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1 \times V_2}{X}\sin\delta \qquad (3.3)$$

- Si aucune précaution n'est prise pour maintenir la tension V_2 constante lorsque la charge varie, on a :

$$V_2 = V_1 \times \cos\delta \quad \text{……………………………………………………………………(3.4)}$$

Soit : $$P_1 = P_2 = IV_2\cos\varphi = \frac{V_1 \times (V_1\cos\delta)}{X}\sin\delta = \frac{V_1^2}{2X}\sin(2\delta) \quad \text{………….………….(3.5)}$$

Il est donc claire que la puissance maximale transmissible par phase égale à :

$$P_{max} = \frac{V_1^2}{2X} \quad \text{……………………………………………………………………….(3.6)}$$

Cette valeur maximale est atteinte pour : δ = 45°

- Si on maintient la tension V_2 constante (c.à.d. la puisance réactive n’est pas nulle) :

De l’équation (3.3) : $$P_{max} = \frac{V_1^2}{X} \quad \text{…………………………………………………………(3.7)}$$

La puissance transmissible est donc, le double par rapport à la puissance précédente donnée par (3.6)

<u>Conclusion:</u>

Améliorer la capacité de transfert des réseaux $\longrightarrow$ Maintenir une tension constante

2. Chute de tension:

Nous avons : $Z = R + J.X$ et la puissance apparente à la réception : $\bar{S}_2 = P_2 + JQ_2$

- Si le réseau n’est pas trop chargé, c.à.d. l’angle de transport est petit :

$$\Delta V = V_1\cos\delta - V_2 \quad \text{…………………………………………………………………(3.8)}$$

On peut écrire, pour un réseau monophasé:

$$\Delta V = RI\cos\varphi + XI\sin\varphi \quad \text{……………………………………………………(3.9)}$$

$$\Delta V = \frac{RP_2 + XQ}{V_2} \quad \text{………………………………………………………………(3.10)}$$

$$Sin\delta = \frac{XI\cos\varphi - RI\sin\varphi}{V_1} = \frac{XP_2 - RQ_2}{V_1V_2} \quad \text{…………………………………..(3.11)}$$

L’hypothèse, réseau peu chargé: $\longrightarrow$ $V_1 \approx V_2 \approx V$

Soit pour un réseau triphasé : La tension composée U correspond à la tension simple V

P et Q les transites de puissances triphasées

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{RP + XQ}{U_2} \quad \text{……………………………………………………………(3.12)}$$

$$Sin\delta \approx \frac{XP - RQ}{U_2} \quad \text{……………………………………………………….(3.13)}$$

Si R<<X , alors ; $\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{XQ}{U_2}$ ……………………………………………………………(3.14)

$$Sin\delta \approx \frac{XP}{U_2} \quad \text{……………………………………………………………….(3.15)}$$

Conclusion:

- La chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par la charge.
- L'angle de transport θ dépend principalement de la puissance active transmise.
- La compensation de la puissance réactive présente donc, l'intérêt économique de réduire les pertes Joules et facilite le réglage du plan de tension.

$$\begin{cases} \Delta U \uparrow \Rightarrow U \downarrow \Rightarrow I \uparrow \Rightarrow P_{joules} \uparrow \\ \Delta U \downarrow \Rightarrow U \uparrow \Rightarrow I \downarrow \Rightarrow P_{joules} \downarrow \end{cases}$$

3. Compensation de la puissance réactive:

Les pertes Joules sont données par:

$$P_{Joules} = 3.R.I^2 = 3.R.(\frac{S^2}{U^2}) = R.\frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad \text{……………………………………..(3.16)}$$

De l'équation (3.16), Il est souhaitable d'augmenter la tension et baisser la puissance réactive pour réduire les pertes Joules.

Chute de tension dans le réseau-Formulation mathématique du Problème

Soit le réseau de la Figure 3.4 représentant une charge alimentée par un poste de distribution via une ligne d'impédance : $Z_S = R_S + JX_S$ ………………………………………………………..(3.17)

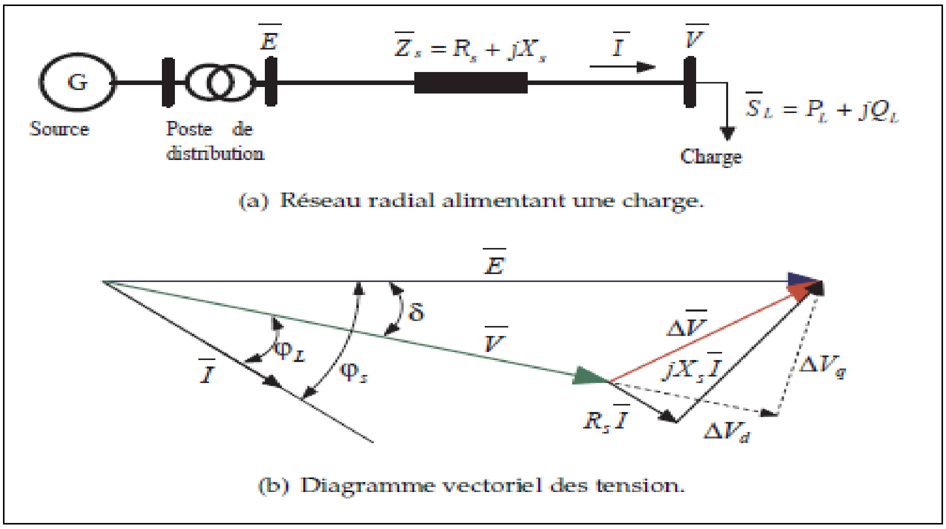


Figure 3.4 : Chute de tension dans une ligne.

La tension E est considérée constante. La chute de tension dans la ligne :

$$\Delta\overline{V} = \overline{E} - \overline{V} = \overline{Z}_S.\overline{I} \quad \text{...(3.18)}$$

Le courant en fonction des puissances absorbées : La tension est considérée comme origine de phase pour la charge.

$$I = \frac{S_L^*}{\bar{V}} = \frac{P_L - jQ_L}{\bar{V}} \quad \text{...(3.19)}$$

La chute de tension s'écrit donc :

$$\Delta\bar{V} = (R_s + jX_s)\left(\frac{P_L - jQ_L}{\bar{V}}\right) = \frac{R_sP_L + X_sQ_L}{\bar{V}} + j\frac{X_sP_L - R_sQ_L}{\bar{V}} \quad \text{...(3.20)}$$

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

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

D'après le diagramme vectorielle sur la figure 3.4(b), cette chute de tensiona une composante directe par rapport à $\overline{V}$ notée ΔV_d (en phase avec $\overline{V}$) et une composante en quadrature ΔV_d (déphasée de 90° par rapport à $\overline{V}$). Ainsi, si on prend $\overline{V}$ comme référence des phases, on peut écrire :

$$\Delta\bar{V} = \frac{R_sP_L + X_sQ_L}{V} + j\frac{X_sP_L - R_sQ_L}{V} = \Delta V_d + j\Delta V_q \quad \text{...(3.21)}$$

Maitenant, d'après le diagramme de la figure 3.4(b) on peut déduire que :

$$E = \sqrt{(V + \Delta V_d)^2 + \Delta V_q^2} = \sqrt{\left(V + \frac{R_sP_L + X_sQ_L}{V}\right)^2 + \left(\frac{X_sP - R_sQ_L}{V}\right)^2} \quad \text{...(3.22)}$$

4. Régulation de la tension dans le réseau

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

$$Rv(\%) = \frac{\left|\overline{E}\right| - \left|\overline{V}\right|}{\left|\overline{V}\right|} \times 100 \quad \text{...(3.23)}$$

<u>Cas particulier</u>

Dans les réseaux de transport, la résistance de ligne est négligée devant la réactance. Le diagramme vectoriel de la figure 3.4(b) devient, avec $R=0$ mais $Q \neq 0$

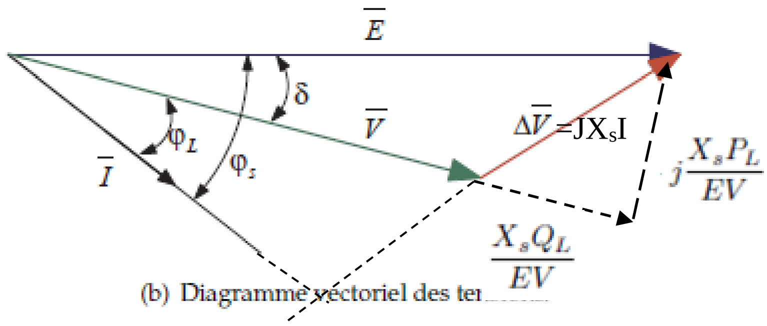


Figure 3.5 : Diagramme vectorielle des tensions

La tension de charge devient alors :

$$\bar{V} = \bar{E} - \frac{X_s Q_L}{V} - j\frac{X_s P_L}{V} = E\left(1 - \frac{X_s Q_L}{EV} - j\frac{X_s P_L}{EV}\right) \quad \text{.......................................(3.24)}$$

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

$$\bar{V} \approx E\left(1 - \frac{Q_L}{S_{sc}} - j\frac{P_L}{S_{sc}}\right) \quad \text{...(3.25)}$$

Où S_{SC} représente la puissance de court-circuit .

$$S_{SC} = \frac{E^2}{X_S} \quad \text{..(3.26)}$$

Comme on peut le voir sur le diagramme de la Figure 3.5, 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 le module de V . Ainsi

$$V \approx E\left(1 - \frac{Q_L}{S_{sc}}\right) \quad \text{...(3.27)}$$

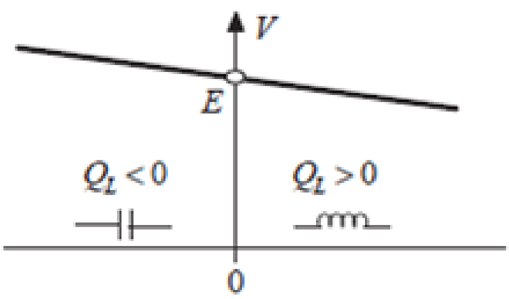


Figure 3.6 : Droite de charge

On peut remarquer que lorsque $Q_L > 0$ la tension V < E , et lorsque $Q_L < 0$, V > E .

5.1 Puissances active, réactive et angle de charge

La tension au jeu de barres source $\overline{E}$ est prise comme référence, la résistance de la ligne est négligeable

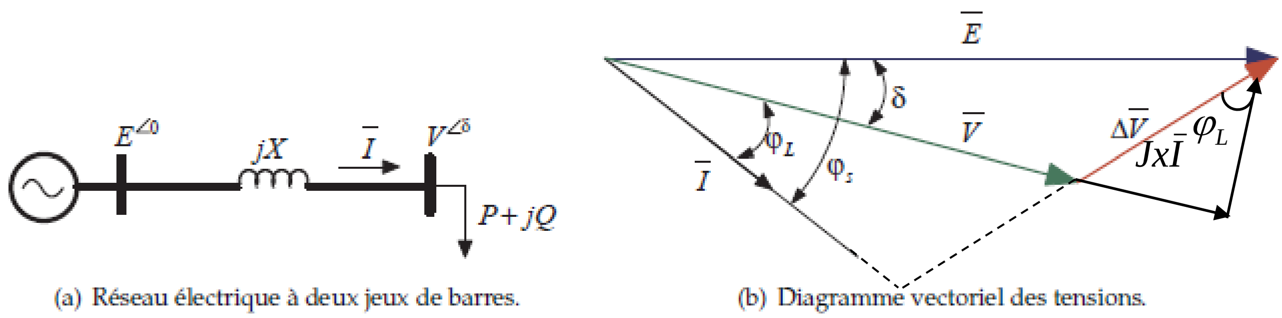


Figure 3.7 : Réseau à deux jeux de barres

Par projection, on aura les expressions suivantes:

$$E\cos(\delta) = V + XI\sin(\varphi_L) \quad \text{et} \quad E\sin(\delta) = XI\cos(\varphi_L) \qquad (3.28)$$

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

$$VI^* = P + jQ = VI\cos(\varphi_L) + jVI\sin(\varphi_L) \qquad (3.29)$$

Des équations (3.28) et (3.29), on tire :

$$P = \frac{EV}{X}\sin(\delta) \qquad (3.30)$$

$$Q = \frac{EV}{X}\cos(\delta) - \frac{V^2}{X} \qquad (3.31)$$

Côté source, la puissance active débitée est égale à celle du jeu de barres de la charge donnée par (3.30) , puisque la résistance de la ligne est négligée, c'est le même résultats reporté par l'expression (3.3). Cependant, pour la puissance réactive, elle est différente du faite 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 :

$$Q_s = Q + XI^2 \qquad \text{avec} \qquad I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V} \qquad (3.32)$$

En remplaçant P et Q par les expressions établies précédemment par (3.30) et (3.31) dans (3.32), la puissance réactive de la source s'écrira comme suit :

$$Q_s = \frac{E^2}{X} - \frac{EV}{X}\cos(\delta) \qquad (3.33)$$

D'après le digramme vectoriel de la Figure (37)b, on peut écrire les chutes de tension directe (longitudinale), et en quadrature (transversale) comme suit :

$$\Delta V_d = E\cos(\delta) - V, \quad \Delta V_q = E\sin(\delta) \quad \text{.......................(3.34)}$$

Ainsi, les équations (3.30) et (3.31) peuvent être réécrites par (3.35)

$$P = \frac{V}{X}\Delta V_q, \quad Q = \frac{V}{X}\Delta V_d \quad \text{.......................(3.35)}$$

***Conclusion** : L'équation (3.35) montre qu'il ne peut pas y avoir de transfert de puissance entre les deux jeux de barres sans chute de tension.*

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

- 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*.
- La réactance de la ligne *X* ; En théorie, plus elle est faible plus la puissance est grande, mais il ne faut perdre de vue qu'une trop faible réactance provoquera une instabilité du système.
- 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 *Q* 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 comme le montre l'équation (3.35). Si cette chute de tension est nulle, alors il n'y a aucune puissance réactive au jeu de barres de la charge. Par ailleurs, la chute de tension en quadrature 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).

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

Des équations (3.30) et (3.31), on tire l'expression (3.36):

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{EV}{X}\right)^2 \quad \text{.......................(3.36)}$$

La solution de cette équation pour la variable *V* donne :

$$V^2 = \frac{E^2}{2} - QX \pm X\sqrt{\frac{E^4}{4X^2} - P^2 - Q\frac{E^2}{X}} \quad \text{.......................(3.37)}$$

pour que l'équation (3.37) admet des solutions positives pour *V* , il faut que :

$$P^2 + Q\frac{E^2}{X} \leqslant \frac{E^4}{4X^2} \quad \text{.......................(3.38)}$$

L'équation (3.37) permet d'identifier les puissances active et réactive que la ligne peut fournir à la charge. Ainsi, en introduisant la puissance S_{sc} donnée par (3.26).

$$S_{sc} = \frac{E^2}{X}$$

On peut écrire la condition précédente (3.38) comme :

$$P^2 + QS_{sc} \leqslant \left(\frac{S_{sc}}{2}\right)^2 \quad \text{...(3.39)}$$

Conclusion :

La condition (3.39) permet de tirer les conclusions suivantes :

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

5.3 Méthodes et moyens de 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.

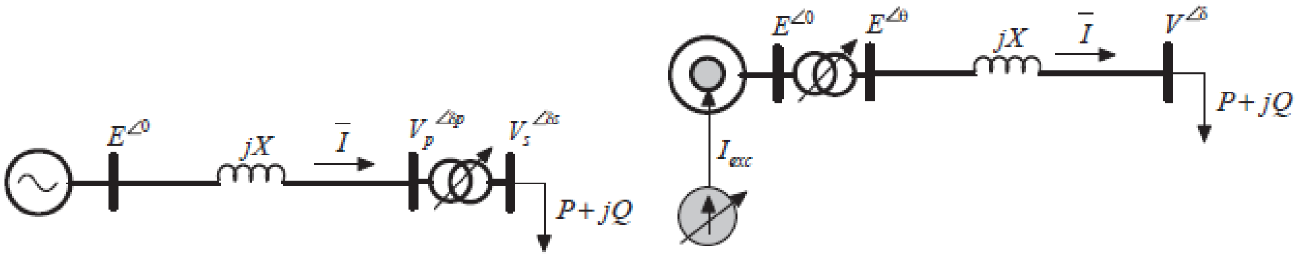
L'équation (**3.37**) montre que le niveau de tension à un jeu de barres donné dépend de la tension de source qui l'alimente, de la réactance de ligne qui le sépare de cette source et des puissances active et réactive à son niveau. Ainsi, si la tension au jeu de barres en question n'est pas dans une limite acceptable, des modifications sur un ou plusieurs de ces paramètres sont alors nécessaires.

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

5.3.1 Réglage directe :

Il consiste à agir directement sur la tension elle-même. Parmi les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie, il y a :

- ➢ La correction du niveau de la tension V , qui fait appel à un auto-transformateur aux niveaux des postes de distribution.
- ➢ 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.



(a) Réglage de tension charge par auto-transformateur.

(b) Réglage de la tension de source par auto-transformateur ou par excitation de la source de production.

Figure 3.8 : Réglage directe de la tension

5.3.2Réglage 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 compensateurs 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 (3.23) :

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

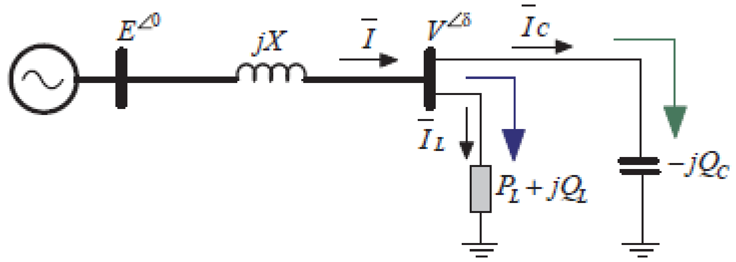
La puissance réactive est en grande partie responsable des chutes de tension.

a) Compensateurs statiques comme :

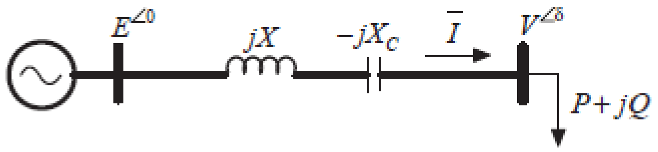
- les batteries de condensateurs.
- Les FACTs (Flexible Alternating Current Transmission systems), Systèmes de transmission flexibles en courant alternatif.

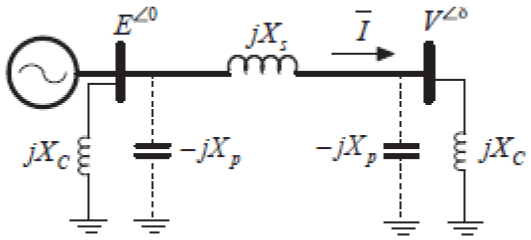
b)Compensateur synchrone

2. Modification de la réactance de la ligne. Toujours d’après l’équation (3.23), on peut remarquer qu’il est possible de modifier les chutes de tension en modifiant la réactance de la ligne X.



(a) Réglage de tension charge par compensation shunt de puissance réactive.





(b) Réglage de la tension de source par compensation d'une partie de la réactance de ligne (compensation série).

(c) Réglage de la tension par inductance shunt dans une ligne de transport lorsqu'elle est à vide ou faiblement chargée.

Figure 3.9 : Réglage Indirecte de la tension

5.4 Caractéristiques des compensateurs série et shunt

5.4.1 Condensateur : La puissance réactive fournie est égale :

$$Q_C = C\omega U^2 \qquad \text{……………………………………………………………………(3.40)}$$

5.4.2 Inductance : La puissance réactive consommée est égale:

$$Q_L = \frac{1}{l.\omega} U^2 \qquad \text{…………………………………………………………………..(3.41)}$$

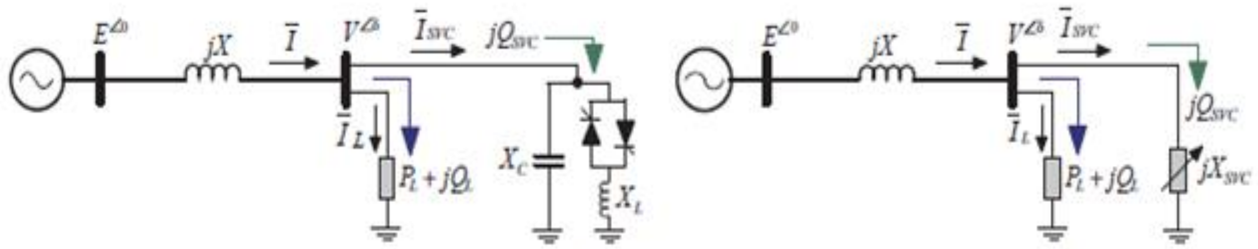
5.4.3 Compensateurs FACTs

Les dispositifs 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 shunts : Comme le SVC, ou Static Var Compensator, le STATCOM, Static Compensator,
- Des compensateurs séries : Comme le TCSC (Thyristor controlled series compensator) ou le DVR, Dynamic Voltage Restorer.

a) SVC (Static Var Compensator)

Constitué d'un condensateur C en parallèle avec un TCR (Thyristor Controlled Reactor). Le TCR est une réactance inductive X_L couplée au jeu de barres via un variateur de tension (gradateur) qui fait que sa réactance X_{TCR} devient variable en fonction de l'angle d'amorçage **α** des thyristors.



(a) Réglage de tension charge par compensation shunt de puissance réactive en utilisant un SVC.

(b) Schéma équivalent du SVC.

Figure 3.10 : Réglage de la tension par SVC

La réactance variable du TCR est donnée par l'expression (3.42)

$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{\sigma - \sin\sigma}, \qquad \sigma = 2(\pi - \alpha) \quad \text{......(3.42)}$$

La réactance du SVC devient alors :

$$X_{SVC} = -X_C // X_{TCR} = \frac{\pi X_C X_L}{X_C(\sigma - \sin\sigma) - \pi X_L} = \frac{\pi X_C X_L}{X_C\Big(2(\pi-\alpha) + \sin(2\alpha)\Big) - \pi X_L} \quad \text{.....(3.43)}$$

Finalement, la puissance réactive du SVC est :

$$Q_{SVC} = \frac{V^2}{X_{SVC}} = V^2 \frac{X_C\Big(2(\pi-\alpha) + \sin(2\alpha)\Big) - \pi X_L}{\pi X_C X_L} \quad \text{......(3.44)}$$

b) 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).

La commande de l'onduleur permet d'imposer une tension $\bar{V}_{STAT}$ à la sortie :

$$\bar{V}_{STAT} = V_{STAT}^{\angle\theta} \quad \text{......(3.45)}$$

Ainsi, la puissance réactive échangée avec le réseau sera :

$$Q_{STAT} = \frac{V^2}{X_{STAT}} - \frac{V V_{STAT}}{X_{STAT}} \cos(\delta - \theta) \quad \text{......(3.46)}$$

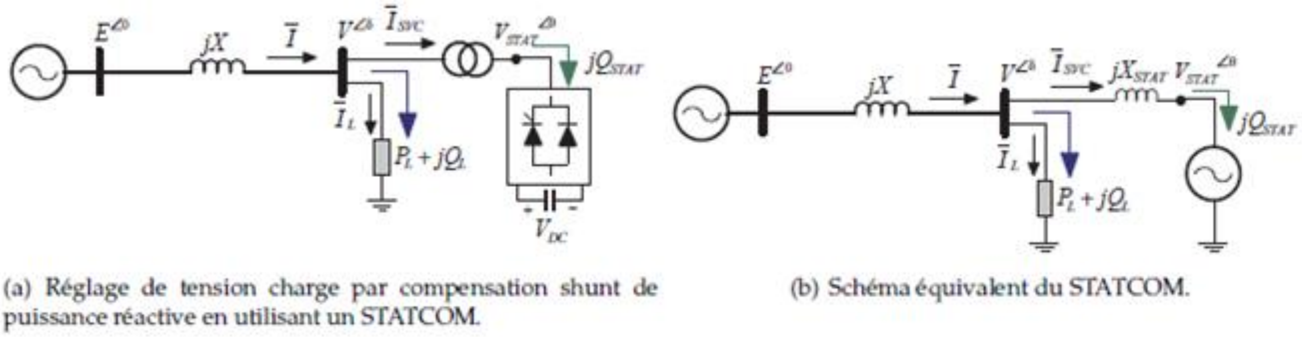


Figure 3.11 : Réglage de la tension par un STATCOM

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 :

$$Q_{STAT} = \frac{V}{X_{STAT}}(V - V_{STAT}) \quad \text{……………………………….……..….…….….…..(3.46)}$$

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} .

c) TCSC *(Thyristor Controlled Series Compensator)*

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 XTCSC variable qui permet de compenser la réactance du réseau X.

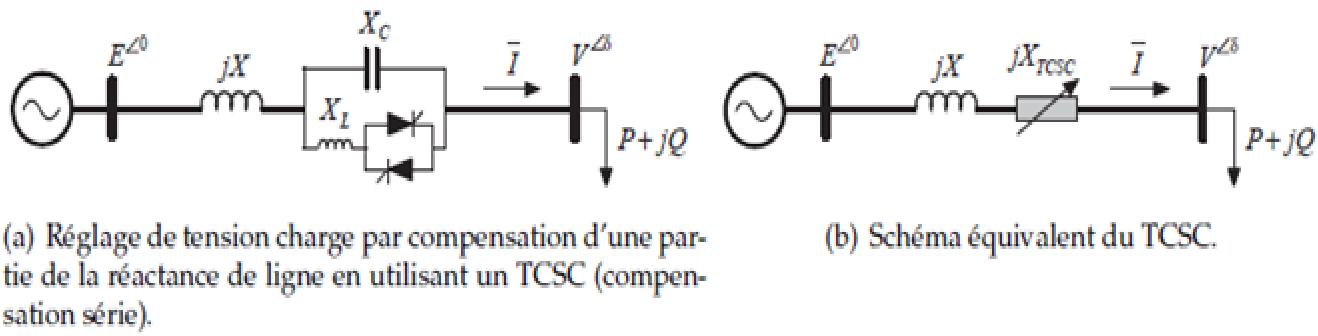


Figure 3.12 : Réglage de la tension par un TCSC

5.5 Stades de réglage de tension

5.5.1 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 agit immédiatement en cas de besoin sur l'excitation des alternateurs afin d'élever ou de baisser les tensions induites au stators. Le temps de réponse du réglage primaire est court, typiquement quelque fractions de secondes.

5.5.2 Réglage secondaire, secondary control

Ce type de réglage (RST) est relativement plus lent (quelques secondes à une 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 acceptables. En générale, le RST agit aux niveau des ces jeux de barres (postes) en actionnant les auto-transformateurs, les compensateurs.

5.5.3 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.

5.6 Besoins de tenue de tension

5.6.1 Contraintes sur les réseaux de transport

limite de tension haute

- Tenue des matériels (tenue diélectrique, vieillissement des isolants) ou par leur fonctionnement correct (saturation des transformateurs, tenue des unités de production).

limite de tension basse

Sécurité du système électrique :

- Surcharge des lignes et des transformateurs,

- Tension critique,
- Stabilité des alternateurs,

5.6.2 Contraintes sur les réseaux de distribution

La limite inférieur de la tension

- les exigences qui fixent les besoins en matière de tenue de la tension sur les réseaux le maintien de la tension les alimentant au voisinage de la tension nominale.

La limite supérieure de la tension

- Réduction de la durée de vie des équipements électriques.

En pratique

Pour les **réseaux de transport**, l’exploitant doit maintenir la tension dans la plage admissible en s’efforçant d’obtenir une tension élevée, afin de réduire les pertes et d’augmenter la marge de sécurité de fonctionnement du réseau.

Pour les **réseaux de distribution**, on cherche à maintenir la tension le plus près possible de la tension nominale pour la majorité de la clientèle car la gêne subie par les usagers est d’autant plus forte qu’on s’en éloigne. Pour y parvenir, alors que la tension des réseaux THT est normalement sujette à des variations dans la plage autorisée, on équipe de régleurs en charge les transformateurs abaisseurs qui alimentent les réseaux de distribution.