

Chapitre 4:

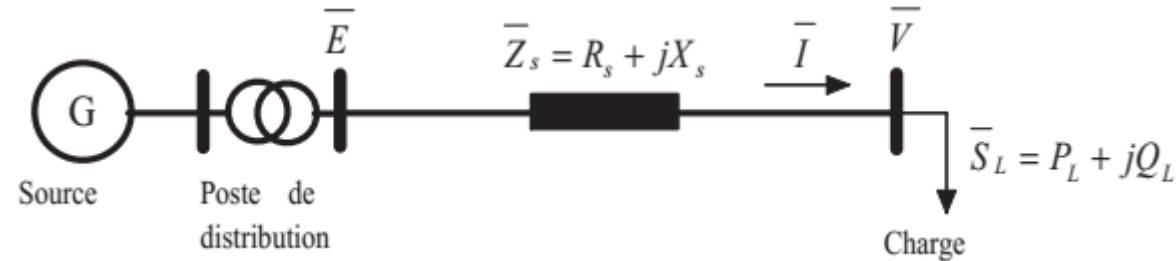
Contrôle de la puissance réactive et réglage de la tension

Mr. AZIZOU

2020/2021

Chutes de tension

Formulation mathématique



Réseau radial alimentant une charge.

$$\Delta \bar{V} = \bar{E} - \bar{V} = \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad \text{Ou} \quad \bar{I} = \frac{\bar{S}_L^*}{\bar{V}} = \frac{P_L - jQ_L}{\bar{V}} \quad (1)$$

Ainsi, la chute de tension s'écrit

$$\Delta \bar{V} = (R_s + jX_s) \bar{I} = \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{\bar{V}} + j \frac{X_s P_L - R_s Q_L}{\bar{V}} \quad (2)$$

La chute de tension dépend des puissances active et réactive de la charge et de l'impédance de ligne

Formulation mathématique

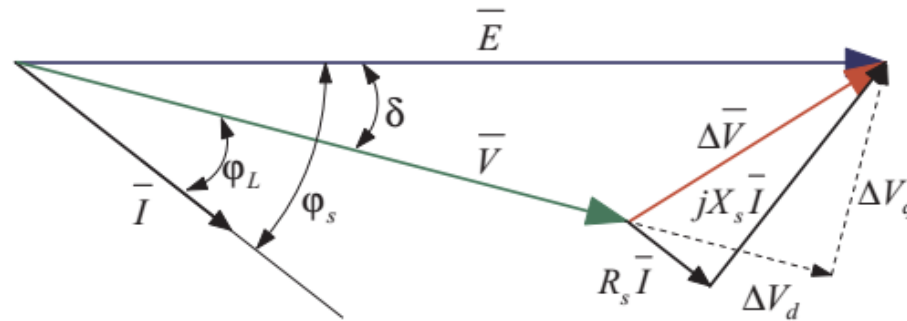


Diagramme vectoriel des tension

$$\Delta \vec{V} = \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{\vec{V}} + j \frac{X_s P_L - R_s Q_L}{\vec{V}} = \Delta V_d + j \Delta V_q \quad (3)$$

Prenant E comme réf

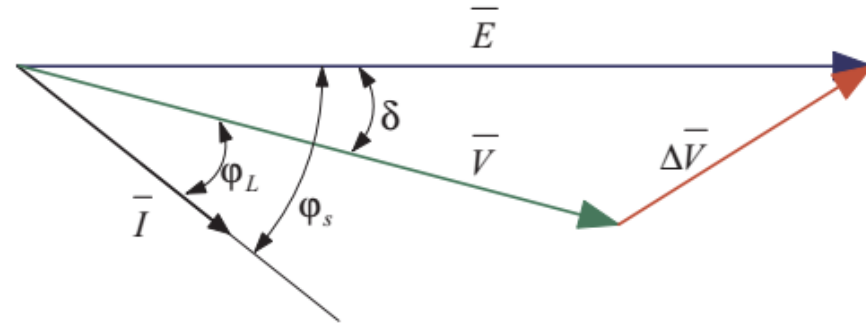
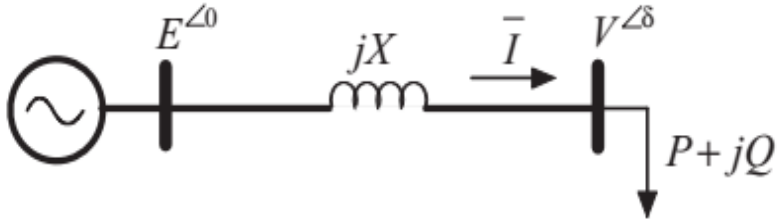
$$E = \sqrt{\left(V + \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{V} \right)^2 + \left(\frac{X_s P_L - R_s Q_L}{V} \right)^2} \quad (4)$$

Régulation de la tension

La régulation de tension en %

$$R_V (\%) = \frac{E - V}{V} \times 100\% \quad (5)$$

Puissances transmises et tension



La relation entre les tensions E^- et V^- peut être alors écrite comme

$$E \cos(\delta) = V + XI \sin(\varphi_L) \quad \text{et} \quad E \sin(\delta) = XI \cos(\varphi_L) \quad (6)$$

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

$$\bar{V} \bar{I}^* = P + jQ = VI \cos(\varphi_L) + jVI \sin(\varphi_L) \quad (7)$$

En faisant sortir les expressions du $\cos()$ et $\sin()$ de l'équation. (6), et en remplaçant dans (7), on aboutit aux équations des flux de puissances suivantes

$$P = \frac{EV}{X} \sin(\delta) \quad (8)$$

$$Q = \frac{EV}{X} \cos(\delta) - \frac{V^2}{X} \quad (9)$$

Côté source, la puissance active débitée est égale à celle du jeu de barres de la charge, puisque la résistance de la ligne est négligée. 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

$$Q_s = Q + XI^2 \quad \text{avec} \quad I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V} \quad (10)$$

En remplaçant P et Q données par (8) et (9)

$$Q_s = \frac{E^2}{X} - \frac{EV}{X} \cos(\delta) \quad (11)$$

La puissance ***P*** échangée entre les deux jeux de barres dépend de :

- 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 est 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 . Ainsi, les équations (8) et (9) peuvent être réécrites comme :

$$P = \frac{V}{X} \Delta V_q, \quad Q = \frac{V}{X} \Delta V_d \quad (12)$$

Remarque:

L'équation (12) montre qu'il ne peut pas y avoir de transfert de puissance entre les deux jeux de barres sans chute de tension.

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

Reprenant les équations

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

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

On peut déduire

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{EV}{X}\right)^2 \quad (13)$$

La solution de cette équation pour V donne

$$V^2 = \frac{E^2}{2} - QX \pm X \sqrt{\frac{E^4}{4X^2} - P^2 - Q \frac{E^2}{X}} \quad (14)$$

L'équation (14) admet des solutions positives pour V , si

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

$$P^2 + Q \frac{E^2}{X} \leq \frac{E^4}{4X^2} \quad (15)$$

Sachant la puissance de court-circuit du réseau

$$S_{sc} = \frac{E^2}{X} \quad (16)$$

on peut écrire la condition précédente comme

$$P^2 + QS_{sc} \leq \left(\frac{S_{sc}}{2} \right)^2 \quad (17)$$

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

A partir de la condition (17):

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.
- ❑ Il est plus difficile de transporter la puissance Q que la puissance P .
 - ❑ Le transport de Q réduit la capacité de transport de P .

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 .

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.

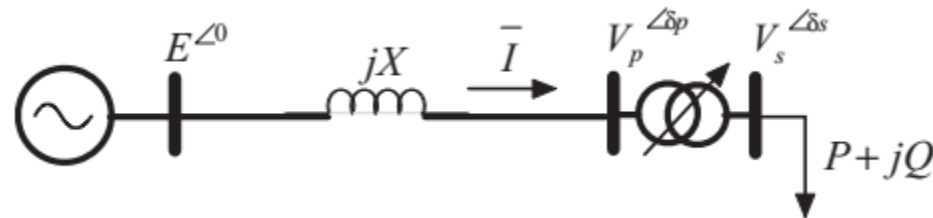
si la tension au jeu de barres en question n'est pas dans une limite acceptable, des modifications sur un ou plusieurs de ces paramètres sont alors nécessaires.

Méthodes et moyens de réglage de la tension

Réglage direct :

Il consiste à agir directement sur la tension elle même. 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 .

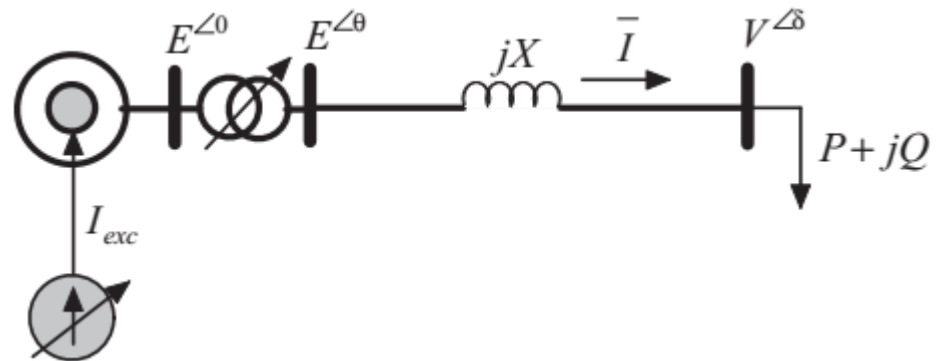
1. La correction du niveau de la tension V , qui fait appel à un auto-transformateur (Tap-load changer) aux niveaux des postes de distribution ;



Méthodes et moyens de réglage de la tension

Réglage directe :

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.



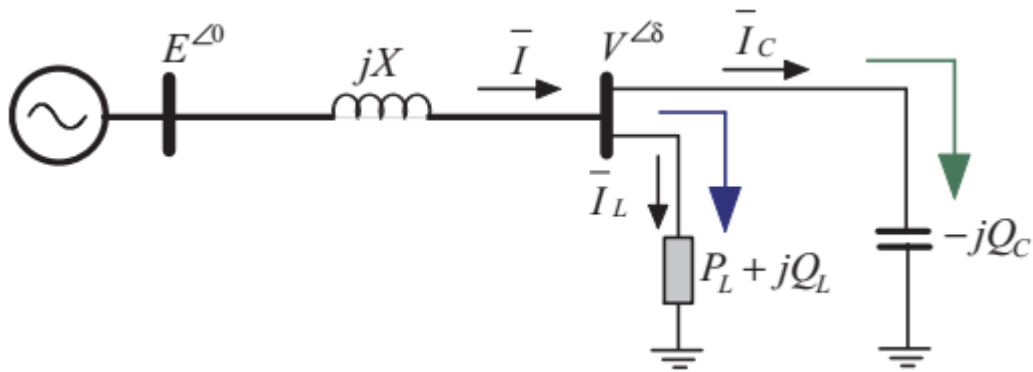
Méthodes et moyens de réglage de la tension

Réglage indirecte :

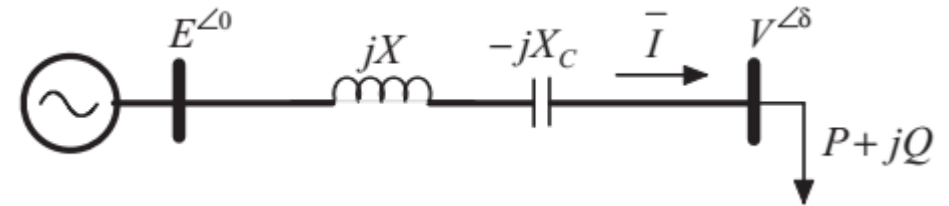
1. La compensation de puissance réactive ; Les compensateurs de puissance réactive peuvent être statique comme les batteries de condensateurs, les FACTs (Flexible Alternating Current Transmission systems), et parfois même des inductances.
Le moteur synchrone peut être utilisé comme compensateur dynamique de puissance réactive. En effet, ce type de moteur produit de la puissance réactive quant il est sur-excité et en consomme lorsque il est sous-excité ;
2. Modification de la réactance de la ligne ; Il est possible de modifier les chutes de tension en modifiant la réactance de la ligne X .

Caractéristiques des compensateurs série et shunt

Condensateur :



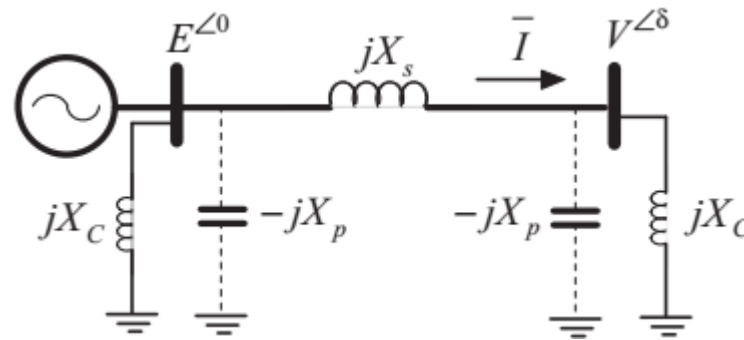
Réglage de tension charge par compensation shunt de puissance réactive.



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

Caractéristiques des compensateurs série et shunt

Inductance :

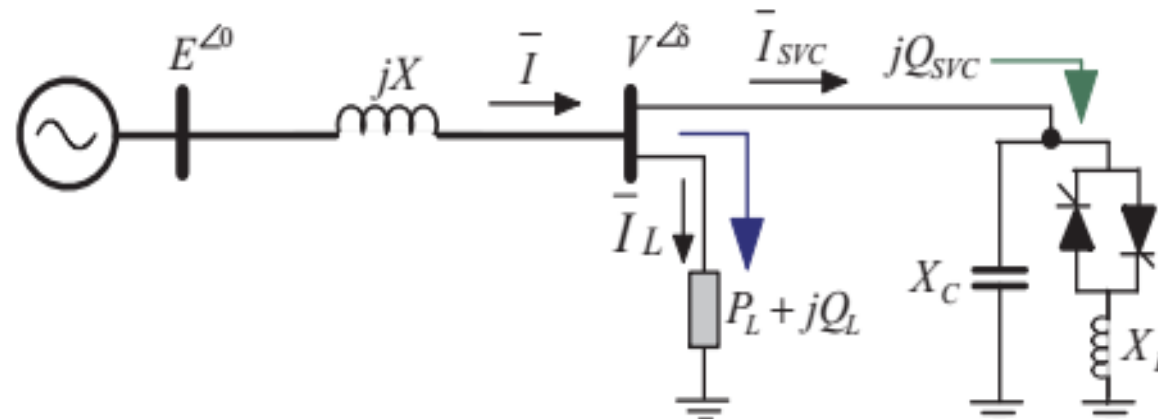


Réglage de la tension par inductance shunt dans une ligne de transport lorsqu'elle est à vide ou faiblement chargée.

Caractéristiques des compensateurs série et shunt

Compensateurs FACTS :

SVC :



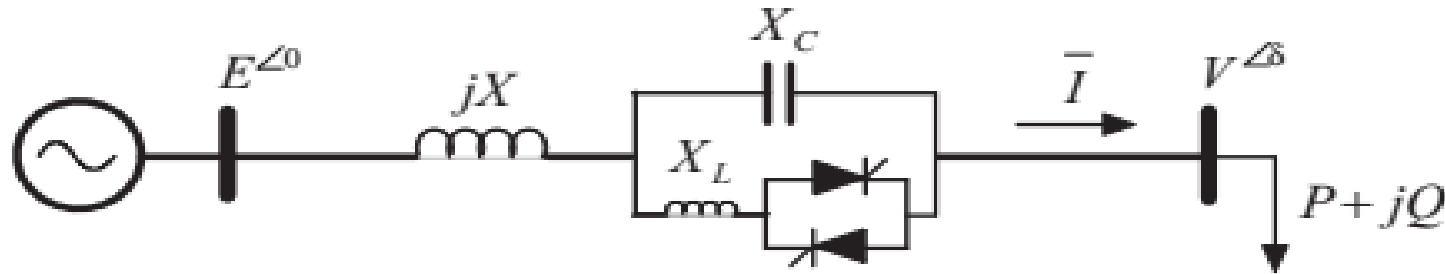
$$Q_{SVC} = \frac{V^2}{X_{SVC}} = V^2 \frac{X_C \left(2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha) \right) - \pi X_L}{\pi X_C X_L}$$

Caractéristiques des compensateurs série et shunt

Compensateurs FACTs :

Thyristor Controlled Series Compensator TCSC :

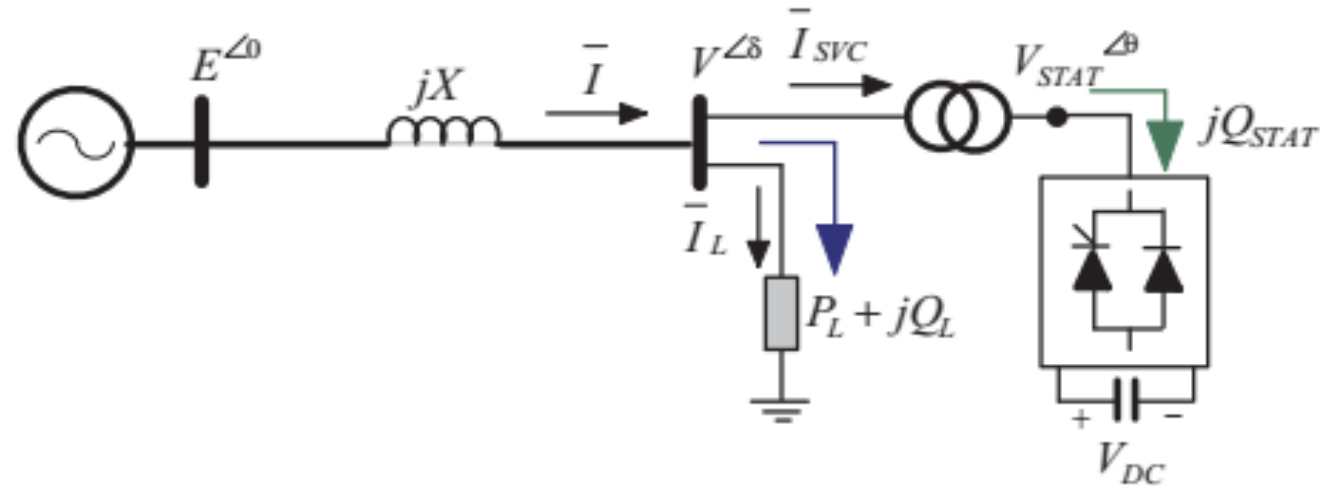
C'est le même principe que le SVC mais cette fois, le dispositif est mis en série avec l'impédance du réseau. Ainsi, on obtient une réactance X_{TCSC} variable qui permet de compenser la réactance du réseau



Caractéristiques des compensateurs série et shunt

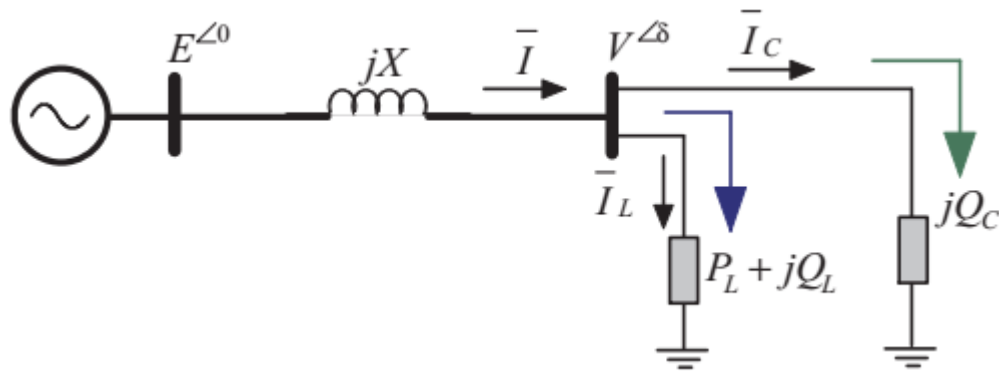
Compensateurs FACTS :

Le STATCOM :



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

Réglage de la tension par compensation de puissance réactive



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

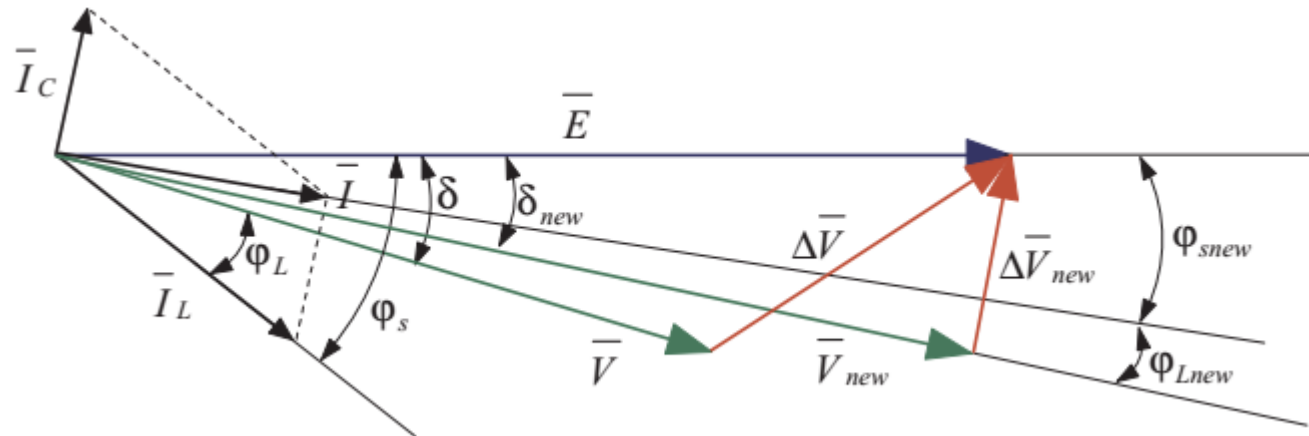


Diagramme vectoriel des tensions et des courants avant et après réglage de la tension.

Réglage de la tension par compensation de puissance réactive

- 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 ;

Conclusion :

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.

Avec un compensateur de puissance réactive, il est impossible d'avoir un réglage parfait de la tension avec un facteur de puissance unitaire.

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.

Il y a deux types d'instabilité

Classification des instabilité de la tension

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.

Instabilité à court terme :

Cette instabilité est très rapide, quelque 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 ;

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

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 shunt

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.

Sorties	Problèmes	Action corrective	Solution conventionnelle	Nouveaux équipements
Limites de Tension	Basse tension lors de charges importantes	Addition de puissance réactive	Condensateurs shunt, SVC, condensateurs séries	TCSC, STATCOM
	Haute tension lors de faibles charges	Supprimer la puissance réactive fournie	Brancher la ligne EHV ou/et le condensateur shunt	TCSC, TCR
		Absorption de la puissance réactive	Brancher le condensateur shunt, générateur, SVC	TCR, STATCOM
	Haute tension après une coupure	Absorption de la puissance réactive	Ajout d'un groupe de production	TCR
		Equipement de protection	Ajout d'un groupe de production	TCVL

	Basse tension après une coupure	Addition de la puissance réactive	Brancher les condensateurs shunts, un générateur, SVC, condensateurs série	STATCOM, TCSC
		Empêcher la surcharge	Générateur série PAR	IPC, TCPAR, TCSC
	Basse tension et surcharge	Ajouter la puissance réactive et limiter la surcharge	Grouper deux ou plusieurs équipements	IPC, TCSC, UPFC, STATCOM
Limites thermiques	Surcharge d'une ligne ou d'un transformateur	Réduire la surcharge	Ajout d'une ligne ou d'un transformateur	TCSC, TCPAR, UPFC
			Ajout de générateur série	TCR, IPC
	Chute de puissance d'un circuit parallèle	Limiter la charge du circuit	Ajout de réacteurs série, condensateurs PAR	UPC, UPFC, TCR

Débits en boucles	Charge d'une ligne parallèle commune	Régler les réactances séries	Ajouter des condensateurs séries/réacteurs	IPC, UPFC, TCSC
		Régler l'angle de charge	Ajouter des PAR	TCPAR
	Faute commune après incident	Réajuster le réseau ou utiliser les actions des limites thermiques	PAR, condensateurs en série ou réacteurs	TPC, TCSC, UPFC, TCR, TCPAR
	Inversion de la direction du débit	Régler l'angle de charge	PAR	IPC, TCPAR, UPFC

Niveaux de court-circuit	Coupure importante de courant	Limiter le courant de court-circuit	Ajouter les condensateurs séries, coupe-circuit, disjoncteurs	TCR, IPC, SCCL, UPFC
		Changer le disjoncteur	Ajouter de nouveaux disjoncteurs	
		Réaménager le réseau	« Split bus »	IPC
Résonance synchrone	Détérioration de l'arbre du générateur	Réduire les oscillations	Limiter les compensateurs séries, filtres, ou SVC au niveau des générateurs	NGH, TCSC