

## REGLAGE DE TENSION

### 1 Introduction

L'étude de fonctionnement du système électrique production-transport-consommation est dominée par quatre préoccupations :

- Maintenir en permanence les conditions nécessaires d'un équilibre entre la production et la consommation (problème de conduite) ;
- Tenir compte du fort couplage dynamique entre la production et la consommation via le réseau (problème de stabilité) ;
- Assurer l'intégrité des ouvrages (problèmes de protection) et du système électrique (problème de stabilité et de protection) ;
- Maintenir les caractéristiques de la tension et de la fréquence dans les plages contractuelles (problème de réglage).

La tension constitue, avec la fréquence, un des principaux paramètres de la sûreté de fonctionnement du système. Ce paramètre est commun aux différents utilisateurs : clients, distributeurs, producteurs raccordés sur un même jeu de barres (JdB) électrique.

Un grand réseau de distribution d'énergie électrique délivre une tension dont la qualité dépend à la fois :

- du producteur, qui s'engage contractuellement à maintenir l'amplitude et la fréquence entre des limites, qu'il est cependant amené à dépasser lors de manœuvres (mise sous tension, élimination automatique de courts-circuits, délestage, etc.);
- des phénomènes aléatoires, d'origine atmosphérique ou accidentelle (foudre, rupture de ligne, etc.);
- des abonnés qui, en manœuvrant à leur gré leurs appareils électriques (marche, arrêt, variation de charge), génèrent des courants transitoires non sinusoïdaux et qui, en utilisant des dispositifs à commutation électronique, engendrent des harmoniques de courant.

En l'absence des moyens de contrôle, le régime normal admissible de la tension ne peut avoir lieu que pour les réseaux à faible puissance et courtes distances entre les points de production et de consommation. En réalité, il est impossible de maintenir strictement constante la tension dans un JdB quelconque du réseau en raison des variations apériodiques et des régimes non linéaires des charges.

Il existe trois principaux types de variations de tension :

- Les variations lentes aléatoires ou périodiques. Elles sont liées aux charges journalières caractérisées par les heures de pointes, les heures creuses et les heures de nuits. Ces variations sont, généralement, prévisibles par l'évaluation de tensions probables relatives à ces périodes.
- Les variations brusques dues principalement au fonctionnement intermittent des appareils à fort appel de courant au démarrage et de gros consommateurs d'énergie réactive. Ce type de variation entraîne des surtensions dites « Flicker » qui sont parfois régulières et parfois aléatoires.
- Les variations rapides d'une fraction de seconde à quelques secondes. Leurs amplitudes sont diverses. Elles sont dues aux perturbations ou à des coupures brèves de courant.

Le but du réglage de la tension est de maintenir, en tout point du réseau, la tension à une valeur qui permet :

- de respecter les contraintes sur le matériel ;
- d'assurer la meilleure qualité de service.

Pour réaliser ces objectifs, il est nécessaire de mettre en œuvre des moyens de réglage pour le maintien de la tension dans les limites admissibles.

## **2 Nécessité de réglage de la tension**

Il y a trois raisons majeures :

- Satisfaction des clients, des distributeurs et des producteurs ;
- Satisfaction des besoins du système ;
- Respect des contraintes de fonctionnement des matériels.

### **2.1 Satisfaction des clients, des distributeurs et des producteurs**

Pour les clients et les distributeurs, chaque contrat de fourniture définit la tension nominale de raccordement et la plage de variation acceptée autour de cette valeur. Ces deux termes, qui conditionnent le dimensionnement des appareils récepteurs des clients, doivent être, à tout moment, respectés.

Pour le producteur, la tension doit également être maintenue dans une plage convenue qui soit supportable par les installations de production. Faute de quoi, les groupes peuvent être contraints à se déconnecter. Ainsi, la sûreté de fonctionnement du système électrique sera affaiblie.

## 2.2 Satisfaction des besoins du système

Le réglage de la tension est, également, nécessaire pour garantir le bon fonctionnement global du système, tant sous l'aspect économique que sous l'angle de la sûreté. Un bon réglage permet, en même temps, de diminuer les pertes du réseau et d'éviter le risque d'effondrement en tension.

## 2.3 Respect des contraintes de fonctionnement des matériels

La tension doit être maintenue, en tout point du réseau, dans une bande étroite compatible avec le dimensionnement des matériels :

- Les tensions trop hautes entraînent le vieillissement ou la destruction des matériels raccordés.
- Les tensions trop basses provoquent des surcharges dans les lignes, perturbent le bon fonctionnement des protections et des régleurs en charge des transformateurs ...etc.

## 3 Chutes de tension, puissance réactive et puissance active transmissible

### 3.1 Chutes de tension

Rappelons que la tension en un point du réseau est fonction des forces électromotrices des générateurs, des charges et autres impédances shunt et des chutes de tension dans les divers éléments série du système : machines, transformateurs, lignes, etc. Les seules sources de tension sont constituées par les alternateurs dont les f.é.m (forces électromotrices) internes sont commandées par leur système d'excitation.

La chute relative de tension produite par le transit d'une puissance apparente complexe  $S = P + jQ$  dans un élément de réseau représenté par son impédance  $Z = R + jX$  est donnée par l'expression approchée :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RP + XQ}{U^2}$$

Rappelons que cette expression est d'autant moins exacte qu'elle est utilisée pour des lignes longues et/ou fortement chargées.

La tension en un point est donc fonction de la topologie du réseau et des transits ; en particulier, lorsque le rapport  $X/R$  est important (cas des lignes THT), ce sont les transits de puissance réactive qui sont à l'origine des plus importantes chutes de tension.

### 3.2 Puissance réactive

La puissance réactive sert à l'aimantation des circuits magnétiques des machines électriques (transformateurs et moteurs) et de certains appareils tels que les lampes fluorescentes. Mais, par contre, la transporter en même temps que la puissance active conduit à sur-dimensionner les lignes de transport et de distribution et donc à en augmenter le coût ou à les faire fonctionner à leurs limites, ce qui peut conduire à des instabilités néfastes pour la qualité de service.

On montre que la puissance réactive a des propriétés de conservation dans le réseau. Par convention, tout élément inductif du réseau consomme de l'énergie réactive et tout élément capacitif en produit. Il est aisé de calculer ces consommations et productions.

La puissance réactive consommée par une inductance  $L$  parcourue par un courant  $I$  est :  $Q_L = L\omega I^2$

La puissance réactive produite par une capacité  $C$  soumise à une tension  $U$  est égale à :  $Q_C = C\omega U^2$

Comme pour la puissance active, on peut établir, aux nœuds du réseau ou sur tout trajet du courant, des bilans équilibrés de puissance réactive. Le bilan global est le suivant :

- Les charges sont très généralement inductives, c'est-à-dire consommatrices de puissance réactive ;
- Les lignes aériennes produisent de l'énergie réactive du fait de leur capacité lorsqu'elles sont peu chargées ; elles en consomment lorsqu'elles sont fortement chargées ;
- Les câbles souterrains en produisent du fait de leur faible inductance et de leur grande capacité ;
- Les transformateurs en consomment.

Globalement, le réseau et ses charges appellent de l'énergie réactive, sauf aux heures creuses. Ainsi, il s'établit, sur les réseaux, une forte circulation de puissance réactive, ce qui se traduit par des  $\cos\varphi$  faibles en tout point du réseau, par conséquent, de fortes pertes de rendement et un surdimensionnement des réseaux. L'ampleur du phénomène est telle que, dans bien des cas, le réseau ainsi constitué deviendrait inexploitable.

La solution consiste à produire de la puissance réactive au voisinage des lieux de consommation. C'est le rôle des condensateurs de puissance. Placés près des éléments inductifs, ces condensateurs leur fournissent directement de la puissance réactive ; celle-ci n'a plus à circuler sur le réseau d'alimentation ; on limite ainsi les instabilités et les surdimensionnements des réseaux. C'est ce que l'on appelle la compensation de la puissance réactive.

La compensation de la puissance réactive présente non seulement l'intérêt économique de réduire les pertes par effet Joule, mais aussi de faciliter le réglage du plan de tension. En pratique, la puissance réactive se transporte mal puisqu'elle crée de fortes chutes de tension. Il faut donc la compenser aussi près que possible des zones où elle est appelée. La compensation de la puissance réactive et donc la tenue de la tension sont des problèmes essentiellement locaux.

### 3.3 Puissance maximale transmissible

Par ailleurs, si l'on considère une charge variable de tension simple  $V_c$ , représentée par une impédance  $\bar{Z} = Z \angle \varphi$ , de déphasage  $\varphi$ , alimentée, à travers un réseau assimilable à une réactance  $X$ , par une source de tension efficace simple constante  $V_s$ , comme le montre la Fig. 5.1.

Le courant traversant le dipôle est :

$$I = \frac{V_s}{\sqrt{X^2 + Z^2 + 2XZ \sin \varphi}}$$

La tension aux bornes de la charge :

$$V_c = ZI = \frac{ZV_s}{\sqrt{X^2 + Z^2 + 2XZ \sin \varphi}}$$

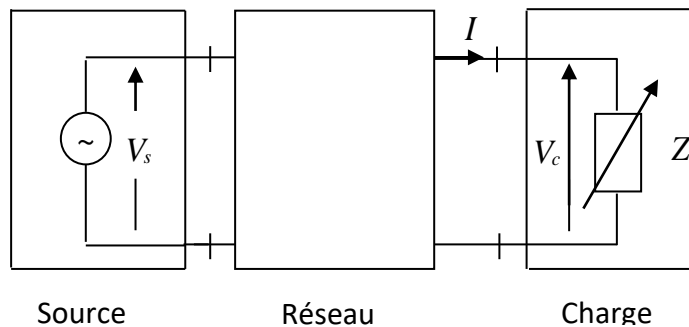


Fig. 1 : Une charge variable alimentée à travers un réseau par une source de tension

La puissance active absorbée par la charge est donc :

$$P_c = V_c I \cos \varphi = \frac{V_s^2 \cos \varphi}{\frac{X^2}{Z} + Z + 2X \sin \varphi}$$

La puissance maximale  $P_{cmax}$  transmise par la source, pour  $X$  fixe et  $Z$  variable, tout en conservant un déphasage  $\varphi$  constant, est obtenue par le principe de transfert maximal de puissance ou d'adaptation d'impédance, pour  $Z = X$  :

$$P_{cmax} = \frac{V_s^2 \cos \varphi}{2X(1 + \sin \varphi)}$$

On met ainsi en évidence l'existence d'une limite de puissance transmissible par un réseau. Les courbes de la Fig. 5.2 montrent l'évolution des trois grandeurs (courant, tension, puissance active), exprimées en valeur réduite, lorsque la charge croît (c'est à dire lorsque l'impédance  $Z$  diminue, ou autrement dit, lorsque l'admittance  $Y = 1/Z$  augmente). On constate, au départ, la puissance active croît rapidement, avec le courant pour augmenter, ensuite, de moins en moins tout en passant par un maximum puis diminue graduellement. Au-delà du maximum, en effet, la chute de tension dans le réseau provoquée

par l'appel de courant fort devient très importante et l'augmentation de  $I$  ne suffit pas à compenser la diminution de  $V_c$  dans l'expression de  $P_c$ . Pour  $Z = X$ , la tension limite correspondante au transfert maximal de puissance  $P_{cmax}$  sera :

$$V_{crit} = \frac{V_s}{\sqrt{2(1 + \sin\varphi)}}$$

$V_{crit}$  est la tension critique ou limite, correspondante au point critique M, au-delà duquel il devient impossible de faire transiter plus de puissance vers la charge. Ces notions de puissance maximale transmissible et de tension critique peuvent, également, être mises en évidence par la courbe de la Fig. 5.3. Cette dernière représente l'évolution de la tension  $V_c$  aux bornes de la charge en fonction de la puissance absorbée.

L'expression de  $P_{cmax}$  montre, entre autres, que :

- Plus la tension d'exploitation  $V_s$  est haute , plus la puissance maximale transmissible  $P_{cmax}$  est grande; d'où l'intérêt d'exploiter avec un plan de tension le plus haut possible.
- Plus l'impédance  $X$  du réseau est faible, plus la puissance maximale transmissible  $P_{cmax}$  est grande; d'où l'intérêt d'avoir un réseau, suffisamment, dimensionné et d'exploiter avec le maximum de lignes disponibles.
- Plus  $\varphi$  diminue, c'est-à-dire, plus la compensation de la charge augmente (grâce à l'adjonction de condensateurs), plus la puissance transmissible croît ; d'où l'intérêt de compenser au maximum et au plus près des charges, l'énergie réactive qu'elles consomment.

Les transits d'énergie réactive sont, principalement, dus :

- à la consommation des charges, caractérisée par le  $tg\varphi$  des récepteurs, très variable selon le type des récepteurs;
- aux éléments du réseau, principalement, les lignes qui peuvent fournir ou absorber de la puissance réactive selon que la puissance transitée est inférieure ou supérieure à la valeur caractéristique.

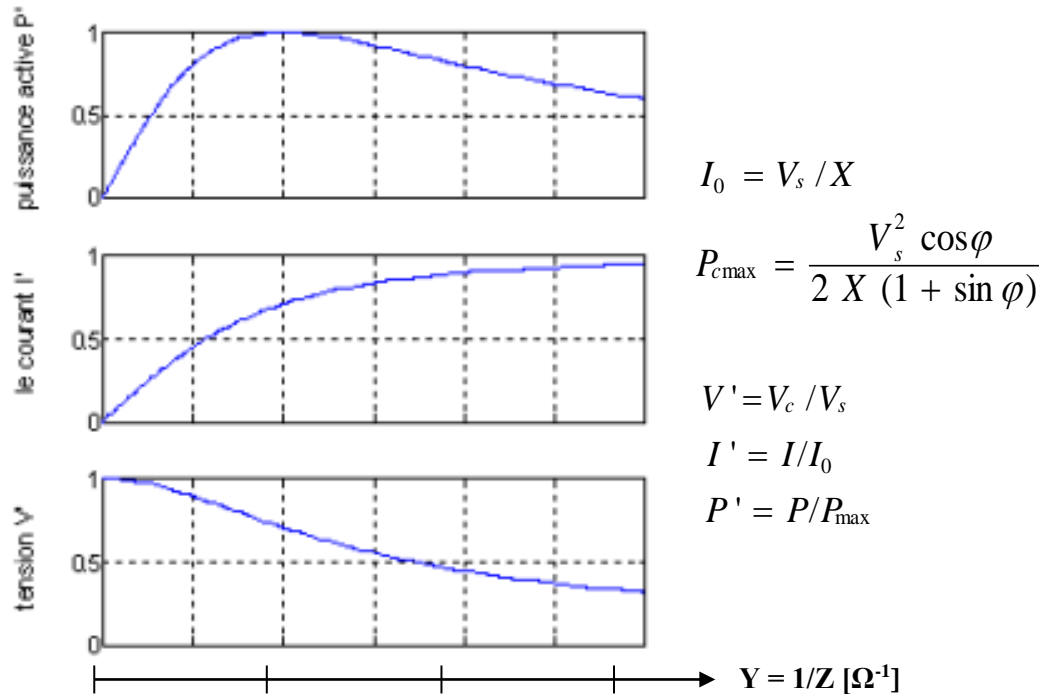


Fig. 5.2 : Variation des grandeurs électriques aux bornes de la charge en fonction de son admittance Y

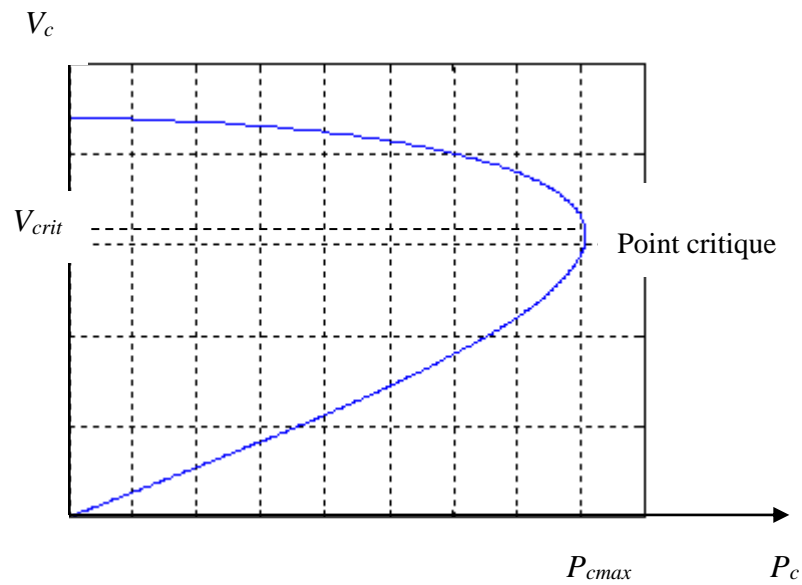


Fig. 5.3: Evolution de la tension aux bornes de la charge en fonction de la puissance fournie

## 4 Classification des modes de réglage

### 4.1 Selon le lieu de réglage

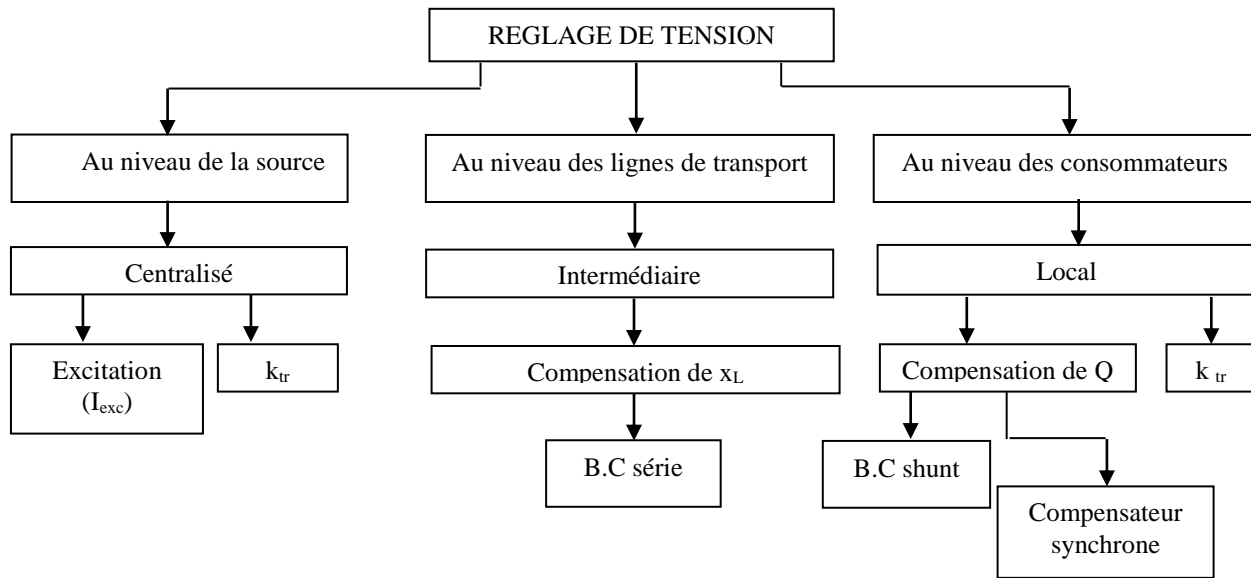


Fig.5.4 : Classification du mode de réglage selon le lieu de réglage

$I_{exc}$  : Courant d'excitation

$k_{tr}$  : Rapport de transformation du transformateur réglable

B.C : Batterie de condensateurs

### 4.2 Selon la continuité de réglage

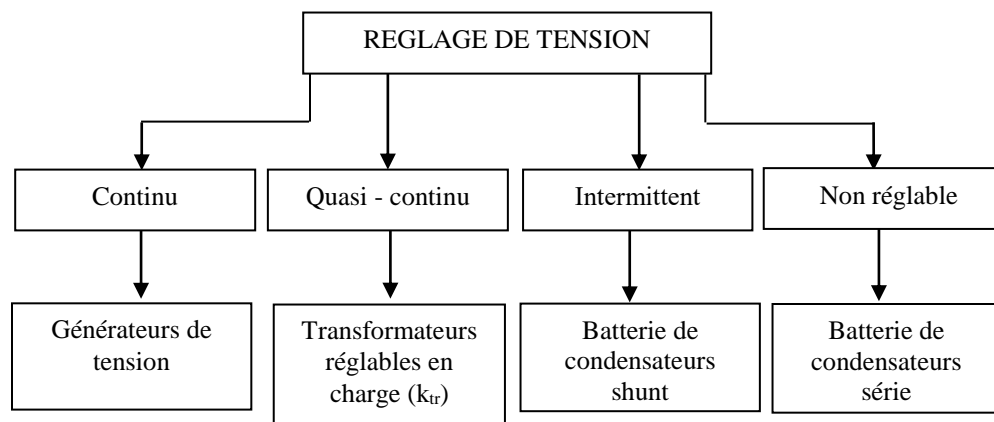


Fig. 5.5 : Classification du mode de réglage selon la continuité de réglage

#### Remarque

Le réglage central se fait à l'aide des régulateurs des générateurs et des prises de transformateurs qui se trouvent au début de la ligne. Ce réglage n'est, généralement, pas commode pour tous les points du système.



### Exemple

La Fig. 5.6 caractérise la desserte de 2 usagers A et B par deux lignes de longueurs différentes  $L_A$  et  $L_B$  ( $L_A > L_B$ ) où les chutes de tensions respectives sont :  $\Delta U_A = U_1 - U_A$  et  $\Delta U_B = U_1 - U_B$ . Parfois, on peut arriver à des situations où le réglage central devient impossible. Citons, par exemple, le cas où :

$$U_A = U_1 - \Delta U_A < U_{min,adm}$$

$$U_B = U_1 - \Delta U_B > U_{min,adm}$$

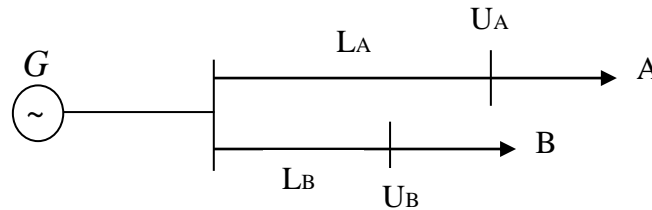


Fig.5.6 : Desserte de 2 usagers par deux lignes de longueurs différentes

Dans ce cas, une augmentation de  $U_1$  peut satisfaire l'utilisateur A, mais va, certainement, déranger l'utilisateur B. Dans le cas contraire, c'est l'utilisateur A qui va être perturbé et l'utilisateur B va être satisfait.

Le réglage central n'est possible que si :

$$U_A = U_1 - \Delta U_A > U_{min,adm}$$

$$U_B = U_1 - \Delta U_B < U_{min,adm}$$

$$\Delta U_A - \Delta U_B < U_{max,adm} - U_{min,adm} = \text{gamme ou plage de réglage}$$

En conclusion, le réglage central n'est possible que si la différence entre les chutes de tension des usagers ne dépasse pas la gamme de réglage.

## 5 Méthodes générales de réglage de tension

L'examen des paramètres intervenant dans l'équation de la chute de tension montre qu'il existe plusieurs façons pour maintenir la tension  $U_2$  constante.

- Augmenter la tension de départ  $U_1$  ;
- Installer des batteries de condensateurs aux bornes des usagers pour fournir  $Q$  ;
- Diminuer la réactance de la ligne  $X$  ;
- Faire un réglage par tension additionnelle ;

### 5.1 Chaîne de réglage de la tension

La chaîne de réglage de la tension présentée dans la Fig. 5.7 est constituée par l'ensemble des moyens permettant de contrôler la tension en tout point du réseau, depuis les groupes de production jusqu'aux appareils d'utilisation.

Le contrôle de la tension présente deux aspects : assurer dans l'espace et dans le temps que la valeur de la tension reste, pour chaque niveau (THT, HT, MT et BT), dans les plages admissibles.

Or, on sait que les exigences en matière de qualité de la tension ne sont pas les mêmes pour les réseaux de transport et de distribution. Ce découplage des besoins justifie donc l'implantation de moyens de réglage de la tension entre ces deux types de réseaux.

Ces moyens, constitués de régleurs en charge sur les transformateurs, permettront de maintenir la tension de distribution sensiblement constante, quels que soient les écarts constatés sur la tension du réseau de transport, et de régler cette dernière avec souplesse de façon à assurer un bon fonctionnement du système électrique.

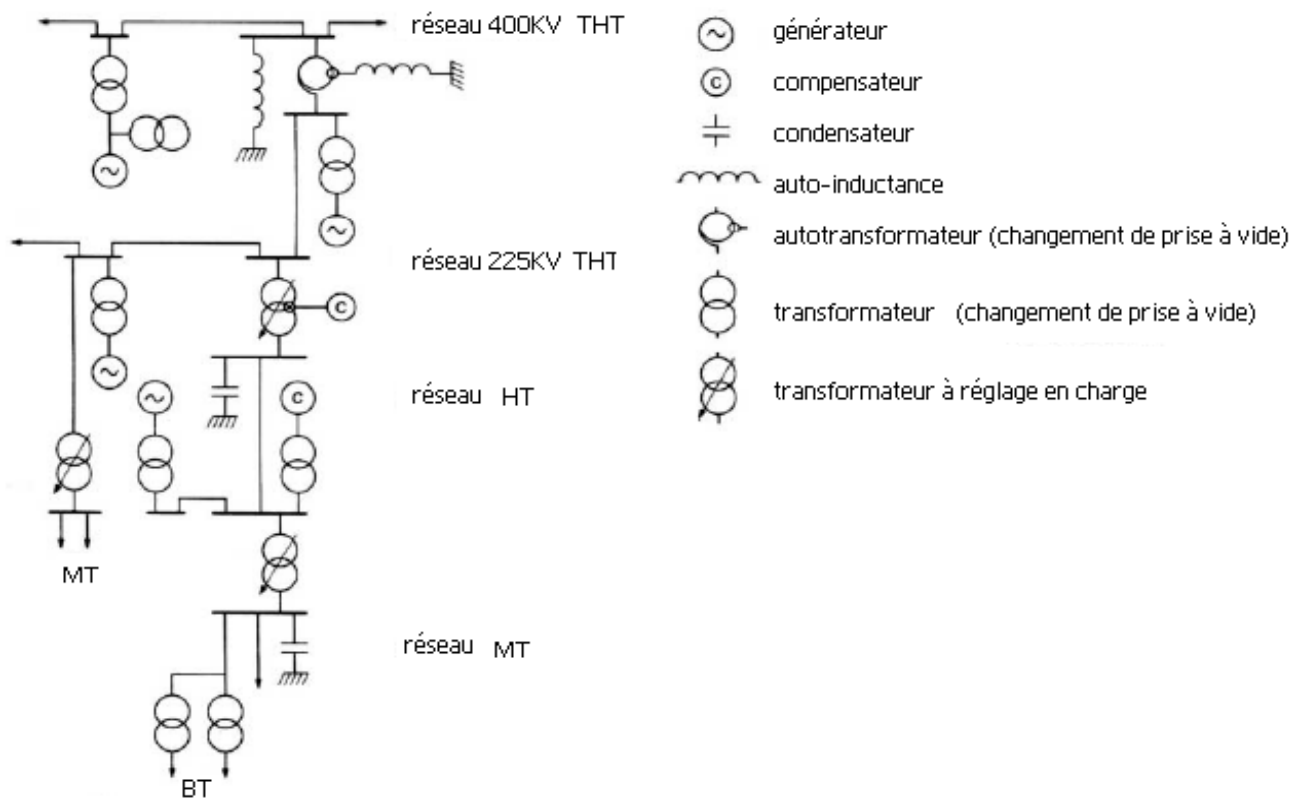


Fig. 5.7 : Organisation générale du réglage de la tension et de la compensation de la puissance réactive

## 5.2 Réglage par augmentation de la tension de départ

### 1) Réglage de la tension dans les centrales

La variation de la tension aux bornes des générateurs est possible suite au réglage du courant d'excitation. Selon le principe de fonctionnement d'un générateur et selon son régime, on peut régler la tension, la diminuer ou l'augmenter, tout en maintenant sa puissance active constante.

Dans le cas général, le réglage central de la tension aux jeux de barres de la source ne satisfait pas le niveau de tension admissible (surtout lorsque la charge est maximale) aux bornes des récepteurs. On utilise dans ce cas les méthodes de réglage local.

## 2) Transformateurs avec réglage en charge

Ces transformateurs sont très utilisés dans les réseaux de transport. Ils se distinguent par leurs schémas, la construction et les dispositifs de réglage. Ces derniers permettent la compensation des chutes de tension par l'introduction d'une tension additionnelle au départ sans aucune interruption de service. Leurs prises fonctionnent automatiquement par les régulateurs de tension ou manuellement.

La Fig. 5.8 montre le schéma de principe. Les chiffres 1, 2, 3 et 4 caractérisent les interrupteurs. B et  $W_0$  sont, respectivement, la bobine variable et le sélecteur de charge. Le rôle de la bobine est de limiter le courant de court-circuit entre les prises. Elle sert aussi comme un diviseur de tension entre les prises paires et impaires. Les manœuvres de passage entre une prise et une autre se font chronologiquement comme suit : Tous les interrupteurs sont, au départ, ouverts sauf une prise  $m$ . Pour le passage d'une prise  $m$  à une prise  $n$ , on doit fermer la prise  $n$  puis on ouvre la prise  $m$ .

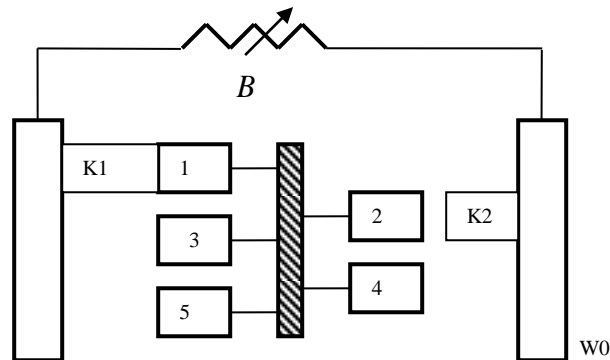


Fig. 5.8 : Transformateur avec réglage en charge

### 5.3 Réglage par injection de la puissance réactive

Si la chute de tension  $\Delta U = U_1 - U_2$  est maintenue constante, on peut écrire :

$$Q_2 = \frac{U_2 \Delta U - P_2 R}{X} = K - \frac{R}{X} P_2$$

Le contrôle de  $Q_2$  entraîne le réglage de  $U_2$ . Ce contrôle se fait par fourniture de  $Q$  à la fin de la ligne. Il est dit réglage par injection de puissance réactive  $Q$ . Cette technique repose sur le principe de production ou d'absorption de  $Q$  en certains points du réseau. Les moyens utilisés sont :

- Les compensateurs synchrones ;
- Les compensateurs shunts ;
- Les réacteurs ;
- Les FACTS « Flexible AC Transmission Systems ».

### 1) Compensateurs synchrones « C.S »

La Fig. 5.9 montre le schéma équivalent et le diagramme de puissance d'une machine synchrones. L'équation de fonctionnement simplifiée est donnée par :

$$E_q = U_{cs} + jX_d I$$

La f.e.m  $E$  dépend, évidemment, du courant d'excitation  $I_{ex}$ . La tension  $U$  est imposée par le réseau de puissance infinie. Les différents modes de fonctionnement de la machine sont déterminés par la position du vecteur courant  $I$ .

En régime à vide, la machine synchrone est dite compensateur synchrone. Ce régime est caractérisé par le déplacement du point C sur l'axe  $OQ$  (fonctionnement en moteur avec un arbre qui tourne à vide). Le compensateur synchrone fournit ou absorbe de l'énergie réactive au réseau selon qu'il est surexcité ou sous-excité.

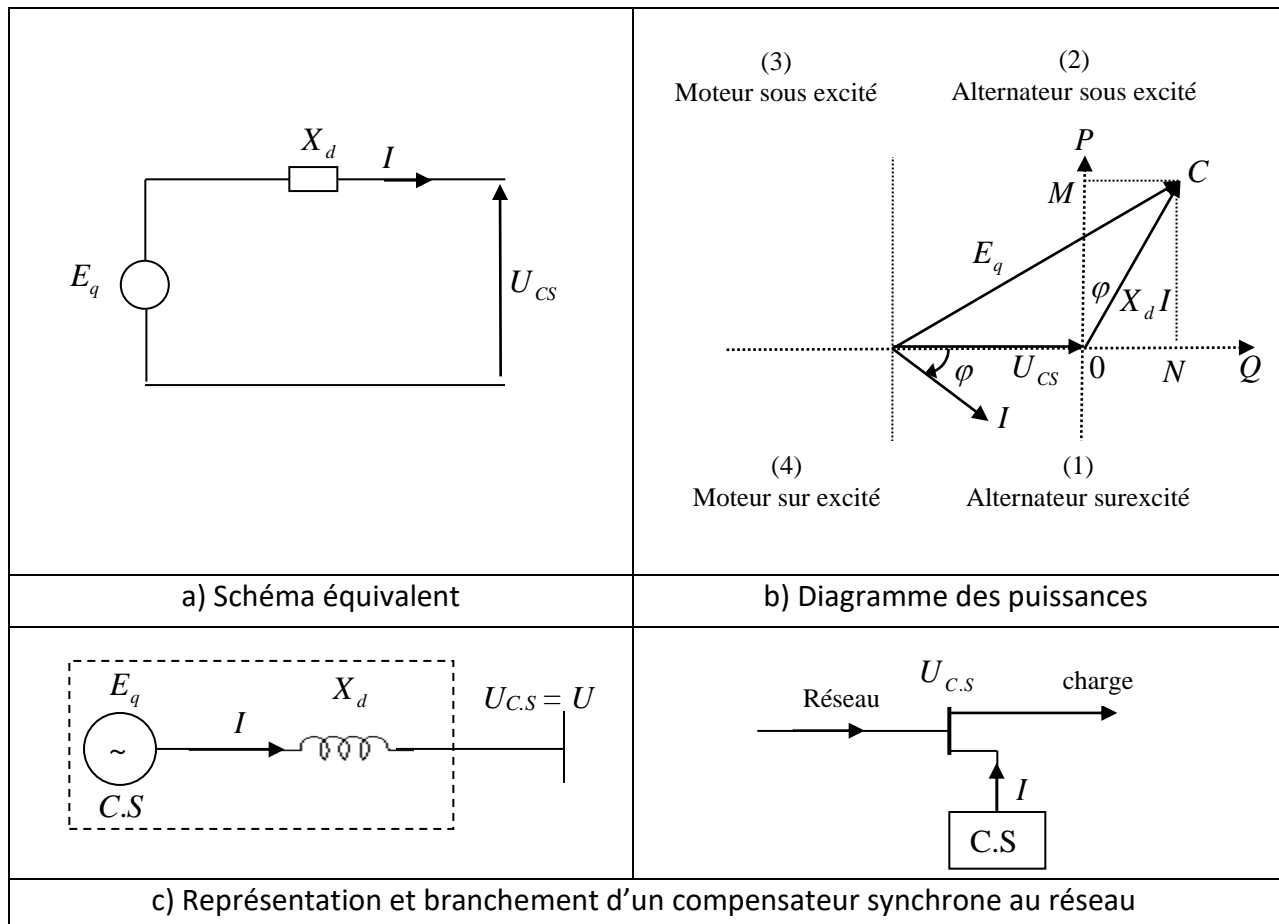


Fig. 5.9 : Compensateur synchrone

Le branchement du C.S au réseau met en interaction la f.é.m  $E_q$  avec la tension du réseau  $U$  ( $U=U_{cs}$ ). Leur différence définit le sens du courant et sa valeur dans la réactance  $X_d$ :

$$I = \frac{E_q - U_{cs}}{X_d}$$

$E_q$  : f.é.m du compensateur C.S. ;  $X_d$  : réactance longitudinale du C.S. ;  $U_{cs}$  : tension du C.S.

Du fait que la tension du réseau est constante, le courant résultant  $I$  dans le circuit varie avec la variation de  $E_q$ . La variation de  $E_q$  (pour un but de réglage) est obtenue par la variation du courant d'excitation rotorique  $I_{ex}$ .

Si le courant d'excitation est tel que  $E_q = U_{cs}$ , alors  $I = 0$ . En désignant, pour ce cas  $I_{ex} = I_{0ex}$ , on peut définir :

$$I_{ex} \neq I_{0ex} \Rightarrow E_q = U_{cs} \Rightarrow I \neq 0$$

$$I_{ex} < I_{0ex} \Rightarrow E_q < U_{cs} \Rightarrow I < 0 \text{ (sous-excitation)}$$

$$I_{ex} > I_{0ex} \Rightarrow E_q > U_{cs} \Rightarrow I > 0 \text{ (sur-excitation)}$$

La puissance réactive du compensateur synchrone est définie par :

$$Q_{cs} = \frac{E_q - U_{cs}}{X_d} U_{cs}$$

## 2) Condensateurs shunts

Leur rôle est de compenser l'énergie réactive qui peut être utilisée pour améliorer le facteur de puissance et régler en même temps la tension chez les usagers. Leur puissance varie de quelques kVAr à plusieurs dizaines de MVar. Ces puissances sont obtenues par le couplage de plusieurs unités. Ainsi, on forme une batterie de condensateurs. Leur faculté de fonctionnement en batterie ou en unité de faible puissance et leur facilité de montage près des charges les rendent très utiles comme système de compensation et de réglage pour les réseaux de distribution et de transport.

La chute de tension avec condensateur shunt s'exprime par :

$$\Delta U' = \frac{RP + (Q - Q_c)X}{U_2} = \Delta U - \frac{Q_c X}{U_2} = \Delta U - \delta U$$

La contribution du condensateur shunt  $\delta U$  correspond à une réduction de la chute de tension initiale  $\Delta U$ . L'avantage du condensateur shunt est de fournir l'énergie réactive localement aux points de consommation. Ainsi, on évite son transit le long des réseaux de transport. Ce type de compensation est utilisé pour les usagers qui fonctionnent au moins sur une période de 60% du temps total des heures de travail et nécessite au moins 4kVAr. Les normes interdisent la surcompensation pendant les périodes de faibles charges et imposent que la puissance permanente branchée des condensateurs soit inférieure à la puissance réactive à vide du transformateur.

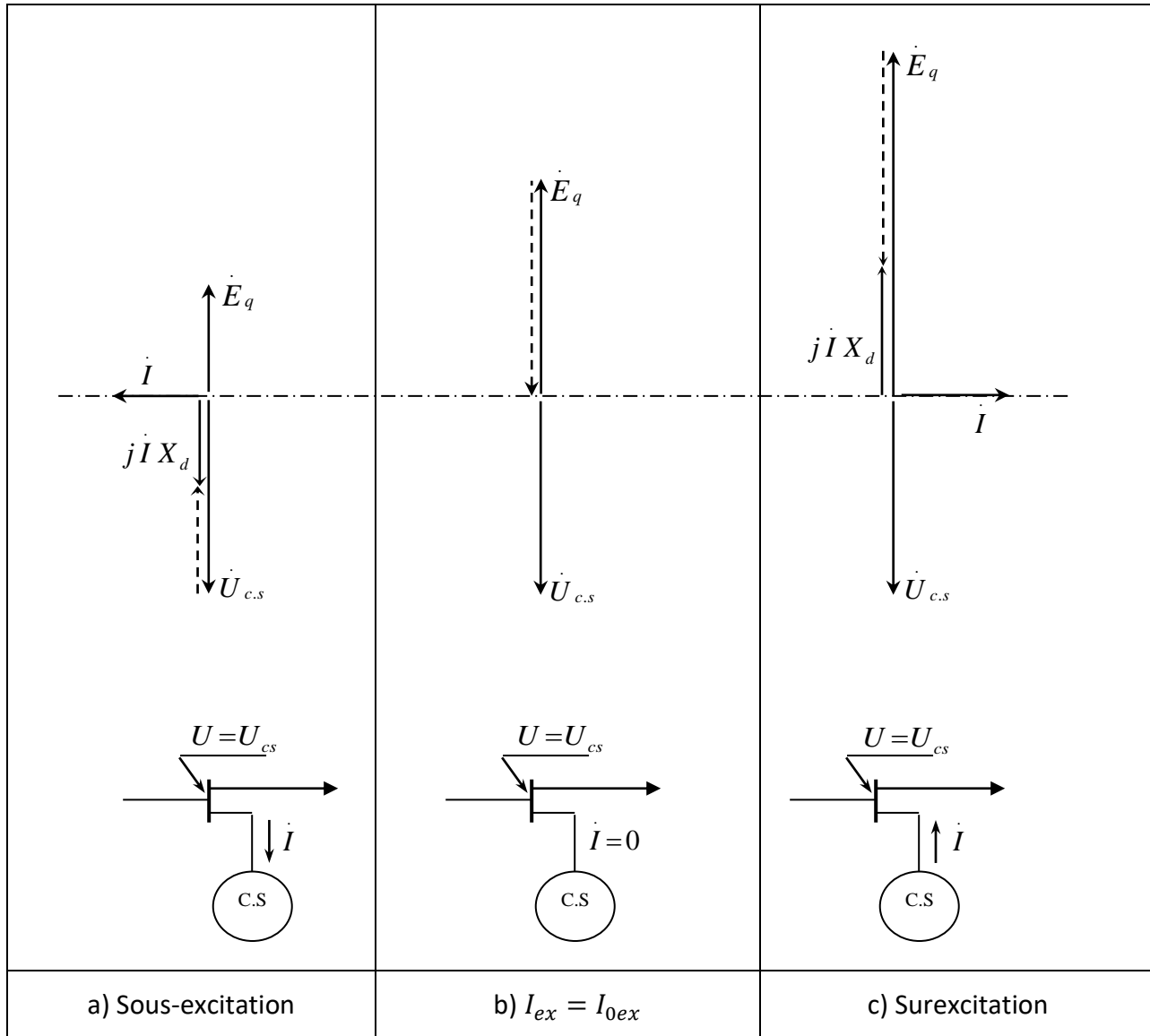


Fig. 5.10 : Sens du courant I en fonction de la différence  $E_q - U_{cs}$

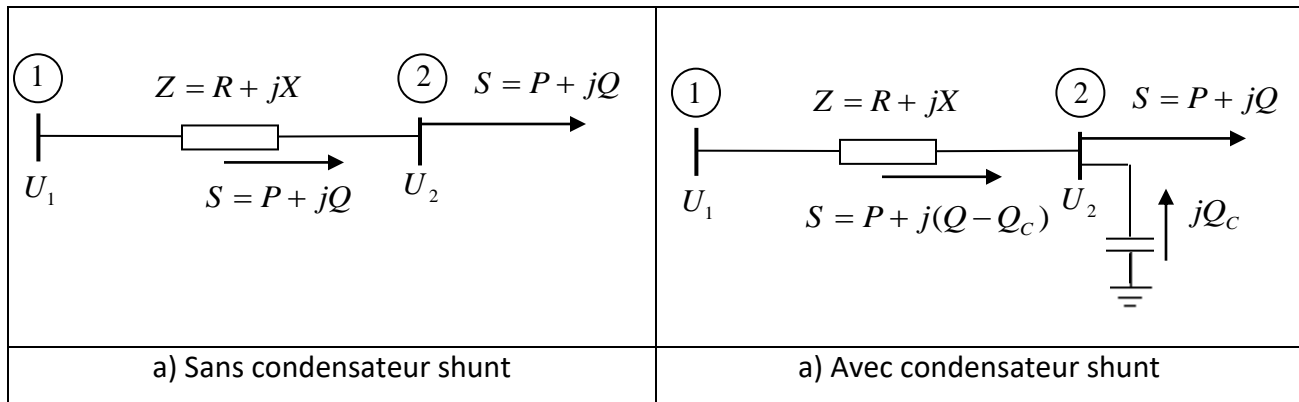


Fig. 5.11 : Réseau radial avec et sans condensateur shunt

### 3) Réactances

Les bobines sont utilisées pour absorber de la puissance réactive fournie pendant les heures de faibles charges par les lignes longues de HT, THT et par les réseaux souterrains importants. Les lignes longues et les câbles se comportent comme une batterie de condensateurs de grandes puissances.

Aux heures de faibles charges, la puissance réactive fournie par la ligne ou le câble est absorbée par les réacteurs installés aux points appropriés au réseau. La Fig. 5.12a montre les connexions du circuit de réglage. La construction du noyau de ces réacteurs est représentée par la Fig. 12b. Cette construction est semblable à celle d'un transformateur de puissance à 6 noyaux. La modification de la polarisation rend possible le réglage continu du courant réactif absorbé par la bobine de la valeur zéro à la valeur maximale.

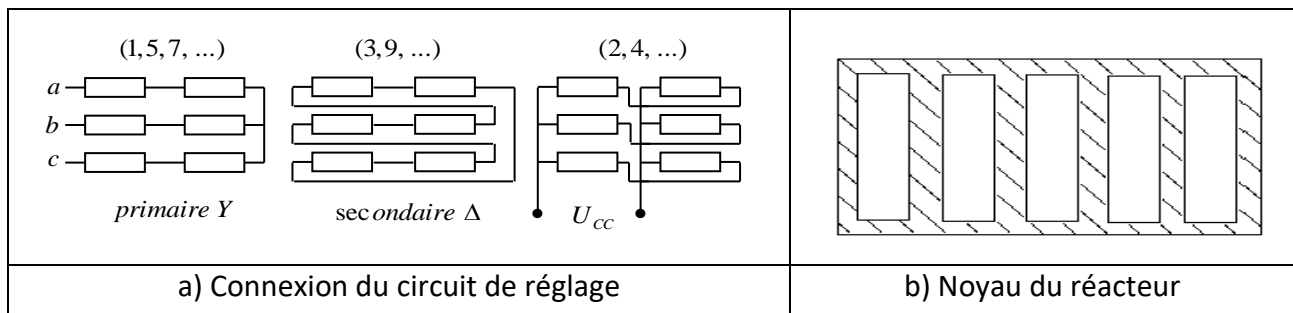


Fig. 5.12 : Réacteur et circuit de réglage

### 4) Réglage par les sources statiques de la puissance réactive

En plus des moyens, ci-dessus, décrits de réglage de la tension, on peut ajouter d'autres installations spéciales, utilisant les semi-conducteurs. Les installations sont réglables et dites sources statiques de puissance réactive ou compensateurs statiques à semi-conducteurs. Ces installations sont utilisées en HT et pour des grandes puissances. Le principe de réglage se base sur la variation de la courbe instantanée du courant des branches réglables du compensateur, en faisant varier les intervalles de conduction des semi-conducteurs insérés.

Ces compensateurs sont, actuellement, largement utilisés. Il se développent encore grâce au développement de la technologie des semi-conducteurs. En fait, leur principe de réglage peut être continu, discontinu (discret) ou mixte (combiné) :

- Le contrôle continu consiste à agir sur la courbe instantanée du courant de la branche réglable du compensateur, en faisant varier les intervalles de conduction (ou de non conduction).
- Le contrôle discret consiste à brancher ou débrancher des réactances (sections) des branches du compensateur.
- Le contrôle combiné utilise les deux modes dans la même procédure.

Le fonctionnement de ces compensateurs peut être défini, globalement, par les Fig. 5.13 à 5.15.

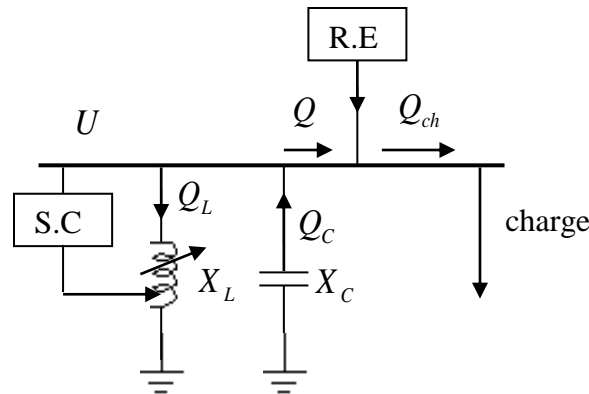


Fig. 5.13 : Compensateur statique ( $X_L$  et  $X_C$  en parallèle)

R.E : Réseau électrique, S.C : Système de commande

La puissance réactive du compensateur  $Q$  peut être inductive ou capacitive.

$$Q_L = \frac{U^2}{X_L}$$

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C}$$

$$Q = \pm(Q_L - Q_C)$$

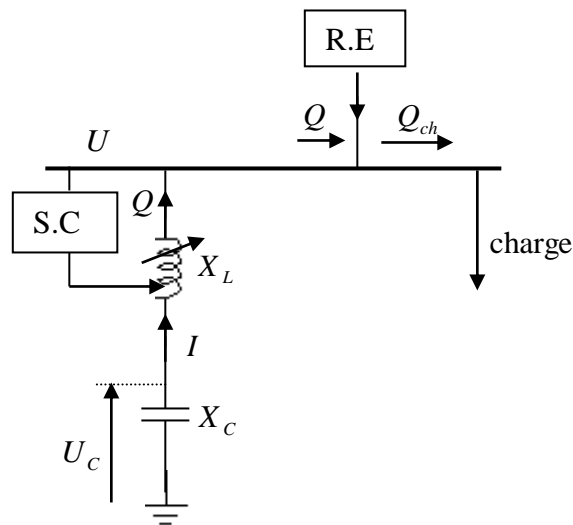


Fig. 5.14 : Compensateur statique ( $X_L$  et  $X_C$  en série)



$$Q = \frac{U^2}{X} = \frac{U^2}{X_C(1-m)} = \frac{Q_{CN}}{1-m} \Rightarrow Q^* = \frac{1}{1-m} \quad \text{avec } m = \frac{X_L}{X_C}$$

$$X = X_C - X_L = X_C \left(1 - \frac{X_L}{X_C}\right) = X_C(1-m)$$

$$U_C = IX_C = \frac{U}{X} X_C = \frac{U}{1-m} \Rightarrow U_C^* = \frac{1}{1-m} = Q^*$$

Pour  $m=1$ , le circuit du compensateur rentre en résonance. Pour cette raison, le passage de la production à la consommation de la puissance réactive est impossible.

Dans les schémas des Fig. 5.13 et 5.14, la variation des réactances est contrôlée discrètement. Par contre, dans le schéma de la fig. 5.15, le contrôle du courant inductif s'effectue par le bloc à thyristor en tête-bêche (contrôle continu).

Par rapport aux schémas 5.13 et 5.14, le réglage, dans ce cas, est plus rapide et les dispositions de réglage sont plus larges. Mais, ce dernier mode présente l'inconvénient de produire des courants harmoniques pour lesquels on doit prévoir des moyens d'atténuation.

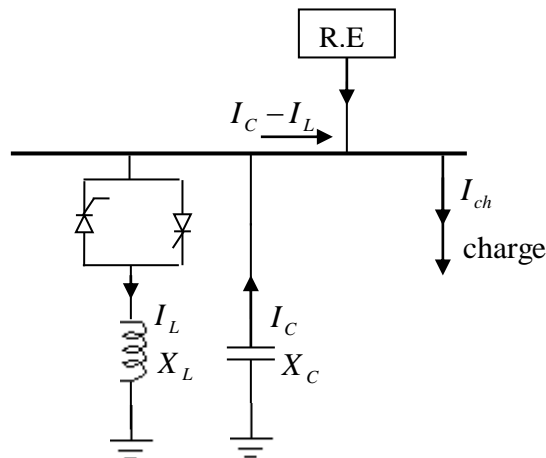


Fig. 5.15 : Contrôle continu par le bloc à thyristor en tête – bêche

### 5.4 Réduction de la réactance de la ligne

La compensation série consiste à placer, sur chaque phase des condensateurs en série avec l'impédance de phase  $Z$  de la ligne comme le montre la Fig. 5.16. Cette compensation entraîne une réduction de  $Z$  comme suit :

$$Z = R + j(X - X_c) \quad \text{avec } X_c = 1/\omega C$$

Ce mode de réglage modifie en même temps le module et l'argument de  $Z$  de sorte qu'on peut écrire :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X - X_c}{R}$$

La chute de tension sera donc donnée par :

$$\Delta U = \frac{PR + Q(X - X_c)}{U_2}$$

Ce type de compensation peut assurer une chute de tension nulle telle que :  $U_1 = U_2$ . Certaines précautions doivent être prises quant à son utilisation. Il provoque certains fonctionnements anormaux tels que :

- En régime de court-circuit, le courant à travers la batterie de condensateurs BC devient très grand et la tension du condensateur risque de dépasser la valeur de claquage. Pour éviter cet incident, le système de compensation est équipé de moyens automatiques de protection appropriée.
- Amorçage hypo-synchrone des moteurs : il est, généralement, considéré non dangereux.
- Ferro-résonance: On doit limiter le rapport  $X_c/X$  pour éviter ses risques dans les réseaux MT.

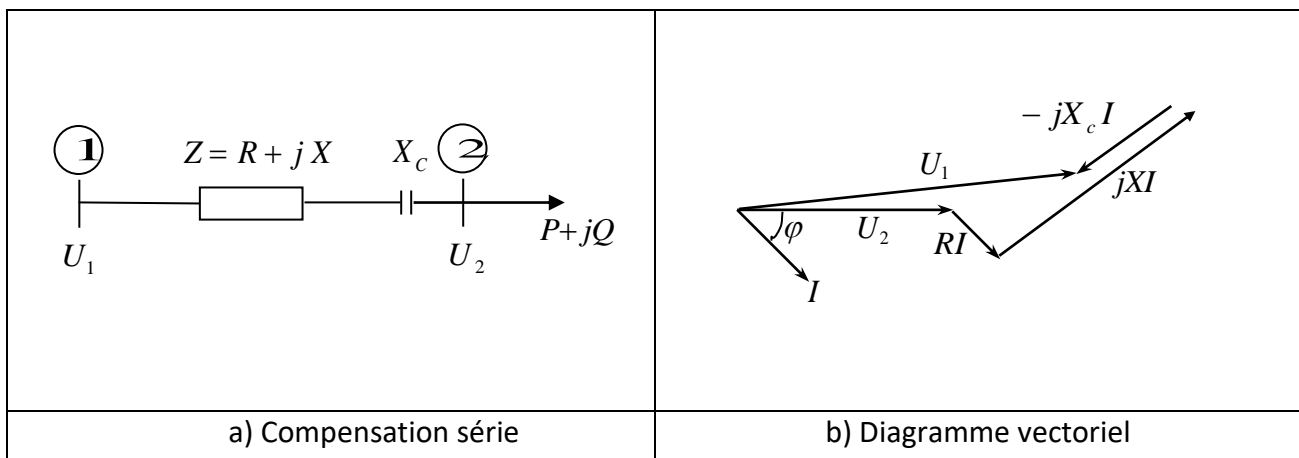


Fig. 5.16 : Branchement et représentation des condensateurs en série

Cependant, les condensateurs séries ont prouvé un bon comportement en service dans les réseaux de transport ( $U_1 > 220kV$ ). Ils sont utilisés surtout pour l'augmentation de la capacité de transport et l'amélioration de la stabilité. Les batteries comportent plusieurs centaines d'éléments (jusqu'à 6000). Leur puissance est de l'ordre de 150 à 600MVar.

### 5.5 Réglage par tension additionnelle

La Fig. 5.17 montre le schéma de ce mode de réglage. Il s'agit d'insérer un dispositif de réglage dans le poste de transformation MT/BT du côté des usagers de sorte qu'on puisse écrire :

$$U_3 = U_2 + U_r$$

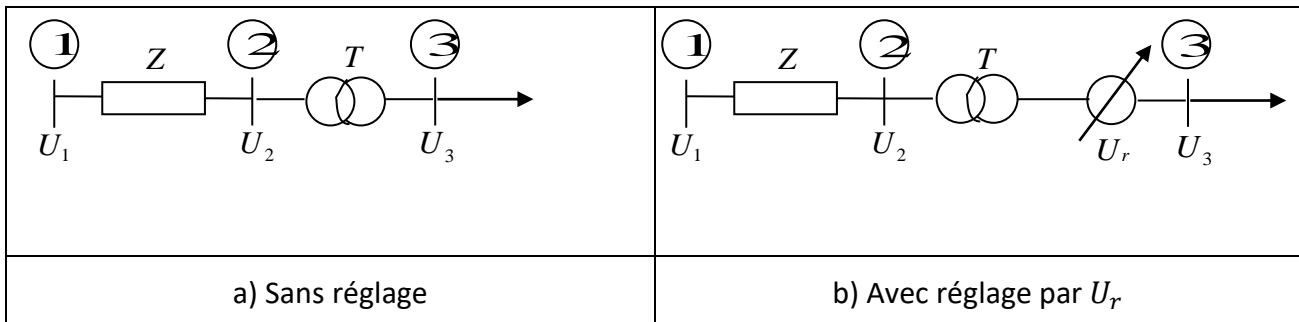


Fig. 5.17 : Réglage par tension additionnelle