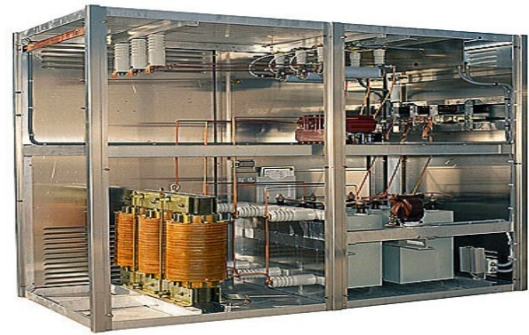


# Cours : Compensation d'Énergie Réactive



Mme AITOUARET Née CHEKKAL Samira

# Table des matières



<b>Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>I - Chapitre 4 :Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique (F.A.C.T.S)</b>	<b>4</b>
1. Introduction .....	4
2. Dispositifs FACTS .....	5
3. Compensateur statique de puissance réactive (SVC) .....	6
4. Inductance contrôlée par thyristors TCR .....	7
5. Calcul de l'impédance équivalente du TCR .....	8
6. Calcul de la puissance réactive fournie par le SVC .....	9
7. AFC .....	9
8. Compensateur Statique Synchronne (STATCOM) .....	9
9. Compensateur série .....	11
10. Condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC) .....	11
11. Calcul de réactance du TCSC .....	12
12. SSSC .....	12
13. Compensateurs mixtes (série- parallèle) .....	13
14. PST .....	13
15. IPFC (Interline Power Flow Controller): Controller de transit de puissance .....	13
16. Régulateur de puissance inter phase IPC .....	13
<b>II - Exercice</b>	<b>14</b>
<b>III - Activité d'auto-évaluation</b>	<b>16</b>
<b>Solution des exercices</b>	<b>17</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>18</b>

# *Objectifs*



L'apprenant doit être capable de :

- Prendre connaissance des principales solutions pour l'amélioration de la qualité de la tension ;
- Acquérir des notions sur les moyens modernes de compensation de l'énergie réactive.

# Chapitre 4 :Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique (F.A.C.T.S)

Introduction	4
Dispositifs FACTS	5
Compensateur statique de puissance réactive (SVC)	6
Inductance contrôlée par thyristors TCR	7
Calcul de l'impédance équivalente du TCR	8
Calcul de la puissance réactive fournie par le SVC	9
AFC	9
Compensateur Statique Synchrones (STATCOM)	9
Compensateur série	11
Condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)	11
Calcul de réactance du TCSC	12
SSSC	12
Compensateurs mixtes (série- parallèle)	13
PST	13
IPFC (Interline Power Flow Controller): Contrôleur de transit de puissance	13
Régulateur de puissance inter phase IPC	13

## 1. Introduction

Le maintien de la stabilité et le réglage de la tension à un niveau admissible restent toujours un problème préoccupant et nécessite un suivi quotidien de la part des gestionnaires des réseaux électriques. Pour y remédier, les dispositifs FACTS apportent une solution efficace et fiable pour faire face à cette situation. Ce cours sera focalisé sur l'étude de l'impact de deux dispositifs FACTS sur un réseau électrique.

## 2. Dispositifs FACTS

Les FACTS (Flexible Alternatif Current Transmission System) regroupent l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et, plus particulièrement, des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor GTO. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques.

La puissance active  $P_{12}$  transitée entre deux réseaux de tensions  $V_1$  et  $V_2$  présentant un angle de transport  $\delta$  (déphasage entre  $V_1$  et  $V_2$ ) et connectés par une liaison d'impédance  $X$  est représentée dans la figure 16 et est donnée par l'équation de la figure 2 :

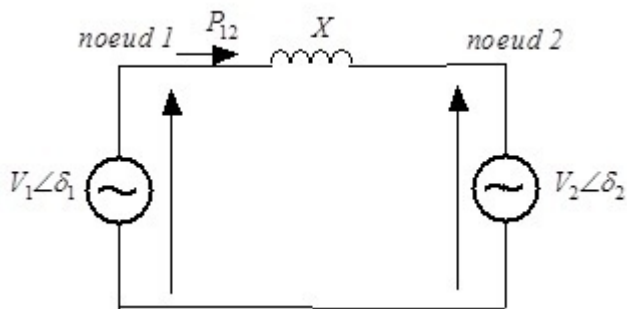


Fig.IV.1 : Schéma simple d'un système de transmission

Tel que :

$V_1$  : Tension à la source ;

$V_2$  : Tension à la réception ;

$\delta$  : Déphasage entre les tensions aux bornes de la ligne ;

$X$  : Réactance de la ligne.

Il existe quatre grandes familles d'éléments FACTS qui peuvent être représentées par la figure 1 et résumées comme suit :

Les compensateurs de type shunt ;

Les éléments en série ;

Les déphaseurs régulateurs de tension ;

Le contrôleur universel de transit de puissance (UPFC).

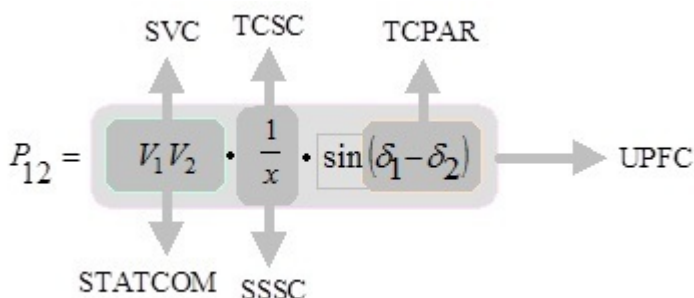


Fig. IV.2 : Effet des dispositifs sur les paramètres déterminants la transmission de puissance

### 3. Compensateur statique de puissance réactive (SVC)

Le SVC est un dispositif FACTS de lière génération connecté en shunt à la ligne et qui permet la génération ou l'absorption de l'énergie réactive et cela pour maintenir un niveau de tension désiré. Il est le plus souvent constitué de trois inductances câblées en triangle et réglées indépendamment par un variateur de courant à thyristors. Cela permet de rééquilibrer le réseau par une action différenciée sur chacune des phases. On place un banc triphasé de condensateurs commutables en gradins pour compléter ce dispositif.

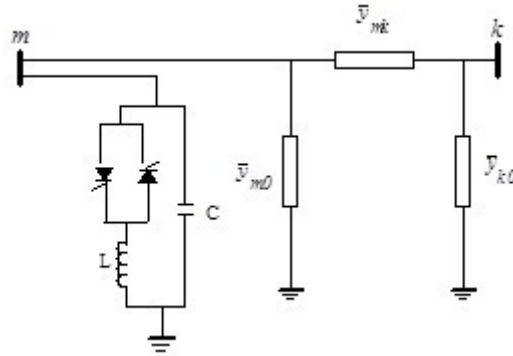


Fig.IV.3 : Insertion d'un SVC à la ligne

La réactance du SVC est donnée par l'expression suivante :

$$X_{\text{SVC}}(\alpha) = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha) - \pi \frac{X_L}{X_C}}$$

*math*

Le SVC constitué par une combinaison de trois dispositifs :

TCR : Thyristors controlled Reactor

TSC : Thyristors Switched Capacitor

AFC: Alternative Filter Current

Destinés à commander l'énergie réactive absorbée ou injectée en un nœud du réseau, en vue de régler la tension au ce nœud

## 4. Inductance contrôlée par thyristors TCR

Un TCR (Thyristors Controlled Reactor) est composé d'une inductance fixe mise en série avec une valve à thyristors (gradateur) d'après la figure 4, qui fait varier le courant à travers l'inductance et cela en variant l'angle d'amorçage des thyristors compris entre  $90^\circ$  et  $180^\circ$ . Le TCR est caractérisé par sa commande continue et par sa génération d'harmoniques sur le réseau.

$$V = L\omega I$$

math\_02

$$I = \beta V$$

math\_03

Avec

$$\beta = \frac{1}{L\omega}$$

math\_04

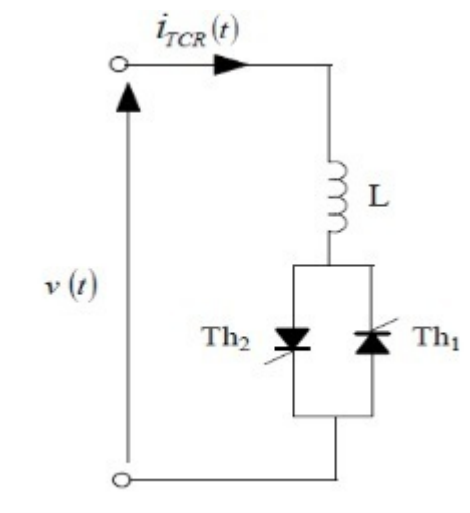


Fig IV.4: Modèle d'un TCR

## 5. Calcul de l'impédance équivalente du TCR

$$I_F = \frac{E \sqrt{2}}{2\pi f L} (1 + \cos(\alpha))$$

math\_05

Composante efficace du courant fondamental

$$I_P = \frac{E}{2\pi f L} \left(2 - \frac{\alpha}{\frac{\pi}{2}} + \frac{\sin(2\alpha)}{\pi}\right)$$

math\_06

$$X_{eq}(TCR) = \frac{E}{I_P} = \frac{2\pi f L}{2 - \frac{\alpha}{\frac{\pi}{2}} + \frac{\sin(2\alpha)}{\pi}}$$

math\_07

$$X_{eq}(TCR) = \frac{\omega L}{\frac{2}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}\right)}$$

math\_08

$$X_{eq}(SVC) = X_{eq}(TCR) \text{ en parallèle avec } X_{eq}(TSC)$$

math\_09

$$X_{svc} = \frac{\omega L}{\frac{2}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}\right) - LC \omega^2}$$

math\_10

Composante efficace du courant fondamental

 $\alpha$ : Angle de commande de TCR

L : Inductance du TCR

C : Capacité du TSC



## 6. Calcul de la puissance réactive fournie par le SVC

$$Q_{SVC} = -3\beta_{SVC} V^2$$

*math\_11*

Dimensionnement des paramètres L et C du SVC

$$Q_{Lmax} = 2Q = Q_{Cmin}$$

*math\_12*

$$X_L = \frac{U_{max}^2}{2Q} = L\omega$$

*math\_13*

$$X_C = \frac{U_{min}^2}{2Q} = \frac{1}{C\omega}$$

*math\_14*

Le dispositif AFC est destiné à atténuer les amplitudes des harmoniques de courant de rangs supérieurs.

Application du SVC

- Régulation de tension
- Amélioration de la stabilité synchrone et équilibrage dynamique des charges

## 7. AFC

Le dispositif AFC est destiné à atténuer les amplitudes des harmoniques de courant de rangs supérieurs.

Application du SVC

- Régulation de tension
- Amélioration de la stabilité synchrone et équilibrage dynamique des charges

## 8. Compensateur Statique Synchrone (STATCOM)

Un STATCOM est un convertisseur à source de tension connectée en parallèle à un réseau alternatif (transmission ou distribution), en général, par le biais d'un transformateur abaisseur. Si l'on règle l'amplitude de la tension du VSC de façon à ce qu'elle soit supérieure à la tension du réseau, une puissance réactive est fournie et augmente la tension au point de connexion. De la même façon, si l'on règle la tension du VSC à une valeur inférieure à la tension du réseau, une puissance réactive est absorbée par le VSC et la tension au point de connexion est réduite.

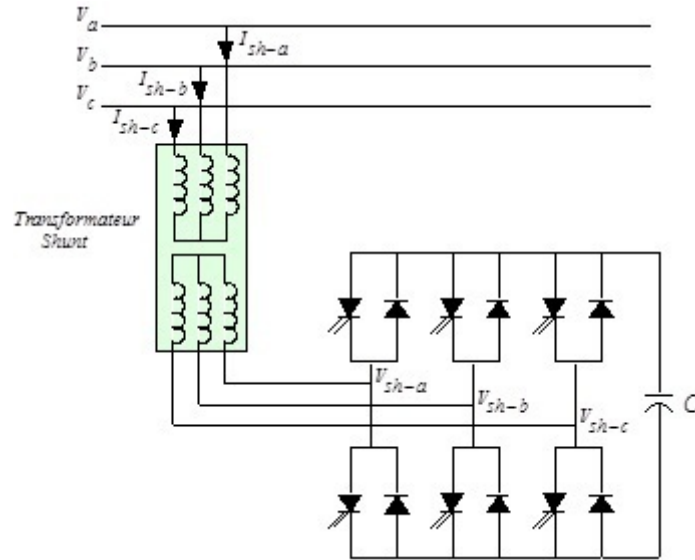


Fig.IV.5 : Compensateur Statique STATCOM

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur  $V_{sh}$  laquelle est en phase avec la tension du réseau  $V$ . Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :

Si la tension  $V_{sh} < V$  le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $-\pi/2$  par rapport à la tension  $V$  ce qui donne un courant inductif (figure 5.a).

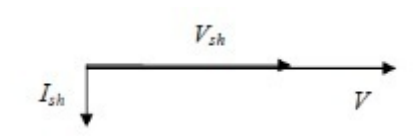


Fig IV.5.a : Courant inductif

Si la tension,  $V_{sh} > V$  le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $+\pi/2$  par rapport à la tension  $V$  ce qui donne un courant capacitif (figure 5.b).

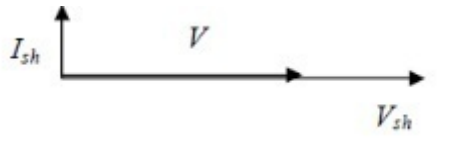


Fig.IV.5.b: Courant capacitif

Si la tension  $V_{sh} = V$ , le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

$$Q_{conv} = 3 \frac{V_R^2 - V_R V_{conv}}{X_T}$$

math\_15

Puissance réactive échangée par le réseau et le convertisseur

Si  $V_R > V_{conv}$  : l'énergie réactive du convertisseur  $Q_{conv} > 0$  implique une inductance ;

Si  $V_R < V_{conv}$  : l'énergie réactive du convertisseur  $Q_{conv} < 0$  implique un condensateur.

Cependant, le STATCOM de base engendre de nombreux harmonique qui peuvent être atténué lorsque l'onduleur est à multi-niveaux et à commande MLI, ou encore lorsqu'ils sont accompagnés de filtres.

## 9. Compensateur série

Le principe de ces compensateurs est basé sur l'insertion en série à la ligne d'une tension commandé en module et en phase. Ce qui peut influencer les chutes de tension, la stabilité de l'angle de rotation transitoire et la répartition et variation des transite d'énergie.

## 10. Condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)

Le TCSC est constitué d'une branche capacitive montée en parallèle à une bobine d'inductance contrôlée par variateur de courant à thyristors de manière à rendre continue, le réglage de la compensation capacitive ou inductive. Au-delà de la fréquence de résonance. La valeur de  $X_{eq}$  (TCSC) est variable en fonction de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet donc de régler la tension, d'influencer le transite de puissance, et d'améliorer la stabilité entre les deux TDB

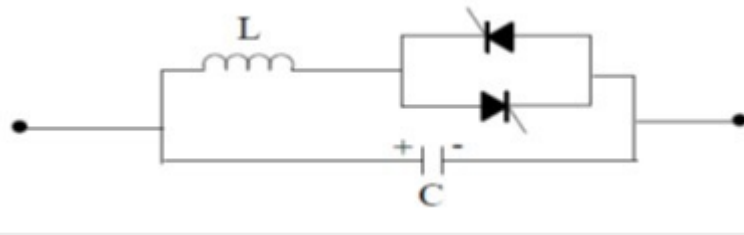


Fig.IV.6 : Topologie du condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)

$$X_{TCSC} = \frac{X_L(\alpha) X_C}{X_L(\alpha) + X_C}$$

math\_16

## 11. Calcul de réactance du TCSC

La réactance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage,  $\alpha$ , peut être calculée, en développant l'expression du courant en série de Fourier et en ne retenant que la composante. Sachant que , le courant qui traverse la bobine est en retard de par rapport à la tension tel que :

$$X_L(\alpha) = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \frac{\pi X_L}{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}$$

*math\_18*

Avec

$$U_{eff} = \frac{U}{\sqrt{2}} \text{ et } I_{eff} = \frac{U}{\sqrt{2} \pi X_L} [2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)]$$

*math\_19*

Alors

$$X_{TCSC}$$

*math\_20*

peut-être écrite sous la forme :

$$X_{eq}(TCSC) = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha) - \pi \frac{X_L}{X_C}}$$

*math\_21*

## 12. SSSC

Ce dispositif à une fonction comparable à celle du TCSC mais contrairement, il n'a pas de zone morte à la résonance parallèle et son réglage est continue, il est constitué d'un onduleur triphasé construit à base de GTO. Couplé au réseau à travers un transformateur triphasé, dont le secondaire est inséré en série à la ligne. Dans la distribution à de faible niveau de puissance, cette structure est utilisée pour atténuer les perturbations tel que les micros coupures, les baisses de tension et surtensions, les variations de fréquence, les déséquilibres... etc.

### 13. Compensateurs mixtes (série- parallèle)

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension à thyristors GTO. Connectés au réseau l'un en dérivation via un transformateur triphasé, et l'autre en série via trois transformateurs monophasés couplés en étoile au primaire. Les deux onduleurs sont interconnectés par un circuit continu comportant un condensateur de filtrage. L'onduleur en série injecte une tension alternative d'amplitude et phase contrôlable à la même fréquence que celle du réseau, cette propriété permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série.

- Contrôle de tension (la tension injectée est en phase avec celle du coté réseau).
- Contrôle de l'impédance de la ligne. (La tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne ce qui permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série).
- Contrôle de phase (amplitude et phase de la tension injectée sont calculées de manière à obtenir le même module de tension en amont et en aval de l'UPFC).

Ainsi ces trois mode de fonctionnement permettent de contrôler simultanément la tension du réseau et le transit de puissance dans celui-ci, et ce grâce à un système de commande des deux onduleurs parfaitement adopté.

### 14. PST

C'est un transformateur de régulation d'angle de phase qui utilise pour régler l'amplitude et la direction du flux d'énergie à travers les lignes de transport la variation de l'angle de charge.

Le déphasage s'obtient par l'extraction d'une tension simple sur une phase et en injectant une partie de celle-ci en série dans une autre phase.

### 15. IPFC (Interline Power Flow Controller): Controller de transit de puissance

L'IPFC est utilisé dans le cas d'un système de ligne multiples reliées à un même poste.li est formé de plusieurs DVR fournissant des compensateurs séries différents a chacun des lignes. Du continu, tous ces systèmes sont reliés à une même source. Ce dispositif permet alors de transférer de la puissance active et/ou réactive d'une ligne vers d'autres lignes selon le plan de charge exigé, ceci grâce à la variation des modules et phases des tensions injectées dans chacune des lignes.

### 16. Régulateur de puissance inter phase IPC

La nécessité de la gestion de la répartition de la puissance a poussé au développement de l'IPC (Interphase Power Controller). Il est constitué de deux impédances par phase : une inductive et l'autre capacitive, chacune liée à une unité de déphasage. L'IPC présente les avantages suivants :

- Le contrôle des transits de puissance active ;
- La limitation des courants de court-circuit ;
- Le découplage des tensions entre deux noeuds ;

L'atout majeur de l'IPC est qu'il est le seul moyen permettant d'interconnecter des réseaux tout en ne permettant pas la propagation des perturbations.

# Exercice



Série de TD

Exo n° 1;

Soit le montage SVC de la figure suivante :

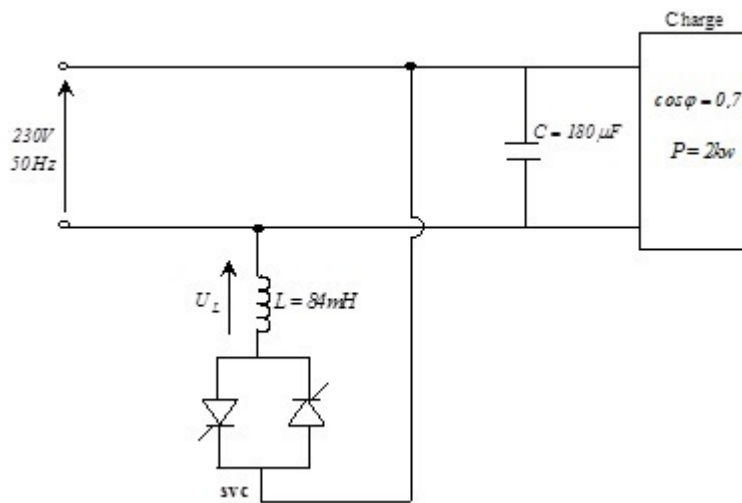


Figure 1

1. On fixe l'angle de commande du SVC  $\alpha=120^\circ$ . Calculer le facteur de puissance de l'ensemble et conclure
2. On veut ramener le facteur de puissance à 0.98, Calculer alors l'angle de commande  $\alpha$  qu'il faut imposer au SVC.

Exo n° 2;

Le montage ci-dessous est composé d'une inductance et de deux condensateurs. L'inductance est connectée en série avec deux thyristors en antiparallèle. En faisant varier l'angle de retard à l'amorçage  $\alpha$  de  $90^\circ$  à  $180^\circ$ , le condensateur C1 de  $312 \mu\text{F}$  est connecté en série avec deux thyristors et un circuit d'amortissement composé d'une inductance de  $1,2 \text{ mH}$  en parallèle avec une résistance de  $20 \Omega$ . Les branches capacitatives sont commandées selon que les thyristors conduisent ou non. Un circuit identique contenant un condensateur C2 permet de doubler la puissance capacitive.

1. Sachant que l'inductance  $L= 18,3 \text{ mH}$  et que la tension est de  $16 \text{ kV}$ .  $50 \text{ Hz}$ , calculer la valeur du courant efficace maximal et de la puissance réactive totale.
2. La capacité  $C1=312 \text{ nF}$ , calculer la valeur du courant capacitif et de la puissance réactive totale.
3. On fixe l'angle de commande du SVC  $\alpha=150^\circ$ . Calculer :
  - a. la valeur du courant fondamental dans l'inductance
  - b. la puissance réactive totale absorbée par le compensateur statique
  - c. la valeur effective de la réactance

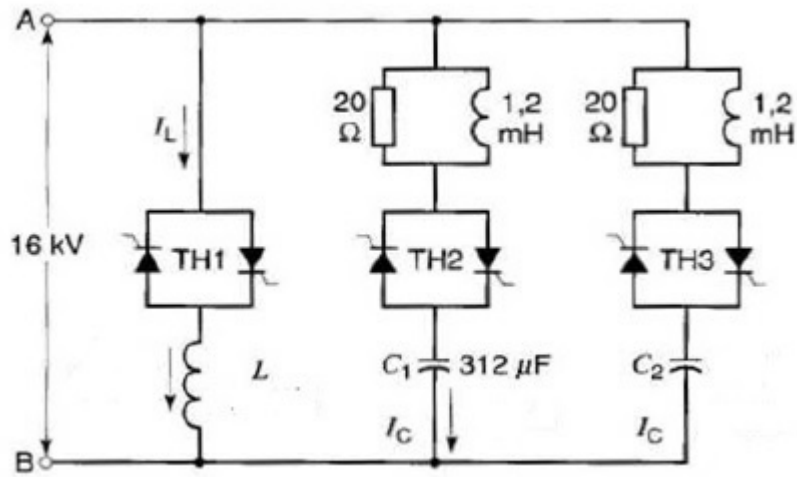


Figure.2

Exo3 :

On donne les informations suivantes sur le compensateur STATCOM représenté par la figure suivante : Il génère une tension fondamentale entre les lignes A, B et C qui varie de 4 kV à 6 kV. Le courant nominal par phase est de 2000 A. La tension de 230 kV entre les lignes X, Y et Z est réduite à 4.8 kV par un transformateur T. La réactance de fuite du transformateur rapportée au secondaire est de 0,2 Ω. Le banc de condensateurs C possède une capacité de 500 μF.

Calculer la tension que le compensateur doit générer afin qu'il débite une puissance réactive de 6.4 Mvar à la ligne de transport.

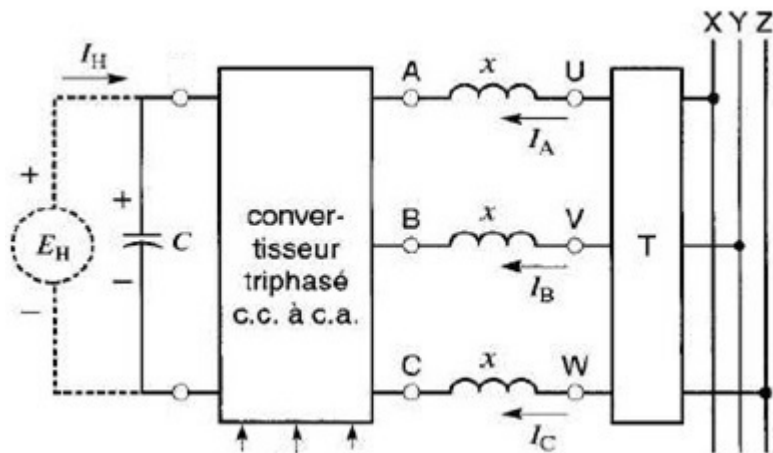


Figure 3

# Activité d'auto-évaluation



## Exercice 1

---

[Solution p 17]

Les FACTS (*Flexible Alternatif Current Transmission System*) regroupent l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique

- Vrai
- Faux

## Exercice 2

---

[Solution p 17]

Le SVC est un dispositif FACTS de 1<sup>ère</sup> génération connecté en série à la ligne et qui permet la génération ou l'absorption de l'énergie réactive

- Vrai
- Faux

## Exercice 3

---

[Solution p 17]

Un TCR (*Thyristors Controlled Reactor*) est composé d'une capacité fixe mise en série avec une valve à thyristors (gradateur)

- Vrai
- Faux

## Exercice 4

---

[Solution p 17]

4. Il existe quatre grandes familles d'éléments FACTS qui peuvent être résumées comme suit

- Les éléments en série
- Les compensateurs de type série
- Les déphaseurs régulateurs de tension
- Le contrôleur universel de transit de puissance (UPFC)



# Solution des exercices



## > Solution n° 1

- Vrai
- Faux

## > Solution n° 2

- Vrai
- Faux

## > Solution n° 3

- Vrai
- Faux

## > Solution n° 4

- Les éléments en série
- Les compensateurs de type série
- Les déphaseurs régulateurs de tension
- Le contrôleur universel de transit de puissance (UPFC)

# Bibliographie



- [1] Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations Part 2 : Voltage Dips and Short Interruptions Working Group UIE Power Quality 1996.
- [2] A. Kusko, M-T. Thompson, Power Quality in Electrical Systems, Mc Graw Hill, 2007.
- [3] F. Ewald Fuchs, M.A.S. Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Elsevier Academic Press, 2008.
- [4] R.C. Dugan, Mark F. Granaghan, Electrical Power System Quality, McGraw Hill, 2001.
- [5] Cahiers techniques Schneider N° CT199, CT152, CT159, CT160 et CT1.
- [6] Qualité de l'énergie, Cours de Delphine RIU, INP Grenoble.
- [7] Marceau, R.J., Sirandi, M., Soumaré, S., Do, X.-D., Galiana, F., Mailhot, R., , A review of signal energy analysis for the rapid determination of dynamic security limits (Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering - IEEE Canada - October 1996, Volume 21, Number 4
- [8] Kundur, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, ERPI Power System Engineering Series, ISBN 007035958X, 1994.