

TP 03 : Régulation de la tension par la méthode de compensation de l'énergie réactive à l'aide de condensateurs

(Régulation de la TMCERA de condensateurs)

1. L'objectif de ce TP

L'objectif est de mettre en évidence par des mesures la chute de tension et compensation d'énergie réactive.

A l'issue de ce TP l'apprenant sera capable de maîtrise et la compréhension du réglage de tension dans une ligne électrique;

2. But de l'expérience

- ✚ L'étude d'une ligne courte : sans et avec compensation série avec une charge inductive (RL),
- ✚ L'influence d'insertion en série différentes valeur d'un condensateur C sur les grandeurs électriques (tension et courant),
- ✚ Calculer la régulation de tension ζ (%) avant et après l'insertion d'un condensateur en série,
- ✚ Minimisation de la chute de tension ΔV de la ligne,

3. Notions et travail de préparation

Le terme compensation est utilisé pour décrire l'insertion intentionnelle des dispositifs de la puissance réactive, capacitive ou inductive, à un réseau électrique pour obtenir un effet désiré. Cela peut inclure l'amélioration du profil de la tension, l'amélioration du facteur de puissance, l'augmentation des performances de la stabilité, et l'amélioration de la capacité de transmission. Les dispositifs réactifs sont connectés soit en série ou en parallèle (shunt).

3.1. Contrôle de la tension

La figure 1 montre un diagramme unifilaire d'un système à courant alternatif qui pourrait représenter en même temps un système monophasé ou une phase d'un système triphasé équilibré. La figure 2 montre le diagramme de phase pour une charge inductive.

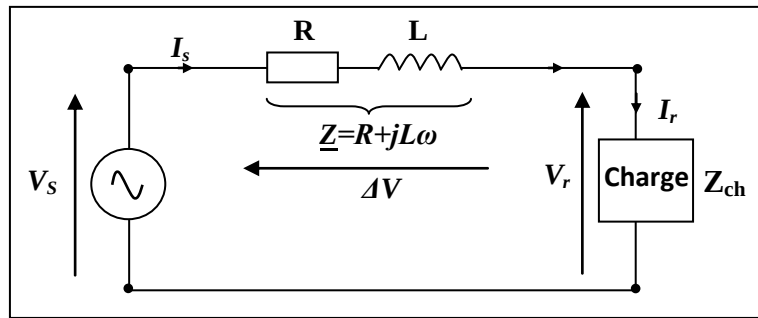


Figure.1. Modèle d'une ligne.

Ou :

$\underline{Z}$: impédance de la ligne série par unité de longueur,

l' : longueur de la ligne, on a alors : $\underline{Z} = (R_{ch} + jL\omega) * l'$ pour une charge inductive, $\underline{Z} = R_{ch} * l'$ pour une charge résistive, $\underline{Z} = (R_{ch} - j1/C\omega) * l'$ pour une charge capacitive,

$L\omega$: Impédance de la ligne,

R : Résistance de la ligne,

$\underline{V}_s$: Tension simple à l'origine (début) de la ligne,

$\underline{V}_r$: Tension simple à l'extrémité (fin) de la ligne (charge),

$\underline{I}_s$: Courant simple à l'origine (début) de la ligne,

$\underline{I}_r$: Courant simple de la charge,

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension.

D'après la figure précédente (figure 1) on a le diagramme vectoriel suivant :

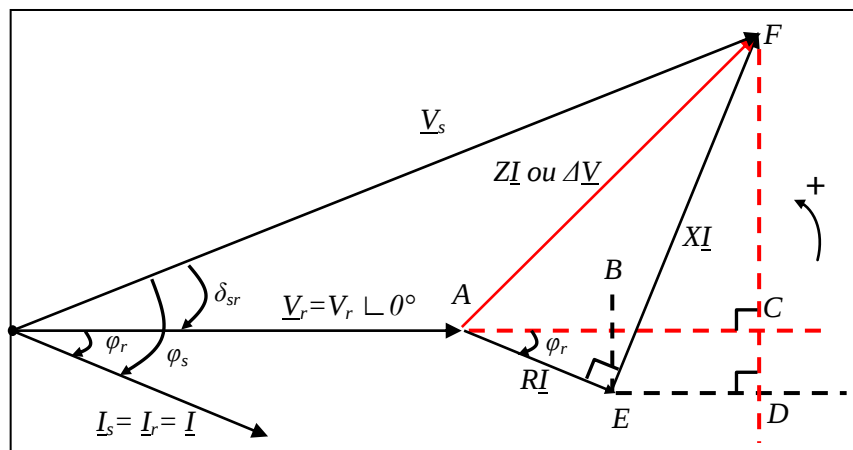


Figure .2. Diagramme vectoriel pour une ligne sans compensation.

La chute de tension entraîne par ce transport est :

$$\Delta \underline{V} = \Delta \underline{V}_R + j \Delta \underline{V}_X = (AB + BC) + j(FD - CD) \quad (1)$$

Tel que :

$$\begin{cases} AB + BC = RI_r \cos \varphi_r + XI_r \sin \varphi_r \\ FD - CD = XI_r \cos \varphi_r - RI_r \sin \varphi_r \end{cases} \quad (2)$$

Donc :

$$\Delta \underline{V} = \frac{RI_r \cos \varphi_r + XI_r \sin \varphi_r}{V_r} + j \frac{XI_r \cos \varphi_r - RI_r \sin \varphi_r}{V_r} \quad (3)$$

$$\Delta \underline{V} = \frac{RP_r + XQ_r}{V_r} + j \frac{XP_r - RQ_r}{V_r} \quad (4)$$

ΔV : chute de tension, (V)

$\Delta \underline{V}$: chute de tension complexe, (V)

R : Résistance de la ligne, (Ω)

$X=L\omega$: Réactance inductif de la ligne, (Ω)

Sans oublier que :

$$\underline{V}_S = \Delta \underline{V} + \underline{V}_R \quad (5)$$

D'après l'équation (1) et (4), la chute de tension ΔV a une composante ΔV_R en phase avec V_R et une composante ΔV_X en quadrature avec V_R . Ainsi, ΔV dépend de la puissance active et réactive de la charge.

En ajoutant une impédance de compensation ou un ' compensateur ' en parallèle à la charge, il est possible de maintenir $|V_R| = |V_S|$.

Ceci est accompli avec un compensateur purement réactif. La puissance réactive de la charge est remplacée par la somme $Q'' = Q_r + Q_c$, (Q_c la puissance réactive du compensateur) est ajustée de façon à pivoter la phase de ΔV jusqu'à $|V_R| = |V_S|$.

Des équations (4) et (5),

$$\underline{V}_S = \underline{V}_r + \frac{RP_r + XQ''}{V_r} + j \frac{XP_r - RQ''}{V_r} \quad (6)$$

Un compensateur purement réactif peut éliminer des variations de tension provoquées par des changements des puissances active et réactive de la charge.

3.2. Rapports entre la puissance active, la puissance réactive, les niveaux de tension et l'angle de charge (δ)

L'exemple qui suit illustre le transport de puissance sur une ligne à courant alternatif, suppose que la charge a un facteur de puissance en retard φ_r ($Z_{ch} = R_{ch} + jX_{ch}$) La ligne est

représenté par son impédance (($Z=R +jX$) voir figure 1. R est négligé (étant habituellement beaucoup plus petite que X).

L'angle entre $\underline{V}_s$ et $\underline{V}_r$ est l'angle de charge δ_{sr} (voir figure 2) et : $\underline{I}_s=\underline{I}_r=\underline{I}$

$$V_s \cos \delta_{sr} = V_r + X I \sin \varphi_r \quad \text{et} \quad V_s \cos \delta_{sr} = X \sin \varphi_r \quad (7)$$

$$P + jQ = \underline{V}_r \underline{I}^* = V_r I \cos \varphi_r - jV_r I \sin \varphi_r \quad (8)$$

L'équation de la puissance :

La puissance qui transite dans cette ligne est donnée en fonction des tensions aux extrémités de la ligne V_s et V_r du déphasage entre ces tensions $\delta_{sr} = \delta$ et l'impédance de la ligne X.

La puissance active est donnée par l'expression suivante :

$$P = \frac{V_s V_r}{X} \sin \delta_{sr} \quad (9)$$

Et l'équation de la puissance réactive au récepteur est :

$$Q = \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s V_r}{X} \cos \delta_{sr} \quad (10)$$

Tel que : $\delta_{sr} = \delta$ déphasage entre V_s et V_r

Remarque

Pour les réseaux de transport la résistance R est faible devant la réactance X de la ligne, ($R \ll X$) donc la chute de tension est majorée principalement par le transit de **la puissance réactive**, le transit de ce dernier (Q) entraîne une augmentation des pertes actives.

D'après l'équation (9 et 10) montre que le niveau de tension à une charge donné par exemple 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.

Le réglage de la tension consiste à maintenir un niveau de tension acceptable aux niveaux de toutes les charges du réseau (jeux de barre).

Donc des modifications sur un ou plusieurs de ces paramètres (**la réactance de ligne**, puissances active et réactive) sont alors nécessaires.

3.3. Méthode de régulation de la tension

Les méthodes de réglage de la tension peuvent être divisées en deux principales catégories. Méthode directe et indirecte.

Les méthodes directes, le réglage direct de la tension consiste à agir directement sur la tension V_r elle-même par l'insertion d'un autotransformateur aux niveaux des postes de distribution. (Au niveau de récepteurs), soit par la modification de la tension de source V_s , (par modification de l'excitation s'il s'agit de la tension à la sortie d'un alternateur).

Parmi les méthodes indirectes, qui ont été l'objectif principal de notre TP si l'introduction de la capacité série dans un réseau réduit la réactance X , augmente la tension à la charge ainsi que la capacité de transmission de la ligne.

La capacité série est utilisée pour neutraliser une partie de la réactance inductive d'un réseau électrique. Cela est illustré dans la figure 3.

L'insertion d'un condensateur en série offre les avantages suivants dans le réseau :

- ✚ La tension améliorée;
- ✚ La stabilité augmentée;
- ✚ La puissance réactive contrôlée.

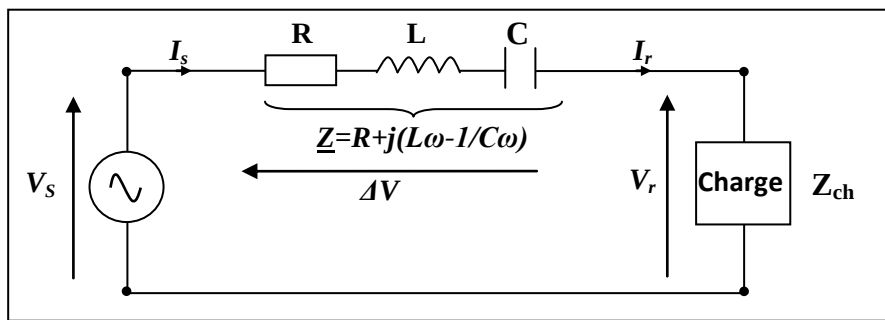


Figure.3. Modèle d'une ligne avec compensateur série.

La réactance introduite aura la valeur X_C , donné par l'équation (11)

$$X_C = S * X \quad (11)$$

S est degré de compensation $0 \leq S \leq 1$

L'impédance totale entre le récepteur et la source est maintenant donné par l'équation (12).

$$X_{TOTAL} = X - X_C = (1 - S)X \quad (12)$$

La puissance transmise, exprimée par l'équation (13), et alors fonction du degré de compensation S .

$$P = \frac{2V^2}{X(1-S)} \sin(\delta_{sr}) \quad (13)$$

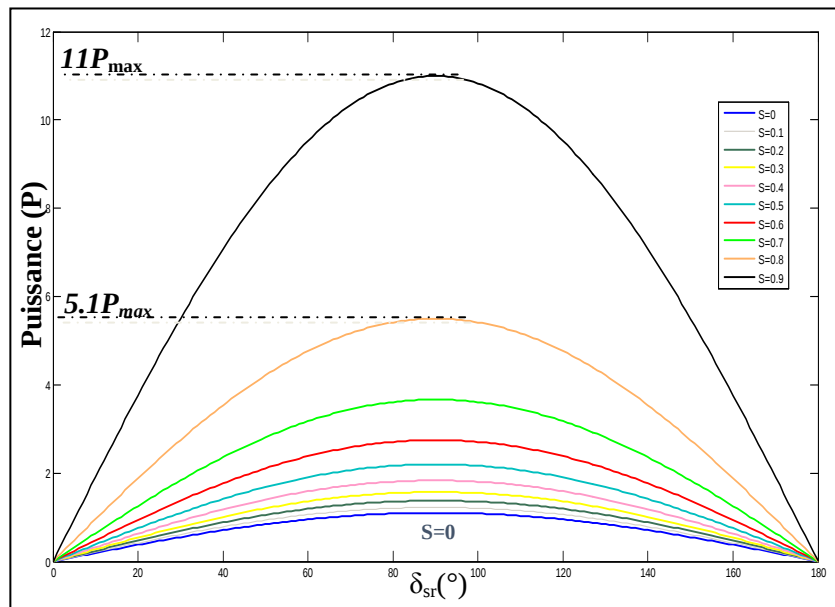


Figure. 4. Courbe de puissance avec et sans compensation série.

3.4. La régulation de la tension

Pour une tension demandée à la charge, il peut arriver que la tension (tension déterminée par la relation) que doit générer la source soit très élevée (dépendant de la charge). Ceci a pour conséquence de causer une chute de tension élevée dans la ligne.

Il est préférable que cette chute de tension ne varie pas plus que +10% de la tension normale d'opération pour que l'isolement de l'équipement dans le réseau ne soit pas soumis à des tensions excessives.

Les causes principales de la chute de tension le long de la ligne sont l'impédance de la ligne et une charge ayant un facteur de puissance en arrière.

Nous définissons la régulation de tension d'une ligne comme suit:

$$\zeta = \frac{V_s - V_r}{V_r} 100 \quad (\%) \quad (14)$$

Question (Préparation théorique)

Après la lecture soigneusement de la partie théorique, démontrer les équations suivant: (4), (6), (9), (10), et (13).

4. Partie pratique

- La figure 5 présentes toute les schémas réalisés durant le TP.
- On prend : $R = \dots \Omega$, $L = \dots H$, l'impédance de ligne toujours constante.

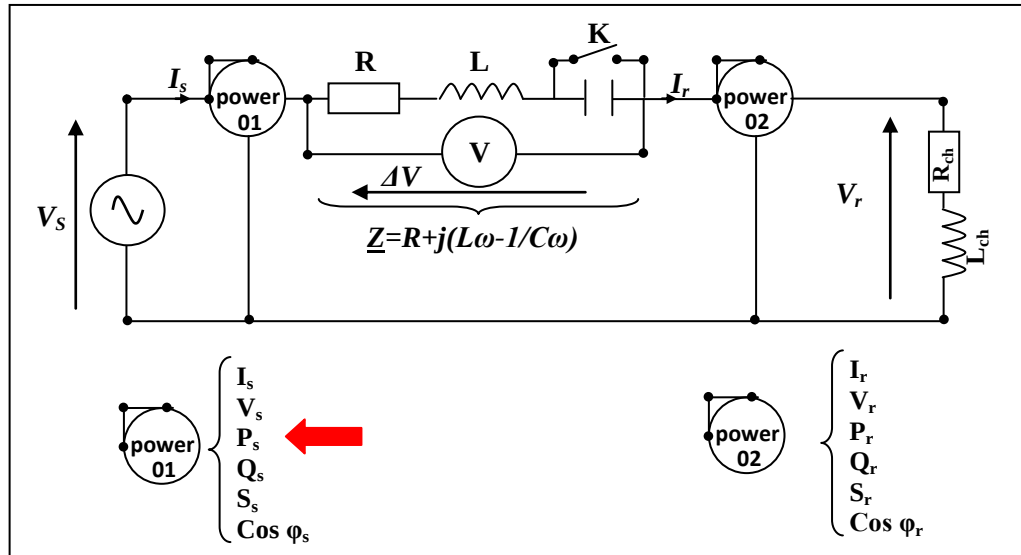


Figure .5. Schéma équivalent d'une ligne avec compensation série pour une charge inductive.

4.1. Sans compensation avec une charge inductive (K fermé)

- Réaliser le montage de la figure 5.
- Alimenter le circuit avec une tension de source : $V_s(t) = \sqrt{2}80\sin(\omega t)$,
- On prend : $R_{\text{Ligne}} = \dots\dots\dots \Omega$, $L_{\text{Ligne}} = \dots\dots\dots \text{H}$, $f = 50\text{Hz}$, et remplir le tableau 1 suivant :
pour une charge 1 : $R_{\text{charge}} = \dots\dots\dots \Omega$ $L_{\text{charge}} = \dots\dots\dots \text{H}$
pour une charge 2 : $R_{\text{charge}} = \dots\dots\dots \Omega$ $L_{\text{charge}} = \dots\dots\dots \text{H}$.
- La régulation de tension d'une ligne comme suit: $\zeta = \frac{V_s - V_r}{V_r} 100 \quad (\%)$

		Grandeurs mesurées								Grandeurs calculées				
		V_s (V)	P_s (w)	V_r (V)	I_r (A)	P_r (w)	Q_r (VAR)	$\cos \phi_r$	ΔV (V)	V_R (V)	V_L (V)	ΔV (V) Methode 1	ΔV (V) Methode 2	ζ (%)
K fermé	Charge 1													
	Charge 2													

4.2. Avec compensation pour une charge inductive constante (K ouvert)

- Faire toujours le montage de la figure 5, avec l'ouverture de l'interrupteur K,
- Alimenter le circuit avec une tension de source : $V_s=80\text{ V}$, $f=50\text{Hz}$, et l'impédance de la ligne est gal : $R_{\text{Ligne}}=10\Omega$, $L_{\text{Ligne}}=10\text{mH}$,

Pour une charge 1: $R_{\text{charge}}=\dots\dots\dots\Omega$ $L_{\text{charge}}=\dots\dots\dots\text{mH}$ constante, et avec une variation de la valeur du condensateur C, complétez le tableau 2 suivant :

		Grandeurs mesurées								Grandeurs calculées					
		V_s (V)	P_s (w)	V_r (V)	I_r (A)	P_r (w)	Q_r (VAR)	$\cos \phi_r$	ΔV (V)	V_R (V)	V_L (V)	V_C (V)	ΔV (V) Methode 1	ΔV (V) Methode 2	ζ (%)
K ouvert	$C_1=\dots\dots\dots\mu\text{F}$														
	$C_2=\dots\dots\dots\mu\text{F}$														
	$C_3=\dots\dots\dots\mu\text{F}$														

5. Travail demandé

✚ Interpréter les résultats obtenus avant et après la régulation de tension après le remplissage du tableau suivant :

	Comparaison des résultats obtenus												
		P_s (w)	P_r (w)	$\zeta(\%)$	I_r (A)	Q_r (VAR)	$\cos \phi_r$	ΔV (V)	V_R (V)	V_L (V)	V_C (V)	ΔV (V) Methode 1	ΔV (V) Methode 2
K fermé													
K ouvert	$C_1 = \dots \mu F$												
	$C_2 = \dots \mu F$												
	$C_3 = \dots \mu F$												

✚ Expliquer l'influence de différents types de charge sur les grandeurs électriques et les puissances actives et réactives ?

✚ Comment on peut améliorer le rendement de la ligne électrique ?

✚ D'après vous, quel est l'intérêt d'insérer un condensateur en série avec l'impédance de la ligne?

✚ Tracer le diagramme vectoriel des tensions après l'insertion du condensateur (figure 5)

✚ Donner une conclusion générale de ce TP.