

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique
Option : Réseaux électriques

Thème

Compensation de la puissance réactive dans
un transformateur de distribution MT/BT

Dirigé par

Mme F. BITAM-MEGHERBI
Mr D. BELKACEMI

UMMTO
Electro-Industries

Etudié par :

AIT MAMMAR Zahra
ACHABOU Zahir
CHILI Mohammed

Promotion 2011

Remerciements

Nos remerciements les plus sincères vont à notre promotrice, madame Ferroudja MEGHERBI, enseignante à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO) qui a bien voulu nous encadrer et qui a toujours été disponible pour nous prodiguer ses recommandations éclairées et orientations pour mener à bien notre travail.

Nous tenons également à remercier Monsieur Djamel BELKACEMI, chef du département transformateur de l'ENEL, pour son aide précieuse, ses conseils et ses remarques et lui exprimons notre profonde gratitude pour avoir consacré une partie de son temps à nous diriger pendant la durée de ce travail.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du personnel de l'ENEL sans exception ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous remercions nos chers parents et nos familles qui nous ont encouragés pour aller au bout de notre cursus et sans le soutien desquels le présent fruit de longs moments de réflexion et de recherches n'aurait pu voir le jour.

Nous joignons à nos marques de gratitude les membres du jury qui nous feront l'honneur et l'amabilité de juger notre travail.

Dédicaces

Je me permets de dédier ce modeste travail à :

- la mémoire de mes grand-parents.

-mes très chers parents .

- mes très chères sœurs cylvia, kamilia.

-mes tres chérs frères : massinissa et madjid.

-mon oncle :mohamed amezian et ammar.

-mes binômes : Zahir et zahra

Mohammed

Dédicaces

Je me permets de dédier ce modeste travail à :

-mes très chers parents.

- ma très chère sœur nassima et ma petite sœur safaa.

-mes oncles et tantes.

-mes cousins et cousines.

-mes binômes : Zahra et Mohammed.

-mes amis : tous mes collègues de la 5ème année électrotechnique promotion 2011, surtout ;Mohand, Brahim et Seddik.

-tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

Zahir

Dédicaces

Je me permets de dédier ce modeste travail à :

-mes très chers parents.

-mes très chères grand-mères : Smina et Tassadite.

-mes très chers frères : Hacene, Rachid, Nabil et surtout le petit Fateh.

- ma très chère sœur Saida, son mari Larbi et leur petite ange Melila.

-mes oncles et tantes.

-mes cousins et cousines : (Naima, Fahima, Nassima)

-mes binômes : Zahir et Mohammed.

-mes copines : Sabrina, Nissa, Noura et Nadia et tous mes collègues de la 5ème année électrotechnique promotion 2011, surtout : Mohand, Brahim et Seddik.

-tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

Zahra

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs triphasés

I.1. Introduction.....	2
I.2. Constitution	2
I.2.1. Circuit magnétique.....	3
I.2.2. Les enroulements.....	4
I.2.3. Cuve et éléments de refroidissement et de protection d'un transformateur.....	4
I.2.3.1. Transformateur respirant avec conservateur.....	4
I.2.3.2. Transformateurs à cuve totalement étanche.....	4
I.2.3.3. Défauts dans un transformateur triphasé.....	5
I.2.3.3. Protection des transformateurs triphasés.....	6
I.3. Types de couplages.....	7
I.3.1. Choix du couplage.....	7
I.3.2. Indice horaire.....	8
I.3.3. Couplages normalisés.....	8
I.3.2.1. Couplage étoile-étoile	8
I.3.2.2. Couplage triangle-étoile	8
I.3.2.3. Couplage étoile-zig zag	9
I.4. Marche en parallèle des transformateurs triphasés.....	9
I.4.1. Utilité de la mise en parallèle des transformateurs.....	9
I.4.2. Conditions de couplage en parallèle des transformateurs triphasés.....	9
I.5. Pertes dans un transformateur	10
I.5.1. Pertes fer.....	10
I.5.1.1. Les pertes par courants de Foucault.....	11
I.5.1.2. Les pertes par hystérésis.....	11
I.5.2. Pertes Joule.....	12
I.6. Détermination pratique des pertes dans un transformateur triphasé.....	12
I.6.1. Essai à vide.....	12
I.6.2. Essai en court-circuit.....	13

Chapitre II : Généralités sur les puissances

II-Généralités.....	14
II.1. Puissance instantané.....	14
II.2. Puissance active.....	14
II.3. Puissance réactive.....	14
II.4. Puissance apparente	15
.II.5-Puissance déformante	15
II.6. Facteur de puissance	15
II.8. Composantes active et réactive du courant	
II.7. Composantes active et réactive du courant	16
II.8. Composantes active et réactive de la puissance.....	17
II.9. Evaluation de l'énergie électrique	17
II.9.1. Energies active, réactive et apparente.....	17
II.9.2. Bilan des puissances.....	18
II.9.3. Puissance installée	18
II.9.4. Puissance consommée	19
II.9.4.1. Coefficient de simultanéité (K_S).....	19
II.9.4.2. Facteur d'utilisation (K_U)	21
II.10. Méthodes de calcul de la puissance consommée	22
II.10.1. Puissance consommée dans chaque coffret	22
II.10.2. Puissance consommée au niveau du tableau secondaire.....	23
II.11. Bilan des puissances dans un transformateur.....	24

Chapitre III : compensation de l'énergie réactive

III.1. Introduction.....	27
III.2. Facteur de puissance.....	27
III.2.1. Définition.....	27

III.2.2. Amélioration du facteur de puissance	28
III.3. Avantages d'un bon facteur de puissance	28
III.3.1. Aspect économique	28
III.3.2. Aspect technique.....	29
III.4. Inconvénients d'un faible facteur de puissance.....	30
III.5. Causes d'un faible facteur de puissance	31
III.6. Modes d'amélioration du facteur de puissance.....	31
III.6.1. Action directe sur l'installation.....	31
III.6.2. Action indirecte.....	32
III.7. Moyens de compensation de l'énergie réactive	32
III.7.1. Compensateur statique à thyristors.....	32
III.7.2. Compensateur synchrone.....	32
III.7.3. Batterie de condensateurs	33
III.8. Méthode de détermination de la compensation d'énergie réactive	34
III.8.1. Calcul de la puissance réactive nécessaire Q_C	34
III.9. Différents Modes de compensation	37
III.10. Types de compensation par batteries de condensateurs.....	40
III.10.1. Batteries fixes	40
III.10.2. Batteries de condensateurs en gradins avec régulation automatique.....	41
III.10.3. Choix du type de compensation	42
III.10.4. Choix du Branchement d'un condensateur	42
III.11. Harmoniques et transformateurs	43
III.11.1. Origine des harmoniques.....	43
III.11.2. Conséquences des harmoniques.....	44
III.11.3. Compensation de l'énergie réactive en présence des harmoniques.....	44

Chapitre IV : Application

IV.1. Introduction.....	45
IV.2. Présentation des transformateurs objets de l'étude.....	45
IV.2.1. Plaque signalétique du transformateur de 100 kVA.	45
IV.2.2. Plaque signalétique du transformateur de 400 kVA.....	45

IV.2.3. Plaque signalétique du transformateur de 630 kVA.....	46
IV.3. Essais à réaliser.....	46
IV.3.1. Essai à vide	46
IV.3.2. Essai en court-circuit	46
IV.4. Déroulement des essais.....	47
IV.4.1. Schéma du montage de l'essai à vide.....	47
IV.4.2. Schéma du montage de l'essai en court-circuit.....	47
IV.5. Résultats expérimentaux.....	48
IV.5.1. Transformateur de 100 kVA.....	48
IV.5.1.1. Résultats de l'essai à vide	48
IV.5.1.2. Résultats de l'essai en court-circuit.....	48
IV.5.2. Transformateur de 400 kVA.....	49
IV.5.2.1. Résultats de l'essai à vide.....	49
IV.5.2.2. Résultats de l'essai en court-circuit.....	50
IV.5.3. Transformateur de 630 kVA.....	50
IV.5.3.1. Résultats de l'essai à vide.....	50
IV.5.3.2. Résultats de l'essai en court-circuit.....	51
IV.6. Discussion des résultats.....	52
Conclusion générale.....	53
Références bibliographique	54

Introduction générale

Tout système électrique utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive. Dans les processus industriels utilisant l'énergie électrique, seule l'énergie active est transformée au sein de l'outil de production en énergie mécanique, thermique ou lumineuse. L'énergie réactive, quant à elle sert notamment à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques tournantes, des réseaux électriques de transport et de distribution (transformateurs, lignes) qui consomment également dans certains cas d'exploitation de l'énergie réactive.

L'énergie réactive surcharge inutilement les installations et perturbe le réseau électrique, c'est la raison pour laquelle SONELGAZ pénalise les utilisateurs dont l'installation consomme de l'énergie réactive. Pour éviter cela, il suffit de mettre en place dans les installations une batterie de condensateurs qui compensera l'énergie réactive. Cette compensation devrait s'effectuer même au niveau du transformateur, qui nécessite de la puissance réactive pour la magnétisation de ses enroulements afin d'assurer son fonctionnement, que ça soit en charge ou à vide quand il s'agit d'abonnés MT, exemple des industriels. Ainsi, Nous nous proposons d'évaluer la puissance réactive consommée par les transformateurs moyenne tension. Ainsi, nous avons subdivisé notre mémoire en quatre chapitres.

Ø Dans le premier chapitre, nous donnons quelques notions sur les transformateurs de puissance triphasés.

Ø Dans le deuxième chapitre, nous rappelons quelques définitions concernant les différentes puissances mises en jeu dans une installation électrique.

Ø Le troisième chapitre, quant à lui, est consacré à la compensation de l'énergie réactive. Nous y donnerons les différents moyens de compensation de l'énergie réactive.

Ø Nous réservons le quatrième chapitre à l'évaluation expérimentale de la puissance réactive absorbée par les transformateurs de puissance moyenne tension fabriqués par la firme Electro-Industries.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur les transformateurs triphasés

I.1. Introduction

Un transformateur électrique est un convertisseur permettant de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Le primaire et le secondaire sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits. Le transformateur triphasé peut être remplacé par trois transformateurs monophasés identiques fictifs et sa représentation est donnée sur la figure I.1.



Figure I.1. Vue en coupe d'un transformateur triphasé.

I.2. Constitution

Un transformateur, qu'il soit monophasé ou triphasé, est constitué du circuit magnétique, des enroulements, de la cuve et des éléments de protection et de refroidissement.

I.2.1. Circuit magnétique

Le circuit magnétique d'un transformateur est soumis à un champ magnétique variable au cours du temps. Pour les transformateurs reliés au secteur de distribution, cette fréquence est de 50 ou 60 Hz. Le circuit magnétique est généralement feuilleté pour réduire les pertes par courants de Foucault qui dépendent de l'amplitude du signal et de sa fréquence. La fonction principale du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique. Le circuit magnétique sert également de support aux enroulements. La figure I.2 représente le circuit magnétique d'un transformateur.

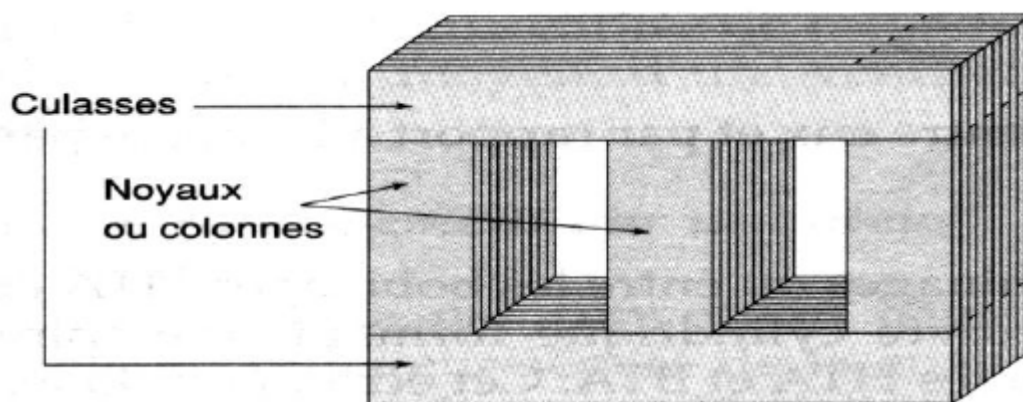


Figure I.2. Circuit magnétique d'un transformateur.

Le circuit magnétique comprend des colonnes, une culasse supérieure et une culasse inférieure et est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques.

Pour une meilleure efficacité, la tôle du circuit magnétique doit :

- Être fabriquée en matériau à très haute perméabilité magnétique et être soumise à une induction proche de l'induction à saturation pour avoir une grande valeur du flux ;
- Avoir une épaisseur faible (0.3mm pour une fréquence $f = 50$ Hz) avec une isolation en Carlitte (matière à base de phosphate) pour diminuer les pertes par courant de Foucault ;
- Être en grains orientés et laminées avec un ajout de silicium pour réduire les pertes par hystérésis.

I.2.2. Les enroulements

Les enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétique, le transfert de puissance entre les enroulements du primaire et ceux du secondaire. Ils sont en général concentriques pour minimiser les fuites de flux.

Pour des raisons économiques, les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions :

- Il faut diminuer les intervalles entre les enroulements pour diminuer le champ de dispersion magnétique, ce qui a pour effet de réduire la consommation de la puissance réactive.
- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégagent sous forme calorifique.
- Les enroulements doivent résister à l'élévation de température, les court-circuits et les surtensions lors du fonctionnement du transformateur.

I.2.3. Cuve et éléments de refroidissement et de protection d'un transformateur

Nous distinguons deux types de transformateurs : les transformateurs respirants avec conservateur et les transformateurs totalement étanches.

I.2.3.1. Transformateur respirant avec conservateur.

Ce sont des transformateurs avec réservoir d'huile à pression atmosphérique, ce qui permet la dilatation thermique de l'huile via un vase d'expansion en haut de la cuve. La surface du diélectrique peut être en contact direct avec l'air ambiant ou en être séparé par une paroi étanche en matière synthétique déformable. Dans tous les cas, un assécheur d'air doté d'un produit dessiccateur évite l'entrée d'humidité à l'intérieur de la cuve.

I.2.3.2. Transformateurs à cuve totalement étanche

L'huile est contenue dans une cuve scellée sans échange d'air. Le volume d'air se situe alors en haut de la cuve. Sa pression augmente lors de la dilatation thermique de

l'huile (changements de volume simultanés et inverses de l'huile et du gaz). La dilatation de l'huile de remplissage est compensée par la déformation élastique des parois ondulées de la cuve, parois dont la souplesse mécanique permet une variation adéquate du volume intérieur de la cuve.

Une technologie particulière a été mise au point par France-Transfo (filiale Schneider) : la technique Etanche à Remplissage Total (ERT). Dans ce type de cuves, toute oxydation du diélectrique liquide par contact avec l'air ambiant est évitée. Le transformateur présente les avantages suivants :

- une économie d'achat et un gain d'encombrement : ni assécheur d'air, ni conservateur de liquide ;
- une grande facilité de raccordement : dégagement total de la plage des bornes haute et basse tension ;
- Facilité d'entretien.

I.2.3.3. Défauts dans un transformateur triphasé

Les défauts dans un transformateur triphasé sont généralement causés par une perte d'isolement entre enroulements ou entre enroulement et noyau. Cette perte d'isolement peut être causée par :

- un vieillissement du transformateur du à un échauffement de longue durée ;
- une contamination de l'huile de remplissage du transformateur ;
- des décharges couronne sur l'isolation. Cette décharge est due à des pointes sur les conducteurs des enroulements.
- surtensions transitoires dues à la foudre ou aux manœuvres ;
- Forces électrodynamiques sur les enroulements dues aux courants élevés de défauts externes ou aux courants d'enclenchement lorsque le transformateur est mis sous tension.

I.2.3.3. Protection des transformateurs triphasés

La protection d'un transformateur doit être fiable et rapide afin de déconnecter le transformateur le plus rapidement possible, dans les délais, pour limiter les conséquences d'un défaut. Les protections les plus mises en œuvre dans les transformateurs à remplissage d'huile sont les suivantes :

A) Contrôle et surveillance de la pression : relais Buchholz :

En cas de défaut, l'arc entraîne une surpression, puis une décomposition de l'huile et une émission de gaz. Ce dernier est détecté par un relais détecteur de gaz Buchholz. Ce dernier possède une unité d'alarme et une unité de déclenchement sensible au flux élevé de gaz lors de défauts internes sévères. Le gaz collecté est analysé et peut délivrer des informations sur la cause de son existence : si le gaz est inflammable cela veut dire qu'il y'a décomposition de l'huile ou du papier, sinon, c'est de l'air et donc il n'y a aucun danger sur le transformateur.

B) Indicateur de la température de l'huile de remplissage :

Une température très élevée dans le transformateur peut être causée par une surcharge, un problème de refroidissement ou une saturation. Les transfos immergés dans l'huile sont surveillés par thermomètre. Il existe des thermomètres pour huile ou pour enroulement. Ces thermomètres sont considérés comme des capteurs de surcharge. Pour les gros transformateurs (> quelques MVA), les deux sont nécessaires. Pour chaque type, il y'a une alarme qui peut mettre en marche un système de refroidissement et un déclencheur.

C) Protection contre les surintensités :

Une protection différentielle compare les courants entrant et sortant du transformateur. Lorsqu'une surintensité apparaît, la protection différentielle opère instantanément quand le courant différentiel mesuré est supérieur à la valeur programmée dans le relais. Le relais est équipé d'une fonction stabilisatrice de courant pour les situations suivantes :

- Surintensité apparaissant lors de la mise sous tension du transformateur ;
- Surexcitation (surflux) du circuit magnétique du transformateur.

D) Protection contre les surtensions :

La cuve est protégée contre les surtensions dues à une coupure de ligne ou d'origine atmosphérique. Ainsi, la cuve du transformateur est mise à la terre à travers un tore raccordé à un relais de terre.

I.3. Types de couplages

Les enroulements du primaire d'un transformateur triphasé peuvent être groupés en étoile ou en triangle. Les enroulements du secondaire peuvent être groupés en étoile, en triangle ou en zigzag. Le couplage zig-zag est obtenu en divisant les trois bobines d'un enroulement en six bobines. Pour avoir une phase, on met en série deux demi-bobines prises sur des colonnes différentes en sens inverse.

I.3.1. Choix du couplage

Il s'effectuera à partir de nombreux critères dont les plus importants sont :

- Dimensionnement des enroulements

- Aux très hautes tensions, on aura intérêt à choisir un couplage étoile pour que chaque bobine n'ait à supporter que : $V' = U / \sqrt{3}$
- Pour les très forts courants, on préférera le montage triangle où chaque enroulement n'est parcouru que par un courant d'intensité : $J = I / \sqrt{3}$

- Fonctionnement déséquilibré :

- Aux faibles déséquilibres ($I_{\text{neutre}} \leq 10\% \cdot I_{\text{ligne}}$), le primaire et le secondaire seront couplés en étoile avec conducteurs neutres.
- Si le déséquilibre est plus important, le primaire restera en étoile mais le secondaire sera connecté en zigzag ;

I.3.2. Indice horaire

C'est un nombre qui désigne sur un cadran horaire le déphasage entre la tension secondaire et la tension primaire entre bornes homologues, la haute tension étant prise comme référence. L'indice horaire est à considérer dans le cas du couplage en parallèle de transformateur.

Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont pour effet d'introduire un déphasage entre les tensions primaires et secondaires, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par des mêmes lettres (V_A, V_a) ou (U_{AB}, U_{ab}). En pratique, le déphasage θ obtenu est toujours un multiple entier de 30° . En d'autres termes :

$\theta =$ retard d'une tension basse tension (BT) sur son homologue haute tension (HT).

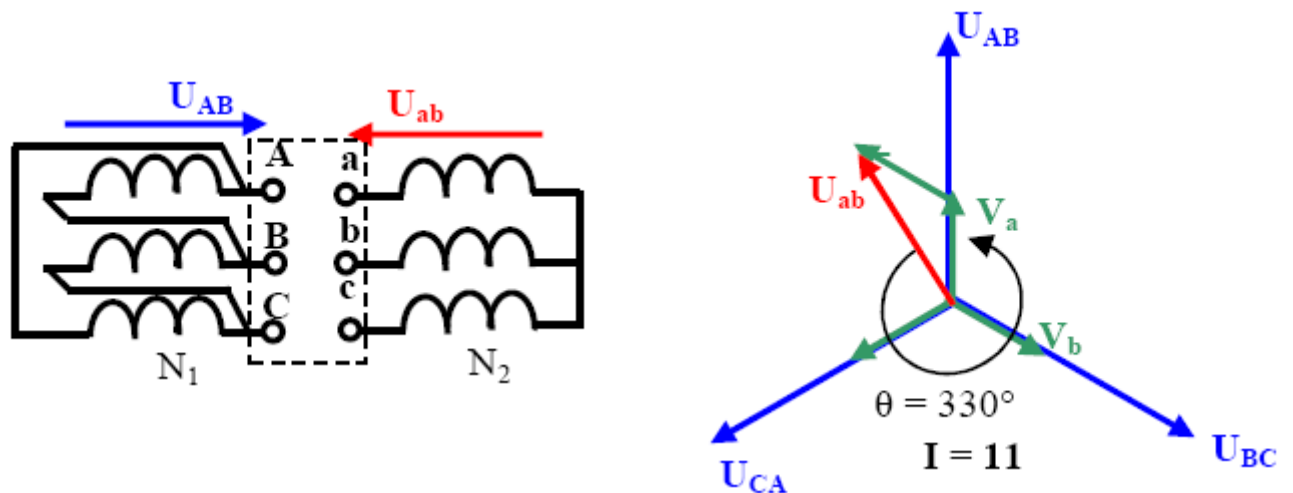
L'indice horaire I est donné par : $I = \theta / 30^\circ$ avec I entier et $0 \leq I \leq 11$.

I.3.3. Couplages normalisés

I.3.2.1. Couplage étoile-étoile Yy

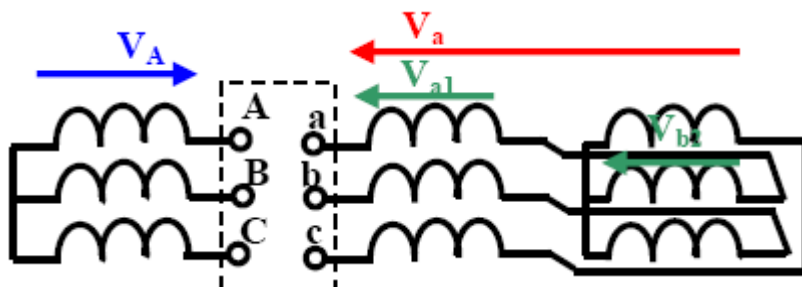


I.3.2.2. Couplage triangle-étoile Dy

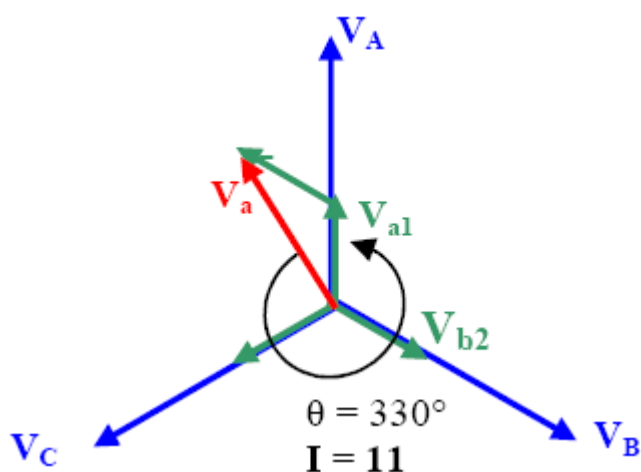


Ce couplage est désigné par Dy11.

I.3.2.3. Couplage étoile-zig zag Yz11



Ce couplage est désigné par Yz11.



I.4. Marche en parallèle des transformateurs triphasés

I.4.1. Utilité de la mise en parallèle des transformateurs

La puissance transmise par une centrale de production d'énergie électrique au réseau évolue au cours du temps en fonction de la consommation. Un transformateur unique serait en général utilisé très en-dessous de son régime nominal en dehors de la pointe de consommation, donc avec un rendement médiocre. Il serait donc préférable de mettre en parallèle plusieurs transformateurs de plus faible puissance et qui seraient toujours au voisinage de leurs conditions nominales de fonctionnement.

I.4.2. Conditions de couplage en parallèle des transformateurs triphasés

Des transformateurs sont en parallèle lorsque leurs primaires sont alimentés par un même réseau et leurs secondaires connectés à une même ligne ou débitent dans une même charge. La mise en parallèle de deux transformateurs triphasés n'est possible que si :

- Les transformateurs sont alimentés sous la même tension ;
- Les rapports de transformations à vide sont identiques ;
- Les tensions de court-circuit sont égales à 10 % près.
- Les transformateurs ont le même indice horaire ou des indices compatibles. Ainsi Deux transformateurs d'un même groupe et ayant le même rapport de transformation peuvent être mis en parallèle.

Les groupes d'indices compatibles sont donnés dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Indices compatibles pour la mise en parallèle des transformateurs.

Groupe	Indices	Couplages
I	0, 4, 8	Yy, Dd, Dz
II	2, 6, 10	Yy, Dd, Dz
III	1, 5	Dy, Yz, Yd
IV	7, 11	Dy, Yz, Yd

I.5. Pertes dans un transformateur

On sait que toute variation d'induction dans un matériau magnétique implique à l'intérieur de celui-ci une dissipation apparaissant le plus souvent sous forme de chaleur non récupérable, d'où l'expression des pertes magnétiques pour désigner le phénomène. Dans la pratique, ces pertes sont mesurées par un appareil dit cadre d'Epstein.

I.5.1. Pertes fer

La variation périodique du flux magnétique provoque des pertes d'énergie dans les tôles du circuit magnétique par courant de Foucault et par hystérésis.

I.5.1.1. Les pertes par courants de Foucault

Les pertes par courants de Foucault sont dues aux courants induits qui se forment dans les masses métalliques des corps ferromagnétiques soumis à des champs d'induction variables. Ces courants provoquent une dissipation d'énergie et l'échauffement des matériaux. Les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique et au carré de la fréquence selon l'équation :

$$= \quad (I.1)$$

Avec :

: Coefficient de Foucault ;

B : induction magnétique ;

f : fréquence.

I.5.1.2. Les pertes par hystérésis

Elles sont dues au travail des forces de freinage agissant sur les parois de Bloch en mouvement durant les processus d'aimantation et de désaimantation. Ces pertes correspondent au travail nécessaire pour parcourir complètement la boucle d'hystérésis magnétique (figure I.3).

$$W = \quad (I.2)$$

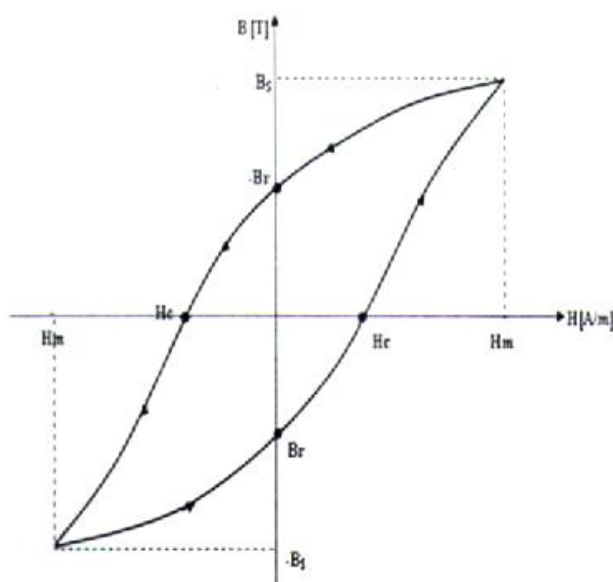


Figure I.3. Cycle d'hystérésis.

I.5.2. Pertes Joule

Le passage du courant dans les enroulements d'un transformateur provoque des pertes par effet Joule.

I.6. Détermination pratique des pertes dans un transformateur triphasé

I.6.1. Essai à vide

Le montage de l'essai à vide est représenté sur la figure I.4. La puissance absorbée à vide est mesurée en utilisant la méthode des deux wattmètres.

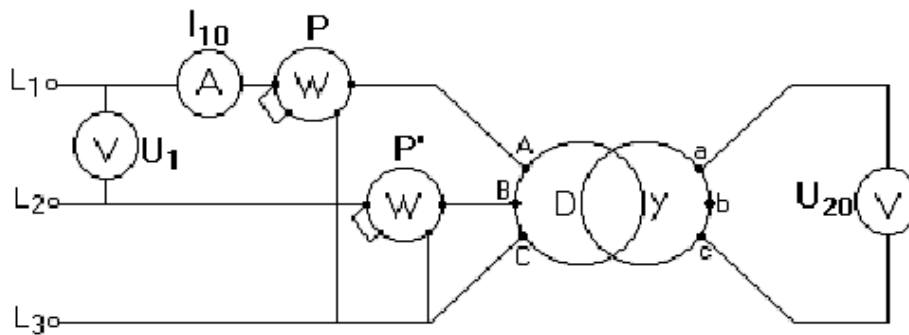


Figure I.4. Schéma du montage de l'essai à vide d'un transformateur triphasé.

L'essai à vide consiste à faire varier la tension d'alimentation d'une valeur initiale U_i jusqu'à une valeur finale U_f . Nous aurons ainsi les valeurs du courant primaire I_{10} affiché sur l'ampèremètre, la puissance active absorbée au primaire P_{10} mesurée par la méthode des deux wattmètres avec $P_{10} = P + P'$. Nous relevons également la tension au secondaire à vide U_{20} .

L'essai à vide du transformateur nous permet de déterminer le rapport de transformation et le facteur de puissance à vide du transformateur. Cet essai nous permet aussi d'évaluer les pertes du transformateur à vide qui représentent les pertes fer.

La puissance P_{10} représente la puissance consommée par le circuit magnétique (pertes fer) et celle consommée par les enroulements qui sont les pertes Joule à vide.

$$P_{10} = P_{fer} + P_{Joule} \quad (I.33)$$

I.6.2. Essai en court-circuit

Le schéma du montage de l'essai en court-circuit est représenté sur la figure I.5.

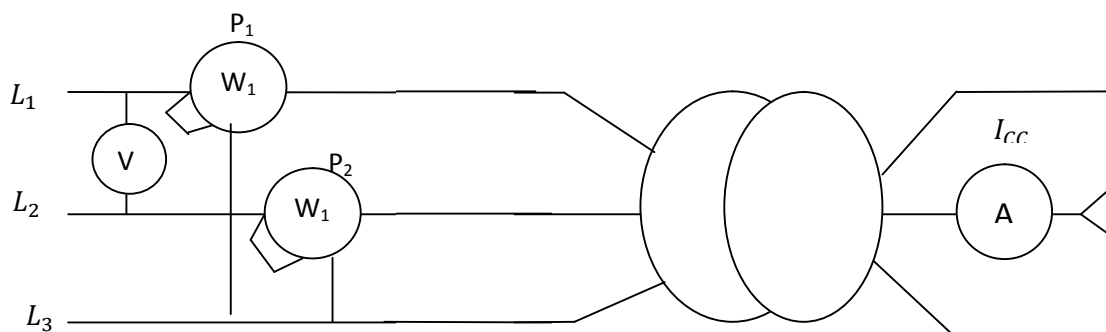


Figure I.5. Schéma du montage de l'essai en court-circuit d'un transformateur triphasé.

On relève la tension appliquée U_{1C} et la puissance active P_{1C} absorbée au primaire du transformateur, ainsi que le courant I_{2C} circulant dans le secondaire.

U_{1C} étant très faible dans la pratique (quelques % de la tension nominale), nous pouvons négliger les pertes fer en court-circuit. Ainsi, la puissance absorbée en court-circuit représente les pertes Joule dans les enroulements du transformateur.

Chapitre II : Généralités

sur les puissances

II. Généralités

II.1. Puissance instantanée

Soit un dipôle linéaire soumis à une tension sinusoïdale :

$$U(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (\text{II.1})$$

Le courant qui le parcourt est sinusoïdal et peut s'écrire sous la forme :

$$i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{II.2})$$

$u(t)$ et $i(t)$ représentent les grandeurs instantanées de la tension et du courant respectivement et φ est le déphasage entre le courant et la tension prise comme origine des phases. U et I sont les valeurs efficaces de la tension et du courant et ω représente la pulsation. Dans un intervalle de temps infiniment court dt , l'énergie reçue par le dipôle est la même que si la tension u et le courant i étaient constants, elle s'écrit comme suit :

$$dw = u(t)i(t)dt \quad (\text{II.3})$$

Par définition, la puissance instantanée est donnée par le rapport :

$$p = \frac{dw}{dt} = u(t)i(t) \quad (\text{II.4})$$

II.2. Puissance active

La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée. Elle est reçue par un dipôle et est transformée en énergie mécanique, thermique ou calorifique, donc directement utilisable. La puissance active représente la grandeur principale qui détermine l'état énergétique des installations à courant alternatif.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T [(U\sqrt{2} \sin(\omega t)][I\sqrt{2} \sin \omega t - \varphi)]dt \quad (\text{II.5})$$

L'équation (II.5) devient :

$$P = UI \cos \varphi \quad (\text{II.6})$$

II.3. Puissance réactive

La puissance réactive Q mesurée en Vars sert à l'aimantation des circuits magnétiques des appareils récepteurs. Cette puissance n'est pas directement utilisable mais elle circule de la source aux récepteurs et inversement. L'expression de la puissance réactive est :

$$Q = UI \sin \varphi \quad (\text{II.7})$$

II.4. Puissance apparente

Cette puissance n'a aucune signification physique, elle sert uniquement à dimensionner les machines, telles que les transformateurs et les moteurs à courant alternatif. La puissance apparente s'exprime en volt- ampère [VA].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{II.8})$$

II.5. Puissance déformante

On considère un dipôle dont les tensions et intensité sont notées $u(t)$ et $i(t)$. La puissance déformante D pour ce dipôle est liée aux puissances apparente, active et réactive par la relation :

$$S = \sqrt{p^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.9})$$

Soit

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (\text{II.10})$$

La puissance déformante est due aux « interactions » entre les harmoniques de rangs différents de la tension et de l'intensité du courant. Il est à noter que lorsque la tension et le courant sont parfaitement sinusoïdaux, la puissance déformante est nulle et la puissance apparente S reprend sa forme classique :

$$S = \sqrt{p^2 + Q^2} \quad (\text{II.11})$$

II.6. Facteur de puissance

En particulier, si le courant et la tension sont des fonctions sinusoïdales du temps, le facteur de puissance d'une installation électrique de l'installation est égal au rapport de la puissance active P sur la puissance apparente S .

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (\text{II.12})$$

Le facteur de puissance permet d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateurs d'énergie réactive. Un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive. Par contre un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0.

La valeur du facteur de puissance qui intervient dans le contrat de facturation de l'énergie électrique représente le facteur de puissance moyen car pour une installation déterminée, les appareils ne fonctionnent pas dans les mêmes conditions. Il est calculé à partir des énergies active et réactive et est donné par :

$$(\cos \varphi)_{\text{moy}} = \frac{E_{\text{tot}}}{\sqrt{E_{\text{tot}}^2 + W_{\text{tot}}^2}} \quad (\text{II.13})$$

Où E_{tot} et W_{tot} désignent respectivement les énergies active et réactive consommées pendant le temps t .

II.7. Composantes active et réactive du courant

A chacune des énergies active et réactive correspond un courant. Le courant actif (I_a) est en phase avec la tension du réseau. Le courant réactif (I_r) est déphasé de 90° par rapport au courant actif, soit en retard (récepteur inductif), soit en avance (récepteur capacitif). Le courant apparent (I_t) est le courant résultant qui parcourt la ligne depuis la source jusqu'au récepteur. Si les courants sont parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation de Fresnel. Ces courants se composent alors vectoriellement comme représenté sur la figure II.1.

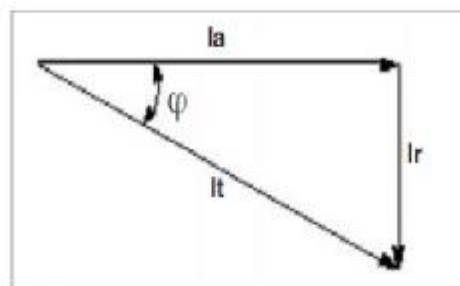


Figure II.1. Composition vectorielle des courants.

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (\text{II.14})$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.15})$$

$$I_r = I \cdot \sin \varphi \quad (\text{II.16})$$

II.8. Composantes active et réactive de la puissance

Le diagramme précédent (figure II.1) établi pour les courants est aussi valable pour les puissances, en multipliant chacun des courants par la tension commune U .

On définit ainsi (figure II.2) :

- La puissance apparente : $S = UI$ (kVA),
- La puissance active : $P = UI \cdot \cos \varphi$ (kW),
- La puissance réactive : $Q = UI \cdot \sin \varphi$ (kVAR).

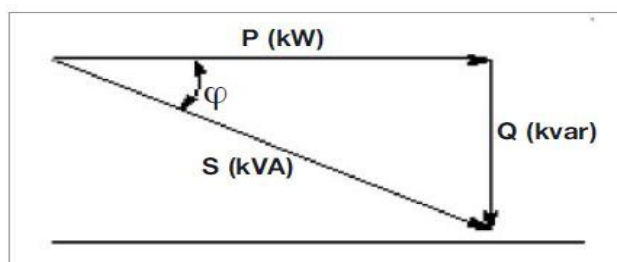


Figure II.2. Composition vectorielle des puissances.

II.9. Evaluation de l'énergie électrique

II.9.1. Energies active, réactive et apparente

Toute machine électrique utilisant le courant alternatif (moteur, transformateur) met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive. L'énergie active consommée résulte de la puissance active absorbée par les récepteurs. Elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes).

L'énergie réactive consommée sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive des récepteurs.

L'énergie apparente est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente S des récepteurs, somme vectorielle de la puissance active et de la puissance réactive.

II.9.2. Bilan des puissances

Le bilan des puissances est utilisé pour déterminer les caractéristiques du transformateur capable d'alimenter une entreprise, en tenant compte d'une éventuelle augmentation de la demande d'énergie.

II.9.3. Puissance installée

Elle est déterminée à partir de la somme de toutes les puissances lues sur les plaques signalétiques des récepteurs (moteurs) après avoir divisé chacune par le rendement de ces récepteurs. Il faut tenir compte de l'éclairage, la climatisation, les chauffages ...etc. Cette puissance représente la puissance la plus élevée car elle suppose que tous les récepteurs fonctionnent simultanément et en régime nominal.

$$P_{ins} = \sum_j^m P_j / \eta_j \quad (\text{II.17})$$

Avec :

η_j : rendement du récepteur d'indice j ;

P_{ins} : puissance installée totale ;

P : puissance installée du récepteur d'indice j ;

m : nombre de récepteurs.

Il est à noter que les informations sur les puissances réellement installées sont exhaustives. Pour cela, généralement, on table sur des estimations dont les valeurs sont consignées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Valeurs estimées des puissances installées [6].

Type récepteur	Type d'exploitation	Puissance installée
Eclairage fluorescent	Bureau atelier	25 VA/ m ²
		20 VA/m ²
		15 VA/ m ²
		Hauteur plafond = 9m
		Hauteur plafond = 6m
Force motrice	Traitement thermique	700 VA/m ²
	Atelier chaudronnerie	450 VA/m m ²
	Atelier peinture	350 VA/ m ²
	Atelier usinage	300 VA/ m ²
	Atelier montage	70 VA/ m ²
	Atelier expédition	50 VA/ m ²
	Bureau	25 VA/ m ²
	Chauffage	23 VA/ m ²
	Conditionnement d'air	4 VA/m ²

II.9.4. Puissance consommée

C'est la puissance maximale réellement consommée par les récepteurs. Elle est égale à la somme des puissances installées multipliée par le coefficient d'utilisation K_u et le coefficient de simultanéité K_s .

II.9.4.1. Coefficient de simultanéité (K_s)

Le coefficient de simultanéité K_s est le rapport de la somme des puissances effectivement absorbées par les appareils susceptibles de fonctionner simultanément à la somme des puissances nominales. La détermination du facteur de simultanéité demande la connaissance détaillée de l'installation et des conditions d'exploitation. On ne peut donc pas choisir des valeurs précises applicables à tous les cas. Pour le calcul de ce facteur, on utilise les

normes N.F.C14-100, U.T.E63-410 et N.F.C 16-100, qui donnent quelques précisions sur ce facteur.

Si l'installation est connue en détail, le coefficient de simultanéité se calcule comme suit :

Soit un niveau n d'une armoire de distribution de puissance, à un nombre N de récepteurs. Le coefficient de simultanéité de ce niveau est :

$$K_{Sn} = N_{RFS} \text{ (de cette armoire)} / N_{TR} \text{ (de cette armoire)} \quad (\text{II.18})$$

Avec : N_{RFS} : nombre de récepteurs fonctionnent simultanément de cette armoire ;

N_{TR} : nombre total de récepteurs de cette armoire.

Le coefficient de simultanéité peut être également utilisé pour le calcul du courant entrant dans le choix des sections des conducteurs et des câbles ainsi que le choix de l'appareillage de protection. Les valeurs du coefficient de simultanéité K_S en fonction du nombre de circuits sont consignées dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Coefficient de simultanéité selon la norme UTE 63-40 pour les armoires [6]

Nombre de circuits	Facteur de simultanéité K_S
1	1.0
2 et 3	0.9
4 et 5	0.8
5 et 9	0.7
10 et plus	0.6

Notons que si l'armoire est composée principalement de circuits d'éclairage, il est prudent de majorer ces facteurs. Les valeurs du coefficient de simultanéité K_S recommandées sont données par le tableau II.3.

Tableau II.3. Valeurs du coefficient de simultanéité K_S Pour les différents types d'utilisation [6]

Utilisation	Facteurs K_S
Eclairage, conditionnement d'air	1.00
Chauffage électrique, chauffe eau	1.00
Prises courant (N étant le nombre de prises de courant alimentées par le même circuit)	$0.10 + 0.90 / N$
Appareil de cuisson	0.7
- moteur à grande consommation	1.00
-moteurs à moyenne consommation	0.75
-autres	0.60

II.9.4.2. Facteur d'utilisation (K_U)

C'est le rapport de la puissance consommée par les récepteurs à sa puissance nominale. Il tient compte du fait que certains récepteurs ne fonctionnent pas à leur régime nominal. Les valeurs du coefficient d'utilisation K_U recommandées par la norme N.F.C 15-100, sont données sur le tableau II.4.

Tableau II.4. Valeurs du coefficient d'utilisation pour différents récepteurs [6]

Type d'utilisation	K_U
Eclairage	1.00
Prises de courant	0.15
Chauffage	1.00
Moteurs de grande puissance	1.00
Moteurs de moyenne puissance	0.75
Moteurs de petite puissance	0.60
Machines outils	0.80

Les gammes des puissances sont données ci-après :

- Petite puissance : $P < 5 \text{ kW}$
- Moyennes puissances : $5 \text{ kW} \leq P \leq 75 \text{ kW}$
- Grandes puissances : $P > 75 \text{ kW}$.

II.10. Méthodes de calcul de la puissance consommée [8]

Soit un récepteur d'indice (i) de puissance utile P_u , de facteur de puissance $\cos\varphi$ et de rendement (η_i). La puissance absorbée par le récepteur (i) est :

$$P_i = P_u / \eta_i \quad (\text{II.19})$$

La puissance réactive correspondante est :

$$Q_i = P_i \operatorname{tg} \varphi_i \quad (\text{II.20})$$

Si K_{U_i} est le coefficient d'utilisation du récepteur (i) alors la puissance d'utilisation s'écrit comme suit :

$$P_{U_i} = K_{U_i} \cdot P_i \quad (\text{II.21})$$

$$Q_{U_i} = K_{U_i} \cdot Q_i \quad (\text{II.22})$$

II.10.1. Puissance consommée dans chaque coffret

Soit le groupe de récepteurs d'indice(i) possédant un facteur de simultanéité K_S au niveau du coffret (j) qui les alimente ($j= 1, 2, 3,4, \dots, n$)

La puissance consommée au niveau du coffret est :

$$P_{Sj} = (\sum_{i=1}^n P_{U_i}) \cdot K_{Sj1} \quad (\text{II.23})$$

$$Q_{sj} = \sum_{i=1}^n Q_{U_i} \cdot K_{Sj1} \quad (\text{II.24})$$

1 : indice de premier niveau

n : nombre de récepteurs

Nous pouvons avoir deux ou plusieurs facteurs de simultanéité dans un même coffret, la puissance s'écrit alors :

$$P_{sj} = (\sum_{i=1}^n P_{Ua} k_{Sja}) + (\sum_{i=1}^n P_{uib} \cdot K_{sjb}) + \dots \quad (\text{II.25})$$

II.10.2. Puissance consommée au niveau du tableau secondaire

Soit un tableau secondaire d'indice (k) qui alimente les différents coffrets (j_2) et affecté lui aussi d'un facteur de simultanéité (K_{Sk2})

K : indice du tableau secondaire

2 : indice de simultanéité du deuxième niveau.

Les puissances consommées au niveau du tableau (k) sont :

$$P_{sk} = (\sum_{j_2=1}^m P_{sj_2}) \cdot K_{sj_2} \quad (\text{II.26})$$

$$Q_{sk} = (\sum_{j_2}^m Q_{sj_2}) \cdot K_{sj_2} \quad (\text{II.27})$$

m : représente le nombre de coffrets.

Le facteur de puissance du tableau K s'écrit :

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{sk}}{\sqrt{P_{sk}^2 + Q_{sk}^2}} \quad (\text{II.28})$$

L'intensité du courant au niveau du tableau général est :

$$I_k = \frac{P_{sk}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_k} \quad (\text{II.29})$$

II.10.3. Puissance consommée au niveau du tableau général

Le tableau général est relié à tous les tableaux secondaires affectés d'un facteur de simultanéité (K_{S3}). Le chiffre 3 représente l'indice du troisième niveau.

Les puissances active et réactive sont données par les expressions :

$$P_{TG} = (\sum_{k=1}^r P_{Sk}) \cdot K_{S3} \quad (\text{II.30})$$

$$Q_{TG} = \sum_{k=i}^r Q_{Sk}) \cdot K_{S3} \quad (\text{II.31})$$

r : nombre de tableaux secondaires

- Facteur de puissance au niveau du tableau général :

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{TG}}{\sqrt{P_{TG}^2 + Q_{TG}^2}} \quad (\text{II.32})$$

- Intensité du courant au niveau du tableau général :

$$I_{TG} = \frac{P_{TG}}{\sqrt{3} U \cos \varphi_k} \quad (\text{II.33})$$

II.10.4. Puissance du transformateur alimentant l'installation

La puissance du transformateur alimentant l'installation est calculée en tenant compte d'une éventuelle extension ou augmentation du nombre de récepteurs. C'est pour cette raison que l'on admet 30% de la puissance de plus pour estimer la puissance du transformateur à mettre en place, soit :

$$S = 1,3 S_g \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$S_G = \sqrt{P_g^2 + Q_g^2} \quad (\text{II.35})$$

II.11. Bilan des puissances dans un transformateur

Tout conducteur électrique, parcouru par un courant électrique s'échauffe et engendre donc des pertes de puissance par effet Joule. Ces pertes se calculent de la façon suivante :

A) Puissances actives :

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N 3 \cdot R_i \cdot I_i^2 \quad \text{en triphasé} \quad (\text{II.36})$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N 2 \cdot R_i \cdot I_i^2 \quad \text{en monophasé} \quad (\text{II.37})$$

ΔP : pertes de puissance dans les conducteurs en watt ;

i : indice distinguant les conducteurs ;

R_i : résistance de chaque conducteur en ohm.

I_i : courant traversant les conducteurs en ampère.

B) Puissances réactives :

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^N 3 \cdot X_i \cdot I_i^2 \quad \text{en triphasé} \quad (\text{II.38})$$

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^N 2 \cdot X_i \cdot I_i^2 \quad \text{en monophasé} \quad (\text{II.39})$$

ΔQ : perte de puissance réactive dans les conducteurs en (Var) ;

X_i : réactance de chaque conducteur(i) en ohm.

Un transformateur est constitué de deux enroulements, le primaire et le secondaire, qui sont liés magnétiquement par un noyau ferromagnétique. Cette constitution induira des pertes qui sont :

a- Puissances actives :

Elles se composent de :

- La puissance perdue dans le cuivre :

$$\text{Primaire : } 3 R_1 I_1^2 \quad (\text{II.40})$$

$$\text{Secondaire : } 3 R_2 I_2^2 \quad (\text{II.41})$$

- La puissance perdue dans le fer :

$$P_0 = \sqrt{3} U_1 I_0 \cos \varphi_0 \quad (\text{II.42})$$

Dans la relation II.46, P_0 représente la puissance absorbée par le transformateur quand il est à vide. Cette puissance représente les pertes fer du transformateur étant donné que les pertes Joule à vide sont faibles, donc négligeables.

a- Puissance réactive :

Elles sont dues :

- Aux flux φ_1 engendré par l'enroulement primaire et φ_2 engendré par l'enroulement secondaire. Les pertes de puissance réactive s'expriment au primaire par la relation :

$$Q_1 = 3X_1 I_1^2 \quad (\text{II.43})$$

et au secondaire par la relation :

$$Q_2 = 3X_2 I_2^2 \quad (\text{II.44})$$

- Aux flux commun φ . Pour entretenir ce flux, il exige une puissance réactive à vide de :

$$Q_0 = \sqrt{3} U_1 I_0 \sin \varphi_0 \quad (\text{II.45})$$

Le bilan de puissance active et réactive dans un transformateur est formulé comme suit :

• **Puissance active :**

$$\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 = 3R_1 I_1^2 + 3R_2 I_2^2 + \sqrt{3} U_1 I_0 \cos \varphi_0 + \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (\text{II.46})$$

• **Puissance réactive :**

$$\sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi_1 = 3X_1 I_1^2 + 3X_2 I_2^2 + \sqrt{3} U_1 I_0 \sin \varphi_0 + \sqrt{3} U_2 I_2 \sin \varphi_2 \quad (\text{II.47})$$

Chapitre III :

compensation de l'énergie réactive

III.1. Introduction

Le transformateur, élément indispensable dans le transport et la distribution de l'énergie électrique doit faire l'objet d'une attention particulière. Au jour d'aujourd'hui, les abonnés MT/BT sont tenus d'évaluer le niveau de leur consommation électrique en énergie active ainsi qu'en énergie réactive. L'énergie réactive est devenue très onéreuse et sa compensation est un élément important pour réduire la facture d'énergie et améliorer la qualité du réseau électrique.

III.2. Facteur de puissance

III.2.1. Définition :

Nous rappelons que le facteur de puissance d'un appareil électrique est égal au rapport de la puissance active P sur la puissance apparente S. (si le courant et la tension sont des fonctions sinusoidales du temps).

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (\text{III.1})$$

Le facteur de puissance permet ainsi de rendre compte de la consommation d'énergie réactive. En effet, un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive (résistance pure). Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductance pure).

Dans une installation électrique, le facteur de puissance pourra être différent d'un atelier à un autre selon les appareils installés et la manière dont ils sont utilisés (fonctionnement à vide ou pleine charge).

Les appareils de comptage d'énergie mesurant plus facilement les consommations d'énergie active et réactive, les services de facturation de l'énergie électrique font apparaître pour leur clientèle, au niveau des factures d'électricité, le terme de $\text{tg}\varphi$ qui vaut :

$$\text{tg}\varphi = \frac{E_r}{E_a} \quad (\text{III.2})$$

La $\text{tg}\varphi$ est le quotient entre l'énergie réactive E_r et l'énergie active E_a consommées pendant le même temps. A l'inverse du $\text{cos}\varphi$, on s'aperçoit facilement que la valeur de $\text{tg}\varphi$ doit être la plus petite possible afin d'avoir le minimum de consommation d'énergie réactive.

III.2.2. Amélioration du facteur de puissance

Améliorer le facteur de puissance d'une installation électrique signifie la compensation de l'énergie réactive consommée par une installation électrique. Cela signifie qu'il faut doter l'installation des moyens qui lui permettent de produire, elle-même une part plus ou moins importante de l'énergie réactive qu'elle consomme.

Il existe différents systèmes pour produire de l'énergie réactive mais le condensateur demeure le plus utilisé, compte-tenu :

- de sa non consommation de énergie active ;
- de son coût d'achat moindre par rapport aux autres systèmes de compensation ;
- de sa facilité d'emploi ;
- de sa durée de vie (10 ans environ) ;
- de son très faible entretien (appareil statique).

III.3. Avantages d'un bon facteur de puissance

Nous entendons par un bon facteur de puissance, un $\text{cos}\varphi$ élevé (proche de 1) ou $\text{tg}\varphi$ faible (proche de 0). Un bon facteur de puissance permet d'optimiser une installation électrique et apporte des avantages selon plusieurs aspects.

III.3.1. Aspect économique

- **Suppression de la facturation des consommations excessives d'énergie réactive :**
Pour les gros consommateurs, l'énergie réactive au-delà d'un seuil permis, est facturée pendant certain périodes.

- **Réduction de la puissance apparente souscrite** : Pour les petits consommateurs, le distributeur facture "une prime fixe" qui dépend de la puissance apparente souscrite. Au delà de cette puissance le consommateur paye des pénalités. La compensation d'énergie réactive permet de réduire la prime fixe en diminuant la puissance apparente souscrite.

III.3.2. Aspect technique

- **Diminution des pertes dans les conducteurs à puissance active constante**

Les pertes W_j d'énergie active dans les conducteurs sont proportionnelles au carré du courant transporté et diminuent au fur et à mesure que le facteur de puissance augmente.

$$W_j = \frac{R.l.10^3}{u^2} \times \frac{p^2}{\cos^2 \varphi} \times t \quad (\text{III.3})$$

R : résistance linéaire (Ω/Km) ;

P : puissance active(kW) ;

l : longueur de la ligne (km) ;

t : durée annuelle d'utilisation de la puissance P (heures).

- **Diminution de la chute de tension**

La chute de tension relative dans une ligne ou un transformateur triphasés s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{\Delta V}{V_n} = \frac{R P + X Q}{3 V_n^2} \quad (\text{III.4})$$

R : résistance des conducteurs ou du transformateur ;

X : réactance du câble ou du transformateur ;

P : puissance active de la charge ;

Q : puissance réactive de la charge ;

V_n : tension simple nominale.

La compensation aux bornes de la charge diminue la valeur de la puissance réactive Q et par conséquent, la chute de tension diminue.

- **Augmentation de la puissance active transportée à courant apparent constant**

La mise en place de batteries de condensateurs en aval d'un câble (ou au secondaire d'un transformateur) dont la charge a un faible $\cos \varphi$, permet de transporter une puissance active supérieure pour un même courant apparent dans les conducteurs (ou le transformateur).

En effet, supposons qu'un câble (ou un transformateur) transporte une puissance active P , avec :

$$P = \sqrt{3} U_n I \cos \varphi \quad (\text{III.5})$$

Si on compense de telle sorte à obtenir $\cos \varphi'$, à courant apparent constant (I constant), on pourra transporter une puissance active P' telle que :

$$P' = \sqrt{3} U_n I \cos \varphi' \quad (\text{III.6})$$

III.4. Inconvénients d'un faible facteur de puissance

Un générateur, une ligne et un appareil d'utilisation sont établis pour fonctionner sous une certaine tension efficace avec un courant efficace inférieur à une certaine limite, fixée le plus souvent par des considérations d'échauffement ou de chute de tension [10].

- **Pour le producteur**

Le dimensionnement d'un alternateur ou d'un transformateur dépend de sa puissance apparente. Ils sont d'autant plus gros et plus coûteux que le facteur de puissance est plus petit puisque :

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (\text{III.7})$$

- **Pour le distributeur**

Une installation déjà existante peut fournir d'autant moins d'énergie active que le facteur de puissance est plus faible.

- **Pour l'utilisateur**

L'utilisateur lui-même est directement intéressé par le facteur de puissance de son installation : il influe sur la chute de tension du transformateur placé à l'entrée de celle-ci et sur celle des conducteurs et de ce fait, les moteurs pourraient se retrouver alimentés avec une tension inférieure à la tension nominale qui leur est nécessaire. L'utilisateur est en outre appelé à relever son facteur de puissance à la valeur exigée par la société de facturation de l'énergie électrique.

III.5. Causes d'un faible facteur de puissance [10]

Les causes des faibles valeurs du facteur de puissance sont évidemment constituées par les gros consommateurs de courant réactif. Le tableau III.1 indique les principaux éléments qui influent sur la valeur du facteur de puissance.

Tableau III.1. Récepteurs qui influencent le facteur de puissance [6].

Appareil	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
Moteurs asynchrones en pleine charge	0.85	0.62
Moteur asynchrone en demi-charge	0.73	0.93
Lampes fluorescentes (non compensées)	0.5	1.73
Transformateurs-redresseurs de soudage à l'arc	0,7	1,02
Fours à arc	0,8	0.75
Redresseurs de puissance à thyristors	0.4	2.25

III.6. Modes d'amélioration du facteur de puissance

III.6.1. Action directe sur l'installation [11]

Il faut procéder à une révision approfondie de toute l'installation électrique. Cette révision doit porter :

- Sur les moteurs : remplacement d'un moteur inutilement trop puissant par un autre moins puissant, généralisation de la marche en étoile pour les moteurs (normalement en triangle) lorsqu'ils fonctionnent à faible charge.
- Sur les transformateurs : réduction des marches à vide ou à faible charge, remplacement d'un appareil à pertes normales par un transformateur à pertes réduites.

III.6.2. Action indirecte

Il s'agit donc de produire de l'énergie réactive au niveau de l'installation elle-même.

III.7. Moyens de compensation de l'énergie réactive

Les moyens les plus utilisés pour la compensation de l'énergie réactive sont :

- 1- Le compensateur statique à thyristors ;
- 2- Le compensateur synchrone ;
- 3- La batterie de condensateurs.

III.7.1. Compensateur statique à thyristors

Le compensateur statique à thyristors est constitué d'un ensemble de condensateurs et d'inductances commandés par Thyristors. Différentes combinaisons sont possibles et l'une des plus utilisées consiste à associer une inductance commandée par thyristors à des gradins de condensateurs commandés manuellement. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Dans le cas des batteries de condensateurs, les thyristors commandent la mise en service des différents gradins et la puissance réactive fournie varie par paliers.

III.7.2. Compensateur synchrone

Il peut être assimilé à un moteur synchrone fonctionnant à vide, c'est à dire que son arbre n'est soumis à aucun couple résistant, qui serait peut-être considéré comme charge. Le stator est branché au réseau (figure III.1) et sur le rotor est enroulée une bobine d'excitation. On peut donc considérer que le compensateur synchrone consomme une très faible quantité de puissance active égale aux pertes par effet Joule dans les enroulements du stator.

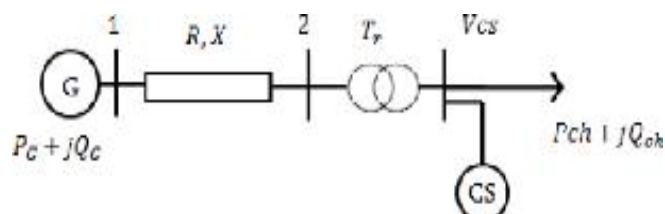


Figure III.1. Schéma d'alimentation d'un réseau électrique avec un compensateur synchrone.

III.7.3. Batterie de condensateurs

Les condensateurs sont placés en série sur une ligne dont ils compensent partiellement la réactance. La compensation série est employée sur certaines lignes à haute tension à la fois très chargées et très longues. Le branchement d'une batterie de condensateurs aux bornes d'une charge est représenté sur la figure III.2. La batterie dans ce cas est considérée comme générateur de puissance réactive.

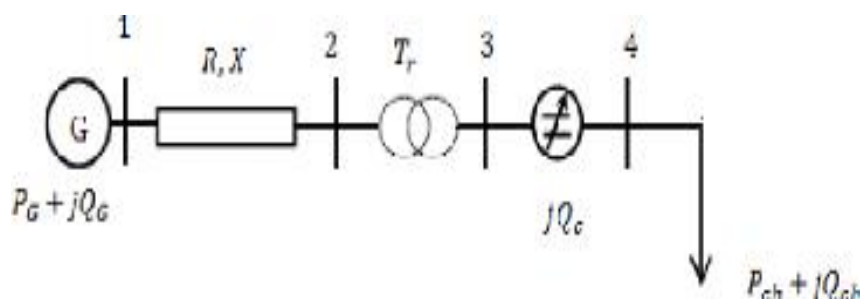


Figure III.2. Schéma d'alimentation d'un réseau électrique avec une compensation série.

La variation de la puissance réactive Q_C peut être obtenue par le branchement ou le débranchement des condensateurs, cette action est obtenue par une combinaison dans la connexion des condensateurs (figure III.3).

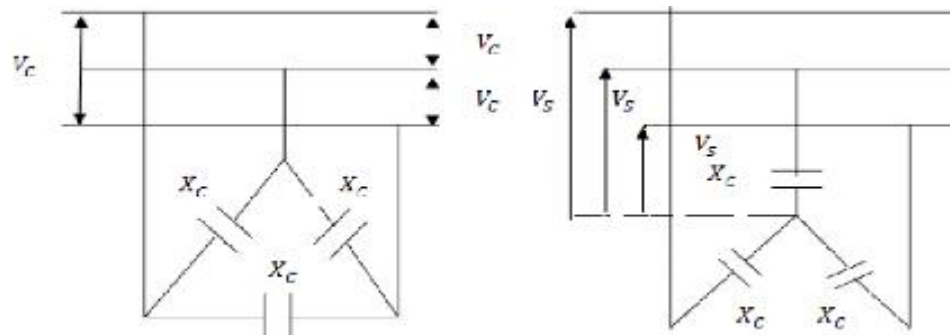


Figure III.3. Représentation de la connexion des condensateurs (étoile ou triangle).

III.8. Méthode de détermination de la compensation d'énergie réactive

III.8.1. Calcul de la puissance réactive nécessaire Q_C

Elle se calcule nécessairement à partir des données électriques de l'installation comme suit :

- Faire le bilan des puissances actives P et réactives Q de tous les récepteurs de l'installation ;
- Tenir compte des facteurs d'utilisation et de simultanéité ;
- Calculer la puissance réactive Q_C nécessaire. La figure III.4 représente le schéma de principe de la compensation.

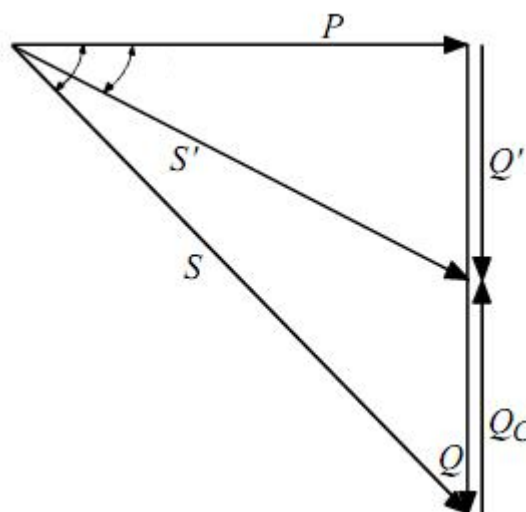


Figure III.4. Schéma de principe de la compensation.

$$Q_c = Q - Q' = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \quad (\text{III.8})$$

$\operatorname{tg} \varphi$ correspond au $\cos \varphi$ de l'installation avant la compensation.

$\operatorname{tg} \varphi'$: correspond au $\cos \varphi'$ souhaité après la compensation.

Q_c : puissance réactive de la batterie de condensateurs.

P : puissance active de la charge.

La relation suivante peut s'écrire :

Si la puissance active P est constante, alors :

$$Q_c = P \cdot k \quad (\text{III.9})$$

Le facteur k peut se déterminer à partir du tableau III.2 en fonction de $\operatorname{tg} \varphi$ et $\operatorname{tg} \varphi'$.

Tableau III.2. kVAR à installer par kW pour élever le facteur de puissance.

avant compensation		Puissance du condensateur en kvar à installer par kw de charge pour relever le facteur de puissance (cosφ) ou tgφ à une valeur donnée													
tgφ	cosφ	tgφ	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,4	0,36	0,33	0,29	0,25	0,2	0,14	0
		cosφ	0,8	0,86	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
2,29	0,40		1,557	1,891	1,805	1,832	1,861	1,895	1,924	1,959	1,998	2,037	2,085	2,146	2,288
2,22	0,41		1,474	1,625	1,742	1,769	1,798	1,831	1,84	1,896	1,935	1,973	2,021	2,082	2,225
2,16	0,42		1,431	1,561	1,681	1,709	1,738	1,771	1,8	1,836	1,874	1,913	1,961	2,022	2,165
2,10	0,43		1,356	1,499	1,624	1,651	1,68	1,713	1,742	1,778	1,816	1,855	1,903	1,964	2,107
2,04	0,44		1,29	1,441	1,558	1,585	1,614	1,647	1,677	1,712	1,751	1,79	1,837	1,899	2,041
1,98	0,45		1,23	1,384	1,501	1,532	1,561	1,592	1,628	1,659	1,695	1,737	1,784	1,846	1,988
1,93	0,46		1,179	1,33	1,446	1,473	1,502	1,533	1,567	1,6	1,636	1,677	1,725	1,786	1,929
1,88	0,47		1,13	1,278	1,397	1,425	1,454	1,485	1,519	1,532	1,588	1,629	1,677	1,758	1,881
1,83	0,48		1,076	1,228	1,343	1,37	1,4	1,43	1,464	1,497	1,534	1,575	1,623	1,684	1,826
1,78	0,49		1,03	1,179	1,297	1,326	1,355	1,386	1,42	1,453	1,489	1,53	1,578	1,639	1,782
1,73	0,50		0,982	1,232	1,248	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,59	1,732
1,69	0,51		0,936	1,087	1,202	1,23	1,257	1,291	1,323	1,357	1,395	1,435	1,483	1,544	1,686
1,64	0,52		0,894	1,043	1,16	1,188	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644
1,60	0,53		0,85	1	1,116	1,144	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,6
1,56	0,54		0,809	0,959	1,075	1,103	1,13	1,164	1,196	1,23	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559
1,52	0,55		0,769	0,918	1,035	1,063	1,09	1,124	1,156	1,19	1,228	1,258	1,316	1,377	1,519
1,48	0,56		0,73	0,879	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,48
1,44	0,57		0,692	0,841	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,3	1,442
1,40	0,58		0,665	0,805	0,921	0,949	0,976	1,01	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405
1,37	0,59		0,618	0,768	0,884	0,912	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368
1,33	0,60		0,584	0,733	0,849	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334
1,30	0,61		0,549	0,699	0,815	0,843	0,87	0,904	0,936	0,97	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299
1,27	0,62		0,515	0,665	0,781	0,809	0,836	0,87	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265
1,23	0,63		0,483	0,633	0,749	0,777	0,804	0,838	0,87	0,904	0,942	0,982	1,03	1,091	1,233
1,20	0,64		0,45	0,601	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,2
1,17	0,65		0,419	0,569	0,685	0,713	0,74	0,774	0,806	0,84	0,878	0,918	0,966	1,027	1,169
1,14	0,66		0,388	0,538	0,654	0,682	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138
1,11	0,67		0,358	0,508	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108
1,08	0,68		0,329	0,478	0,595	0,623	0,65	0,684	0,716	0,75	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079
1,05	0,69		0,299	0,449	0,565	0,593	0,62	0,654	0,686	0,72	0,758	0,798	0,84	0,907	1,049
1,02	0,70		0,27	0,42	0,536	0,564	0,591	0,657	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,02
0,99	0,71		0,242	0,392	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,85	0,992
0,96	0,72		0,213	0,364	0,479	0,507	0,534	0,568	0,6	0,634	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963
0,94	0,73		0,186	0,336	0,452	0,48	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936
0,91	0,74		0,159	0,309	0,425	0,453	0,48	0,514	0,546	0,58	0,618	0,658	0,7	0,767	0,909
0,88	0,75		0,132	0,282	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,74	0,882
0,86	0,76		0,105	0,255	0,371	0,399	0,426	0,46	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855
0,83	0,77		0,079	0,229	0,345	0,373	0,4	0,434	0,466	0,5	0,538	0,578	0,62	0,687	0,829
0,80	0,78		0,053	0,202	0,319	0,347	0,374	0,408	0,44	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803
0,78	0,79		0,026	0,176	0,292	0,32	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776
0,75	0,80			0,15	0,266	0,294	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,75
0,72	0,81			0,124	0,24	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724
0,70	0,82			0,098	0,214	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,489	0,556	0,698
0,67	0,83			0,072	0,188	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,53	0,672
0,65	0,84			0,046	0,162	0,19	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645
0,62	0,85			0,02	0,136	0,164	0,191	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,478	0,62
0,59	0,86				0,109	0,14	0,167	0,198	0,23	0,264	0,301	0,343	0,39	0,45	0,593
0,57	0,87				0,083	0,114	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,424	0,567
0,54	0,88				0,054	0,085	0,112	0,143	0,175	0,209	0,246	0,288	0,335	0,393	0,538
0,51	0,89				0,028	0,059	0,086	0,117	0,149	0,183	0,23	0,262	0,309	0,369	0,512
0,48	0,90					0,031	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484

III.9. Différents Modes de compensation [13]

La compensation peut être globale, par secteur ou individuelle. En principe, la compensation idéale est celle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Ce mode de compensation est très coûteux et dans la pratique, un optimum technico-économique est recherché.

a) Compensation globale

La batterie de condensateurs est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation (voir figure III.5). Elle reste en service de façon permanente pendant la période de facturation de l'énergie réactive pour un fonctionnement normal du site.

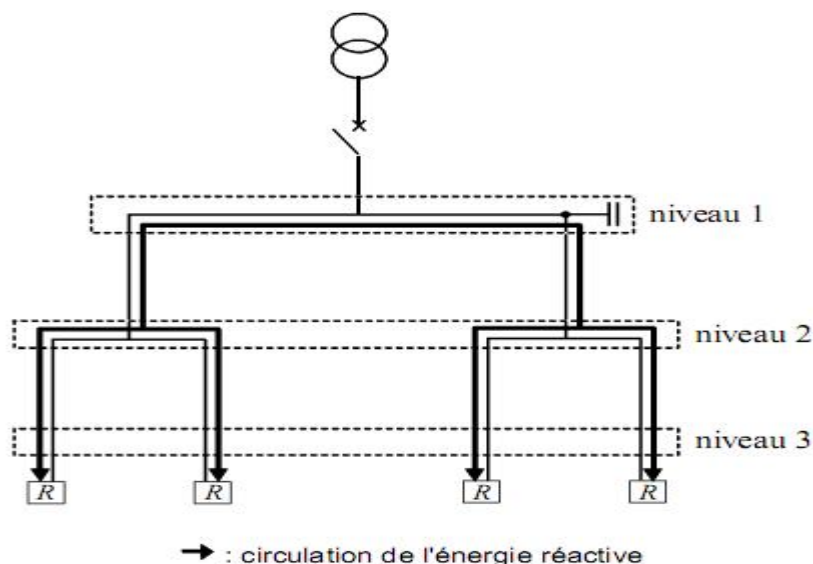


Figure III.5. Compensation globale (niveau 1).

Ce mode de compensation est économique du fait que toute la puissance de compensation est concentrée en un point. Il permet d'augmenter la puissance active disponible au niveau du transformateur de livraison. Lorsque la charge est régulière, une compensation globale convient.

Le mode de compensation globale présente des inconvénients parmi lesquels nous citons :

- les pertes par effet Joule et les chutes de tension dans les câbles ne sont pas diminuées ;
- Risque de surcompensation par suite de variations des charges importantes ;
- Non amélioration du facteur de puissance pour toute la partie de l'installation.*

b) Compensation par secteur :

Dans ce mode de compensation, la batterie est raccordée au tableau de distribution selon le schéma de la figure III.5. Cette compensation fournit l'énergie réactive demandée par un secteur de l'installation. Une grande partie de l'installation se trouve donc soulagée, en particulier les canalisations alimentant chaque secteur.

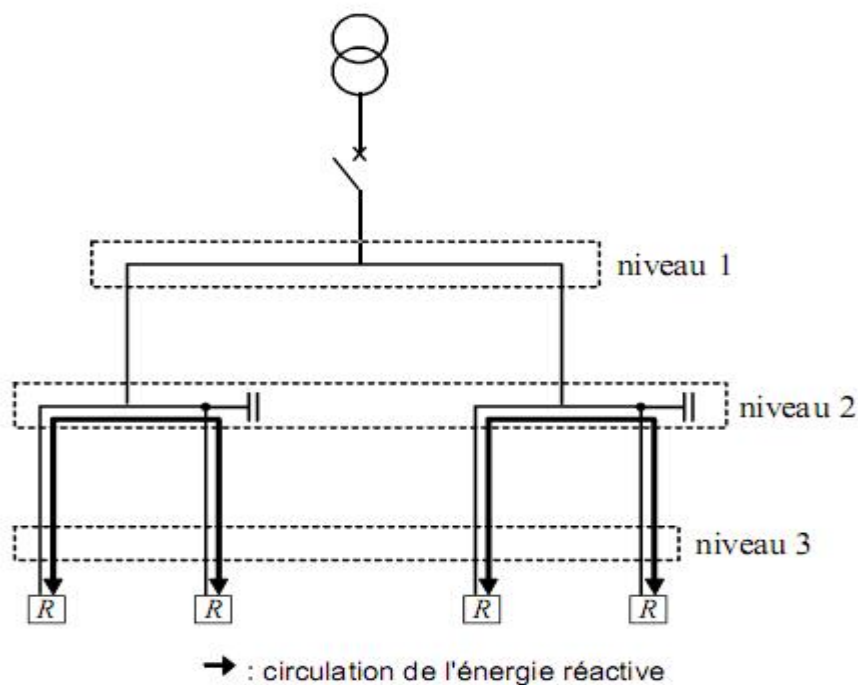


Figure III.6. Compensation par secteur.

Ce mode de compensation présente les avantages suivants :

- Augmente la puissance active disponible du transformateur et la puissance active qui peut être véhiculée dans les canalisations situées en amont du secteur compensé ;
- Supprime les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive ;

- Diminue les pertes par effet Joule dans les câbles ;

La compensation par secteur est conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des secteurs à forte consommation d'énergie réactive. Cette compensation est considérée la meilleure du fait qu'elle est économique et techniquement réalisable.

c) Compensation individuelle

Dans ce type de compensation, la batterie est raccordée directement aux bornes du récepteur comme le montre la figure III.7. La compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur. Cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins. Un complément en tête de l'installation peut être nécessaire au niveau du transformateur.

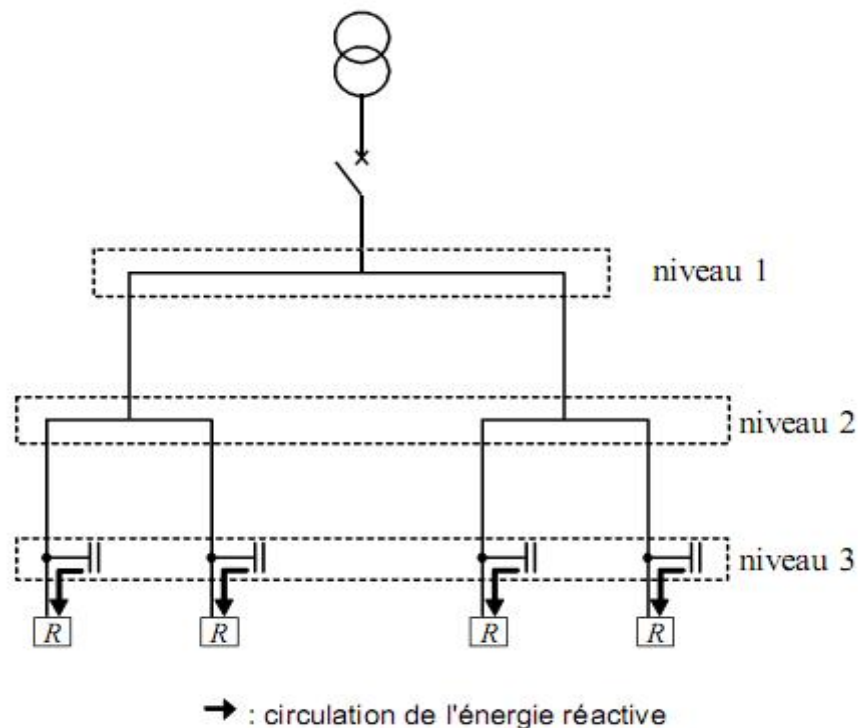


Figure III.7. Compensation individuelle.

La compensation individuelle de :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive ;
- Réduire les pertes par effet Joule et les chutes de tension dans les canalisations entre le niveau 3 et le niveau 1.

Dans la compensation individuelle, le courant réactif n'est plus véhiculé dans les canalisations de l'installation.

III.10. Types de compensation par batteries de condensateurs

La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits :

- Les condensateurs de valeur fixe ou batterie fixe ;
- Les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batteries automatiques) qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation.

III.10.1. Batteries fixes [10]

La batterie de condensateurs (figure III.8) a une puissance constante quelle que soit la variation du facteur de puissance et de la charge des récepteurs, donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation.

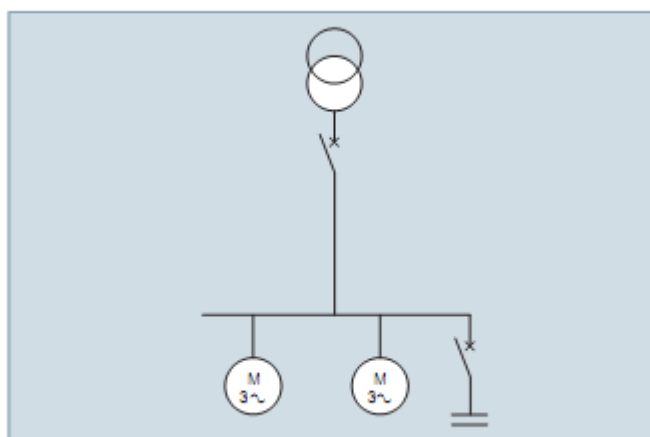


Figure III.8. Batteries fixes.

On met en service l'ensemble de la batterie dans un fonctionnement "Tout ou rien". La mise en service peut être manuelle (par disjoncteur ou interrupteur), semi-automatique (par contacteur) ou asservie aux bornes des moteurs.

Ce type de compensation est utilisé lorsque la puissance réactive est faible ($< 15\%$ de la puissance du transformateur) et la charge relativement stable. Cette compensation est utilisée pour la compensation individuelle (locale) des moteurs et pour les installations électriques à charge constante fonctionnant 24/24h.

III.10.2. Batteries de condensateurs en gradins avec régulation automatique [6]

La puissance réactive fournie par la batterie est modulable en fonction des variations du facteur de puissance et de la charge des récepteurs donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation. Ces batteries sont composées d'une association en parallèle de gradins de condensateurs (gradin = condensateur + contacteur). La mise en ou hors service étant asservie à un régulateur de puissance intégré. Ces batteries sont également utilisées dans les installations électriques à charge variable et dans la compensation de tableaux généraux ou gros départ. Le principe de la compensation automatique d'une installation est représenté sur la figure III.9.

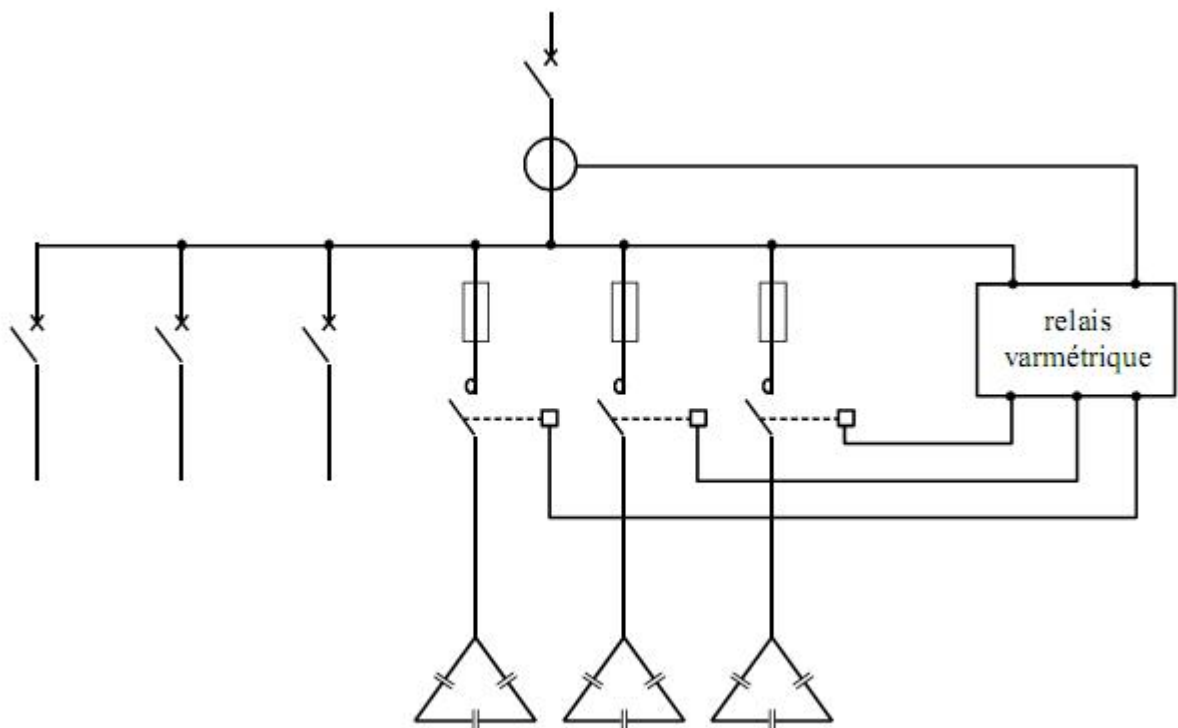


Figure III.9. Principe de la compensation automatique d'une installation.

La compensation automatique permet donc d'éviter les surtensions permanentes résultant d'une surcompensation lorsque le réseau est peu chargé.

III.10.3. Choix du type de compensation :

Le type de compensation est choisi selon les cas suivants :

- Si la puissance des condensateurs est inférieure à 15 % de la puissance du transformateur, on choisit une batterie fixe.
- Si la puissance des condensateurs est supérieure à 15 % de la puissance du transformateur, on choisit une batterie en gradins avec régulation automatique.

III.10. Choix du Branchement d'un condensateur

Les batteries de condensateurs peuvent être montées du côté basse tension comme du côté moyenne tension des transformateurs en montage étoile (figure III.10) et en montage triangle (figure III.11).

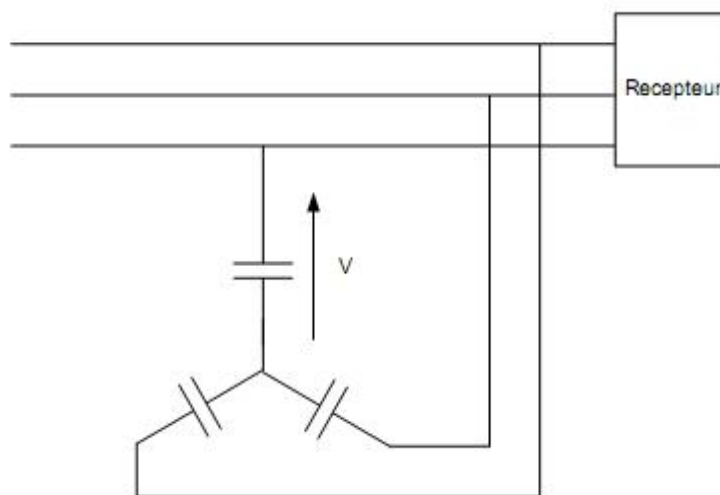


Figure III.10. Schéma du montage étoile des condensateurs.

On utilise le montage étoile dans les réseaux HT (haute tension) pour diminuer la tension aux bornes de chaque condensateur.

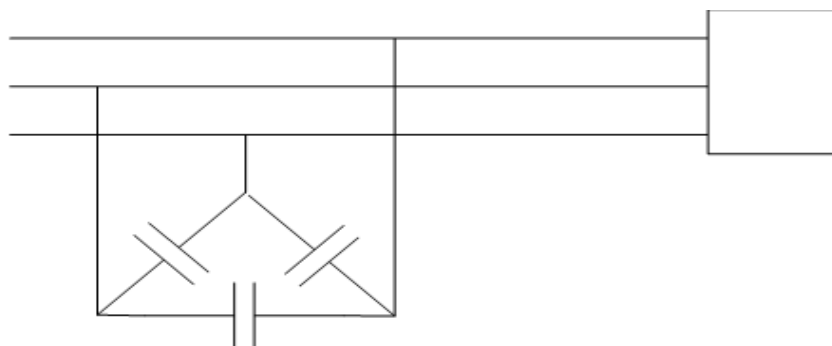


Figure III.11. Schéma du montage triangle des condensateurs.

On utilise le montage triangle dans les réseaux BT (basse tension) pour diminuer l'intensité dans chaque condensateur.

On peut déterminer la puissance de batterie à utiliser à partir de :

- La facture d'électricité.
- Du $\cos \varphi$ d'origine et du $\cos \varphi$ désiré.
- La puissance du moteur
- La puissance du transformateur.

III.11. Harmoniques et transformateurs

III.11.1. Origine des harmoniques

Les réseaux BT et MT sont soumis de plus en plus à des harmoniques de courant et de tension qui les polluent. Ces harmoniques sont générés par des charges non linéaires (fours à arc, éclairages convertisseur et redresseurs), qui absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de tension. Celles-ci peuvent perturber les appareils électriques du réseau. Ces harmoniques de courant et de tension peuvent fortement contraindre les transformateurs, jusqu'à les endommager.

III.11.2. Conséquences des harmoniques

La présence des harmoniques dans un réseau électrique peut engendrer plusieurs inconvénients que nous pouvons résumer comme suit :

- Dégradation du facteur de puissance ;
- Réduction de la capacité du réseau ;
- Surcharges des câbles, transformateurs et moteurs ;
- Réduction de la durée de vie des transformateurs.

III.11.3. Compensation de l'énergie réactive en présence des harmoniques

Les équipements générateurs d'harmoniques (charges non linéaires) absorbent des courants efficaces plus importants engendrant des pertes Joule supplémentaires et surchargent les condensateurs de compensation d'énergie réactive. L'installation des condensateurs permet de compenser l'énergie réactive de la composante fondamentale uniquement. Cependant, il n'est pas possible de compenser par des condensateurs l'énergie réactive due aux harmoniques. Face à ce phénomène, en fonction du type d'harmoniques et de leur importance, deux types de solution, parfois complémentaires, sont proposées par Schneider Electric :

- Le surdimensionnement du transformateur dès sa conception ;
- La mise en place de système de filtrage pour protéger l'installation (filtre passif, filtre actif) ;

Les solutions préventives de base possibles pour atténuer les effets des harmoniques consistent à :

- positionner les charges polluantes en amont du réseau ;
- regrouper les charges polluantes ;
- utiliser des transformateurs à couplages particuliers ;
- placer des inductances dans l'installation,
- choisir un schéma de liaison à la terre adapté.

Chapitre IV :

Application

IV.1. Introduction

Notre application consiste à faire des essais sur trois transformateurs moyenne tension de 100 kVA, 400 kVA et 630 KVA, fabriqués par la firme ELECTRO-INDUSTRIES.

Le but de notre travail est d'étudier la nécessité de la compensation de l'énergie réactive dans un transformateur moyenne tension lors de son fonctionnement à vide et en charge afin d'assurer son bon fonctionnement.

IV.2. Présentation des transformateurs objets de l'étude

IV.2.1. Plaque signalétique du transformateur de 100 kVA

- Puissance : 100 kVA.
- Tension primaire : 30 kV.
- Tension secondaire : 400V.
- Couplage Yzn11 (MT/BT)
- Courant nominal primaire : 1.92A.
- Courant nominal secondaire : 144.3A
- Liquide isolant : huile minérale
- Fréquence : 50 Hz.
- Tension de court-circuit : 4.6%.

IV.2.2. Plaque signalétique du transformateur de 400 kVA

- Puissance assignée : 400 kVA.
- Tension primaire : 30 kV.
- Tension secondaire : 400V.
- Couplage Δ Yn11 (MT/BT)
- Courant nominal primaire : 7.7A.
- Courant nominal secondaire : 577A
- Liquide isolant : huile minérale
- Fréquence : 50 Hz.
- Tension de court-circuit : 4.5%.

IV.2.3. Plaque signalétique du transformateur de 630 kVA

- Puissance : 630 kVA.
- Tension primaire : 30 kV.
- Tension secondaire : 400V.
- Couplage : DYN11
- Courant nominal primaire : 12.12 A.
- Courant nominal secondaire : 577A
- Liquide isolant : huile minérale
- Fréquence : 50 Hz.
- Tension de court-circuit : 6.05%

IV.3. Essais à réaliser

IV.3.1. Essai à vide

Cet essai consiste à maintenir l'enroulement secondaire en circuit ouvert pour pouvoir mesurer la puissance absorbée et le courant à vide. Le primaire de chaque transformateur est l'enroulement basse tension. La puissance est mesurée en utilisant la méthode des deux wattmètres.

IV.3.2. Essai en court-circuit

On alimente le primaire et on court-circuite le secondaire. Cet essai nous permet de mesurer la tension de court-circuit ainsi que la puissance.

IV.4. Déroulement des essais

IV.4.1. Schéma du montage de l'essai à vide

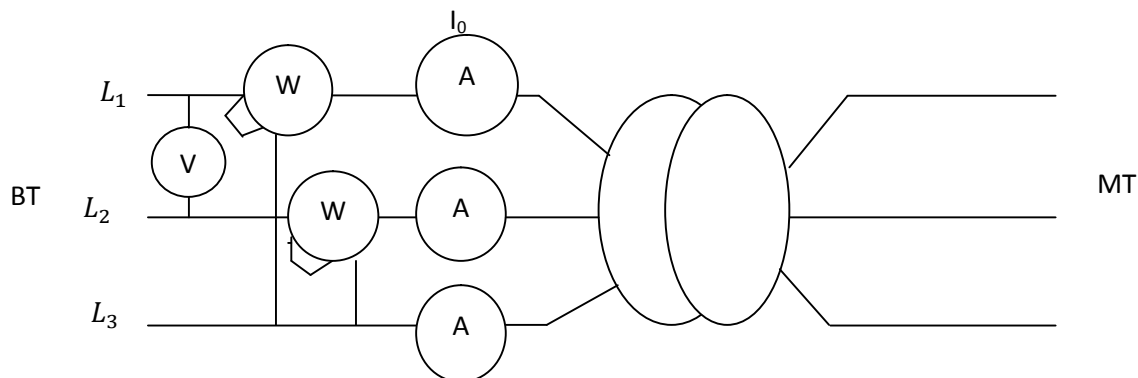


Figure IV.1. Schéma de l'essai à vide.

Durant l'essai à vide, nous faisons varier la tension d'alimentation de 50 à 400 V avec un pas de 50 V. On relève les valeurs du courant primaire I_0 affiché sur les trois ampèremètres et nous faisons la moyenne des trois valeurs. La puissance P_0 absorbée à vide est donnée par la somme des puissances indiquées par les deux wattmètres.

IV.4.2. Schéma du montage de l'essai en court-circuit

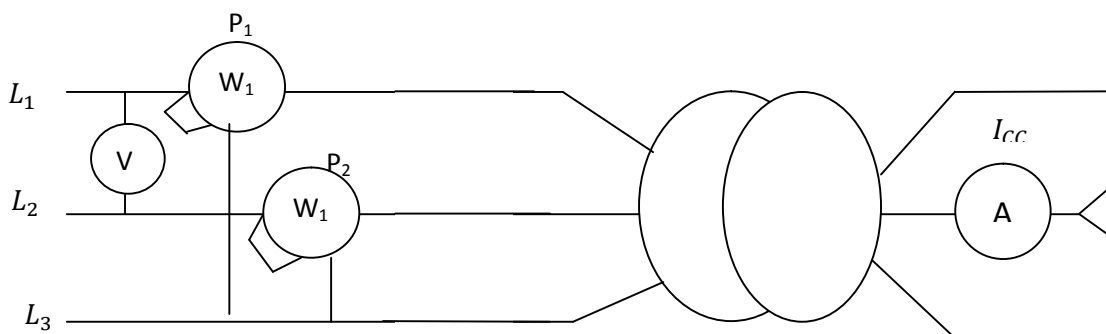


Figure IV.4.2. Schéma du montage de l'essai en court-circuit.

Dans cet essai, on court-circuite le secondaire du transformateur en mettant un ampèremètre de très faible impédance entre ses bornes, et on alimente l'enroulement

primaire par une tension réduite. On fait varier cette tension jusqu'à obtenir le courant nominal au secondaire.

IV.5. Résultats expérimentaux

IV.5.1. Transformateur de 100 kVA

IV.5.1.1. Résultats de l'essai à vide

Les valeurs de l'essai à vide pour le transformateur de 100 kVA sont consignées dans le tableau IV.1. Dans ce tableau, la puissance P_0 représente les pertes consommées par le circuit magnétique. Ces pertes regroupent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault. Nous remarquons que la puissance réactive absorbée par le transformateur vaut 2.62 kVAR quand il est alimenté sous tension nominale.

Tableau IV.1. Résultats de l'essai à vide du transformateur de 100 kVA.

U_0 (V)	I_0 (A)	P_0 (W)	$\cos \varphi_0$	Q_0 (KVAR)
100	0.14	21	0.866	0.012
150	0.18	45.5	0.972	0.011
200	0.23	74.5	0.935	0.028
250	0.33	125	0.874	0.069
300	0.61	183.5	0.578	0.256
350	1.33	265	0.328	0.761
400	3.83	412.5	0.155	2.62

IV.5.1.2. Résultats de l'essai en court-circuit

Les valeurs correspondant à l'essai en court-circuit du transformateur de 100 kVA sont consignées dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2. Résultats de l'essai en court-circuit du transformateur de 100 kVA.

U_{cc}	I_{cc} (A)	P_{cc}	$\text{Cos } \varphi_{cc}$	Q_{cc} (Kvar)
200	0.288	29.5	0.295	0.095
400	0.576	145.5	0.364	0.371
600	0.855	319	0.359	0.829
800	1.14	569	0.360	1.47
1000	1.41	819	0.335	2.301
1200	1.70	1244	0.352	3.307
1350	1.91	1594	0.356	4.17

Quand les enroulements du transformateur sont traversés par le courant nominal, le transformateur nécessite une puissance réactive de 4.17 kVAR pour son fonctionnement.

IV.5.2. Transformateur de 400 kVA

IV.5.2.1. Résultats de l'essai à vide

Les valeurs relevées dans l'essai à vide pour le transformateur dont la puissance nominale est de 400 kVA sont consignées dans le tableau IV.3.

Tableau IV.1. Résultats de l'essai à vide du transformateur de 400 kVA.

U_0 (V)	I_{10} (A)	P_0 (W)	$\text{Cos } \varphi_0$	Q_0 (KVAR)
50	0.147	6.25	0.49	0.011
100	0.314	38.5	0.707	0.038
150	0.486	88.5	0.700	0.09
200	0.67	159	0.685	0.169
250	0.834	248.5	0.688	0.262
300	0.965	371.5	0.74	0.337
350	1.06	546.5	0.850	0.338
400	4.76	850	0.257	3.18

La puissance réactive absorbée par le transformateur de 400 kVA est de 3.18 kVAR quand la tension d'alimentation vaut 400 V.

IV.5.2.2. Résultats de l'essai en court-circuit

Les résultats de l'essai en court-circuit sont consignés dans le tableau IV.4. Quand le transformateur débite le courant nominal, il lui faut une puissance réactive de 16.93 kVAR.

Tableau IV.4. Résultats de l'essai en court-circuit du transformateur de 400 kVA.

U_{cc}	I_{cc}	P_{cc}	$\cos \varphi_{cc}$	Q_{cc}
200	1.14	119.75	0.303	0.376
400	2.28	496	0.314	1.50
600	3.4	1086	0.307	3.36
800	4.56	1966	0.311	6
1000	5.68	3071	0.312	9.34
1200	6.8	4371	0.309	13.44
1350	7.64	5696	0.318	16.93

IV.5.3. Transformateur de 630 kVA

IV.5.3.1. Résultats de l'essai à vide

Les valeurs de l'essai à vide pour le transformateur de 630 kVA sont consignées dans le tableau suivant IV.5.

Tableau IV.5. Résultats de l'essai à vide du transformateur de 630 kVA.

$U_0(V)$	$I_0(A)$	$P_0(W)$	$\cos \varphi_0$	Q_0
50	0.203	6.25	0.355	0.016
100	0.38	49.5	0.752	0.043
150	0.566	114	0.775	0.18
200	0.764	202.5	0.765	0.17
250	0.965	321.25	0.768	0.27
300	1.145	482.5	0.814	0.345
350	1.41	723.75	0.846	0.456
400	11.7	1215	0.15	8.014

La puissance réactive nécessaire au fonctionnement à vide du transformateur est de 8.014 kVAR

IV.5.3.2. Résultats de l'essai en court-circuit

Les résultats concernant l'essai en court-circuit sont donnés dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6. Résultats de l'essai en court-circuit du transformateur de 630 kVA.

$U_{cc}(V)$	$I_{2cc}(A)$	$P_{cc}(W)$	$\cos \varphi_{cc}$	$Q_{cc}(KVAR)$
200	1.35	94	0.201	0.458
400	2.7	271.5	0.145	1.85
600	4.04	894	0.212	4.103
800	5.4	1604	0.214	7.309
1000	6.7	2494	0.215	11.33
1200	8.05	3494	0.208	16.365
1400	9.4	4994	0.22	22.235
1600	10.75	6369	0.213	29.107
1800	12.1	8369	0.221	36.8

Une puissance réactive de 36.8 kVAR est nécessaire pour le fonctionnement du transformateur quand ce dernier débite le courant nominal.

IV.6. Discussion des résultats

Avant de commenter nos résultats expérimentaux, nous dressons le tableau IV.7 où sont rassemblés nos résultats pour le régime nominal des trois transformateurs testés.

Tableau IV.7. Tableau récapitulatif des puissances pour le régime nominal.

S_n	$P_0(KW)$	$Q_0(KVAR)$	$P_{cc}(KW)$	$Q_{cc}(KVAR)$
100 KVA	0.4125	2.62	1.594	4.17
400 KVA	0.850	3.18	5.696	16.93
630 KVA	1.215	8.014	8.369	36.8

A partir tu tableau ci-dessus nous pouvons dresser les remarques suivantes :

- Si l'on néglige les pertes Joule à vide, les pertes fer augmentent avec la puissance nominale des transformateurs.
- Si l'on néglige les pertes fer en court-circuit, les pertes Joule augmentent avec la puissance nominale des transformateurs.
- La puissance réactive à vide est très significative, si on la compare à la puissance réactive absorbée à pleine charge. Ceci est valable pour les trois gammes de puissance.

- La puissance réactive absorbée par les transformateurs à pleine charge est non négligeable. Elle va de 4.17% de la puissance nominale pour un transformateur de 100 kVA à 5.84% de la puissance nominale pour un transformateur de 630 kVA.

Ainsi, nous pouvons conclure que pour compenser la puissance réactive dans un réseau électrique, il est nécessaire de prendre en considération la consommation réactive propre des transformateurs.

Conclusion générale

Le transformateur MT/BT, élément indispensable dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Son prix d'entretien et son coût étant élevés, le transformateur doit faire l'objet d'une attention particulière. Il est donc impératif d'évaluer le niveau de consommations électriques actives et réactives dans une installation électrique, notamment dans un transformateur.

Le présent travail a été mené dans le but d'évaluer la puissance réactive consommée par un transformateur à vide et en pleine charge.

Les récepteurs raccordés au secondaire d'un transformateur MT/BT absorbent de la puissance réactive. Le transformateur lui-même a besoin pour son fonctionnement, d'énergie réactive interne nécessaire à la magnétisation de ses enroulements. En effet, lors du fonctionnement nominal d'un transformateur MT/BT, la puissance réactive absorbée est assez élevée comparée à la puissance nominale du transformateur. Dans le cadre de notre étude, la puissance réactive absorbée par un transformateur à pleine charge varie de 4.17% de la puissance nominale pour un transformateur de 100 kVA à 5.84% de la puissance nominale pour un transformateur de 630 kVA. A partir de nos essais, nous avons également montré que la puissance réactive à vide est aussi assez élevée. Il est donc nécessaire de tenir compte de la consommation en énergie réactive d'un transformateur lors du dimensionnement de la compensation de l'énergie réactive de toute installation alimentée par un transformateur de puissance.

Références bibliographique

- [1] : A.GUILBERT, «Circuit magnétiques à courant alternatif, transformateur». Edition Masson et Cie, Paris 1973.
- [2] : J. CHATELAIN, «machine électrique, traité d'électricité». Edition GEORGI, 1983.
- [3] : R. BONNEFILLE, «Les techniques de l'ingénieur ». Génie électrique, (Electrotechnique D₄). Edition ISTRRA 1990.
- [4] : O. IRNATEN ET S. ABBAS, «Élaboration d'un programme informatique pour réduire la facture d'énergie électrique d'une entreprise ». Mémoire de fin d'études d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.
- [5] : L. TOUAT , F. SIFOUANE, « Compensation de l'énergie réactive au niveau de l'hôpital d'AZAZGA». Mémoire de fin d'études d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2010.
- [6] : MERLIN GERIN, «Guide de l'installation électrique», 1982.
- [7] : R. BOGEOI et D. COGNIEL, «Mémothech d'électrotechnique». Editions André CASTEILLA, 1987 .
- [8] : MERLIN GERIN, «Guide de la compensation de l'énergie réactive et filtrage d'harmonique HT/MT», Groupe SCHNEIDER.
- [9] : B. GASBAOUI, «Optimisation de l'énergie réactive dans un réseau d'énergie électrique». Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de BECHAR, 2008.
- [10] : F. BOUDELLAL, «Compensation de l'énergie réactive - Application à l'Enel Rouïba», Mémoire de fin d'études d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2000.

[11] : MERLIN GERIN, «Guide de la compensation de l'énergie réactive BT». Groupe SCHNEIDER.

[12] : Legrand, «Guide technique& catalogue de compensation de l'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques».

[13] : C. PREVE « les réseaux électriques industriels 2». Edition HERMES, PARIS ,2005.