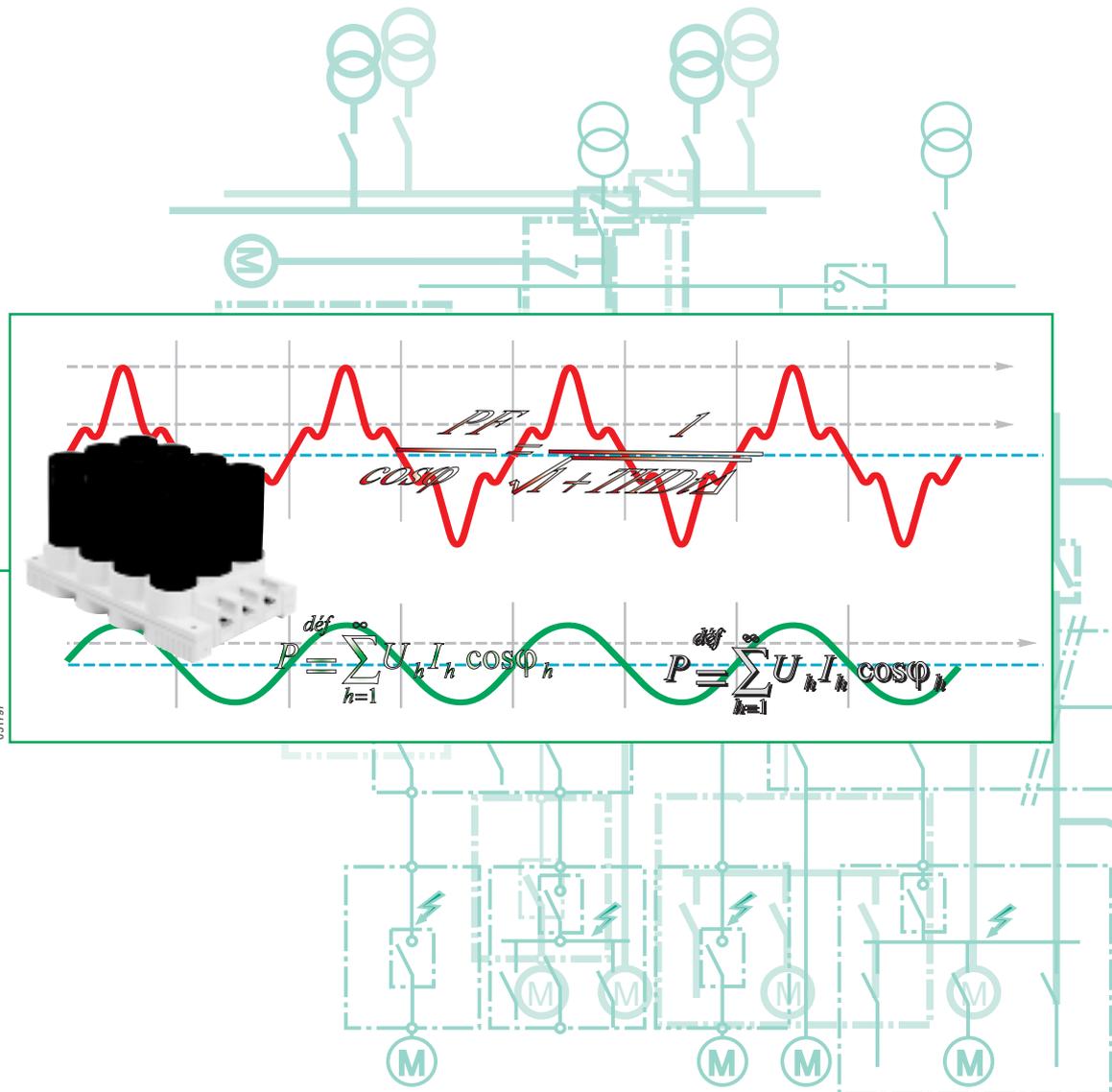


N° 6

Guides experts basse tension

Guide de la **compensation** d'énergie **réactive** et du filtrage **des harmoniques**



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Sommaire

1. Généralités sur la compensation d'énergie réactive	3
1.1 Définitions	3
1.1.1. <i>Energies active, réactive, apparente</i>	3
1.1.2. <i>Composantes active et réactive du courant</i>	3
1.1.3. <i>Composantes active et réactive de la puissance</i>	3
1.1.4. <i>Facteur de puissance</i>	4
1.2 Objectifs	4
1.3 Choix du type de compensation	5
1.3.1. <i>Choix de la localisation</i>	5
1.3.2. <i>Choix du type de compensation</i>	5
1.4 Compensation d'énergie réactive en présence d'harmoniques	6
1.5 Appellations utilisées pour les dispositifs de compensation Rectiphase	6
2. Phénomènes transitoires et perturbations	8
2.1 Régime transitoire d'enclenchement	8
2.1.1. <i>Cas d'une batterie fixe</i>	8
2.1.2. <i>Cas d'une batterie en gradins</i>	10
2.2 Résonance	12
2.3 Surcharge harmonique	15
2.3.1. <i>Cas général</i>	15
2.3.2. <i>Surcharge des filtres d'harmoniques</i>	15
3. Choix des protections	17
3.1 Courant d'enclenchement	17
3.2 Dimensionnement thermique des matériels (appareils de coupure et câbles)	17
3.3 Choix et calibrage des protections pour batterie de condensateurs Rectiphase	17
4. Compléments techniques	21
Compensation de moteurs asynchrones	22
Compensation de transformateurs	23
Section des câbles	24
Choix des protections	25

L'énergie, le courant et la puissance sont constitués de composantes :

- active,
- réactive,
- apparente.

Seule la composante active est créatrice de travail ou de chaleur.

Généralités sur la compensation d'énergie réactive

1.1 Définitions

1.1.1. Energies active, réactive, 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 (kWh) résulte de la **puissance active P (kW)** des récepteurs. Elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes).

L'énergie réactive consommée (kvarh) sert à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la **puissance réactive Q (kvar)** des récepteurs.

L'énergie apparente (kVAh) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la **puissance apparente S (kVA)** des récepteurs, somme vectorielle de P(kW) et Q(kvar).

1.1.2. 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 ci-dessous :

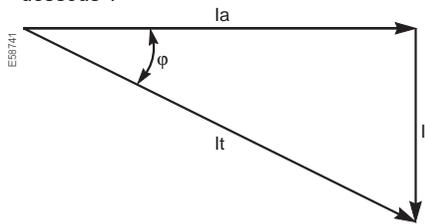


Figure 1 - Composition vectorielle des courants

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi$$

$$I_r = I \cdot \sin \varphi$$

1.1.3. Composantes active et réactive de la puissance

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

On définit ainsi :

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

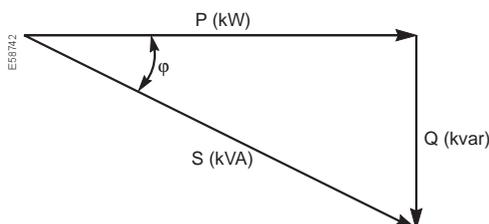


Figure 2 - Composition vectorielle des puissances

L'objectif de la compensation d'énergie réactive est de réduire le courant appelé sur le réseau.

L'énergie réactive est fournie par des condensateurs, au plus près des charges inductives.

1.1.4. Facteur de puissance

Le facteur de puissance est égal par définition à :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\text{puissance_active_}(kW)}{\text{puissance_apparente_}(kVA)}$$

Si les courants et tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, le facteur de puissance est égal à $\cos\varphi$.

On utilise également la variable $\text{tg}\varphi$. Dans les mêmes conditions, nous avons la relation :

$$\text{tg}\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{\text{puissance_réactive_}(k\text{ var})}{\text{puissance_active_}(kW)}$$

Sur une période de temps donnée, nous avons également :

$$\text{tg}\varphi = \frac{Wr}{Wa} = \frac{\text{énergie_réactive_consommée_}(k\text{ var h})}{\text{énergie_active_consommée_}(kWh)}$$

1.2 Objectifs

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active P, la figure suivante montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente, et donc de courant, que la puissance réactive est importante.

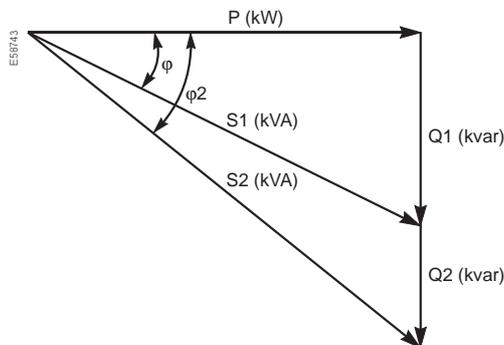


Figure 3 - Influence de la puissance réactive

Ainsi, la circulation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution entraîne, du fait d'un courant appelé plus important :

- des surcharges au niveau des transformateurs,
- l'échauffement des câbles d'alimentation,
- des pertes supplémentaires,
- des chutes de tension importantes.

Pour ces raisons, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges, pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle "**compensation de l'énergie réactive**".

Pour inciter à cela et éviter de surcalibrer son réseau, le distributeur d'énergie pénalise financièrement les consommateurs d'énergie réactive au-delà d'un certain seuil.

On utilise des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs.

Pour réduire la puissance apparente absorbée au réseau de la valeur S_2 à la valeur S_1 , on doit connecter une batterie de condensateurs fournissant l'énergie réactive Q_c , telle que : $Q_c = P.(tg\varphi_2 - tg\varphi_1)$.

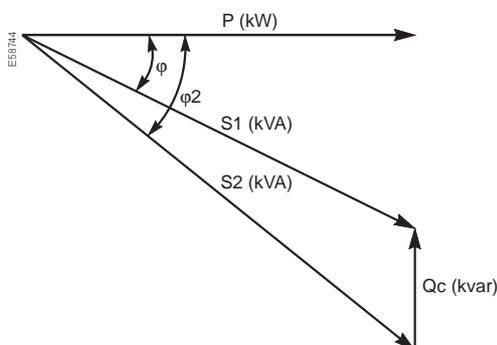


Figure 4 - Principe de la compensation d'énergie réactive

1.3 Choix du type de compensation

L'intérêt économique de la compensation est mesuré en comparant le coût d'installation des batteries de condensateurs aux économies qu'elle procure.

Le coût des batteries de condensateurs dépend de plusieurs paramètres dont :

- la puissance installée,
- le niveau de tension,
- le fractionnement en gradins,
- le mode de commande,
- le niveau de qualité de la protection.

1.3.1. Choix de la localisation

■ Compensation globale

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure la compensation pour l'ensemble des charges. Elle convient lorsqu'on cherche essentiellement à supprimer les pénalités et soulager le poste de transformation.

■ Compensation locale ou par secteurs

La batterie est installée en tête du secteur d'installation à compenser. Elle convient lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.

■ Compensation individuelle

La batterie est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur inductif (moteur en particulier). Elle est à envisager lorsque la puissance du moteur est importante par rapport à la puissance souscrite. Cette compensation est techniquement idéale puisqu'elle produit l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée, et en quantité ajustée à la demande.

1.3.2. Choix du type de compensation

■ Compensation fixe

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), 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.

■ Compensation automatique ou en "gradins"

La batterie de condensateurs est fractionnée en gradins, avec possibilité de mettre en service plus ou moins de gradins, en général de façon automatique. Ce type de batterie est installé en tête de la distribution BT ou d'un secteur important. Elle permet une régulation pas à pas de l'énergie réactive. L'enclenchement et le déclenchement des gradins est piloté par un relais varométrique.

Les courants harmoniques générés par les équipements électroniques peuvent être responsables d'une surcharge des condensateurs de compensation.

Différents types de condensateurs adaptés sont proposés.

1.4 Compensation d'énergie réactive en présence d'harmoniques

Les équipements faisant appel à l'électronique de puissance (variateurs de vitesse, redresseurs, onduleurs, ...), de plus en plus utilisés, sont responsables de la circulation de courants harmoniques dans les réseaux. Ces harmoniques perturbent le fonctionnement de nombreux dispositifs. En particulier, les condensateurs y sont extrêmement sensibles du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang des harmoniques présents.

Dans certaines circonstances, des phénomènes de résonance peuvent se produire entraînant une forte distorsion de tension et la surcharge des condensateurs. La description de ces phénomènes est détaillée en 2.2.

Selon la puissance des générateurs d'harmoniques présents, différents types de condensateurs doivent être choisis, associés éventuellement à des inductances. Le tableau suivant résume les différents choix possibles :

Transfo de puissance $S_n < 2\text{MVA}$			
$G_h < 0,15.S_n$	$0,15.S_n < G_h < 0,25.S_n$	$0,25.S_n < G_h < 0,6.S_n$	$G_h > 0,6.S_n$
équipements de compensation standards	équipements de compensation type H	équipements de compensation type SAH	filtre d'harmoniques

- G_h : puissance des générateurs d'harmoniques
- S_n : puissance du transfo
- type H : condensateurs surdimensionnés
- type SAH : condensateurs surdimensionnés, associés à des inductances de protection

Pour les valeurs élevées de puissance des générateurs d'harmoniques, le traitement des harmoniques est en général nécessaire. Le dispositif approprié (filtre d'harmonique) remplit à la fois les fonctions de compensation d'énergie réactive et de filtrage des harmoniques.

1.5 Appellations utilisées pour les dispositifs de compensation Rectiphase

- **Élément de condensateur ou "pot"**
Dispositif constitué de deux électrodes séparées par un diélectrique, contenues dans une enveloppe plastique. L'enveloppe inclut également un dispositif de protection contre les défauts de fin de vie, comprenant un surpresseur et un fusible HPC qui isole l'élément en cas de défaut.

- **Bloc condensateur Varplus M**
Ensemble de 3 ou 12 éléments de condensateurs configurés en blocs triphasés. Existe en versions standard ou type H, utilisées suivant le niveau de pollution harmonique.

- **Ensemble de compensation fixe Varplus forte puissance**
Ensemble de blocs condensateurs Varplus M, sans dispositif de protection. Existe en versions standard, type H ou type SAH, utilisées suivant le niveau de pollution harmonique.

- **Ensemble de compensation fixe Rectibloc**
Ensemble de blocs condensateurs Varplus M, protégé par disjoncteur. Existe en versions standard, type H ou type SAH, utilisées suivant le niveau de pollution harmonique.

■ Equipement de compensation automatique **Turbovar**

Ensemble de blocs condensateurs Varplus M, commandé par un relais d'intensité.

■ Batterie de compensation automatique : **Rectimat, Secomat, Prisma**

Equipements réalisés par association de plusieurs ensembles de compensation, constitués en "gradins". Les différentes appellations sont relatives à différents types d'enveloppes.

Un dispositif régulateur varmétrique **Varlogic**, intégré à l'équipement, commande séparément chaque gradin. Suivant le besoin global d'énergie réactive, le régulateur commande la mise sous tension d'un certain nombre de gradins, par l'intermédiaire de contacteurs.

L'équipement peut être en option doté d'un disjoncteur.

Existe en versions standard, type H ou type SAH, utilisées suivant le niveau de pollution harmonique.

■ Platine équipée ou module de compensation

Sous-ensemble de compensation constituant un gradin et destiné à être monté dans une batterie de compensation automatique.

Ce sous-ensemble comprend essentiellement un bloc de compensation Varplus M, un contacteur de mise sous tension et des fusibles de protection.

Existe en versions standard, type H ou type SAH, utilisées suivant le niveau de pollution harmonique.

L'utilisation de condensateurs s'accompagne de différents régimes transitoires et de perturbations :

- courant d'appel important et forte surtension à l'enclenchement des condensateurs,
- phénomène de résonance et surcharge harmonique.

Phénomènes transitoires et perturbations

2.1 Régime transitoire d'enclenchement

L'enclenchement d'une batterie de condensateurs est accompagné d'un régime transitoire en courant et en tension. Une surintensité et une surtension apparaissent, dont l'amplitude et la fréquence dépendent des caractéristiques du réseau amont et du nombre de batteries de condensateurs.

Le réseau amont est considéré comme une inductance pure L_a telle que :

$$L_a \omega = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{cc}}$$

avec :

- U_n : tension composée nominale,
- I_{cc} : courant de court-circuit triphasé symétrique au point de raccordement du condensateur,
- S_{cc} : puissance de court-circuit au point de raccordement du condensateur (par définition, $S_{cc} = \sqrt{3} U_n I_{cc}$).

La liaison reliant l'appareil de coupure (contacteur, disjoncteur ou interrupteur) à la batterie de condensateurs est considérée également comme une inductance pure.

2.1.1. Cas d'une batterie fixe

Modèles correspondants de la gamme Rectiphase : **Varplus forte puissance, Rectibloc.**

Le schéma monophasé équivalent est celui de la figure suivante :

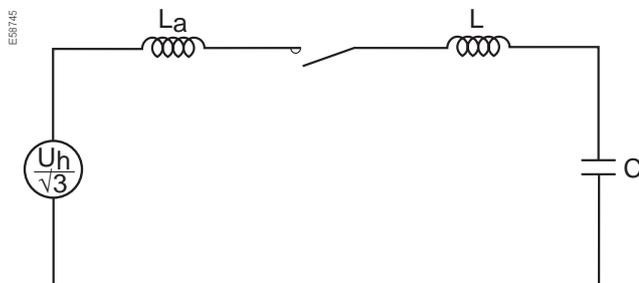


Figure 5 - Schéma simplifié d'une batterie fixe

- L_a : inductance du réseau amont,
- L : inductance de la liaison reliant l'appareil de coupure à la batterie de condensateurs.

On démontre que l'expression du courant crête d'enclenchement est :

$$\hat{I}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} U_n \sqrt{\frac{C}{L_a + L}}$$

L est négligeable devant L_a , d'où :

$$\hat{I}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} U_n \sqrt{\frac{C}{L_a}}$$

La fréquence propre de ce courant est :

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C}}$$

Sa durée est équivalente à la durée de la période transitoire d'un court-circuit, soit quelques dizaines de ms.

On peut comparer ce courant au courant nominal de la batterie :

$$I_{ncapa} = C\omega \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

d'où :

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{ncapa}} = \sqrt{2} \times \frac{1}{\omega\sqrt{L_a C}}$$

En utilisant :

$$L_a\omega = \frac{U_n^2}{S_{cc}} \quad \text{et} \quad Q = C\omega U_n^2$$

on obtient :

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{ncapa}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

La surintensité s'accompagne d'une surtension dont la valeur maximale peut être proche de 2 fois la tension crête réseau.

■ Exemple

Supposons une batterie fixe de 250 kvar de tension composée $U_n = 400$ V alimentée par un réseau de puissance de court-circuit maximal $S_{cc} = 20$ MVA, on a :

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{ncapa}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{ncapa}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{20 \cdot 10^6}{250 \cdot 10^3}} = 12,6$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C}}$$

$$f_o = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{20 \cdot 10^6}{250 \cdot 10^3}} = 447 \text{ Hz}$$

Le courant crête d'enclenchement maximal vaut dans cet exemple 12,6 fois le courant nominal de la batterie, sa fréquence propre est 447Hz.

Les figures suivantes représentent le courant d'enclenchement et la tension réseau, lorsque l'enclenchement a lieu au maximum de la tension.

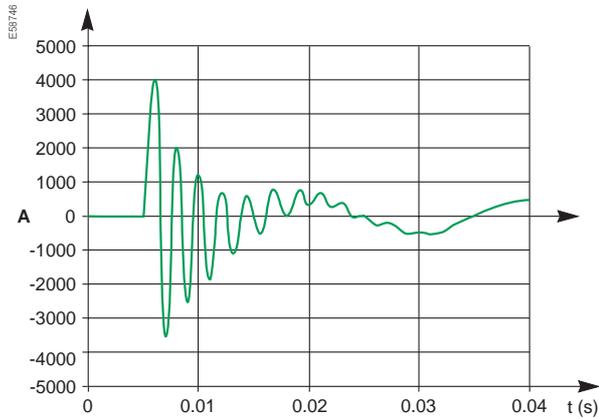


Figure 6 - Courant d'enclenchement

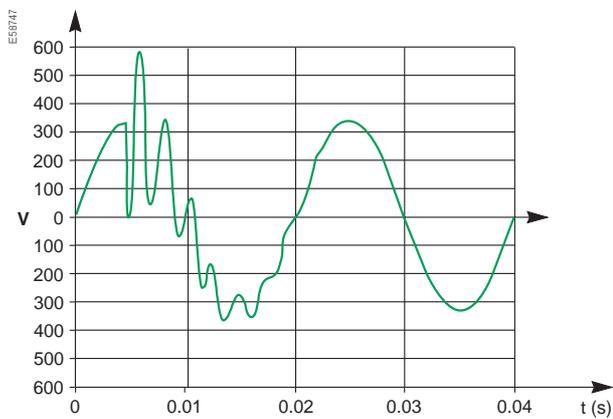


Figure 7 - Tension réseau à l'enclenchement

2.1.2. Cas d'une batterie en gradins

Modèles correspondants de la gamme Rectiphase : *Rectimat*, *Secomat*, *Prisma*.

Le schéma monophasé équivalent pour $(n+1)$ gradins de condensateurs est celui de la figure suivante :

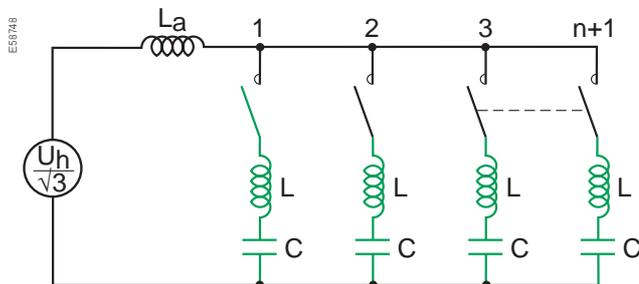


Figure 8 - Schéma simplifié d'une batterie en gradins

- L_a : inductance du réseau amont
- L : inductance de la liaison reliant l'appareil de coupure à la batterie de condensateurs ($0,5 \mu\text{H/m}$).

Le courant crête d'enclenchement \hat{i}_e est maximal lorsque n gradins sont en service et que l'on enclenche le $(n+1)^{\text{ème}}$. Les gradins en service se déchargent dans le gradin enclenché. Les inductances L étant très faibles, ce courant d'enclenchement est très important (il est indépendant de l'inductance du réseau L_a).

On démontre que l'expression du courant crête d'enclenchement est :

$$\hat{I}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{n}{n+1} U_n \sqrt{\frac{C}{L}}$$

On peut comparer ce courant au courant nominal d'un gradin I_{ncapa} :

$$I_{ncapa} = C\omega \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

On obtient :

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{ncapa}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{n}{n+1} U_n \cdot \frac{1}{\sqrt{Q\omega L}}$$

avec : Q = puissance réactive d'un gradin.

■ Exemple

Supposons une batterie de 6 gradins de chacun 50 kvar, de tension composée 400 V, distants de 1 mètre de leur appareil de coupure associé. On a :

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{ncapa}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{n}{n+1} U_n \cdot \frac{1}{\sqrt{Q\omega L}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{5}{6} \cdot 400 \cdot \frac{1}{\sqrt{50 \cdot 10^3 \cdot 314 \cdot 0,5 \cdot 10^6}} = 168$$

Le courant crête d'enclenchement maximal vaut dans cet exemple 168 fois le courant nominal d'un gradin de condensateurs.

Ce courant très élevé ne peut pas être supporté par les condensateurs et les appareils de coupure, il faudra donc utiliser un dispositif limitant le courant d'enclenchement.

Dans le cas des batteries de compensation Rectiphase, la limitation des courants d'enclenchement est obtenue par des résistances de pré-insertion dont le principe est illustré sur la figure suivante :

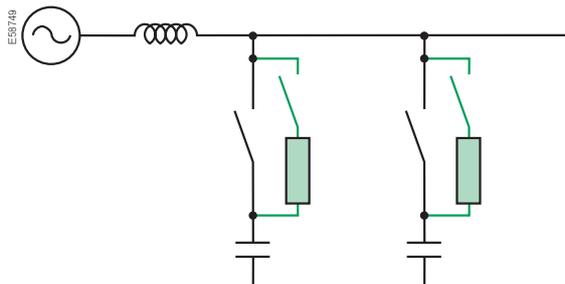


Figure 9 - Schéma de principe des résistances de pré-insertion

Chaque gradin de condensateurs est commandé par un contacteur équipé de contacts auxiliaires. Des résistances sont connectées en série avec les contacts auxiliaires.

A la fermeture du contacteur, les contacts auxiliaires sont fermés instantanément, ce qui autorise la précharge au travers des résistances. Après 3ms environ, les contacts principaux se ferment, court-circuitant les résistances.

Illustration : sur les données de l'exemple précédent, avec résistance de pré-insertion égale à $3,2\Omega$:

- courant dans le condensateur enclenché,
- tension aux bornes du condensateur enclenché et tension réseau.

Pointe de courant à l'enclenchement du 6^{ème} gradin : $\hat{I}_{capa} \approx 700$ A, soit environ 10 fois le courant nominal d'un gradin.

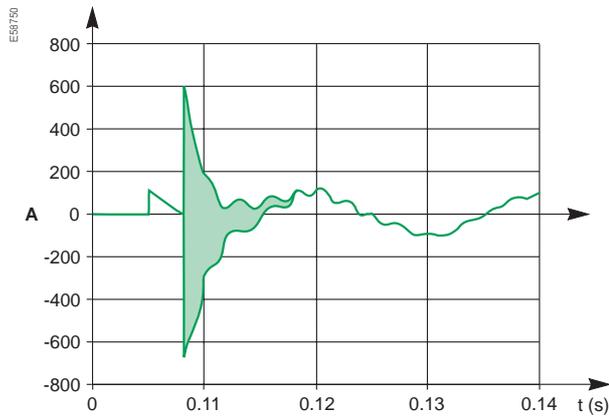


Figure 10 - Courant dans le condensateur enclenché

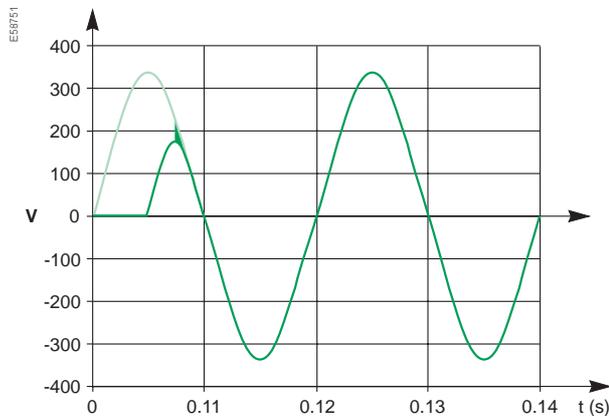


Figure 11 - Tension aux bornes du condensateur enclenché et tension réseau

2.2 Résonance

Le phénomène de résonance est à l'origine des plus importantes distorsions harmoniques dans les réseaux de distribution, et la cause majeure de surcharges des condensateurs de compensation.

Les phénomènes décrits ci-dessous sont du type "résonance parallèle".

Considérons le schéma simplifié suivant, représentant une installation comprenant :

- un transformateur d'alimentation,
- des charges linéaires,
- des charges non linéaires génératrices de courants harmoniques,
- des condensateurs de compensation.

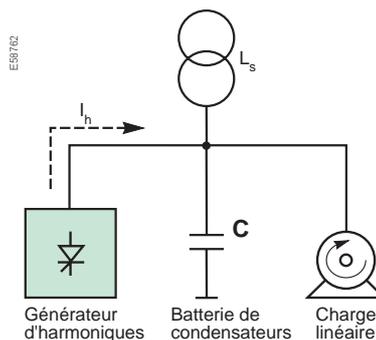


Figure 12 - Schéma simplifié d'une installation

Pour une analyse harmonique, le schéma équivalent est le suivant :

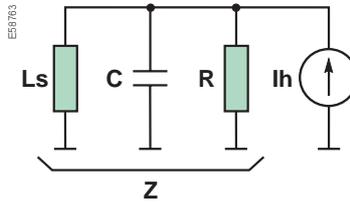


Figure 13 - Schéma équivalent pour analyse harmonique

- L_s : inductance de l'alimentation (réseau + transfo + ligne),
- C : capacité de compensation,
- R : résistance des charges linéaires,
- I_h : générateurs d'harmoniques.

Le module de l'impédance vue par les courants harmoniques est représenté sur la figure ci-dessous :

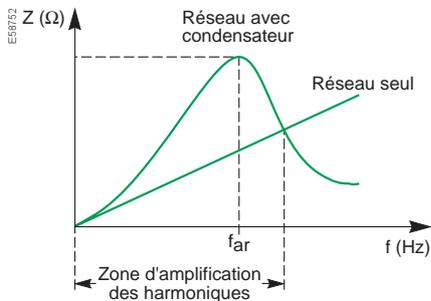


Figure 14 - Module de l'impédance Z en fonction de la fréquence

Interprétation physique :

- la fréquence f_{ar} est la fréquence d'accord du circuit ($L_s + C$),
- à la fréquence f_{ar} , le module de l'impédance du réseau vu par les harmoniques est maximal. Il y a donc apparition de tensions harmoniques importantes, et donc une forte distorsion de tension,
- dans la zone d'amplification des harmoniques il y a dans le circuit ($L_s + C$) circulation de courants harmoniques supérieurs aux courants harmoniques injectés.

Le schéma suivant montre les éléments du circuit affectés par les courants harmoniques :

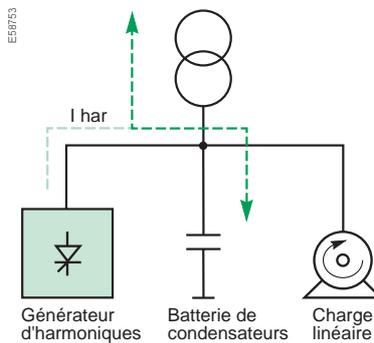


Figure 15 - Circulation des courants harmoniques

Le réseau d'alimentation ainsi que les condensateurs de compensation sont soumis à des courants harmoniques importants et donc à des risques de surcharge.

■ Exemple

On considère dans un premier temps un réseau comportant un transformateur, un ensemble de charges linéaires et un batterie de compensation d'énergie réactive.

Les paramètres sont les suivants :

- puissance nominale du transfo : $S_n = 1000\text{kVA}$,
- tension de court-circuit du transfo : 5 %,
- charges linéaires :
 - puissance : $P = 500\text{kW}$,
 - $\cos\varphi : 0,75$,
 - batterie de condensateurs : $Q = 250\text{kvar}$.

Dans un deuxième temps, on suppose que la moitié des charges linéaires sont remplacées par des charges non-linéaires.

On observe alors une forte distorsion du courant dans les condensateurs de compensation.

La fréquence de résonance est de 447Hz, ce qui provoque une forte amplification des harmoniques de rang 11.

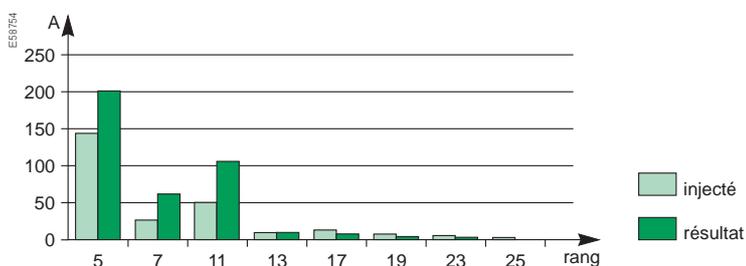


Figure 16 - Spectre des courants harmoniques

■ Courant condensateurs, sans injection d'harmoniques

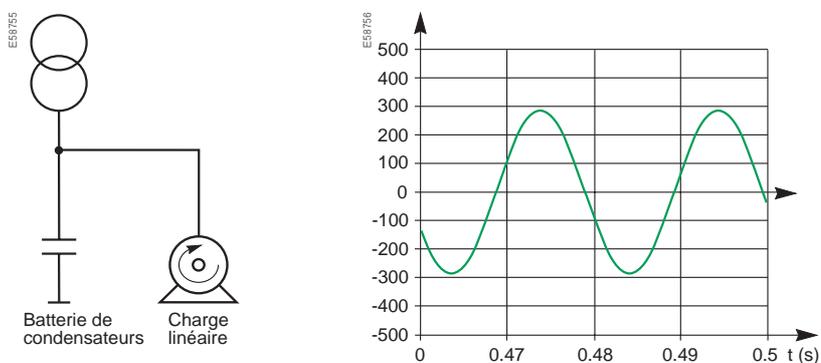


Figure 17 - Compensation sans injection d'harmoniques

■ Courant condensateurs, avec injection d'harmoniques

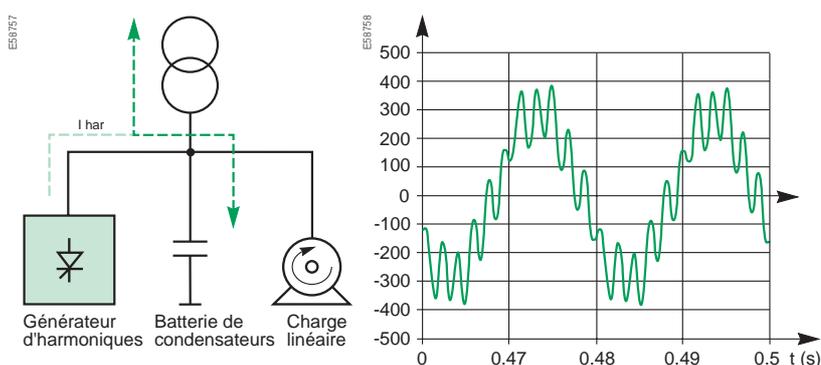


Figure 18 - Compensation avec injection d'harmoniques

2.3 Surcharge harmonique

2.3.1. Cas général

Les tensions harmoniques appliquées aux condensateurs provoquent la circulation de courants proportionnels à la fréquence des harmoniques. Ces courants sont responsables de pertes supplémentaires. Les tensions harmoniques augmentent aussi la valeur crête de la tension, ce qui entraîne un vieillissement accéléré des condensateurs.

■ Exemple

- tension fondamentale : U_1 ,
 - tensions harmoniques :
 - $u_5 = 8 \%$,
 - $u_7 = 5 \%$,
 - $u_{11} = 3 \%$,
 - $u_{13} = 1 \%$,
- (THDu = 10 %).

$$I_1 = U_1 \cdot C \cdot \omega$$

$$I_5 = U_5 \cdot C \cdot 5 \cdot \omega = u_5 \cdot 5 \cdot I_1$$

$$I_7 = U_7 \cdot C \cdot 7 \cdot \omega = u_7 \cdot 7 \cdot I_1$$

$$I_{11} = U_{11} \cdot C \cdot 11 \cdot \omega = u_{11} \cdot 11 \cdot I_1$$

$$I_{13} = U_{13} \cdot C \cdot 13 \cdot \omega = u_{13} \cdot 13 \cdot I_1$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum I_h^2}$$

$$\frac{I_{rms}}{I_1} = \sqrt{1 + (u_5 \cdot 5)^2 + (u_7 \cdot 7)^2 + (u_{11} \cdot 11)^2 + (u_{13} \cdot 13)^2} = 1,19$$

Il en résulte donc une surcharge de près de 20 % par rapport à un fonctionnement sous tension parfaitement sinusoïdale.

Les condensateurs de type standard peuvent supporter une surcharge en courant de 30 % (pour supporter l'effet cumulé des harmoniques et des fluctuations de tension).

En cas de forte distorsion harmonique, on doit utiliser des condensateurs de type H, pouvant supporter 1,43 In.

2.3.2. Surcharge des filtres d'harmoniques

L'objectif d'un filtre d'harmoniques est de dériver les courants harmoniques dans un circuit de faible impédance, afin qu'ils ne circulent pas dans le réseau d'alimentation. Ce principe est illustré sur la figure suivante :

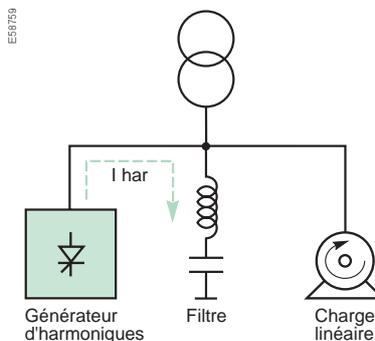


Figure 19 - Schéma simplifié d'une installation avec filtre d'harmoniques

Dans le cas où le réseau d'alimentation présente une distorsion préexistante (due à des charges génératrices d'harmoniques raccordées en amont de l'installation), il existe un risque de surcharge du filtre, comme illustré sur la figure suivante :

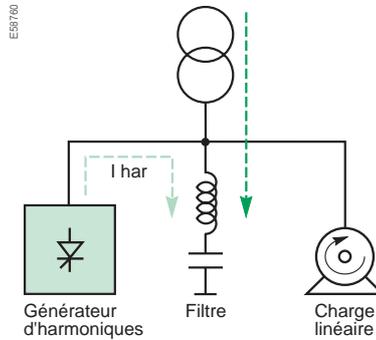


Figure 20 - Risque de surcharge d'un filtre d'harmoniques

La distorsion de tension préexistante doit être prise en compte pour le dimensionnement des filtres d'harmoniques.

Les équipements de filtrage d'harmoniques sont systématiquement équipés d'une protection en surcharge.

Le choix et le calibrage des protections tiennent compte de différentes contraintes :

- courant d'enclenchement,
- composantes harmoniques,
- variations de tension réseau,
- dispersion de fabrication.

Choix des protections

3.1 Courant d'enclenchement

On a vu précédemment que la valeur du courant crête à l'enclenchement d'une batterie de condensateurs pouvait être très élevée, surtout pour une batterie automatique en gradins. Dans la pratique, les batteries automatiques de condensateurs basse tension de Rectiphase sont équipées de contacteurs avec une résistance de limitation du courant d'enclenchement.

Cette résistance permet :

- de ne pas atteindre le courant maximal crête admissible par les batteries de condensateurs,
- de ne pas atteindre le courant d'enclenchement maximal admissible par les appareils de coupure (contacteur, disjoncteur ou interrupteur),
- d'augmenter la durée de vie des contacteurs.

3.2 Dimensionnement thermique des matériels (appareils de coupure et câbles)

Les variations admissibles de la valeur de la tension fondamentale et des composantes harmoniques peuvent conduire à une majoration du courant dans les condensateurs de 30 à 45 %.

Les variations dues aux tolérances sur la capacité des condensateurs peuvent conduire à une majoration supplémentaire de 15 % (suivant norme NFC 15-104). Dans le cas des condensateurs Rectiphase, cette majoration supplémentaire est ramenée à 5 %.

L'effet cumulé des deux phénomènes fait que les matériels doivent être dimensionnés pour un courant de :

- $1,3 \times 1,15 = 1,5$ fois le courant nominal des batteries de condensateurs en général,
- $1,3 \times 1,05 = 1,36$ fois le courant nominal dans le cas de batteries de condensateurs Rectiphase de type standard ou protégées par inductances (type SAH).
- $1,45 \times 1,05 = 1,5$ fois le courant nominal dans le cas de batteries de condensateurs Rectiphase renforcées (type H).

3.3 Choix et calibrage des protections pour batterie de condensateurs Rectiphase

La protection des condensateurs basse tension peut être réalisée par fusible ou disjoncteur.

■ Protection par disjoncteur

Comme indiqué précédemment, le calibre doit être supérieur à $1,36 \times I_{ncapa}$, le seuil thermique peut être réglé à $1,36 \times I_{ncapa}$.

La protection doit être sensible à la valeur efficace du courant (incluant les harmoniques).

Le seuil de déclenchement instantané doit être réglé à $10 \times I_{ncapa}$.

■ Type de déclencheur

Les déclencheurs de type magnéto-thermique conviennent à l'application.

Dans le cas d'utilisation de déclencheurs électroniques, le seuil de déclenchement "court retard" doit être fixé à 10 fois le courant de réglage I_r , afin d'autoriser le passage de la pointe de courant d'enclenchement.

■ Coordination des disjoncteurs avec les équipements de compensation

Dans le cas de protection d'une batterie de compensation par un disjoncteur limiteur, il n'est pas nécessaire de dimensionner la batterie pour le même courant de court-circuit que l'installation. (se reporter aux courbes de limitation des disjoncteurs Compact et Masterpact).

■ Utilisation de dispositifs différentiels résiduels (DDR)

A l'enclenchement d'une batterie de condensateurs, les 3 courants de phases ne sont pas équilibrés, même si la somme de ces 3 courants est nulle. Ces courants sont de valeurs élevées. Il faut donc veiller à centrer au mieux géométriquement le tore de mesure sur les 3 câbles, afin d'éviter qu'une dissymétrie ne provoque une détection de courant parasite et un déclenchement intempestif.

■ Protection par fusible

□ cas d'une batterie fixe :

Pour ne pas avoir de risque de fusion des fusibles après un grand nombre d'enclenchements, le calibre doit être supérieur à $1,6x I_{ncapa}$.

□ cas d'une batterie en gradins :

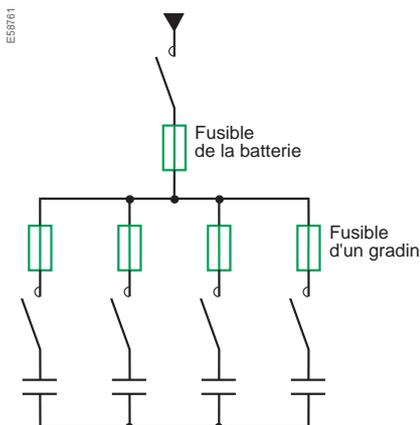


Figure 21 - Protection par fusibles d'une batterie en gradins

Le calibre du fusible de chaque gradin doit être supérieur à $1,6x I_{ncapa}$ (I_{ncapa} : courant nominal d'un gradin).

Le calibre du fusible de la batterie doit être supérieur à $1,4x I_{nbat}$ (I_{nbat} : courant nominal de la batterie).

On peut remarquer que le coefficient de majoration du calibre du fusible de la batterie est 1,4 au lieu de 1,6 car les gradins ne sont pas enclenchés simultanément.

Les fusibles doivent être du type gL. Compte tenu du surcalibrage, ceux-ci ne peuvent assurer la protection contre les surcharges.

Bien que les éléments de condensateurs soient équipés de dispositifs de protection contre les défauts internes, les platines équipées Rectiphase sont par précaution généralement équipées de fusibles et occasionnellement de disjoncteurs.

Les batteries de compensation automatique peuvent être en option équipées d'un disjoncteur général.

□ cas des condensateurs avec selfs anti-harmoniques et filtres

Le calibre des fusibles est choisi en fonction du courant efficace nominal (tenant compte des harmoniques).

Rappel : le courant efficace est $I_{eff} = \sqrt{I_1^2 + \dots + I_i^2 + \dots}$

avec

- I_1 : valeur du courant à 50 Hz (ou 60 Hz),
- I_i : valeur du courant harmonique de rang i .

Le calibre du fusible de chaque gradin doit être supérieur à $1,4x I_{ecapa}$
(I_{ecapa} : courant efficace nominal d'un gradin).

Le calibre du fusible de la batterie doit être supérieur à $1,2x I_{ebat}$
(I_{ebat} : courant efficace nominal de la batterie).

On peut remarquer que les coefficients de majoration des calibres des fusibles sont inférieurs au cas où il n'y a pas de self anti-harmoniques ou de filtres. En effet, ces inductances limitent le courant d'enclenchement.

■ Protection des câbles

Les câbles d'alimentation doivent être dimensionnés de la même manière que les dispositifs de commande et de protection, c'est-à-dire pour une valeur de 1,36 fois le courant nominal de la batterie.

Il devront également être protégés contre les courts-circuits pouvant survenir dans le câblage ou en cas de défaillance des condensateurs.

Notes

Compléments techniques

Compensation de moteurs asynchrones

p 22

Compensation de transformateurs

p 23

Section des câbles

p 24

Choix des protections

p 25

Applications

E54600



de moteurs asynchrones

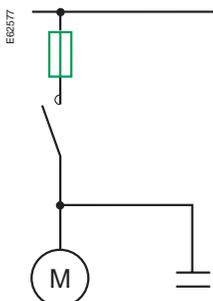


Le $\cos \varphi$ des moteurs est en général très mauvais à vide ainsi qu'à faible charge et faible en marche normale. Il est donc utile d'installer des condensateurs pour ce type de récepteurs.

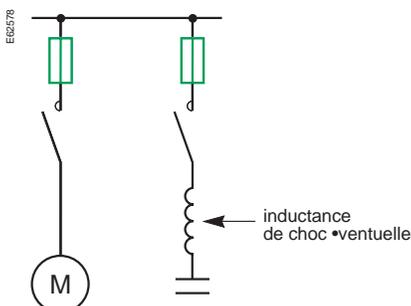
Le tableau ci-dessous donne, à titre indicatif, les valeurs de la puissance des batteries de condensateurs en kvar à installer en fonction de la puissance des moteurs.

puissance nominale des moteurs		puissance (en kvar) à installer			
kW	CV	nombre de paires de pôles			
		1	2	3	4
22	30	6	8	9	10
30	40	7,5	10	11	12,5
37	50	9	11	12,5	16
45	60	11	13	14	17
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
90	125	20	25	27	30
110	150	24	29	33	37
132	180	31	36	38	43
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
250	240	52	57	63	71
280	380	57	63	70	79
355	482	67	76	86	98
400	544	78	82	97	106
450	610	87	93	107	117

Contraintes de la compensation de moteurs asynchrones



Montage des condensateurs aux bornes du moteur



Montage des condensateurs en parallèle avec commande séparée

Lorsqu'un moteur entraîne une charge de grande inertie il peut, après coupure de la tension d'alimentation, continuer à tourner en utilisant son énergie cinétique et être auto-excité par une batterie de condensateurs montée à ses bornes. Ceux-ci lui fournissent l'énergie réactive nécessaire à son fonctionnement en génératrice asynchrone. Cette auto-excitation provoque un maintien de la tension et parfois des surtensions élevées.

Cas du montage des condensateurs aux bornes du moteur

Pour éviter des surtensions dangereuses dues au phénomène d'auto-excitation, il faut s'assurer que la puissance de la batterie vérifie la relation suivante :

$$Q_c \leq 0,9 \sqrt{3} U_n I_0$$

I_0 : courant à vide du moteur
 I_0 peut être estimé par l'expression suivante :

$$I_0 = 2 I_n (1 - \cos \varphi_n)$$

I_n : valeur du courant nominal du moteur
 $\cos \varphi_n$: $\cos \varphi$ du moteur à la puissance nominale
 U_n : tension composée nominale

Cas du montage des condensateurs en parallèle avec commande séparée

Pour éviter les surtensions dangereuses par auto-excitation ou bien dans le cas où le moteur démarre à l'aide d'un appareillage spécial (résistances, inductances, autotransformateurs), les condensateurs ne seront enclenchés qu'après le démarrage.

De même, les condensateurs doivent être déconnectés avant la mise hors tension du moteur.

On peut dans ce cas compenser totalement la puissance réactive du moteur à pleine charge.

Attention, dans le cas où l'on aurait plusieurs batteries de ce type dans le même réseau, il convient de prévoir des inductances de chocs, une limitation des courants d'enclenchement par insertion de résistance.

de transformateurs

05/2014



Un transformateur consomme une puissance réactive qui peut être déterminée approximativement en ajoutant :

- une partie fixe qui dépend du courant magnétisant à vide l_0 : $Q_0 = \sqrt{3} U_n l_0$
- une partie approximativement proportionnelle au carré de la puissance apparente qu'il transite : $Q = U_{cc} S^2/S_n$

U_{cc} : tension de court-circuit du transformateur en p.u.

S : puissance apparente transitée par le transformateur

S_n : puissance apparente nominale du transformateur

U_n : tension composée nominale.

La puissance réactive totale consommée par le transformateur est : $Q_t = Q_0 + Q$. Si cette compensation est individuelle, elle peut se réaliser aux bornes mêmes du transformateur.

Si cette compensation est effectuée avec celle des récepteurs d'une manière globale sur le jeu de barres du tableau principal, elle peut être de type fixe à condition que la puissance totale ne dépasse pas 15 % de la puissance nominale du transformateur (sinon utiliser des batteries à régulation automatiques).

Les valeurs de la compensation individuelle propre au transformateur, fonction de la puissance nominale du transformateur, sont indiquées dans le tableau ci dessous.

puissance en kVA (400 V)	puissance réactive à compenser en kvar	
	à vide	en charge
100	2,5	6,1
160	3,7	9,6
250	5,3	14,7
315	6,3	18,4
400	7,6	22,9
500	9,5	28,7
630	11,3	35,7
800	20	54,5
1000	23,9	72,4
1250	27,4	94,5
1600	31,9	126,2
2000	37,8	176

Le dimensionnement des câbles doit prendre en compte :

- Les courants harmoniques + 30 %,
- Les tolérances des condensateurs + 15 % ramenées à 5 % pour les condensateurs Rectiphase soit au global $1,36 I_n$ pour les condensateurs Rectiphase.

Les variations admissibles de la valeur de la tension fondamentale et des composantes harmoniques peuvent conduire à une majoration du courant de 30 %.

Les variations dues aux tolérances sur les condensateurs peuvent conduire à une majoration du courant de 15 % ; dans le cas des condensateurs Rectiphase, cette tolérance est de 5 %.

En conséquence, les câbles d'alimentation ainsi que les dispositifs de commande et protection de ces batteries doivent également être surdimensionnés pour une valeur de $1,3 \times 1,15 = 1,5 I_n$ et seulement pour une valeur de $1,3 \times 1,05 = 1,36 I_n$ dans le cas de condensateurs Rectiphase. Le tableau ci-contre indique, pour une puissance de batterie de condensateurs donnée : la section minimale du câble d'alimentation.

Dans le cas d'utilisation de condensateurs autres que des condensateurs Rectiphase, sélectionner le calibre immédiatement supérieur à celui indiqué dans le tableau.

Section des câbles de raccordement des batteries de condensateurs de moyennes et grandes puissances (1) (câbles U 1000 RO2V)

puissance de la batterie (kvar)		section cuivre (mm ²)	section alu (mm ²)
230 V	400 V		
5	10	2,5	16
10	20	4	16
15	30	6	16
20	40	10	16
25	50	16	25
30	60	25	35
40	80	35	50
50	100	50	70
60	120	70	95
70	140	95	120
90-100	180	120	185
	200	150	240
120	240	185	2 x 95
150	250	240	2 x 120
	300	2 x 95	2 x 150
180-210	360	2 x 120	2 x 185
245	420	2 x 150	2 x 240
280	480	2 x 185	2 x 300
315	540	2 x 240	3 x 185
350	600	2 x 300	3 x 240
385	660	3 x 150	3 x 240
420	720	3 x 185	3 x 300

(1) Section minimale ne tenant pas compte des facteurs de correction éventuels (mode de pose, température...).

Les calculs ont été effectués pour des câbles unipolaires posés à l'air libre à 30 °C.

Choix des protections

Compensation fixe Rectibloc

Ensemble constitué de condensateurs Varplus M en coffret ou montés dos à dos sur une structure en tôle peinte et protégé par un disjoncteur intégré. Il existe en différents types en fonction du niveau de pollution harmonique



Coffret



Structure



Rectibloc type SAH

Tension réseau 400/415 V

Type standard

Pour réseau peu pollués ($Gh/Sn \leq 15\%$)

puissance (kvar)	courant nominal (A)	disjoncteur	Ir (A)	type réalisation
10	15	NC100L	20	coffret
15	22	NC100L	30	coffret
20	29	NC100L	40	coffret
25	36	NS100N/H/L	50	structure
30	43	NS100N/H/L	60	structure
40	58	NS100N/H/L	80	structure
50	72	NS100N/H/L	100	structure
60	87	NS160N/H/L	120	structure
70	101	NS160N/H/L	140	structure
80	115	NS160N/H/L	160	structure
100	144	NS250N/H/L	200	structure
120	173	NS250N/H/L	240	structure

Installation

■ coffret : fixation murale

■ structure : au sol avec raccordement des câbles de puissance par le bas.

Type H

Pour réseaux pollués ($15\% < Gh/Sn \leq 25\%$)

puissance (kvar) (*)	courant nominal (A)	disjoncteur	Ir (A)	type réalisation
7,5	11	NC100L	15	coffret
10	15	NC100L	20	coffret
15	22	NC100L	30	coffret
20	29	NS100N/H/L	40	structure
22,5	32	NS100N/H/L	45	structure
30	43	NS100N/H/L	60	structure
35	51	NS100N/H/L	70	structure
40	58	NS100N/H/L	80	structure
45	65	NS100N/H/L	90	structure
52,5	76	NS160N/H/L	105	structure
60	87	NS160N/H/L	120	structure
70	101	NS160N/H/L	140	structure
80	115	NS250N/H/L	160	structure
90	130	NS250N/H/L	180	structure
105	152	NS250N/H/L	210	structure

(*) : puissance utile en 400 V.

Type SAH

Pour réseaux fortement pollués ($15\% < Gh/Sn \leq 60\%$)

puissance (kvar)	courant nominal (A)	disjoncteur	Ir (A)	type réalisation
25	36	NS100N/H/L	50	armoire
37,5	54	NS100N/H/L	75	armoire
50	72	NS100N/H/L	100	armoire
75	108	NS160N/H/L	150	armoire
100	144	NS250N/H/L	200	armoire
125	180	NS250N/H/L	250	armoire
150	217	NS400N/H/L	300	armoire

Choix des protections

(suite)

Compensation automatique Rectimat 2

Les batteries Rectimat 2 sont des équipements de compensation automatique qui se présentent sous la forme de coffret ou d'armoire selon la puissance



Rectimat 2 coffret 1



Rectimat 2 armoire 1



Rectimat 2 armoire 3

Tension réseau 400 V Rectimat 2

Type standard

Pour réseau peu pollués ($Gh/Sn \leq 15\%$)

puissance batterie (kvar)	courant nominal (A)	disjoncteur	Ir (A)	type réalisation
30	43	NS100N/H/L	60	coffret 1
45	65	NS100N/H/L	90	coffret 1
60	87	NS160N/H/L	120	coffret 2
75	108	NS160N/H/L	150	coffret 2
90	130	NS250N/H/L	180	armoire 1
105	152	NS250N/H/L	205	armoire 1
120	173	NS250N/H/L	235	armoire 2
150	217	NS400N/H/L	300	armoire 1
180	260	NS400N/H/L	350	armoire 1
210	303	NS630N/H/L	415	armoire 2
240	346	NS630N/H/L	470	armoire 3
270	390	NS630N/H/L	530	armoire 3
315	455	NS630N/H/L	620	armoire 3
360	520	C801N/H/L	710	armoire 3
405	585	C801N/H/L	800	armoire 3
450	650	C1001N/H/L	885	armoire 3
495	714	C1001N/H	975	armoire 4
540	779	C1251N/H	1060	armoire 4
585	844	C1251N/H	1150	armoire 4
630	909	C1251N/H	1240	armoire 4
675	974	CM1600N/H	1325	armoire 4
720	1039	CM1600N/H	1415	armoire 4
765	1104	CM1600N/H	1500	armoire 4
810	1169	CM1600N/H	1600	armoire 4
855	1234	CM2000N/H	1680	armoire 4
900	1299	CM2000N/H	1770	armoire 4

Type H

Pour réseaux pollués ($15\% < Gh/Sn \leq 25\%$)

puissance batterie (kvar)	courant nominal (A)	disjoncteur	Ir (A)	type réalisation
30	43	NS100N/H/L	65	coffret 2
45	65	NS100N/H/L	100	coffret 2
50	72	NS160N/H/L	110	coffret 2
80	115	NS250N/H/L	175	armoire 2
100	144	NS250N/H/L	220	armoire 1
120	173	NS400N/H/L	260	armoire 1
160	231	NS400N/H/L	345	armoire 2
180	260	NS630N/H/L	390	armoire 2
210	303	NS630N/H/L	455	armoire 2
245	354	NS630N/H/L	530	armoire 3
280	404	NS630N/H/L	610	armoire 3
315	455	C801N/H/L	685	armoire 3
350	505	C801N/H/L	760	armoire 3
420	606	C1001N/H/L	910	armoire 4
455	657	C1001N/H/L	985	armoire 4
525	758	C1251N/H/L	1140	armoire 4
560	808	C1251N/H/L	1215	armoire 4
630	909	CM1600N/H	1370	armoire 4
700	1010	CM1600N/H	1520	armoire 4

Choix des protections

(suite)



Rectimat 2 armoire 2



Rectimat 2 armoire 3

Type SAH

Pour réseaux fortement pollués ($15\% < Gh/Sn \leq 60\%$)

puissance batterie (kvar)	courant nominal (A)	disjoncteur	I _r (A)	type réalisation
25	36	NS100N/H/L	50	armoire 2
37,5	54	NS100N/H/L	75	armoire 2
50	72	NS100N/H/L	100	armoire 2
62,5	90	NS160N/H/L	125	armoire 2
75	108	NS160N/H/L	150	armoire 2
100	144	NS250N/H/L	200	armoire 2
125	180	NS250N/H/L	250	armoire 3
150	217	NS400N/H/L	300	armoire 3
175	253	NS400N/H/L	350	armoire 3
200	289	NS400N/H/L	400	armoire 3
250	361	NS630N/H/L	490	armoire 3
300	433	NS630N/H/L	590	armoire 4
350	505	C801N/H/L	690	armoire 4
400	577	C1801N/H/L	785	armoire 4
450	650	C1001N/H/L	885	armoire 4
500	722	C1001N/H/L	980	armoire 4

Exemple

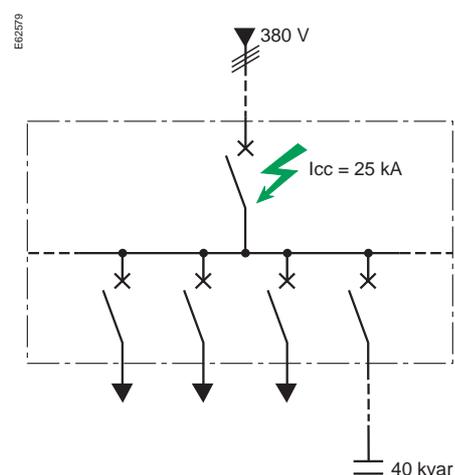
Réseau triphasé 400 V

I_{cc} = 25 kA au niveau du jeu de barres.

Soit une batterie de condensateurs Rectibloc type H de 40 kvar à installer au niveau d'une armoire alimentant un atelier. Déterminer la section minimale du câble d'alimentation et le calibre du disjoncteur de protection :

- le tableau page 24 préconise une section minimale de 10 mm² cuivre ou 16 mm² alu
- le tableau page 26 indique plusieurs possibilités pour le disjoncteur de protection.

Pour une intensité de court-circuit de 25 kA, il y a lieu d'installer un NS100N (P_{dc} = 25 kA) équipé d'un déclencheur magnétothermique TM80D ou électronique STR22SE 100 A.



Compensation automatique Turbovar (tarif jaune)

puissance (kvar)	courant nominal (A)	disjoncteur	Ir (A)	modèle
10	15	C60	20	TJ50
20	29	C60	40	TJ75
30	43	NC100N/H/L	60	TJ100
37,5	54	NC100N/H/L	75	TJ125
50	72	NS100N/H/L	100	TJ150
60	87	NS160N/H/L	120	TJ175
72,5	105	NS160N/H/L	145	TJ200
85	123	NS250N/H/L	170	TJ250

Turbovar est un équipement constitué :

■ de condensateurs :

de type autocatrisants

protégés par un système HQ

(surpresseur associé à un fusible HPC)

mettant hors circuit le condensateur en cas de défaut interne.

■ d'un contacteur spécifique pour limiter les courants d'enclenchement

■ d'un relais d'intensité qui enclenche Turbovar au-delà d'une certaine consommation

■ d'une enveloppe métallique peinte.

Schneider Electric Industries SA

5, rue Nadar
92506 Rueil Malmaison
Cedex France

Tel : +33 (0)1 41 29 82 00
Fax : +33 (0)1 47 51 80 20

<http://www.schneiderelectric.com>

En raison de l'évolution des normes et du matériel, les caractéristiques indiquées par le texte et les images de ce document ne nous engagent qu'après confirmation par nos services.



Ce document a été imprimé sur du papier écologique.

Publication : Schneider Electric
Réalisation : AMEG
Impression :