



## Solution en Compensation Facteur de puissance



Solutions complètes dans  
la régulation de la Qualité de l'onde





<b>1. INTRODUCTION</b>	
1.1 Généralité .....	4
1.2 Facteur de puissance .....	4
1.3 Demande de puissance réactive .....	4
<b>2. EFFET ÉCONOMIQUE DE LA COMPENSATION</b>	
2.1 Coût d'acquisition des équipements de compensation .....	4
2.1.1 Production de puissance réactive par l'utilisation d'appareils rotatifs .....	4
2.1.2 Coût d'acquisition et d'entretien des condensateurs .....	5
2.2 Transmission de la puissance réactive et conception du réseau .....	5
2.3 Puissance réactive et pertes de transmission .....	5
2.3.1 Pertes de puissance active .....	5
2.3.2 Pertes de puissance réactive .....	6
2.4 Transmission de la puissance réactive et chute de tension .....	6
2.4.1 Compensation en parallèle .....	6
2.4.2 Compensation en série .....	6
<b>3. MÉTHODES DE COMPENSATION</b>	
3.1 Compensation individuelle .....	7
3.2 Compensation centrale basse tension .....	8
3.3 Compensation haute tension .....	9
3.4 Conséquences techniques de la compensation .....	10
3.4.1 Élévation de la tension .....	10
3.4.2 Influence des harmoniques .....	10
3.4.3 Conditions ambiantes .....	11
<b>4. RÉSUMÉ</b> .....	11

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 Généralité

En plus de la puissance active, la majorité des appareils électriques nécessitent une puissance réactive.

Si cette puissance réactive n'est pas fournie par des condensateurs dans l'entourage immédiat, elle doit être transmise par le système de distribution. Dans ce dernier cas, l'influence de la puissance réactive sur le courant total doit entrer en ligne de compte lors de la conception du système et peut entraîner le besoin de transformateurs plus puissants et de câbles plus gros que ceux requis ordinairement.

De plus, la transmission de la puissance réactive provoque des pertes d'énergie additionnelles. En utilisant la compensation de la puissance réactive, la quantité de puissance réactive n'a que très peu

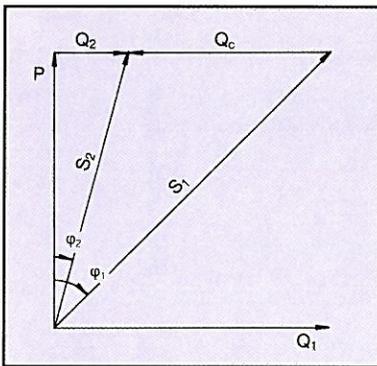


Schéma 1. La puissance apparente d'un réseau peut être réduite par la correction du facteur de puissance (CFP).

d'importance sur le dimensionnement du système et sur les pertes de transmission.

- $S_1$  = puissance apparente avant CFP
- $S_2$  = puissance apparente après CFP
- $P$  = puissance active
- $Q_1$  = puissance réactive avant CFP
- $Q_2$  = puissance réactive après CFP
- $Q_c = Q_1 - Q_2$  = puissance de compensation du condensateur
- $\varphi_1$  = déphasage avant CFP
- $\varphi_2$  = déphasage après CFP

## 1.2 Facteur de puissance

La puissance totale de fonctionnement, appelée puissance apparente, peut s'exprimer en termes de puissance réactive et de puissance active :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

Le facteur de puissance  $\cos \varphi$  représente la relation suivante entre la puissance active et la puissance apparente :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\text{puissance active}}{\text{puissance apparente}} \quad (2)$$

de même

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{\text{puissance réactive}}{\text{puissance active}} \quad (3)$$

La correction du facteur de puissance (CFP) signifie que des condensateurs (ou des appareils synchronisés) sont utilisés pour réduire la quantité de puissance réactive pour l'électricité fournie à la clientèle industrielle et commerciale, améliorant ainsi le facteur de puissance à un niveau supérieur.

## 1.3 Demande en puissance réactive

Les moteurs à induction ont besoin de puissance réactive pour maintenir le champ magnétique essentiel à leur fonctionnement. La demande moyenne en puissance réactive pour les moteurs asynchrones est d'environ 1 kvar par 1 kW de puissance active.

Les entraînements par thyristor utilisent le courant réactif du réseau et génèrent également des harmoniques qui ont tendance, entre autres choses, à surcharger les condensateurs. En plus des équipements mentionnés ci-dessus, les transformateurs, les câbles chargés, les lignes de transmission et divers appareillages électriques ont tous besoin, dans une certaine mesure, de puissance réactive.

Tableau 1 Exemple de facteurs de puissance

Type de charge	Facteur de puissance approx. (demi...pleine charge)
moteur à induction < 100 kW	0,6...0,8
250 kW	0,8...0,9
entraînements par thyristor	0,7
lampe à incandescence	1,0
lampe à arc au mercure	0,5
lampe fluorescente (cathode chaude)	0,5...0,6
lampe tube néon	0,4...0,5
four à induction	0,2...0,6
four à arc	0,6...0,8
radiateur électrique	1,0
soudeuse à arc CA ou par résistance	0,5...0,6

# 2. EFFET ÉCONOMIQUE DE LA COMPENSATION

Au cours des dernières années, une plus grande attention a été accordée à la réduction des coûts énergétiques et aux problèmes reliés à la fabrication, la transmission, la distribution et la consommation de l'électricité.

Lors de la conception d'un schéma de compensation, on devrait toujours tenter de trouver la solution la plus économique, pour laquelle les économies réalisées en coûts d'équipements et en pertes de transmission sont plus importantes de façon significative que les coûts d'acquisition de puissance réactive.

Au moment de déterminer l'emplacement des condensateurs, on doit se rappeler des conditions ambiantes défavorables peuvent réduire la durée de vie des unités, ce qui se traduira par des dépenses additionnelles. Les frais d'installation des condensateurs, les effets de la correction du facteur de puissance sur le niveau de tension et les normes en

vigueur des autorités en ce qui concerne la surcompensation devraient également être considérés.

## 2.1 Coût d'acquisition des équipements de compensation

### 2.1.1 Production de puissance réactive par l'utilisation d'appareils rotatifs

Traditionnellement, la puissance réactive était générée par des appareils rotatifs et transmise par le système jusqu'aux consommateurs de la même façon que la puissance active. Les gros moteurs utilisés dans l'industrie sont souvent des appareils synchronisés qui produisent eux-mêmes la puissance réactive dont ils ont besoin.

Il est souvent possible de faire en sorte que ces appareils soient surmagnétisés et produisent ainsi un excès de puissance réactive pour compenser

d'autres charges. Les frais d'acquisition des génératrices et des appareils synchronisés dépendent de la quantité supplémentaire de puissance réactive demandée.

La production de puissance réactive par des appareils synchronisés cause des pertes additionnelles de l'ordre de 10 à 30 W/kvar, selon la dimension et la construction de la machine et de la quantité de puissance réactive produite. Cependant, en élevant le facteur de puissance, les pertes additionnelles peuvent être réduites.

La puissance réactive produite par des appareils rotatifs doit être transmise par le système de distribution. Ceci entraîne une immobilisation additionnelle et des pertes supplémentaires au niveau de la transmission, qui sont particulièrement significatives dans le cas de la transmission haute tension.

On s'entend généralement pour dire qu'il n'est pas avantageux d'installer de

telles génératrices et des moteurs synchronisés uniquement pour la production de grande quantité de puissance réactive et qu'il est également peu économique de produire de la puissance réactive à partir d'appareils synchronisés déjà en place dans le système.

Il s'agit d'une conséquence de l'augmentation rapide des coûts énergétiques au cours des années 1970 et des développements des frais de capitalisation des systèmes en comparaison aux coûts d'achat et d'entretien de condensateurs.

### 2.1.2 Coût d'acquisition et d'entretien des condensateurs

Les coûts d'acquisition des condensateurs peuvent, pour des raisons de comparaison économique, être exprimés en coûts annuels comme suit :

$$K = a \cdot H \quad (4)$$

K = coûts annuels

a = facteur de coût des intérêts et dépréciation

H = coûts d'acquisition des condensateurs, incluant l'installation.

Un taux d'intérêt de 7 à 10 % est habituellement utilisé pour les calculs de rentabilité. La période de dépréciation des condensateurs de puissance est de 15 à 20 ans.

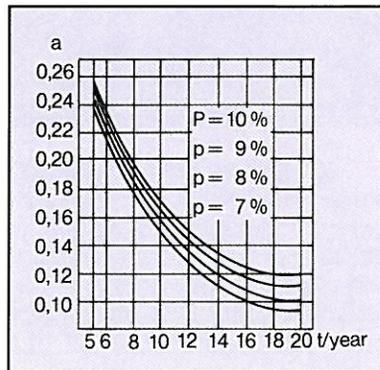


Schéma 2. Facteur de coût (a) dérivé des intérêts et de la dépréciation.

Les coûts annuels de fonctionnement comprennent les pertes et les coûts d'entretien et de réparation. Les pertes de puissance sont maintenant grandement réduites avec l'utilisation dans les condensateurs de film comme matériau diélectrique en remplacement du papier.

Les dépenses annuelles pour l'entretien et la réparation comptent habituellement pour 1 à 2 % du prix d'achat des condensateurs. Les condensateurs ne présentent aucune pièce mobile ou susceptible de subir une usure. Les contacteurs, et les relais régulateurs dans les batteries de condensateurs automatiques et les coupe-circuit dans les batteries haute tension sont les seules composantes qui nécessitent un entretien.

Une immobilisation pour l'acquisition de condensateurs sera normalement rentabilisée en 0,5 à 2 ans par de plus

faibles pertes et des frais moindres en puissance/énergie réactive. Les économies annuelles pour toute la période de dépréciation représentent de 30 à 100 % du prix d'achat.

### 2.2 Transmission de la puissance réactive et conception du réseau

Le courant total dans le réseau est, règle générale, le critère de base de la conception du système. À basse tension tout spécialement, le courant thermique du réseau constitue le facteur critique, tandis qu'à haute tension, d'autres facteurs, comme la puissance de court-circuit sont également vitaux.

Lorsque la compensation parallèle fait partie intégrante du système, moins de puissance réactive est transmise. En conséquence, la composante de courant correspondante  $I_q$  diminue et réduit ainsi le courant total  $I$  exprimé comme suit :

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (5)$$

$I$  = courant effectif sur la conception du réseau

$I_p$  = composante du courant causée par la transmission de puissance active

$I_q$  = composante du courant causée par la transmission de la puissance réactive

En diminuant le courant qui circule dans un nouveau réseau, cela signifie que des transformateurs, des conducteurs et des câbles de plus faible puissance pourront être utilisés. Dans un système existant, plus de puissance active peut être transmise ( $I_p$  augmente) lorsque la transmission de puissance réactive est réduite ( $I_q$  diminue) et la charge totale ( $I$ ) demeure constante.

Ainsi, le remplacement du transformateur ou des câbles peut être retardé de quelques années ou jusqu'à la fin de la durée de vie du transformateur. La puissance transmissible sur ce même réseau peut être calculée ainsi :

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \quad (6)$$

$P_1$  = capacité de transmission de puissance active du réseau au facteur de puissance  $\cos \varphi_1$

$P_2$  = capacité de transmission de puissance active du réseau au facteur de puissance  $\cos \varphi_2$

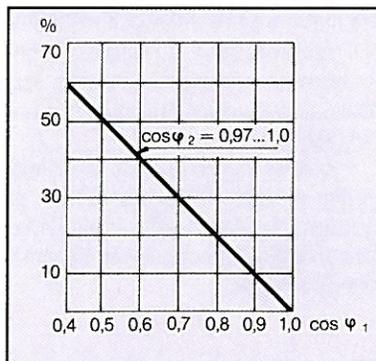


Schéma 3. Pourcentage de diminution en courant d'un réseau lorsque le facteur de puissance ( $\cos \varphi_2$ ) est élevé à la plus proche unité.

### 2.3 Puissance réactive et pertes de transmission

La transmission de puissance réactive provoque une perte de puissance active dans la résistance du réseau et une perte de puissance réactive dans les réactances.

À cause de la perte de puissance active, les composantes d'un tel système comme les câbles et les transformateurs subissent une hausse de température et la perte de puissance (kW) et l'énergie correspondante (KWh) doivent être compensées.

#### 2.3.1 Pertes de puissance active

Les pertes de puissance active dans un réseau triphasé peuvent être calculées selon la formule suivante :

$$P_h = 3 \times I^2 \times R = 3 \times I_p^2 \times R + 3 \times I_q^2 \times R \quad (7)$$

$P_h$  = pertes de puissance active

$R$  = résistance du réseau/déphasage de transmission

L'équation ci-dessus démontre que les pertes de puissance générées par les composantes du courant réactif ( $I_q$ ) sont indépendantes de la transmission de puissance active et peuvent être considérées séparément :

$$P_{h_q} = 3 \times I_q^2 \times R \quad (8)$$

Remarquez tout particulièrement que les pertes de puissance se produisent en proportion du carré de  $I_q$ , c'est-à-dire que le courant double, les pertes quadruplent. Également, pour un facteur de puissance moyen de  $\cos \varphi = 0,7$  pour une charge moteur asynchrone, la moitié des pertes totales de transmission seront causées par la puissance réactive.

La résistance des câbles peut être calculée approximativement avec la formule suivante :

$$R = k \times \frac{1}{A} \quad (9)$$

$R$  = résistance du câble

$k = 0,020 \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$  pour les câbles Cu

$= 0,033 \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$  pour les câbles Al

$l$  = longueur du câble

$A$  = section du câble

La résistance des transformateurs peut être calculée comme suit :

$$R = r_k \times \frac{U^2}{S_n} \quad (10)$$

alors que

$$r_k = \frac{P_1}{S_n} \quad (11)$$

$R$  = résistance du transformateur

$S_n$  = puissance nominale du transformateur

$U$  = tension secteur (pour le calcul de la résistance)

$r_k$  = résistance de court-circuit relative

$P_1$  = pertes de charge au courant nominal (selon les tableaux ou la plaque signalétique)

Lors du calcul des pertes, il est préférable d'examiner les différentes parties du réseau séparément. Par cette méthode, les

perles causées par les câbles, les transformateurs, etc., peuvent être comparées et les sources principales ainsi détectées. Ces résultats servent par la suite de critère pour le choix d'un emplacement pour les condensateurs.

Les coûts annuels engendrés par les pertes en puissance active sont :

$$C_a = (P_h \times a) + (P_h \times t_a \times b) \quad (12)$$

$C_a$  = coûts annuels des pertes de puissance active  
 $t_a$  = temps durant lequel les pertes de puissance active sont utilisées  
 $a$  = charge de puissance  
 $b$  = charge d'énergie

Si la charge de puissance (ou demande de charge maximum) n'est pas comprise dans le tarif, les coûts annuels de pertes d'énergie sont simplement proportionnels à la période de temps d'utilisation de l'équipement.

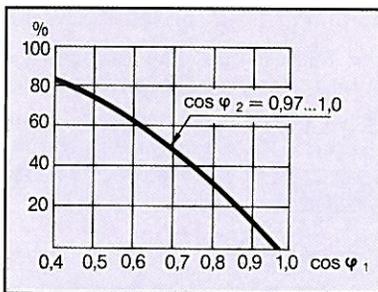


Schéma 4. Pourcentage de diminution des pertes totales d'un réseau après amélioration du facteur de puissance.

### 2.3.2 Pertes de puissance réactive

Les pertes provoquées par la transmission de puissance réactive peuvent être examinées séparément de la même façon que dans le cas des pertes de puissance active. Elles sont également indépendantes de la transmission de la puissance active.

Les pertes de puissance réactive triphasée peuvent être calculées selon la formule suivante :

$$Q_{h,q} = 3 \times I_q^2 \times X \quad (13)$$

$Q_{h,q}$  = pertes de puissance réactive causée par les composantes du courant réactif  
 $X$  = réactance du réseau

La réactance d'une ligne aérienne est calculée à partir de son inductance :

$$X = 2 \times \pi \times f \times L \times l \quad (14)$$

$X$  = réactance de la ligne  
 $f$  = fréquence du réseau  
 $L$  = inductance spécifique de la ligne  
 $l$  = longueur de la ligne

La réactance d'une ligne aérienne est habituellement de l'ordre de 0,4 ohm/km, ce qui est beaucoup plus important que dans le cas des câbles. Les pertes de puissance réactive générées dans les câbles sont généralement négligeables.

La réactance du transformateur est calculée comme suit :

$$X = X_k \times \frac{U^2}{S_n} \quad (15)$$

alors que

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - I_k^2} \quad (16)$$

$X$  = réactance du transformateur  
 $S_n$  = puissance nominale du transformateur  
 $U$  = tension secteur (pour le calcul de la réactance)  
 $Z_k$  = impédance relative de court-circuit  
 $X_k$  = réactance relative de court-circuit  
 $I_k$  = résistance relative de court-circuit

L'impédance relative de court-circuit ( $Z_k$ ) des transformateurs de puissance est de 2 et même 3 fois supérieure à celle des transformateurs de distribution.

## 2.4 Transmission de puissance réactive et chute de tension

### 2.4.1 Compensation parallèle

La transmission de puissance active produit une chute de tension à travers les résistances dans le réseau tandis que la transmission de puissance réactive produit une chute de tension dans les réactances inductives. La chute de tension totale peut être calculée approximativement en utilisant la formule suivante :

$$dU = I_p \times R + I_q \times X \quad (17)$$

$dU$  = chute de tension (tension de phase)  
 $R$  = résistance du réseau  
 $X$  = réactance du réseau

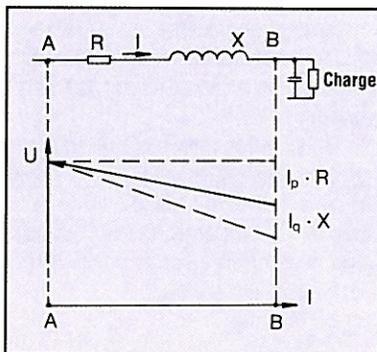


Schéma 5. La compensation parallèle réduit la chute de tension.

Ceci démontre que la chute de tension dans les réactances du système peut être moindre en réduisant la composante de l'intensité réactive, la plupart du temps en utilisant la compensation parallèle, également appelée compensation de dérivation (Schéma 5).

Avec les transformateurs, la chute de tension produite par la transmission de puissance réactive est relativement élevée. Cette chute peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$U_d = \frac{1}{I_n} (I_k \times \cos \varphi + X_k \times \sin \varphi) \quad (18)$$

$U_d$  = chute de tension relative dans le transformateur  
 $\cos \varphi$  = facteur de puissance de la charge  
 $I_n$  = intensité nominale du transformateur  
 $I$  = courant de charge

### 2.4.2 Compensation en série

Tel que mentionné plus haut, la compensation de dérivation réduit la composante réactive de l'intensité du réseau et par le fait même, la chute de tension. Lorsque la compensation en série est utilisée, la réactance de la ligne est réduite en raccordant des condensateurs en série avec la ligne. L'énoncé (17) pour calculer la chute de tension est modifié de la façon suivante :

$$dU = I_p \times R + I_q \times (X_l - X_c) \quad (19)$$

$dU$  = chute de tension sur la ligne  
 $X_l$  = réactance de la ligne  
 $X_c$  = réactance du condensateur

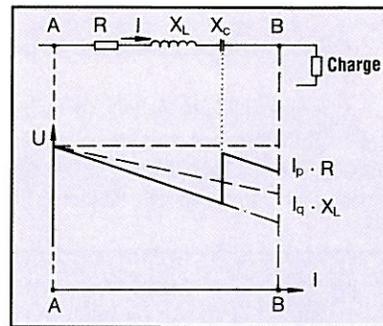


Schéma 6. La tension peut être élevée au niveau désiré par l'utilisation d'un condensateur raccordé en série.

Lorsque  $X_c$  est égal à  $X_l$ , la réactance du réseau est de zéro ( $X_l - X_c = 0$ ) et la chute de tension provoquée par la transmission de puissance réactive est par conséquent elle aussi de zéro. En ajoutant un condensateur approprié en série, la valeur de  $X_c$  peut être plus grande que celle de  $X_l$ . Dans un tel cas, la réactance du réseau devient négative. De cette façon, la compensation en série peut également réduire la chute de tension provoquée par la transmission de puissance active (Schéma 6).

De plus, les condensateurs en série offrent les avantages suivants si on les compare aux systèmes de transmission haute tension sans compensation : plus grande capacité de transmission de puissance, meilleure stabilité statique et dynamique, moins de réglages et moins de pertes par un partage optimal de la charge sur des lignes parallèles. La compensation en série représente également une solution économique en comparaison à la mise en place de nouvelles lignes parallèles.

### 3. MÉTHODES DE COMPENSATION

Au moment de choisir une méthode de compensation, on devrait toujours tenir compte de l'emplacement des condensateurs, des aspects financiers mentionnés préalablement, tels que les tarifs, les paramètres du réseau, les pertes de transmission et la chute de tension, ainsi que les coûts initiaux d'acquisition et les dépenses d'entretien des appareils. De plus, il existe certains facteurs tels que les harmoniques du système et les conditions ambiantes, qui peuvent limiter une utilisation efficace des condensateurs.

Des tableaux et des monogrammes sont disponibles pour vous aider à calculer la puissance de condensateur requise. Dans le tableau 2, en faisant correspondre la valeur donnée de  $\cos \varphi$  ou de  $\tan \varphi$  avec la valeur souhaitée, on obtient le facteur K, par lequel on doit multiplier la puissance P. Ce qui donne la puissance de condensateur requise.

Il n'existe pas de méthode de compensation universelle; plusieurs méthodes peuvent être applicables pour chaque cas. Nous présentons ici trois méthodes de compensation : individuelle, de groupe et centrale.

#### 3.1 Compensation individuelle

En reliant les condensateurs aux bornes des équipements auxquels on souhaite fournir une compensation, il est plus facile de se rendre compte de l'influence du condensateur sur le dimensionnement du réseau et sur les pertes de puissance et de tension.

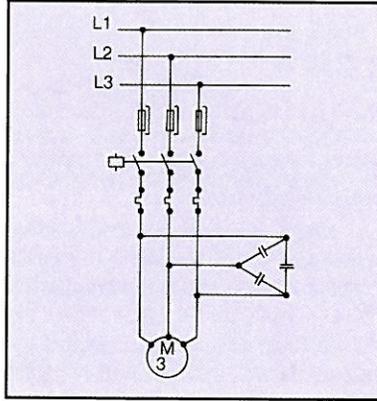


Schéma 7 Principe de compensation individuelle d'un moteur.

La demande en puissance réactive de moteurs asynchrones triphasés varie entre 0,5 et 1 kvar par kilowatt de puissance active, selon la vitesse, la dimension et la

charge des moteurs. La majeure partie de la puissance réactive nécessaire peut être générée par des condensateurs montés en parallèle avec le moteur. Le condensateur peut être relié soit aux bornes du moteur ou au démarreur (Schéma 7).

La puissance requise du condensateur peut être calculée avec la formule :

$$Q_c = \frac{P}{e} \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (20)$$

$Q_c$  = puissance du condensateur  
 $P$  = puissance nominale du moteur  
 $e$  = efficacité du moteur  
 $\varphi_1$  = déphasage avant CFP  
 $\varphi_2$  = déphasage après CFP

Une augmentation de tension par autoexcitation peut survenir, particulièrement lorsque le moteur est rapidement rebranché immédiatement après une mise hors tension. Il est donc souhaitable de limiter la puissance de compensation à :

$$Q_c = 0.9 \times I_0 \times U \times \sqrt{3} \quad (21)$$

$I_0$  = courant à vide du moteur  
 $U$  = tension secteur

En raison de l'autoexcitation, il n'est pas recommandé d'utiliser une compensation individuelle du moteur si l'appareil que

Tableau 2. Pourcentage du facteur de puissance souhaité

	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
50	0.982	1.003	1.034	1.069	1.084	1.112	1.139	1.165	1.192	1.220	1.248	1.276	1.305	1.337	1.369	1.403	1.442	1.481	1.529	1.590	1.732	
51	.937	.962	.989	1.015	1.041	1.067	1.094	1.120	1.147	1.175	1.203	1.231	1.261	1.292	1.324	1.358	1.395	1.436	1.484	1.544	1.687	
52	.893	.919	.945	.971	.997	1.023	1.050	1.076	1.103	1.131	1.159	1.187	1.217	1.248	1.280	1.314	1.351	1.392	1.440	1.500	1.643	
53	.850	.876	.902	.928	.954	.980	1.007	1.033	1.080	1.088	1.116	1.144	1.174	1.205	1.237	1.271	1.308	1.349	1.397	1.457	1.600	
54	.809	.835	.861	.837	.913	.939	.966	.982	1.019	1.047	1.075	1.103	1.133	1.164	1.196	1.230	1.267	1.308	1.356	1.416	1.559	
55	.769	.795	.821	.847	.873	.899	.926	.962	.979	1.007	1.035	1.063	1.090	1.124	1.156	1.190	1.228	1.268	1.316	1.377	1.519	
56	.730	.756	.782	.808	.834	.860	.887	.913	.940	.968	.996	1.024	1.051	1.085	1.117	1.151	1.189	1.229	1.277	1.338	1.480	
57	.692	.718	.744	.770	.796	.822	.849	.875	.902	.930	.958	.986	1.013	1.047	1.079	1.113	1.151	1.191	1.239	1.300	1.442	
58	.655	.681	.707	.733	.759	.785	.812	.838	.865	.893	.921	.949	.976	1.010	1.042	1.076	1.114	1.154	1.202	1.263	1.405	
59	.618	.644	.670	.696	.722	.748	.775	.801	.828	.856	.884	.912	.939	.973	1.005	1.039	1.077	1.117	1.165	1.226	1.368	
60	.584	.610	.636	.662	.688	.714	.741	.767	.794	.822	.850	.878	.905	.939	.971	1.005	1.043	1.083	1.131	1.192	1.334	
61	.549	.575	.601	.627	.653	.679	.706	.732	.759	.787	.815	.843	.870	.904	.936	.970	1.008	1.048	1.096	1.157	1.299	
62	.515	.541	.567	.593	.619	.645	.672	.696	.725	.753	.781	.809	.836	.870	.902	.936	.974	1.014	1.062	1.123	1.265	
63	.483	.509	.535	.561	.587	.613	.640	.666	.693	.721	.749	.777	.804	.838	.870	.904	.942	.982	1.030	1.091	1.233	
64	.450	.476	.502	.528	.554	.580	.607	.633	.660	.688	.716	.744	.771	.805	.837	.871	.909	.949	.997	1.058	1.200	
65	.419	.445	.471	.497	.523	.549	.576	.602	.629	.657	.685	.713	.740	.774	.806	.840	.878	.918	.966	1.027	1.169	
66	.396	.414	.440	.466	.492	.518	.545	.571	.598	.626	.654	.682	.709	.743	.775	.809	.847	.887	.935	.996	1.138	
67	.358	.384	.410	.436	.462	.488	.515	.541	.568	.596	.624	.652	.679	.713	.745	.779	.817	.857	.905	.966	1.108	
68	.329	.355	.381	.407	.433	.459	.486	.512	.539	.567	.595	.623	.650	.684	.716	.750	.788	.828	.876	.937	1.079	
69	.299	.325	.351	.377	.403	.429	.456	.482	.509	.537	.565	.593	.620	.654	.686	.720	.758	.798	.840	.907	1.049	
70	.270	.296	.322	.348	.374	.400	.427	.453	.480	.508	.536	.564	.591	.625	.657	.691	.729	.769	.811	.878	1.020	
71	.242	.268	.294	.320	.346	.372	.399	.425	.462	.480	.508	.536	.563	.597	.629	.663	.701	.741	.783	.850	.992	
72	.213	.239	.265	.291	.317	.343	.370	.396	.423	.451	.479	.507	.534	.568	.600	.634	.672	.712	.754	.821	.963	
73	.188	.212	.238	.264	.290	.316	.343	.369	.396	.424	.452	.480	.507	.541	.573	.607	.645	.685	.727	.794	.936	
74	.159	.185	.211	.237	.263	.289	.316	.342	.369	.397	.425	.453	.480	.514	.546	.580	.618	.658	.700	.767	.909	
75	.132	.158	.184	.210	.236	.262	.289	.315	.342	.370	.398	.426	.453	.487	.519	.553	.591	.631	.673	.740	.882	
76	.105	.131	.157	.183	.209	.235	.262	.288	.315	.343	.371	.399	.426	.460	.492	.526	.564	.604	.652	.713	.855	
77	.079	.105	.131	.157	.183	.209	.236	.262	.289	.317	.345	.373	.400	.434	.466	.500	.538	.578	.620	.687	.829	
78	.053	.079	.105	.131	.157	.183	.210	.236	.263	.291	.319	.347	.374	.408	.440	.474	.512	.552	.594	.661	.803	
79	.026	.052	.078	.104	.130	.156	.183	.209	.236	.264	.292	.320	.347	.381	.413	.447	.485	.525	.567	.634	.776	
80	.000	.026	.052	.078	.104	.130	.157	.183	.210	.238	.266	.294	.321	.355	.387	.421	.459	.499	.541	.608	.750	
81	....	.000	.026	.052	.078	.104	.131	.157	.184	.212	.240	.268	.295	.329	.361	.395	.433	.473	.515	.682	.724	
82	....	....	.000	.026	.052	.078	.105	.131	.158	.186	.214	.242	.269	.303	.335	.369	.407	.447	.489	.556	.698	
83	....	....	....	.000	.026	.052	.079	.105	.132	.160	.188	.216	.243	.277	.309	.343	.381	.421	.463	.530	.672	
84	....	....	....	....	.000	.026	.053	.079	.106	.134	.162	.190	.217	.251	.283	.317	.355	.395	.437	.504	.645	
85	....	....	....	....	....	.000	.027	.053	.080	.108	.136	.164	.191	.225	.257	.291	.329	.369	.417	.484	.626	
86	....	....	....	....	....	....	....	.026	.053	.081	.091	.137	.167	.198	.230	.265	.301	.343	.390	.451	.593	
87	....	....	....	....	....	....	....	....	.027	.055	.082	.111	.141	.172	.204	.238	.275	.317	.364	.425	.567	
88	....	....	....	....	....	....	....	....	....	.028	.056	.084	.114	.145	.177	.211	.248	.290	.337	.398	.540	
89	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	.028	.056	.086	.117	.149	.183	.220	.252	.309	.370	.512	
90	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	.028	.058	.089	.121	.155	.192	.234	.281	.342	.484	
91	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	.030	.061	.093	.127	.164	.206	.253	.314	.456
92	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	.031	.063	.087	.134	.176	.223	.284	.426
93	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	.032	.066	.103	.145	.192	.253	.395
94	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	.034	.071	.113	.160	.221	.363
95	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	.037	.079	.126	.187	.328

Pourcentage du facteur de puissance initial

Valeur du tableau x charge Kw = kvar des condensateurs nécessaires à la correction du facteur de puissance

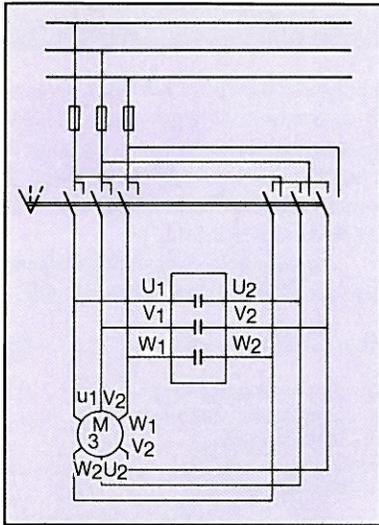


Schéma 8. Raccordement d'un condensateur pour un moteur à démarrage mécanique Y/D.

le moteur fait tourner peut à son tour faire tourner le moteur à trop grande vitesse (grues, convoyeurs, etc.) ou si la tension de l'aimant-frein est dérivée des pôles du moteur.

Au moment de déterminer la grosseur du câble du condensateur, prenez note que les fusibles protègent également le câble d'alimentation. Le câble du condensateur devrait donc être identique au câble principal du moteur.

De plus, au moment de l'installation d'un relais de surintensité, prenez note que la compensation réduit l'intensité du courant.

Si le moteur est muni d'un démarreur étoile-triangle automatique et que le moteur est mis hors tension directement à partir de la configuration delta, un conden-

sateur raccordé normalement peut être utilisé pour correction du facteur de puissance.

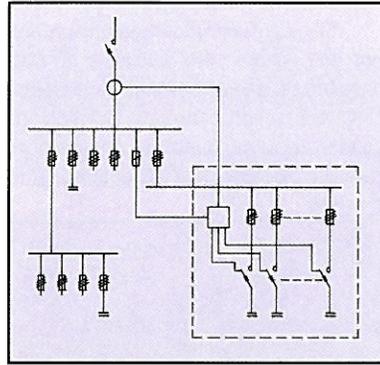


Schéma 9. Diagramme de connexions comprenant des condensateurs fixes et des banques de condensateurs contrôlés automatiquement.

Cependant, si un démarreur mécanique étoile-triangle est utilisé comme sur le schéma 8, des condensateurs spécialement conçus pour cet usage doivent être utilisés. Des condensateurs uniphasés sont reliés en parallèle à chaque enroulement du moteur.

### 3.2 Compensation centrale basse tension

Bien qu'une compensation individuelle ou de groupe puisse être utilisée, des condensateurs additionnels sont installés au point d'alimentation secteur pour obtenir un niveau de correction suffisant ( $\cos \varphi \geq 0,97$ ). Une partie de la compensation requise pourra être fournie par des unités fixes alors que le reste le sera par des banques de condensateurs contrôlés automatiquement tel qu'illustré au schéma 9.

Tableau 3. Consommation approximative de puissance réactive de différents transformateurs de distribution de 60 Hz (tension primaire 10 à 20 kV)

Puissance nominale kVA	Consommation de puissance réactive kvar	
	charge à vide	pleine charge
16	0,3	1,0
30	0,5	1,7
50	0,8	2,8
100	1,5	5,5
200	3	13
315	4	20
500	6	31
800	9	40
1000	10	70
1250	11	96
1600	13	109
2000	14	134

Les condensateurs qui sont reliés en permanence au système produisent continuellement une puissance réactive, même lorsque la charge est faible. Ainsi, tout surplus de puissance réactive est transmis au réseau secteur.

La consommation de puissance réactive d'un transformateur de distribution lorsque la charge est nulle est de 1 à 2 % et, à pleine charge, est de 4 à 7 % de sa puissance nominale (voir tableau 3).

Pour éviter les désavantages d'une surcompensation, la puissance totale des condensateurs fixes devrait être limitée à 10 à 15 % de la puissance du transformateur. Un fusible-interrupteur ou un coupe-circuit est habituellement installé de façon à ce que le condensateur puisse être mis hors tension au besoin.

Dans le cas d'une batterie de condensateurs automatiques, un régulateur de

Tableau 4a. Puissances maximum conseillées des condensateurs pour moteurs à cage d'écureuil à cadre Pre-U NEMA B 230 V, 460 V, 575 V.

Vitesse nominale du moteur												
Puissance du moteur à induction (hp)	3600 t/min.		1800 t/min.		1200 t/min.		900 t/min.		720 t/min.		600 t/min.	
	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)
3	1.5	14	1.5	15	1.5	20	2	27	2.5	35	3.5	41
5	2	12	2	13	2	17	3	25	4	32	4.5	37
7 1/2	2.5	11	2.5	12	3	15	4	22	5.5	30	6	34
10	3	10	3	11	3.5	14	5	21	6.5	27	7.5	31
15	4	9	4	10	5	13	6.5	18	8	23	9.5	27
20	5	9	5	10	6.5	12	7.5	16	9	21	12	25
25	6	9	6	10	7.5	11	9	15	11	20	14	23
30	7	8	7	9	9	11	10	14	12	18	16	22
40	9	8	9	9	11	10	12	13	15	16	20	20
50	12	8	11	9	13	10	15	12	19	15	24	19
60	14	8	14	8	15	10	18	11	22	15	27	19
75	17	8	16	8	18	10	21	10	26	14	32.5	18
100	22	8	21	8	25	9	27	10	32.5	13	40	17
125	27	8	26	8	30	9	32.5	10	40	13	47.5	16
150	32.5	8	30	8	35	9	37.5	10	47.5	12	52.5	15
200	40	8	37.5	8	42.5	9	47.5	10	60	12	65	14
250	50	8	45	7	52.5	8	57.5	9	70	11	77.5	13
300	57.5	8	52.5	7	60	8	65	9	80	11	87.5	12
350	65	8	50	7	67.5	8	75	9	87.5	10	95	11
400	70	8	65	6	75	8	85	9	95	10	105	11
450	75	8	67.5	6	80	8	92.5	9	100	9	110	11
500	77.5	8	72.5	6	82.5	8	97.5	9	107.5	9	115	10

Nota: valables pour les moteurs triphasés 60 Hz reliés avec des condensateurs comme un seul module (ANSI/IEEE C37.012-1979 (2)).

Tableau 4b. Puissances maximum conseillées des condensateurs pour moteurs à cage d'écurieil à cadre Pre-U NEMA B 230 V, 460 V, 575 V.

Vitesse nominale du moteur																	
3600 t/min.			1800 t/min.			1200 t/min.			900 t/min.			720 t/min.			600 t/min.		
Puissance du moteur à induction (hp)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)			
2	1	17	1	20	1	23	1	24	-	-	-	-	-	-			
3	1	11	1	16	1	19	2	24	-	-	-	-	-	-			
5	1	9	2	15	2	19	2	20	-	-	-	-	-	-			
7 1/2	1	6	2	13	4	19	4	20	-	-	-	-	-	-			
10	2	5	2	11	4	16	5	15	5	17	5	21	5	21			
15	4	6	4	11	4	13	5	15	5	17	5	21	5	21			
20	4	6	5	11	5	13	5	15	10	17	10	21	10	21			
25	5	5	5	8	5	9	5	15	10	17	10	18	10	18			
30	5	6	5	8	5	9	10	15	10	15	10	18	10	18			
40	5	6	10	8	10	9	10	15	10	15	15	17	15	17			
50	5	6	10	8	10	9	15	12	15	12	20	17	20	17			
60	10	6	10	8	10	9	15	12	20	12	25	17	25	17			
75	15	6	15	8	15	9	20	11	25	12	30	17	30	17			
100	15	6	20	8	25	9	25	11	40	12	45	17	45	17			
125	20	6	25	7	30	9	30	11	45	12	45	15	45	15			
150	25	6	30	7	30	9	40	11	45	12	50	15	50	15			
200	35	6	40	7	60	9	55	11	55	11	60	13	60	13			
250	40	5	40	6	60	9	80	11	60	11	100	13	100	13			
300	45	5	45	6	80	8	80	10	80	10	120	13	120	13			
350	60	5	70	6	80	8	80	9	-	-	-	-	-	-			
400	60	5	80	6	80	6	160	-	-	-	-	-	-	-			
450	70	5	100	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
500	70	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

Nota: valables pour les moteurs triphasés 60 Hz reliés avec des condensateurs comme un seul module.

Tableau 4c. Puissances maximum conseillées des condensateurs pour moteurs à cage d'écurieil à cadre en T NEMA B 230 V, 460 V, 575 V.

Vitesse nominale du moteur																	
3600 t/min.			1800 t/min.			1200 t/min.			900 t/min.			720 t/min.			600 t/min.		
Puissance du moteur à induction (hp)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)	Puissance du condensateur (kvar)	Réduction de la tension de la ligne (%)			
3	1.5	14	1.5	23	2.5	28	3	38	3	40	4	40	4	40			
5	2	14	2.5	22	3	26	4	31	4	40	5	40	5	40			
7 1/2	2.5	14	3	20	4	21	5	28	5	38	6	45	6	45			
10	4	14	4	18	5	21	6	27	7.5	36	8	38	8	38			
15	5	12	5	18	6	20	7.5	24	8	32	10	34	10	34			
20	6	12	6	17	7.5	18	9	23	10	29	12	30	12	30			
25	7.5	12	7.5	17	8	19	10	23	12	25	18	30	18	30			
30	8	11	8	16	10	19	14	22	15	24	22.5	30	22.5	30			
40	12	12	13	15	16	19	18	21	22.5	24	25	30	25	30			
50	15	12	18	15	20	19	22.5	21	24	24	30	30	30	30			
60	18	12	21	14	22.5	17	26	20	30	22	35	28	35	28			
75	20	12	23	14	25	15	28	17	33	14	40	19	40	19			
100	22.5	11	30	14	30	12	36	16	40	15	45	17	45	17			
125	25	10	35	12	35	12	42	14	45	15	50	17	50	17			
150	30	10	42	12	40	12	52.5	14	52.5	14	60	17	60	17			
200	35	10	50	11	50	10	66	13	68	13	90	17	90	17			
250	40	11	60	10	62.5	10	82	13	87.5	13	100	17	100	17			
300	45	11	68	10	75	12	100	14	100	13	120	17	120	17			
350	50	12	75	8	90	12	120	13	120	13	135	15	135	15			
400	75	10	80	8	100	12	130	13	140	13	150	15	150	15			
450	90	8	90	8	120	10	140	12	160	14	160	15	160	15			
500	100	8	120	9	150	12	150	12	180	13	180	15	180	15			

Nota: valables pour les moteurs triphasés 60 Hz reliés avec des condensateurs comme un seul module.

puissance réactive contrôle la mise en fonctionnement des groupes de condensateurs selon la variation des besoins en puissance réactive. Les limites opérationnelles inductives et capacitatives du régulateur sont réglées et la quantité de puissance réactive dans le réseau est maintenue à l'intérieur de ces limites. Les problèmes de surcompensation ne se présentent donc pas.

Les effets de la compensation centrale sur le dimensionnement d'un réseau et sur les pertes sont principalement reliés au transformateur de distribution et au câble de raccordement. Le système de panneau électrique profite donc de la correction du facteur de puissance à basse tension, et on en tient généralement compte lorsque les frais de raccordement et les tarifs annuels sont établis.

### 3.3. Compensation haute tension

La compensation peut également être utilisée du côté haute tension. Cependant, dans ce cas, il n'y a pas d'économies reliées au dimensionnement et aux pertes des transformateurs de distribution. En raison de la grande réactance des transformateurs, des chutes de tension considérables et des pertes de puissance réactive sont également causées par la transmis-



sion de puissance réactive. Ainsi, en comparaison avec la basse tension, plus de condensateurs seraient requis du côté haute tension d'un transformateur.

Il est possible de compenser individuellement les moteurs haute tension de la même façon que dans le cas de basse tension. À cette fin, des batteries de condensateurs à enveloppe étanche sont fabriquées et peuvent, au besoin, être installées à côté du moteur.

Habituellement, les batteries de condensateurs haute tension sont utilisées pour compenser la consommation de puissance réactive par les longues lignes de transmission et les transformateurs de puissance. Il est parfois avantageux de compenser en partie pour la puissance réactive d'une usine importante par l'utilisation de batteries de condensateurs haute tension.

Cependant, à cause des coûts relativement élevés des équipements de raccordement, (coupe-circuit, protection, câbles, barre de distribution), le coût total par kvar peut sembler très élevé par rapport aux batteries de condensateurs haute tension en elles-mêmes.

### 3.4 Conséquences techniques de la compensation

#### 3.4.1 Élévation de tension

Les condensateurs fixes peuvent causer une élévation de tension dans un réseau non chargé. L'élévation de la tension dans un transformateur non chargé peut être calculée selon la formule suivante :

$$d_u (\%) = \frac{Q_c}{S_n} \cdot x_k (\%) \quad (23)$$

$d_u$  = pourcentage d'élévation de la tension

$Q_c$  = puissance nominale de la batterie de condensateurs

$S_n$  = puissance nominale du transformateur

$x_k$  = pourcentage de réactance au court-circuit du transformateur

En pratique, une élévation de tension de 1,2 % est enregistrée au cours d'un fonctionnement à vide. Si la proportion de la puissance des condensateurs fixes est de 20 % de la puissance nominale du transformateur et que  $x_k = 6 \%$ , la tension du transformateur s'élève de 1,2 % au cours d'un fonctionnement à vide.

#### 3.4.2 Influence des harmoniques

Les charges non linéaires, telles que les entraînements par thyristor, les convertisseurs et les fours à arc produisent des courants harmoniques excessifs qui causent une distorsion du courant et de la tension. Les condensateurs offrent une impédance faible à toutes les hautes fréquences qui les traversent, mais ils peuvent également amplifier les effets des courants harmoniques qui traversent d'autres parties du réseau.

L'effet des harmoniques sur la tension de phase d'une batterie de condensateurs peut être calculé selon la formule suivante :

$$U_p = \sum \frac{I_{cn}}{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot C} \quad (24)$$

$U_p$  = tension de phase de la batterie de condensateurs  
 $n$  = ordre de l'harmonique (la fréquence de l'harmonique  $f_n = n \cdot$  fréquence de base)

$I_{cn}$  = courant harmonique «*énième*» traversant la batterie de condensateurs

$f_1$  = fréquence de base (c.-à-d. 60 Hz)

$C$  = capacitance de la batterie par phase

En d'autres mots, la composante de la tension de chaque harmonique est résumée mathématiquement par la tension de la fréquence de base. Lors de la conception d'un schéma de compensation, les harmoniques qui traversent la batterie doivent être calculées sur la base du courant harmonique imposé par la charge. Les harmoniques dans une batterie de condensateurs existante peuvent être calculées à l'aide d'un analyseur d'harmoniques.

Les harmoniques qui traversent la batterie de condensateurs peuvent, dans certains cas, être très élevées. La pire situation survient lorsque les condensateurs et l'inductance du réseau forment, en parallèle ou en série, un circuit résonnant dans les conditions suivantes :

$$n = \sqrt{\frac{X_c}{X_1}} = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (25)$$

$X_c$  = réactance capacitive de la batterie à la fréquence de base

$X_1$  = réactance inductive au court-circuit du réseau à la fréquence de base

$Q_c$  = puissance réactive de la batterie de condensateurs

$S_k$  = puissance de court-circuit du réseau

Le raccord d'une source harmonique et de condensateurs sur la même barre de distribution peut créer un circuit résonnant en parallèle. De la même façon, une batterie de condensateurs reliée au côté basse tension d'un transformateur peut former une série de circuits résonnants avec les harmoniques provenant du côté haute tension du transformateur.

En utilisant la compensation de la puissance réactive, on devrait éviter les problèmes de résonance pour chacune des harmoniques communes (3<sup>e</sup>, 5<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup>, 11<sup>e</sup> et 13<sup>e</sup>).

La puissance d'un condensateur qui pourrait provoquer de la résonance lorsque relié au réseau peut être calculée de la façon suivante :

$$Q_c = \frac{S_k}{n^2} \quad (26)$$

Par exemple, si la puissance de court-circuit de la barre de distribution est de 15 MVA, l'équation (26) nous donne :

$$\text{pour } n = 3 : Q_c = \frac{15}{3^2} \text{ Mvar} = 1.7 \text{ Mvar}$$

$$\text{pour } n = 5 : Q_c = \frac{15}{5^2} \text{ Mvar} = 0.6 \text{ Mvar}$$

$$\text{pour } n = 7 : Q_c = \frac{15}{7^2} \text{ Mvar} = 0.3 \text{ Mvar}$$

#### Exemple

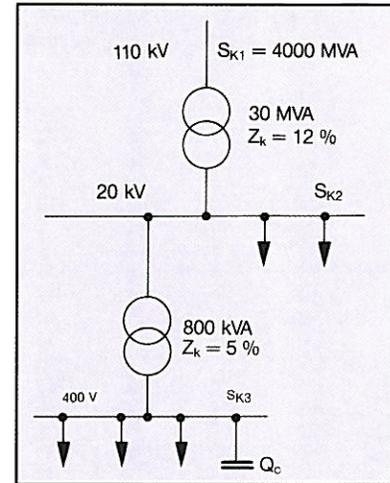


Schéma 10. Diagramme de l'exemple.

Pour les harmoniques plus élevées, la possibilité de résonance est habituellement faible, mais on doit en tenir compte si le résidu harmonique est très élevé.

Le courant nominal du système d'entraînements par thyristor présenté au schéma 10 est calculé en utilisant un facteur de puissance de 0,7, un facteur de diversité de 0,8 et un rendement du moteur de 95 % comme suit :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot e \cdot \cos \phi} = \frac{0.8 \cdot 3 \cdot 100000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.95 \cdot 0.7} = 550 \text{ A}$$

Les harmoniques causées par des entraînements par thyristor sont habituellement générées par des redresseurs à 6 impulsions dans les pourcentages suivants de courant nominal :

$$5^{\text{e}} \text{ harmonique (30 \%)} \quad I_5 = 0,3 \cdot 550 \text{ A} = 165 \text{ A}$$

$$7^{\text{e}} \text{ harmonique (12 \%)} \quad I_7 = 0,12 \cdot 550 \text{ A} = 66 \text{ A}$$

$$11^{\text{e}} \text{ harmonique (6 \%)} \quad I_{11} = 0,06 \cdot 550 \text{ A} = 33 \text{ A}$$

$$13^{\text{e}} \text{ harmonique (5 \%)} \quad I_{13} = 0,05 \cdot 550 \text{ A} = 28 \text{ A}$$

$$I_{13} = 0,05 \cdot 550 \text{ A} = 28 \text{ A}$$

$$I_{13} = 0,05 \cdot 550 \text{ A} = 28 \text{ A}$$

$$I_{13} = 0,05 \cdot 550 \text{ A} = 28 \text{ A}$$

La capacitance et la réactance (à la fréquence de puissance) d'une batterie de condensateurs de 200 kvar sont :

$$C = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2} = \frac{200000}{314 \cdot 400^2} = 3.98 \cdot 10^{-3} \text{ F}$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{U^2}{Q_c} \cdot \frac{400^2}{200000} = 0.8 \Omega$$

Si l'impédance du réseau est simplifiée, ne comportant que de la réactance

inductive, elle peut être exprimée comme suit :

$$X_k = \frac{U^2}{S_k} = \frac{400^2}{15 \cdot 10^6} = 0.01067 \Omega$$

Pour une fréquence harmonique «n», les réactances de la batterie de condensateurs et du réseau sont de :

$$X_{cn} = \frac{X_c}{n} \quad (27)$$

$$X_{kn} = n \cdot X_k \quad (28)$$

$X_{cn}$  = réactance capacitive de la batterie à une fréquence harmonique «n»

$X_c$  = réactance capacitive de la batterie à la fréquence de base

$X_{kn}$  = réactance inductive du réseau à une fréquence harmonique «n»

$X_k$  = réactance inductive du réseau à la fréquence de base

Les courants harmoniques qui traversent la batterie ( $I_{cn}$ ) et le réseau ( $I_{kn}$ ) sont calculés simplement par la règle de division des courants lorsque les courants de la source harmonique ( $I_n$ ) sont connus :

$$I_{cn} = \left( \frac{X_{kn}}{X_{kn} - X_{cn}} \right) \cdot I_n \quad (29)$$

$$I_{kn} = \left( \frac{X_{cn}}{X_{kn} - X_{cn}} \right) \cdot I_n \quad (30)$$

Pour la 5<sup>e</sup> harmonique, les courants harmoniques suivants sont produits :

$$X_{k5} = 5 \cdot 0,01067 = 0,0533$$

$$X_{c5} = 0,8/5 = 0,16$$

$$I_5 = 165 \text{ A}$$

$$I_{k5} = \left( \frac{0,16}{0,0533 - 0,16} \right) \cdot 165 \text{ A} = 248 \text{ A}$$

$$I_{c5} = \left( \frac{0,0533}{0,0533 - 0,16} \right) \cdot 165 \text{ A} = 82 \text{ A}$$

Les tensions harmoniques qui traversent la batterie de condensateurs sont :

$$U_n = I_{cn} \cdot X_{cn} (= I_{kn} \cdot X_{kn}) \quad (31)$$

Pour  $n = 5$  :  $U_5 = 82 \text{ A} \cdot 0,16 \Omega = 13 \text{ V}$

La tension électrique totale est de :

$$U = 400 \text{ V} + \sqrt{3} \cdot U_5 + \sqrt{3} \cdot U_7 + \sqrt{3} \cdot U_{11} + \sqrt{3} \cdot U_{13}$$

## 4. RÉSUMÉ

La façon la plus économique de produire la puissance réactive nécessaire à la plupart des appareils électriques est par l'utilisation de condensateurs.

Les condensateurs réduisent les pertes du réseau et les chutes de tension, et la transmission de puissance réactive est évitée. Ceci signifie des économies annuelles substantielles.

Un courant excessif causé par les harmoniques dans une batterie de condensateurs est calculé en termes de valeur effective du courant :

$$I_c = \sqrt{I_{c1}^2 + \dots + I_{cn}^2} \quad (32)$$

$I_c$  = courant total dans la batterie de condensateurs  
 $I_{c1}$  = courant total dans la batterie de condensateurs à la fréquence de base (60 Hz)

$$I_{c1} = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 0,4} \text{ A} = 289 \text{ A}$$

Tableau 5. Valeurs du courant et de la tension pour l'exemple. Les valeurs correspondantes sont également données pour d'autres puissances de condensateurs.

Cond. kvar	$I_{ct}$ A	$I_{c5}$ A	$I_{c7}$ A	$I_{c11}$ A	$I_{c13}$ A	$I_c$ A
100	144	33	32	137	250	323
200	289	82	124	87	50	340
400	577	330	281	48	36	724

Cond. kvar	$I_{k5}$ A	$I_{k7}$ A	$I_{k11}$ A	$I_{k13}$ A
100	198	98	171	221
200	248	190	54	22
400	495	215	15	8

Cond. kvar	$U_1$ V	$U_5$ V	$U_7$ V	$U_{11}$ V	$U_{13}$ V	U V
100	400	11	7	20	31	519
200	400	13	14	6	3	462
400	400	26	16	2	1	478

$$I_c = \sqrt{289^2 + 82^2 + 124^2 + 87^2 + 50^2} \text{ A} = 340 \text{ A}$$

Le tableau 5 démontre qu'à toutes les puissances choisies, les condensateurs fonctionneront en grande surtension. Notez qu'une batterie de 100 kvar serait pratiquement en résonance à la 13<sup>e</sup> harmonique. La valeur effective du courant est de près de 2,5 fois supérieure à la valeur nominale. Les condensateurs ne pourraient pas tolérer cette tension supplémentaire.

Lorsque la puissance des condensateurs dans un système augmente en proportion de la charge, les dangers de résonance se déplacent vers les fréquences plus basses qui ont habituellement des courants harmoniques plus élevés.

Il est aussi important de noter que les courants qui traversent le réseau sont considérablement plus élevés que ceux engendrés par les entraînements par thyristor. Cependant, en pratique, la présomption que l'impédance serait purement inductive n'est pas valable. Pour les fréquences plus élevées, les harmoniques sont atténuées par la résistance du réseau et les résonances ne sont moins probables que dans cet exemple.

Les problèmes d'harmoniques sont résolus par l'utilisation d'un filtre harmonique, tel que décrit plus loin dans cette brochure.

L'élévation de température des condensateurs causée par toute augmentation des pertes ne constitue pas habituellement un problème avec les unités modernes à film métallisé à faible perte. Cependant, les condensateurs avec diélectrique de papier ont tendance à surchauffer très rapidement avec la présence excessive d'harmoniques dans le réseau.

### 3.4.3 Conditions ambiantes

Des conditions défavorables réduiront la durée de vie d'un condensateur et occasionneront par le fait même des frais additionnels de réparation et d'entretien.

Selon les nouvelles normes IEC pour les condensateurs de puissance, les catégories de température s'échelonnent de -50°C à +55°C. Par exemple, la plus haute température ambiante moyenne pour un condensateur de catégorie A est de +40°C pour une courte période, mais seulement de 30°C pour une période 24 heures et de +20°C pour une période de 1 an. Des températures plus élevées accélèrent le vieillissement du diélectrique et par le fait même, raccourcissent la durée de vie du condensateur. Les régulateurs pour les batteries de condensateurs contrôlées automatiquement sont généralement conçus pour une température ambiante variant entre -5°C et +60°C.

Dans des conditions très humides, des condensateurs de type extérieur devraient être utilisés car ils sont protégés adéquatement contre la corrosion.

sidération lors de la conception du système.

Pour de plus amples renseignements, n'hésitez pas à communiquer avec le représentant de votre région.



condensateurs attachées à une barrette commune sont munies d'un disjoncteur. Si nécessaire, des réacteurs de limitation de courant peuvent être fournis afin de réduire le courant d'irruption à une valeur convenable pour le disjoncteur.

L'utilité principale des banques de condensateurs de dérivation est de produire de la puissance réactive suffisamment près du point de consommation pour réduire les pertes, baisser le prix de la puissance réactive, augmenter la tension, et améliorer la capacité de puissance de transmission d'une section de ligne.

### 4.3 Protection des Banques de Condensateurs

Dans les réseaux électriques, l'utilité de toute protection est de protéger l'équipement contre de la surintensité et de la surtension et de minimiser les effets de ces derniers, en tenant compte des restrictions économiques et techniques de même que les règlements de sécurité.

La protection interne d'une banque comprend des fusibles, soient internes ou externes, et de la protection contre les déséquilibres, alors que la banque est protégée extérieurement contre la surcharge, la surtension et les courts-circuits.

#### 4.3.1 Fusibles Internes et Externes

Il y a deux types de fusibles utilisés pour les condensateurs. internes ou externes. Lorsque la puissance réactive d'une unité de condensateur était seulement quelques kvar, la méthode la plus naturelle pour protéger le condensateur était à l'aide d'un fusible externe, alors que dans le cas d'un claquage la puissance réactive perdue était moindre. Ceci dit, maintenant qu'un élément de condensateur a une capacité d'environ la même valeur qu'une unité précédente, il est raisonnable de protéger chaque élément séparé avec un fusible interne.

Si l'unité de condensateur est protégée à l'aide d'un fusible interne, la puissance réactive perdue dans le cas d'un fusible sauté est très bas (approximativement 2% d'une unité). À cause du faible pourcentage de perte de puissance, il n'est pas nécessaire de remplacer l'unité de condensateur dans son ensemble, préservant ainsi la continuité de l'opération en plus d'épargner sur les coûts de remplacement.

Si l'unité est protégée à l'aide d'un fusible externe, l'unité entière est

perdue et il est presque toujours nécessaire de remplacer immédiatement l'unité défectueuse. Il est, alors, évident qu'en utilisant des unités avec fusibles incorporés internes, la nécessité de recourir à des unités de rechange est beaucoup moins élevée qu'en utilisant des fusibles externes.

#### 4.3.2 Protection contre les Déséquilibres

Les banques HV sont habituellement câblées, soit en simple ou en double étoile. Si l'impédance d'une phase change par rapport aux deux autres phases, la pointe de l'étoile de la banque se déplace. Ceci se produit lorsque des fusibles d'éléments dans un condensateur sautent à la suite d'une décharge disruptive.

Au même moment, la division de tension à l'intérieur de la banque est également changée. Alors, la banque doit être désactivée (hors) avant que l'opération des fusibles ne provoque une hausse de tension considérablement au-dessus du 10% de surtension permise.



Des transformateurs de tension isolés à double pôles sont utilisés comme protection contre les déséquilibres de banques branchées à étoile unique. Les primaires de transformateur sont branchées en parallèle avec les banques de phase et les secondaires forment un triangle ouvert. Le déséquilibre de tension généré dans le triangle ouvert opère le disjoncteur à travers le relais de tension.

Là où il y a un nombre suffisant d'unités branchées parallèles, il est recommandé de brancher la banque en double étoile. La protection contre les déséquilibres est alors entreprise par un transformateur branché entre les deux points d'étoile, et un relais de surintensité (Fig. 20). Les réglages de temps sont de 5 s pour l'alarme et de 0.1 s pour le déclenchement. En utilisant les fusibles internes, une protection fiable contre les déséquilibres peut être accomplie, protégeant ainsi les banques contre tout dommage majeur pendant une opération de défaut.

#### 4.3.3 Protection contre la Surintensité et la Surtension

La protection contre la surcharge et le court-circuitage d'une banque HV est normalement entreprise par le biais de transformations de courant ainsi que par un relais de surintensité à deux étapes.

La banque de condensateur possède un large degré d'auto-protection contre la surtension d'interruption et d'éclairage, à cause de sa faible impédance à haute fréquence.

La protection contre la surtension est alors habituellement incluse dans la protection des autres équipements. Si de la protection séparée contre la surtension est requise, la capacité de décharge de l'appareil protecteur est d'une grande importance. Parfois le déclenchement de protection contre la surtension est nécessaire à la fréquence de puissance pendant des périodes de basse charge.

### 4.4 Filtres Harmoniques

Les filtres harmoniques apportent une autre source de compensation. Dans un filtre, un réacteur est branché en série à une banque de condensation. Avec une inductance de réacteur appropriée, le circuit de série des condensateurs et réacteurs forme une basse impédance à une fréquence d'harmonique exigée. La majeure partie du courant d'harmonique s'écoule alors dans le filtre et non dans le réseau.

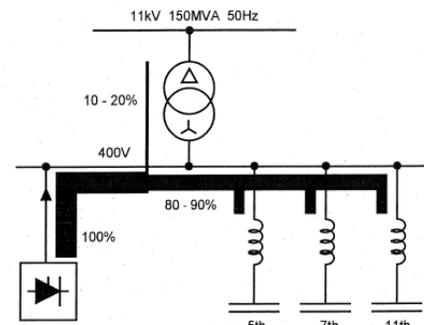


Fig : 21

Au même moment, le filtre fournit une puissance réactive capacitive à la fréquence de base.

Parmi les problèmes provoqués par les harmoniques, il y a l'interférence aux télécommunications, les perturbations au système de contrôle et de protection du réseau, les défaillances des relais, ainsi que la surtension dangereuse liée à la résonance. Les pertes supplémentaires qui se produisent dans les câbles, transformateurs, moteurs et générateurs sont aussi significatives: elles causent la perte d'énergie et des hausses excessives de température dans l'équipement.

Les harmoniques les plus fréquemment rencontrées et les plus potentiellement nuisibles sont le 5ième et le 7ième, qui sont générées par les redresseurs à 6 pulsions.

Les filtres harmoniques peuvent être branchés aux circuits LV ou HV. Là où il y a plusieurs charges génératrices d'harmoniques, chacun alimenté par un transformateur de distribution, il est souvent plus économique d'éliminer les harmoniques en installant des filtres centraux à la barrette HV, au lieu d'avoir des filtres séparés sur le côté LV de chaque transformateur.

Une construction typique de filtre est indiquée à la Fig. 21. Les harmoniques inférieures (5e et 7e) ont des circuits individuels et les harmoniques supérieures (11e et 13e) ont un filtre haute-passe commun.

Le circuit à la Fig. 22 peut être simplifiée davantage; ce qui comprend l'impédance de réseau couplé parallèle  $Z_{nw}$  et de l'impédance de filtre  $Z_f$ . L'impédance varie selon la fréquence telle que montrée à la Fig. 23 (valeurs absolues). Les courants dessinés conséquemment dépendent sur eux, et peuvent être exprimés comme suit:

$$I_h = \frac{Z_f}{Z_{nw} + Z_f} \cdot I_h \quad (33a)$$

$$I_f = \frac{Z_{nw}}{Z_{nw} + Z_f} \cdot I_h \quad (33b)$$

#### 4.5 Compensateurs de Statique Rapide

Dans quelques cas, des fourneaux d'arc et des machines de soudure par exemple, il existe des fluctuations très rapides de la puissance réactive à l'intérieur d'une courte période - quelques cycles. Des méthodes traditionnelles de contrôle de puissance réactive ne sont pas appropriées car elles sont trop lentes pour de telles variations.

Le compensateur de statique rapide a été développé afin de tenir compte de ce problème.

Le compensateur de statique rapide NOKIA comprend une banque de condensateur shunt fixe, normalement ajustée comme un filtre, et un réacteur shunt contrôlé à partir de thyristors. En contrôlant le courant du réacteur, la puissance réactive totale fournie par le c.s.r. dans le réseau est ajustée conformément.



Les harmoniques générées par la charge et les thyristors sont ainsi éliminées. Les désavantages des fluctuations de la puissance réactive et les harmoniques sont donc minimisés.

Les compensateurs statiques sont également utilisés pour réduire les variations de tension causées par des changements de puissance dans les lignes de transmission.

#### 4.6 Condensateurs Contrôlés à partir de Thyristors

Les condensateurs contrôlés à partir de thyristors, qui demeurent plus simples en construction que les compensateurs de statique rapide décrits auparavant, sont convenables pour la compensation de puissance réactive rapide.



Le condensateur est muni d'un interrupteur de thyristor, qui remplace le contacteur traditionnel. Des opérations régulières sont combinées avec les contrôles de thyristors automatiques. Cet équipement peut compenser rapidement pour les fluctuations de puissance réactive rapides dans les machines à soudure et les variations de tension conséquentes.

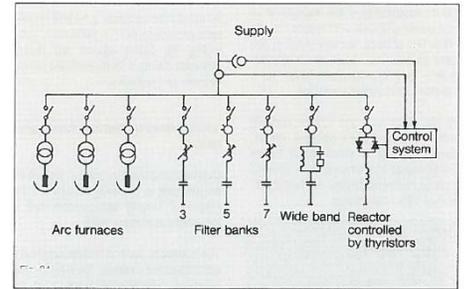


Fig. 24 Fast static compensator for arc furnaces.

#### 4.4 Filtre actif.

##### 4.4.1 Filtration harmonique par filtre actif

Une variété de solutions existent pour éliminer les problèmes d'harmoniques. MaxSine breveté Étape actuelle Direct Control (IGBT) avec la technologie de traitement numérique de pointe donne à votre réseau une réduction harmonique efficace et rapide et de compensation de puissance réactive.

- > Deux modes de rémunération
  - > Sélectif 1-25th, mode rapide
  - > Temps réel - sélective, ultra rapide en mode
  - > Global trois compensation de phase des harmoniques de courant à env. 50th harmoniques, mode ultra rapide
  - > Par application de la technologie 4-fil, le courant neutre est éliminé
  - > Une excellente dynamique, temps de réponse <1ms en mode ultra rapide et 30ms (60Hz) avec un mode rapide
  - > Mode veille en cas de faible charge actuelle
  - > La sécurité pour l'exploitation sur le côté de la charge des groupes électrogènes, UPS, etc
  - > Aucune influence sur les systèmes de télécommande centralisée
  - > Protection électronique de surcharge
  - > Peut être utilisé en combinaison avec le condensateur conventionnel étranglée banques
- Applications> sont économiques, même pour le pouvoir de petite et moyenne gammes MaxSine est indépendante de
- > La forme courbe du cours pour être indemnisé
  - > La dynamique des changements en cours
  - > La phase du courant (inductif / capacitif)
  - > Le sens du courant (générateur / load)
  - > La phase de la charge (symétrique / asymétrique)
  - > La qualité de la tension du réseau

À quoi sert cet appareil ?

Améliorer le facteur de puissance

Réduire les harmoniques

Y a-t-il des charges qui génèrent des harmoniques ?

Non

Oui

Y a-t-il plusieurs petits moteurs ?

Non

Oui

Est-ce que > 15 % de la charge génère des harmoniques ?

Non

Oui

Est-ce que > 50 % de la charge génère des harmoniques ?

Non

Oui

Est-ce que le réseau comprend des appareils sensibles aux transitoires ?

Non

Oui

Est-ce que le réseau comprend des appareils sensibles aux transitoires ?

Non

Oui

Condensateur fixe  
DSHI, DSHM,  
HVCB

Banc Auto standard  
C100

Commutation  
Thyristor  
FT300

Banc  
Antirésonant  
FT100

Filtre  
Thyristor  
FT300

- Filtre Passif FT200  
- Filtre Actif FT400

a-t-il des charges à fluctuation rapide ?

Non

Oui

# Gamme complète de solutions en Gestion de la puissance et de la Qualité de l'onde



Power Quality  
Manager



C100  
Auto Bank



FT100, FT200  
Passive Filter



DS100, DS200  
DriveSaver



FT400  
Active Filter



HVCE 3 Ph. Cap  
(2400@6900 V)



C1000 & FT1000  
HV Metal Enclosed  
5,15,25 kV