

Compensation du courant réactif

Informations techniques générales



Table des matières

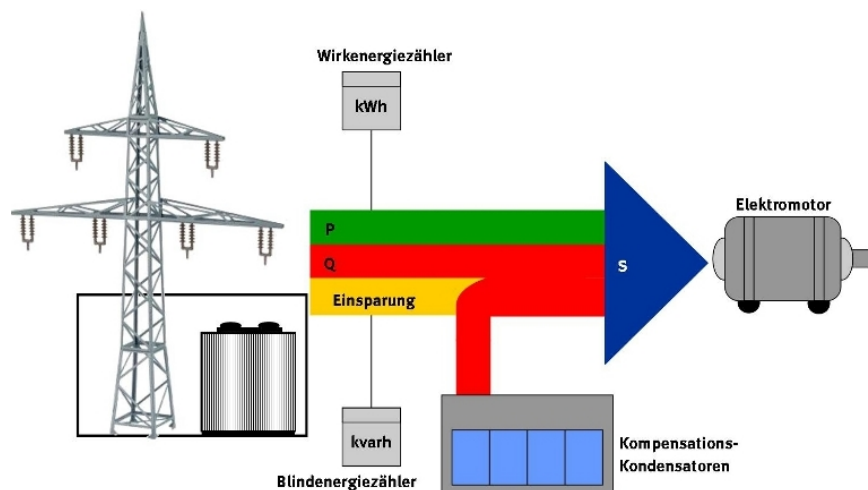
1.	Bases	3
1.1	Qu'est-ce que le courant réactif.....	3
1.2	Pourquoi faut-il compenser.....	3
1.3	Tâches d'une installation de compensation du courant réactif.....	3
1.4	Tâches supplémentaires d'une installation de compensation du courant réactif bridée.....	4
1.5	Structure du réseau.....	4
2.	Informations techniques / formules	5
2.1	Puissance apparente.....	5
2.2	Puissance effective	6
2.3	Puissance réactive	6
2.4	Puissance effective et réactive	7
2.5	Coefficient de puissance	7
2.6	Calcul de la puissance de compensation	8
3.	Formes de la compensation du courant réactif	10
3.1	Compensation isolée.....	10
3.2	Compensation regroupée.....	11
3.3	Compensation centralisée.....	12
4.	Versions des installations de compensation de courant réactif.....	13
4.1	Compensation bridée	13
4.1.1	Avantages d'une installation de compensation bridée	13
4.1.2	Facteurs de bridage pour les installations de compensation de courant réactif	14
4.2	Bridage combiné	14
4.3	Circuits absorbants accordés.....	15
4.4	Installations à thyristors.....	15
4.4.1	Domaines d'utilisation des installations de compensation du courant réactif à thyristors	15
4.4.2	Applications	16

1. Bases

1.1 Qu'est-ce que le courant réactif

Le courant réactif est le courant qui en cas de consommateurs inductifs (par ex. moteurs électriques, transformateurs, ballasts), donc des bobines de tous genres, est nécessaire pour créer un champ magnétique.

Dans les réseaux alternatifs ou triphasés, ce champ magnétique est généré et éliminé avec la fréquence du réseau. Cette part énergétique n'est pas transformée en puissance effective mais oscille en tant que puissance réactive entre le générateur et le consommateur.



1.2 Pourquoi faut-il compenser

- Pour économiser les coûts du courant réactif facturé par les fournisseurs d'électricité.
- Coûts d'investissement et de maintenance plus faibles pour le réseau d'alimentation.
- Pour décharger les moyens d'exploitation électriques du courant réactif (par ex. les lignes, les commutateurs, les transformateurs, les générateurs). Il s'en suit: moins de pertes, moins de chute de tension, moins de coûts énergétiques.
- Pour économiser en cas d'extension les coûts liés à la nouvelle ligne d'alimentation ou pour l'acquisition d'un nouveau transformateur.
- Pour utiliser le transformateur de manière plus rentable, à savoir en prélevant le moins d'énergie possible.
- Pour respecter les valeurs indicatives prescrites par les fournisseurs régionaux d'énergie (prescriptions régionales des fournisseurs d'électricité).

1.3 Tâches d'une installation de compensation du courant réactif

- Diminution des coûts de prélèvement du courant.
- Amélioration du coefficient de puissance.
- Diminution des pertes dans les lignes.
- Création de réserves de puissance.
- Utilisation énergétique plus durable.

1.4 Tâches supplémentaires d'une installation de compensation du courant réactif bridée

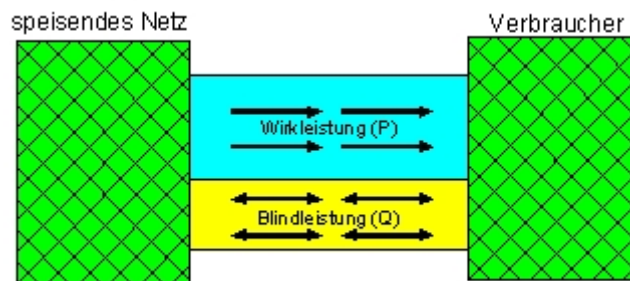
- Prévention des apparitions de résonance entre les condensateurs de puissance et les inductances du réseau.
- Réduction des harmoniques et amélioration de la qualité du réseau.
- Augmentation de la sécurité de fonctionnement.

1.5 Structure du réseau

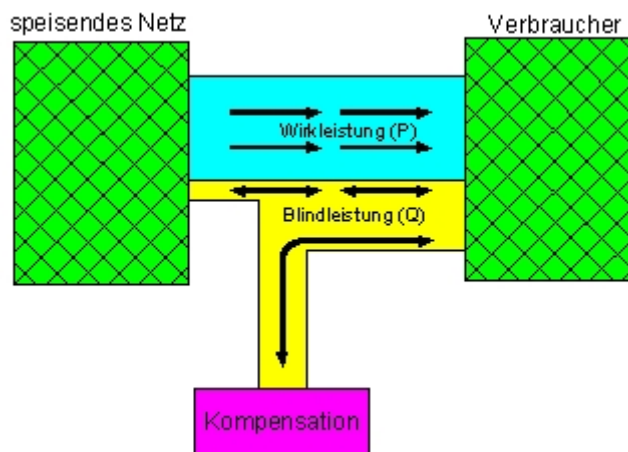
Si la puissance réactive inductive est compensée sur place par ex. par un condensateur, le prélèvement de puissance réactive au fournisseur d'électricité est entièrement ou partiellement éliminé.

La compensation du courant réactif est la plus efficace quand elle est utilisée proche du consommateur.

Sans compensation du courant réactif:



Avec compensation du courant réactif:



2. Informations techniques / formules

La puissance fournie par les fournisseurs d'électricité n'est pas transformée entièrement en travail. C'est pourquoi on désigne cette puissance comme puissance apparente (S). La puissance qui est transformée en travail est désignée comme puissance effective (P). La puissance réactive (Q) charge uniquement le réseau.

2.1 Puissance apparente

La puissance apparente est décisive pour la charge des réseaux de lignes électriques. Les transformateurs, les générateurs, les installations de distribution, les fusibles et les sections de ligne doivent être dimensionnés pour la puissance apparente (S) présente.



La puissance apparente est le produit résultant de la tension (U) et de l'intensité (I) sans prendre en compte le décalage des phases.

$$S = U * I$$

La puissance apparente résulte de l'addition géométrique de la puissance effective et de la puissance réactive.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

On prend pour la puissance effective

$$P = \sqrt{h^2 - Q^2}$$

On prend pour la puissance réactive

$$Q = \sqrt{h^2 - P^2}$$

Légende:

$$S = VA$$

$$U = V$$

$$I = A$$

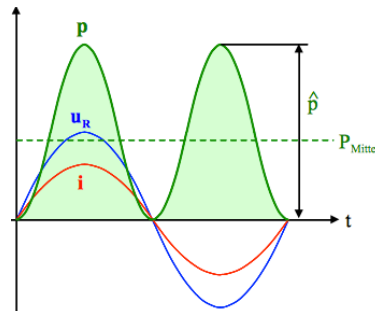
$$P = W$$

$$Q = var$$

2.2 Puissance effective

La puissance effective est la partie de la puissance enregistrée par le compteur transformée sous forme non électrique (par ex la chaleur, la lumière, la puissance mécanique).

Exemple: L'intensité et la tension sont en phase. La puissance effective a la double fréquence réseau et se trouve entièrement dans la plage positive car le produit de deux nombres négatifs est aussi positif.



En cas de charge purement ohmique, la puissance effective est calculée en prenant le produit des valeurs effectives de l'intensité (I) et de la tension (U).

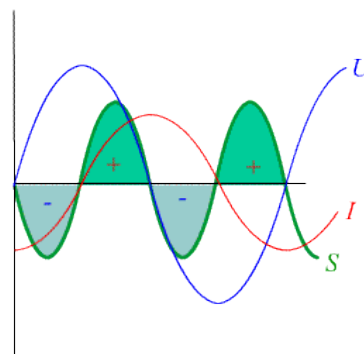
$$P = U * I$$

Légende: P = W
U = V
I = A

2.3 Puissance réactive

Une puissance réactive purement inductive apparaît sur les moteurs et les transformateurs en fonctionnement à vide si on ne considère pas les pertes.

On peut parler d'une puissance réactive purement capacitive sur les condensateurs de lignes car ils présentent des pertes très faibles. Si les courbes de la tension et de l'intensité sont décalées l'une de l'autre de 90°, la courbe de puissance se trouve pour moitié dans le positif et pour l'autre dans le négatif. La puissance effective est nulle car les surfaces positives et négatives s'éliminent mutuellement.



La puissance réactive qui oscille pour la génération et l'élimination du champ magnétique entre le générateur et le consommateur se calcule de la manière suivante.

$$Q = U * I * \sin \Phi$$

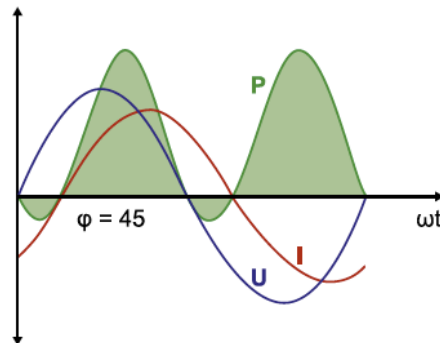
Légende: Q = var
U = V
I = A

2.4 Puissance effective et réactive

Pour tous les consommateurs qui ont besoin d'un champ magnétique pour fonctionner, on a: Le courant utilisé pour la génération et l'inversion des pôles du champ magnétique n'est pas consommé mais oscille en tant que courant réactif entre le générateur et le consommateur. Un décalage de phases apparaît entre l'intensité et la tension.

En cas de charge inductive, l'intensité suit la tension, en cas de charge capacitive, l'intensité précède la tension.

On calcule maintenant selon $P = U * I$ les valeurs momentanées de la puissance, on obtient ainsi toujours des valeurs négatives si U et I présentent des signes différents.



La puissance effective se calcule dans ce cas à partir de:

$$P = U * I * \cos \Phi$$

Légende: $P = \text{var}$
 $U = \text{V}$
 $I = \text{A}$

2.5 Coefficient de puissance

En cas de courants sinusoïdaux, le coefficient de puissance correspond à l'angle de phase $\cos \Phi$. Le coefficient de puissance est une valeur qui permet de savoir quelle part de la puissance apparente est transformée en puissance effective. Si la puissance effective reste identique, la puissance apparente est d'autant plus grande que le $\cos \Phi$ est plus petit.

Si par exemple, la puissance effective avec un coefficient de puissance de $\cos \Phi = 0,5$ est transportée vers un consommateur, alors les transformateurs et les réseaux de lignes pour une puissance effective identique doivent être conçus pour une double intensité.

Le rapport de la puissance effective à la puissance apparente s'appelle le coefficient de puissance ou le coefficient effectif ($\cos \Phi$).

$$\cos \Phi = P / S$$

Légende: $P = \text{W}$
 $S = \text{VA}$

Le rapport de la puissance réactive à la puissance apparente s'appelle le coefficient réactif ($\sin \Phi$).

$$\sin \Phi = Q / S$$

Légende: $Q = \text{var}$
 $S = \text{VA}$

2.6 Calcul de la puissance de compensation

Présente		cos Φ 2 requis						
Tan Φ 1	Cos Φ 1	0,80	0,85	0,90	0,92	0,95	0,98	1,00
3,18	0,30	2,43	2,56	2,70	2,75	2,85	2,98	3,18
2,96	0,32	2,21	2,34	2,48	2,53	2,63	2,76	2,96
2,77	0,34	2,02	2,15	22,28	2,34	2,44	2,56	2,77
2,59	0,36	1,84	1,97	2,10	2,17	2,26	2,39	2,59
2,43	0,38	1,68	1,81	1,95	2,01	2,11	2,23	2,43
2,29	0,40	1,54	1,67	1,81	1,87	1,96	2,09	2,29
2,16	0,42	1,41	1,54	1,68	1,73	1,83	1,96	2,16
2,04	0,44	1,29	1,42	1,56	1,61	1,71	1,84	2,04
1,93	0,46	1,18	1,31	1,45	1,50	1,60	1,73	1,93
1,83	0,48	1,08	1,21	1,34	1,40	1,50	1,62	1,83
1,73	0,50	0,98	1,11	1,25	1,31	1,40	1,53	1,73
1,64	0,52	0,89	1,02	1,16	1,22	1,31	1,44	1,64
1,56	0,54	0,81	0,94	1,07	1,13	1,23	1,36	1,56
1,48	0,56	0,73	0,86	1,00	1,05	1,15	11,28	1,48
1,40	0,58	0,65	0,78	0,92	0,98	1,08	1,20	1,40
1,33	0,60	0,58	0,71	0,85	0,91	1,00	1,13	1,33
1,30	0,61	0,55	0,68	0,81	0,87	0,97	1,10	1,30
1,27	0,62	0,52	0,65	0,78	0,84	0,94	1,06	1,27
1,23	0,63	0,48	0,61	0,75	0,81	0,90	1,03	1,23
1,20	0,64	0,45	0,58	0,72	0,77	0,87	1,00	1,20
1,11	0,67	0,36	0,49	0,63	0,68	0,78	0,90	1,11
1,08	0,68	0,33	0,46	0,59	0,65	0,75	0,88	1,08
1,05	0,69	0,30	0,43	0,56	0,62	0,72	0,85	1,05
1,02	0,70	0,27	0,40	0,54	0,59	0,69	0,82	1,02
0,99	0,71	0,24	0,37	0,51	0,57	0,66	0,79	0,99
0,96	0,72	0,21	0,34	0,48	0,54	0,64	0,76	0,96
0,94	0,73	0,19	0,32	0,45	0,51	0,61	0,73	0,94
0,91	0,74	0,16	0,29	0,42	0,48	0,58	0,71	0,91
0,88	0,75	0,13	0,26	0,40	0,46	0,55	0,68	0,88
0,86	0,76	0,11	0,24	0,37	0,43	0,53	0,65	0,86
0,83	0,77	0,08	0,21	0,34	0,40	0,50	0,63	0,83
0,80	0,78	0,05	0,18	0,32	0,38	0,47	0,60	0,80
0,78	0,79	0,03	0,16	0,29	0,35	0,45	0,57	0,78

Présente		cos Φ 2 requis						
Tan Φ 1	Cos Φ 1	0,80	0,85	0,90	0,92	0,95	0,98	1,00
0,75	0,80	-	0,13	0,27	0,32	0,42	0,55	0,75
0,72	0,81	-	0,10	0,24	0,30	0,40	0,52	0,72
0,70	0,82	-	0,08	0,21	0,27	0,37	0,49	0,70
0,67	0,83	-	0,05	0,19	0,25	0,34	0,47	0,67
0,65	0,84	-	0,03	0,16	0,22	0,32	0,44	0,65
0,62	0,85	-	-	0,14	0,19	0,29	0,42	0,62
0,59	0,86	-	-	0,11	0,17	0,26	0,39	0,59
0,57	0,87	-	-	0,08	0,14	0,24	0,36	0,57
0,54	0,88	-	-	0,06	0,11	0,21	0,34	0,54
0,51	0,98	-	-	0,03	0,09	0,18	0,31	0,51
0,48	0,90	-	-	-	0,06	0,16	0,28	0,48
0,46	0,91	-	-	-	0,03	0,13	0,25	0,46
0,43	0,92	-	-	-	-	0,10	0,22	0,43
0,40	0,93	-	-	-	-	0,07	0,19	0,40
0,36	0,94	-	-	-	-	0,03	0,16	0,36
0,33	0,95	-	-	-	-	-	0,13	0,33
0,29	0,96	-	-	-	-	-	0,09	0,29

Maniement du tableau:

- Etape 1: Calcul de $\tan \Phi 1 = \text{Consommation d'énergie réactive} / \text{consommation d'énergie effective}$ (à partir de la facture d'électricité)
- Etape 2: Sélectionner le facteur dans le tableau à la colonne $\cos \Phi 2$ requis
- Etape 3: Ligne de compensation nécessaire = coefficient * puissance de crête (à partir de la facture d'électricité)

3. Formes de la compensation du courant réactif

On distingue trois formes de compensation du courant réactif:

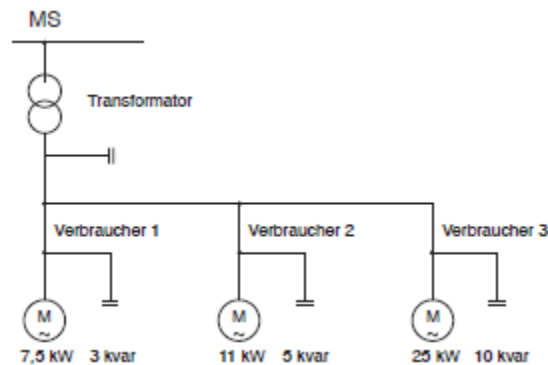
Compensation isolée: Transformateurs et grands consommateurs avec long temps de maintien de la puissance.

Compensation regroupée: Une compensation est attribuée à plusieurs consommateurs.

Compensation centralisée: Les conditions du réseau sont saisies sur un point par un régulateur de puissance réactive et le $\cos \Phi$ requis est régulé automatiquement.

3.1 Compensation isolée

Dans la compensation isolée, on installe un condensateur de grandeur appropriée en parallèle à chaque consommateur. On obtient de cette manière une décharge complète des lignes, y compris de la ligne d'alimentation vers les consommateurs compensés.



Application: Compensation de la puissance réactive de marche à vide des transformateurs

Consommateurs avec une puissance très élevées comme les compresseurs.

Entraînements avec une section de ligne petite ou une ligne d'alimentation longue.

Avantages: Décharge de l'ensemble du réseau interne à l'entreprise au niveau du courant réactif.

Réduction des pertes en cas de chute de tension.

Inconvénients: La compensation est répartie sur l'ensemble de l'entreprise.

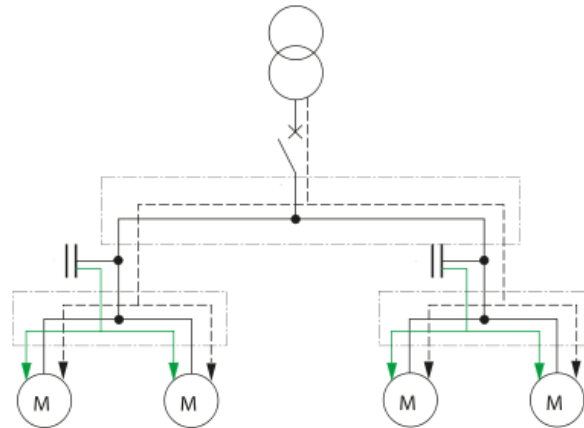
La place nécessaire doit toujours être disponible.

Grand effort d'installation et coûts élevées pour chaque kvar.

Une plus grande puissance de compensation est nécessaire car le facteur de simultanéité ne peut pas être pris en compte.

3.2 Compensation regroupée

Les machines qui sont toujours allumées en même temps peuvent être regroupées. Un condensateur de grandeur appropriée est installé pour le groupe.



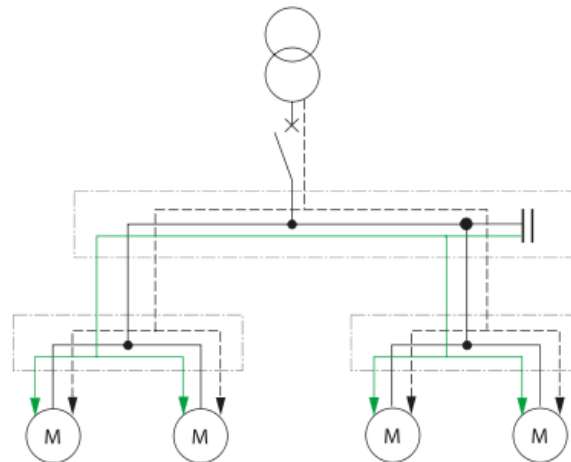
Application: Pour plusieurs consommateurs si ceux-ci fonctionnent toujours en même temps.

Avantages: Plus économiques que des composants isolés.
Décharge de la ligne d'alimentation du groupe.

Inconvénients: Uniquement pour les groupes de consommateurs qui fonctionnent toujours ensemble.

3.3 Compensation centralisée

L'ensemble de la compensation est disposée en un point central, par ex. à proximité de la distribution principale de basse tension. Cette solution est réalisée aujourd'hui dans la plupart des cas. La puissance de compensation est répartie sur plusieurs étages et adaptées aux conditions de charge par un régulateur automatique de puissance réactive via des contacteurs ou des commutateurs électroniques.



- Application:** Peut toujours être utilisée si le réseau de lignes de l'entreprise n'est pas sous-dimensionné.
- Avantages:** Bonne utilisation de la puissance installée des condensateurs, installation simple et économique.
Puissance de compensation plus petite car le facteur de simultanéité peut être pris en compte.
Plus économique sur les réseaux avec harmoniques car en cas d'installation de régulation, les coûts supplémentaires pour le bridage sont plus faibles.
- Inconvénients:** Le réseau interne de l'entreprise n'est pas déchargé.
Coûts supplémentaires pour le régulateur et le transformateur de courant.

4. Versions des installations de compensation de courant réactif

Il y a cinq types différents d'installations de compensation:

Sans bridage:	Uniquement pour les réseaux avec principalement des consommateurs linéaires.
Avec bridage de 7 %:	Pour les réseaux avec charge d'harmoniques et fréquences de commande circulaire supérieures à 250 Hz.
Avec bridage de 14 %:	Pour les réseaux avec charge d'harmoniques et fréquences de commande circulaire entre 186 à 190 Hz.
Circuits absorbants:	Spécialement conçus pour le nettoyage de réseau en cas de charge d'harmoniques très élevée.
Installation à thyristors:	Pour les entreprises de production avec des modifications de charge très rapides.

4.1 Compensation bridée

Les compensations bridées sont utilisées sur les réseaux avec harmoniques. Les harmoniques apparaissent lors du fonctionnement de consommateurs électriques ayant une caractéristique tension-intensité non linéaire. En font partie entre autres les redresseurs, les convertisseurs continu-alternatif pour les entraînements, les soudeuses et les alimentations en courant sans interruption (ACI). Les harmoniques sont des tensions et des intensités sinusoïdales avec des fréquences qui s'élèvent à un multiple de la fréquence réseau de 50 Hz ou 60 Hz. Dans les réseaux triphasés basse tension, la 5ème et la 7ème harmonique doivent être observées tout particulièrement. Lors de l'utilisation de condensateurs de puissance pour la compensation de la puissance réactive dans des réseaux avec harmoniques, des condensateurs bridés doivent être utilisés pour éviter les résonnances avec les harmoniques.

Les condensateurs bridés présentent un circuit oscillant en série du condensateur de puissance et de la bride qui présente la plus petite résistance possible au point de résonance (presque zéro en négligeant la résistance effective). Le circuit résonnant série est accordé de telle manière que la fréquence de résonance en série se trouve en-dessous des harmoniques présentes dans le réseau. Pour toutes les fréquences au-dessus de la fréquence de résonance en série, la disposition a un comportement inductif. De cette manière, aucune résonance ne peut se produire avec les inductances du réseau.

En fonction de la fréquence de résonance en série choisie, une partie des courants d'harmonique est absorbée par les condensateurs de puissance bridés. Le reste des courants d'harmoniques coule dans le réseau supérieur. L'utilisation de condensateurs de puissance bridés contribue à la réduction des réactions sur le réseau par les harmoniques et réduit l'influence perturbante sur le bon fonctionnement d'autres consommateurs électriques.

4.1.1 Avantages d'une installation de compensation bridée

- Economie des coûts de puissance réactive et minimiser en même temps les propres pertes de réseau, optimiser la charge du réseau et stabiliser la tension du réseau.
- Abaissement du courant apparent et ainsi augmentation de la capacité de transfert.
- Réduction des résonnances entre l'installation de condensateur et l'inductance du réseau.
- Absorption des harmoniques et en conséquence une sécurité de fonctionnement accrue pour les moyens d'exploitation électriques.

4.1.2 Facteurs de bridage pour les installations de compensation de courant réactif

Facteur de bridage p en %	Fréquence de résonance en série du circuit résonnant en Hz
5,0	224
5,5	213
5,67	210
7,0	189
8,0	177
9,0	167
12,5	141
13,5	136
14,0	134
15,0	129
16,0	125

Note: Les installations de compensation du courant réactif bridées et non bridées ne doivent jamais fonctionner sur le même réseau ou le même rail de regroupement car des résonances parallèles dangereuses peuvent alors survenir.

4.2 Bridage combiné

Sur ces installations, des étages de compensation de 5,5 % et 12,5 % sont regroupés de sorte qu'il y ait un équilibre de puissance entre les deux bridages.

Grâce à ce type de bridage, on obtient une grande réduction des réactions de réseau dans les réseaux à harmoniques. Les niveaux d'harmoniques générés dans la plage supérieure ou par des consommateurs non linéaires peuvent être réduits à des valeurs admissibles. La sécurité de fonctionnement des moyens d'exploitation raccordés est ainsi nettement améliorée.

En raison de la linéarité élevée des brides et des condensateurs utilisés dans la technique MKK, une surcharge du bridage combiné peut être exclu.

On obtient en même temps un effet de barrage suffisant par rapport aux fréquences de commande circulaire dans la plage de 166 Hz à 190 Hz.

4.3 Circuits absorbants accordés

Cette variante présente une solution spéciale pour les réseaux à très forte teneur en harmoniques. En cas de perturbations continues, la cause peut être une part d'harmoniques trop importante dans le réseau. Si c'est le cas, il est possible d'effectuer un nettoyage de réseau élevé directement sur place dans le générateur d'harmoniques grâce à un circuit absorbant accordé. On crée pour les harmoniques présentes des circuits absorbants en série. Les circuits absorbants sont conçus spécialement pour les 5ème, 7ème, 11ème et 13ème harmonique (= ondes harmoniques). Les circuits absorbants en série sont adaptés de telle manière qu'ils présentent pour les courants d'harmonique une impédance relativement petite par rapport à l'impédance du réseau. Les courants d'harmonique sont ainsi presque totalement absorbés par le circuit absorbant. Seulement une petite partie coule dans le réseau.

Etant donné que les circuits absorbants sur l'harmonique fondamentale (50 Hz) présentent toujours une réactance capacitive, ils absorbent outre les courants d'harmonique aussi les courants d'harmonique fondamentale capacitifs et contribuent ainsi à la compensation du courant réactif.

Lors de la mise en et hors circuit des circuits de filtrage, un ordre de commutation défini doit être respecté. La mise en circuit commence avec le circuit de filtrage de la fréquence la plus basse. Pour la mise hors circuit, on procède dans l'ordre inverse. Cet arrêt et mise en circuit définis sont nécessaires car chaque circuit de filtrage pour les fréquences inférieures à sa fréquence de résonance agit de manière capacitive. En cas de non-respect de l'ordre de commutation, des résonances parallèles entre les circuits de filtrage capacitifs et les inductances du réseau avec leurs effets connus sont possibles. De plus, en raison des tolérances des éléments, les circuits de filtrage de la même fréquence peuvent être une fois capacitif et une fois inductif. Ici aussi, une résonance parallèle serait possible.

Pour la conception de telles installations, tous les paramètres réseau doivent être connus, c'est pourquoi des analyses réseau étendues sont nécessaires.

4.4 Installations à thyristors

Le thyristor est une solution prête au raccordement pour les installations de compensation de la puissance réactive à commutation rapide.

En raison de ses propriétés, les avantages suivants sont présents grâce à l'utilisation du commutateur rapide à thyristor à la place d'un actionneur classique, comme des contacteurs à air de condensateur:

- Commutation rapide des étages de compensation dans une plage de ms.
- Comportement de commutation défini par le principe de pleine oscillation et donc avec peu de réaction du réseau.
- Grande durée de vie grâce aux cycles de commutation quasiment illimités.
- Pas d'entretien en raison de l'absence d'usure.
- Pas de génération de bruit.
- Montage simple par la combinaison de rails-support ou de technique de fixation par vis.

4.4.1 Domaines d'utilisation des installations de compensation du courant réactif à thyristors

- Commandes à programmation enregistrée.
- Régulateur à puissance réactive ou régulateurs de procédés.
- Systèmes d'ordinateur ou techniques de gestion de processus.
- Partout où les puissances capacitives doivent être commutées rapidement et sans usure.

4.4.2 Applications

Compensation de la puissance réactive des charges inductives qui doivent être mises en et hors circuit fréquemment et surtout rapidement. Applications typiques:

- Installations de grue, ascenseurs, soudeuses par points et éoliennes

Sous réserve de modifications techniques et d'erreurs.
Version V117

Alpiq Digital SA
Bahnhofquai 12
CH-4601 Olten
xamax-ag.ch

T +41 44 866 70 80
F +41 44 866 70 90
xamax@alpiq.com