
1

étude d'une installation

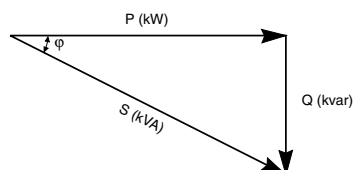
1k compensation de l'énergie réactive

page

compensation d'énergie réactive	K268
démarche de choix d'une batterie de condensateurs	K269
compensation des moteurs asynchrones	K274
compensation des transformateurs	K274
règles de protection et de raccordement de l'équipement de compensation	K275
filtrage des harmoniques	K277

Les équipements de compensation de l'énergie réactive (condensateurs et batteries) permettent de réaliser des économies sur les factures d'électricité et d'optimiser les équipements électriques.

La tangente Phi ($\tan \varphi$) est un indicateur de consommation d'énergie réactive. Elle est égale au rapport de la puissance réactive à la puissance active consommée. Le cosinus Phi ($\cos \varphi$) est une mesure du rendement électrique d'une installation. C'est le quotient de la puissance active consommée par l'installation sur la puissance apparente fournie à l'installation. Un bon rendement correspond à un $\cos \varphi$ proche de 1.



S : puissance apparente

P : puissance active

Q : puissance réactive

φ : déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension)

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

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

Interêt d'un bon $\cos \varphi$

Augmentation de la puissance disponible au secondaire du transformateur.

Soit un transformateur d'une puissance nominale de une puissance de 400 kVA dans une installation de 300 kW, la puissance appelée est :

$$S = P / \cos \varphi \rightarrow \text{si } \cos \varphi = 0,75$$

$$S = 300 \text{ kW} / 0,75 = 400 \text{ kVA} \rightarrow \text{le transfo est au maximum} \rightarrow \text{si } \cos \varphi = 0,93$$

$$S = 300 \text{ kW} / 0,93 = 322 \text{ kVA} \rightarrow \text{le transfo à une réserve de puissance de } +20\%$$

Diminution du courant véhiculé dans l'installation en aval du disjoncteur BT, ceci entraîne la diminution des pertes par effet Joule dans les câbles où la puissance consommée est $P = RI$

Le courant véhiculé est :

$$I = P / U \sqrt{3} \cos \varphi \rightarrow \text{si } \cos \varphi = 0,75$$

$$I = 300 \text{ kW} / 0,4 \text{ kV} \times \sqrt{3} \times 0,75 = 578 \text{ A}$$

$$\rightarrow \text{si } \cos \varphi = 0,93$$

$$I = 300 \text{ kW} / 0,4 \text{ kV} \times \sqrt{3} \times 0,93 = 465 \text{ A}$$

soit une diminution du courant véhiculé de -20%

Diminution des chutes de tension dans les câbles en amont de la compensation.

La compensation d'énergie réactive et ses avantages

Suppression de la facturation des consommations excessives d'énergie réactive...

EDF peut fournir l'énergie réactive, mais cette fourniture surcharge les lignes et les transformateurs. C'est la raison pour laquelle, lorsque l'électricité est livrée en moyenne tension, EDF a choisi de facturer la fourniture d'énergie réactive au même titre que la fourniture d'énergie active. Le seuil de facturation : $\cos \varphi = 0,93$ ou $\tan \varphi = 0,4$ - est destiné à inciter les clients à s'équiper de condensateurs. Le principe de facturation EDF pour surconsommation de kvar est :

■ applicable du 1^{er} novembre au 31 mars

■ tous les jours sauf le dimanche

■ de 6 heures à 22 heures

Remarques :

■ pour une activité de 8 heures par jour on considère 176 heures par mois

■ pour une activité continue de 24 h / 24h on considère 400 heures / mois.

...par compensation en Tarif Vert (puissance souscrite > 250 kVA)

L'abonné Tarif Vert est propriétaire du poste de transformation HTA/BT où est effectuée la livraison de l'énergie électrique.

■ le comptage est en BT si :

□ le transformateur de puissance est unique avec une puissance P supérieure à la limite 250 kVA du Tarif Vert, sans excéder 1250 kVA :

$$250 \text{ kVA} < P \leq 1250 \text{ kVA}$$

■ le comptage est en HTA si :

□ le transformateur de puissance est unique avec $P > 1250 \text{ kVA}$

□ l'abonné utilise au minimum 2 transformateurs de puissance HTA/BT.

Quel que soit le mode de comptage, pour chaque mois de l'hiver tarifaire (de novembre à mars) la facture d'électricité d'un abonné tarif vert fait apparaître :

■ la quantité d'énergie réactive consommée dans le mois pendant les heures pleines ou heures de pointe (hors heures creuses)

■ la tangente φ moyenne du mois (rapport de l'énergie réactive sur l'énergie active)

$$\text{tangente } \varphi = \frac{\text{Energie réactive}}{\text{Energie active}}$$

■ la tangente φ est mesuré par EDF :

□ en comptage en HTA, réalisé au point de livraison en amont du transformateur, c'est le rapport des consommations d'énergie réactive et active du mois.

Vu côté HTA, il est donc nécessaire de respecter :

tangente $\varphi \leq 0,4$ (soit $\cos \varphi \geq 0,93$) pour échapper aux pénalités

□ en comptage en BT, réalisé en aval du transformateur HTA/BT,

EDF prend en compte la consommation d'énergie réactive du transformateur situé en amont des batteries de condensateurs. Ce terme est pris forfaitairement égal à 0,09. Vu côté BT, il est donc nécessaire de respecter :

tangente $\varphi \leq 0,4 - 0,09$ c'est-à-dire :

tangente $\varphi \leq 0,31$ (soit $\cos \varphi \geq 0,955$) pour échapper aux pénalités.

■ une partie des kvar est fournie «gratuitement» en franchise (40 % de l'énergie active consommée) et correspond à une tangente φ primaire de 0,4 ($\cos \varphi = 0,93$)

■ le dépassement fait l'objet d'une facturation complémentaire.

Pour chaque mois de l'été tarifaire (d'avril à octobre) EDF fournit l'énergie réactive gratuitement.

En conclusion :

■ plus l'installation consomme de l'énergie réactive, plus le facteur de puissance ($\cos \varphi$) est faible et plus la tangente φ est élevée

■ plus le facteur de puissance est faible, plus il faut appeler sur le réseau une puissance importante pour aboutir au même travail utile.

D'où l'intérêt pour l'abonné Tarif Vert d'installer un équipement de compensation qui optimise son installation en réduisant sa consommation d'énergie réactive dans la limite de non pénalité :

tangente $\varphi \leq 0,4$ (soit $\cos \varphi \geq 0,93$)

...par compensation en Tarif Jaune (puissance souscrite 36 à 250 kVA)

Pour l'abonné Tarif Jaune :

■ le transformateur de puissance n'appartient pas au client

■ le comptage s'effectue en BT

■ la puissance est souscrite en kVA.

L'énergie réactive n'est pas facturée, mais la puissance utile maximum est limitée par la puissance souscrite en kVA.

La compensation d'énergie réactive en Tarif Jaune permet :

■ de diminuer la puissance souscrite en kVA de l'installation

■ de réduire l'intensité tout en conservant la même puissance en kW

■ d'augmenter la puissance utile de l'installation tout en conservant la même puissance utile.

Démarche de choix d'une batterie de condensateurs

K269
1^k

1^{ère} étape

Calcul de la puissance réactive nécessaire Q_c
La puissance à installer se calcule soit :

- à partir des factures d'électricité ou du feuillet de gestion
- à partir des données électriques de l'installation.

2^{ème} étape

Choix d'une compensation fixe ou automatique

3^{ème} étape

Choix du type d'équipements de compensation
Équipement standard, type H, type SAH.

1^{ère} étape

Calcul de la puissance réactive nécessaire à partir de la facture d'électricité en tarif vert

■ Prendre la facture EDF pour laquelle les kvar facturés sont les plus élevés parmi celles de la période du 1^{er} novembre au 31 mars.

■ Relever la tangente ϕ primaire, au recto de cette facture (ex : 0,829)

■ Saisir la puissance active atteinte (kW) la plus élevée en période P ou HP au verso de cette facture (ex : 268 kW)

■ Appliquer la formule

$Q_c = \text{puissance atteinte (kW)} \times (\text{tangente } \phi - 0,4)$

ex : $Q_c = 268 \times (0,829 - 0,4) = 115 \text{ kvar}$

EDF Electricité de France FACTURE SUR RELEVÉ 05/04/94

Votre service local : EDF GDF SERVICES

MONTANT A REGLER AVANT LE 20/04/94 : 57 820,03F

TARIF VERT A5 MOYENNES UTILISATIONS

PRIMES FIXES, REDEVANCES ET FRAIS DIVERS

PERIODE	CONSUMATION	PRISE	PRISE	CONSUMATION	CONSUMATION	PRISE	PRISE
tarif	en kWh	en kWh	en kWh	en kWh	en kWh	en kWh	en kWh
HPH	44959			44959	59,78	26876,49	
HCH	28947			28947	35,77	10354,34	
TOTAL	73906			73906			

ENERGIE REACTIVE (en kvarh) FACTUREE SUR LA BASE TANGENTE $\phi = 0,40$

ENERGIE REACTIVE	ENERGIE ACTIVE	TANGENTE	COEFFICIENT	COEFFICIENT	COEFFICIENT	COEFFICIENT
en kvarh	en kWh	en kvarh	en kvarh	en kvarh	en kvarh	en kvarh
37309	44959	0,829	37309	17983	19326	13,19

EDF Electricité de France

FACTURE DU 05/04/1994

RELEVÉ DE VOS CONSOMMATIONS DU 01/03/94 AU 01/04/94

PUISSANCE CONTRÔLÉE PAR COMPTEUR ÉLECTRONIQUE

POSE	VALUEUR	COEFFICIENT	VALUEUR	COEFFICIENT	VALUEUR
horaire	réactive	de lecture	réactive	de lecture	réactive
	268,00		268,00		268,00
	506,00		506,00		506,00

PUISSANCE RÉDUITE SOUSCRITE 366,5 KW

Facture EDF en tarif vert

Les services

Journée technique compensation de l'énergie réactive en milieu perturbé réf. JTCER

Démarche de choix d'une batterie de condensateurs (suite)

1^{ère} étape (suite)

Calcul de la puissance réactive nécessaire à partir du feuillet de gestion EDF en tarif vert

Le feuillet de gestion EDF donne la synthèse des consommations d'électricité sur l'année.

- Identifier le mois où l'énergie réactive est le plus élevée (ex : 630 kW en février)
- Choisir la valeur la plus élevée de la puissance atteinte (kW) en période P ou HP correspondant au même mois (ex : 78 kW)
- Saisir la valeur de la tangente ϕ correspondante au même mois (ex : 0,845)
- Appliquer la formule

$Q_c = \text{puissance atteinte (kW)} \times (\text{tangente } \phi - 0,4)$

ex : $Q_c = 78 \times (0,845 - 0,4) = 34,7 \text{ kvar}$

EDF
Electricité de France

Electricité de France

Feuillet de Gestion

Nom et adresse du lieu de consommation :

Situation à fin : DECEMBRE

Votre service local :
ELECTRICITE DF FRANCE

Notre référence :
Nom et adresse du client :

Code siret :

A.P.E. :

Tél renseignements :

Tél dépannage :

CD : Service :

Tarif 1010 AS COURTES UTILISATIONS

PRELEVEMENT A 15 JOURS

SYNTHESE DES RESULTATS DEPUIS LE

1^{ER} JANVIER

	P	HP	HC	HPE	HCE				PUISSANCE REDUITE FACTUREE
PUISS. SOUSCRITES (KW) (A)	05	05	05	05	05				05,0 KW
PUISS. ATTEINTES KW MAXI (B)	74	86	0	78	0				TOTAL
CONSO ENERGIE ACTIVE KWH (C)	8259	42861	16438	44866	16495				127938
NB HEURES UTILIS. (C/A OU C/B)	111	498	193	575	182				1559

ELEMENTS ISSUS DES FACTURES DE

JANVIER 1993 A DECEMBRE 1993

	P	HP	HC	P	HP	HC	TOTAL	EN. REAC. P+HP KVARH	TGTE PHI	EN. ACTIVE F HT	EN. REACT. F HT	TOTAL FAC F HT	P.U. KWH CTS HT
JANV	74	86	0	2551	6881	3326	12758	8149	0,845	10960	673	12328	96,63
FEBR	67	78	0	2886	7929	2978	13793	9138	0,845	12170	630	13587	98,51
MARS					9365	3703	13068	7641	0,845	9056	515	10386	79,48
AVRI					8269	2807	11076	6292	0,761	2083		2943	26,87
MAI					5835	2414	8249	4810	0,773	1524		2389	28,96
JUIN					7628	2477	10105	5469	0,717	1907		2771	27,44
JUIL					4589	2102	6691	3652	0,796	1224		2092	31,27
AOUT					1790	1174	2964	1716	0,959	522		1393	47,00
SEPT					7166	2292	9448	5259	0,735	1705		2650	28,05
OCTO					9618	2239	11847	7338	0,763	2293		3155	26,63
NOVE					10555	3002	13557	8296	0,786	9688	539	11050	81,51
DECE	63	86	0	2822	8131	3429	14382	8904	0,813	12416	598	13965	97,10
				8259	67746	31933	127938	76364		65628	2855	78709	61,52

	P	HP	HC	P	HP	HC	TOTAL	P	HP	HC	TOTAL	% FAC
DEPASSEMENT PUISS. KW												
JANV												
FEBR												
MARS												
AVRI												
MAI												
JUIN												
JUIL												
AOUT												
SEPT												
OCTO												
NOVE												
DECE												

	PRIME	DEPASS.	EN. ACTIVE	EN. REACT.	EN. RES/	F. DIVERS	SOUPL. FIN	TOTAL FAC	TVA	TAXES LOC	TOTAL FAC	P.U. KWH
	FIXE F HT	F HT	F HT	F HT	REST. F HT	F HT	F HT	F HT	F	F HT	F TTC	CTS HT
	9716	143	65628	2855		804	-437	78709	14813	935	94457	61,52

OBSERVATIONS DIVERSES

1. FACTURATION D ENERGIE REACTIVE (TGTE PHI > 0,4)

DATE D ECHEANCE CONTRACTUELLE

Feuillet de gestion

En tarif jaune

L'énergie réactive n'est pas facturée mais la puissance utile maximum est limitée par la puissance souscrite en kVA.

puissance souscrite (kVA)	modèle de Turbovar
36 - 42	TJ50
48 - 54 - 60 - 66	TJ75
72 - 78 - 84 - 90 - 96	TJ100
102 - 108 - 120	TJ125
132 - 144	TJ150
156 - 168 - 180	TJ175
192 - 204 - 216	TJ200
228 - 240 - 252	TJ250

Calcul de la puissance réactive nécessaire en tarif jaune

La compensation d'énergie réactive en tarif jaune permet de :

- diminuer la puissance souscrite en kVA de l'installation
- réduire l'intensité tout en conservant la même puissance utile en kW,
- d'augmenter la puissance utile de l'installation tout en conservant la même puissance souscrite

Le choix du Turbovar se fait simplement à partir de la puissance souscrite en kVA qui figure sur la facture EDF.

Exemple : puissance souscrite 144 kVA → Turbovar type TJ150.

1^{ère} étape (suite)

Calcul de la puissance réactive nécessaire à partir des données électriques de l'installation

■ Faire les bilans de puissance active P et réactive Qc de tous les récepteurs de l'installation.
■ Tenir compte des facteurs d'utilisation et de simultanéité.

■ Calculer les puissances totales P et Qc.

■ Calculer la tg φ globale (tg φ = Q/P) et à chaque sous station ou atelier.

■ Calculer la compensation nécessaire en la répartissant par niveau (cos φ ≥ 0,93).

■ Comparer le bilan de puissance ainsi corrigé avec le précédent kW, kVA, cos φ.

Pour une puissance active donnée P (kW), la valeur de la puissance réactive Qc (kvar) à installer est :

$$Q_c = P(tg\varphi - tg\varphi') = kP$$

tg φ correspond au cos φ de l'installation sans condensateur, soit mesuré, soit estimé

tg φ' = 0,4 correspond à cos φ' = 0,93, valeur qui permet de ne pas payer les consommations excessives d'énergie réactive.

Exemple

Puissance de l'installation : 438 kW

Cos φ (secondaire transformateur) = 0,75 soit tg φ (secondaire transformateur) = 0,88 tg φ (ramenée au primaire) = 0,88 + 0,09 * = 0,97.

$$Q_c = 438 \text{ kW} \times (0,97 - 0,4) = 250 \text{ kvar.}$$

* la consommation d'énergie réactive mesurée au secondaire du transformateur est majorée, forfaitairement, des pertes dans le transformateur, soit 0,09.

Tableau donnant la valeur de k (en kvar à installer pour élever le facteur de puissance)

avant compensation		puissance du condensateur en kvar à installer par kW de charge pour relever le facteur de puissance à une valeur donnée									
tgφ	cosφ	tgφ	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,0
cosφ	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1		
1,73	0,50	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732	
1,69	0,51	1,257	1,291	1,323	1,357	1,393	1,435	1,483	1,544	1,686	
1,64	0,52	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644	
1,60	0,53	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,600	
1,56	0,54	1,130	1,164	1,196	1,230	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559	
1,52	0,55	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519	
1,48	0,56	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480	
1,44	0,57	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442	
1,40	0,58	0,976	1,010	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405	
1,37	0,59	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368	
1,33	0,60	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334	
1,30	0,61	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299	
1,27	0,62	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265	
1,23	0,63	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,030	1,091	1,233	
1,20	0,64	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,200	
1,17	0,65	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,027	1,169	
1,14	0,66	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138	
1,11	0,67	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108	
1,08	0,68	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079	
1,05	0,69	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049	
1,02	0,70	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020	
0,99	0,71	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992	
0,96	0,72	0,534	0,568	0,600	0,634	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963	
0,94	0,73	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936	
0,91	0,74	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909	
0,88	0,75	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882	
0,86	0,76	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855	
0,83	0,77	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,687	0,829	
0,80	0,78	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803	
0,78	0,79	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776	
0,75	0,80	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,750	
0,72	0,81	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724	
0,70	0,82	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,489	0,556	0,698	
0,67	0,83	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,530	0,672	
0,65	0,84	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,646	
0,62	0,85	0,191	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,478	0,620	
0,59	0,86	0,167	0,198	0,230	0,264	0,301	0,343	0,390	0,450	0,593	
0,57	0,87	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,424	0,567	
0,54	0,88	0,112	0,143	0,175	0,209	0,246	0,288	0,335	0,395	0,538	
0,51	0,89	0,086	0,117	0,149	0,183	0,230	0,262	0,309	0,369	0,512	
0,48	0,90	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484	

2^{ème} étape

Choix du type de compensation : fixe ou automatique

Dans le cas de la compensation globale ou par ateliers, le ratio Qc/Sn ⁽¹⁾ permet de choisir entre un équipement de compensation fixe ou automatique. Le seuil de 15 % est une valeur indicative conseillée pour éviter les effets de la surcompensation à vide :

■ Qc/Sn ≤ 15 % : compensation fixe

■ Qc/Sn > 15 % : compensation automatique.

(1) Qc = puissance (kvar) de la batterie à installer

Sn = puissance apparente (kVA) du transformateur de l'installation

Batterie fixe ou automatique

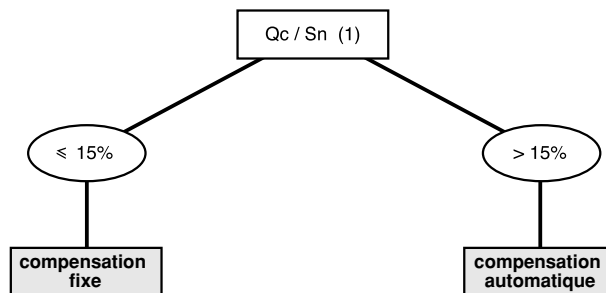
■ Batterie fixe → si puissance de la batterie < 15% de la puissance du transformateur

■ Batterie automatique → si puissance de la batterie > 15% de la puissance du transformateur

Attention :

tenir compte de la puissance kvar des batteries existantes

Réseau 400V/50Hz



Démarche de choix d'une batterie de condensateurs (suite)

Choix du type d'équipement

Les équipements de compensation peuvent être de trois types, adaptés au niveau de pollution harmonique du réseau.

Le choix peut se faire :

■ soit à partir du rapport G_h/S_n

Exemple 1

U = 400 V
 $S_n = 800$ kVA
 $P = 450$ kW
 $G_h = 50$ kVA

$$\frac{G_h}{S_n} = 6,2\% \rightarrow \text{Equipement standard}$$

Exemple 2

U = 400 V
 $S_n = 800$ kVA
 $P = 300$ kW
 $G_h = 150$ kVA

$$\frac{G_h}{S_n} = 18,75\% \rightarrow \text{Equipement type H}$$

Exemple 3

U = 400 V
 $S_n = 800$ kVA
 $P = 100$ kW
 $G_h = 400$ kVA

$$\frac{G_h}{S_n} = 50\% \rightarrow \text{Equipement type SAH}$$

■ soit à partir du taux de distorsion en courant harmonique THD⁽¹⁾ mesuré :

S_n = puissance apparente du transformateur.

S = charge en kVA au secondaire du transformateur au moment de la mesure

$$\text{THD}^{(1)} \times \frac{S}{S_n} < 5\% \rightarrow \text{Equipement standard}$$

$$5\% < \text{THD}^{(1)} \times \frac{S}{S_n} < 10\% \rightarrow \text{Equipement type H}$$

$$10\% < \text{THD}^{(1)} \times \frac{S}{S_n} < 20\% \rightarrow \text{Equipement type SAH}$$

Nota :

Il faut que la mesure d'harmoniques soit faite au secondaire du transformateur, à pleine charge et sans condensateurs.
 Tenir compte de la puissance apparente au moment de la mesure.

(1) THD "Total Harmonic Distortion" ou taux global de distorsion harmonique

3^{ème} étape

Détermination du type de batterie

Les équipements de compensation peuvent être de trois types, adaptés au niveau de pollution harmonique du réseau.

Le rapport G_h/S_n permet de déterminer le type d'équipement approprié.

Type standard, type H ou type SAH

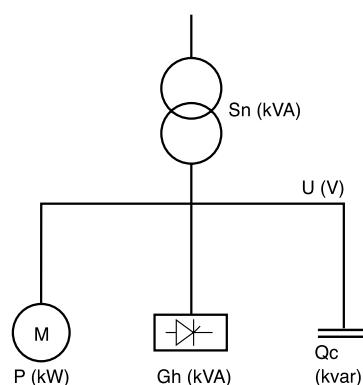
■ Standard → si puissance des générateurs d'harmoniques inférieure à 15% de la puissance du transformateur

■ Type H (isolation renforcée à 470 V) → si puissance des générateurs d'harmoniques est comprise entre 15% et 25% de la puissance du transformateur

■ Type SAH (avec selfs anti harmoniques) → si puissance des générateurs d'harmoniques est comprise entre 25% et 50% de la puissance du transformateur

Attention :

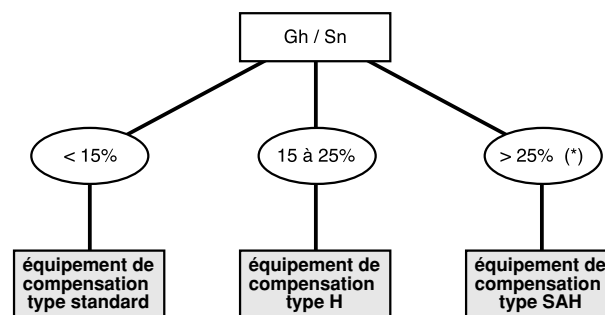
au-delà de 50% de générateurs d'harmoniques, l'installation de filtres est recommandée.



S_n : puissance apparente du transformateur.

G_h : puissance apparente des récepteurs produisant des harmoniques (moteurs à vitesse variable, convertisseurs statiques, électronique de puissance...).

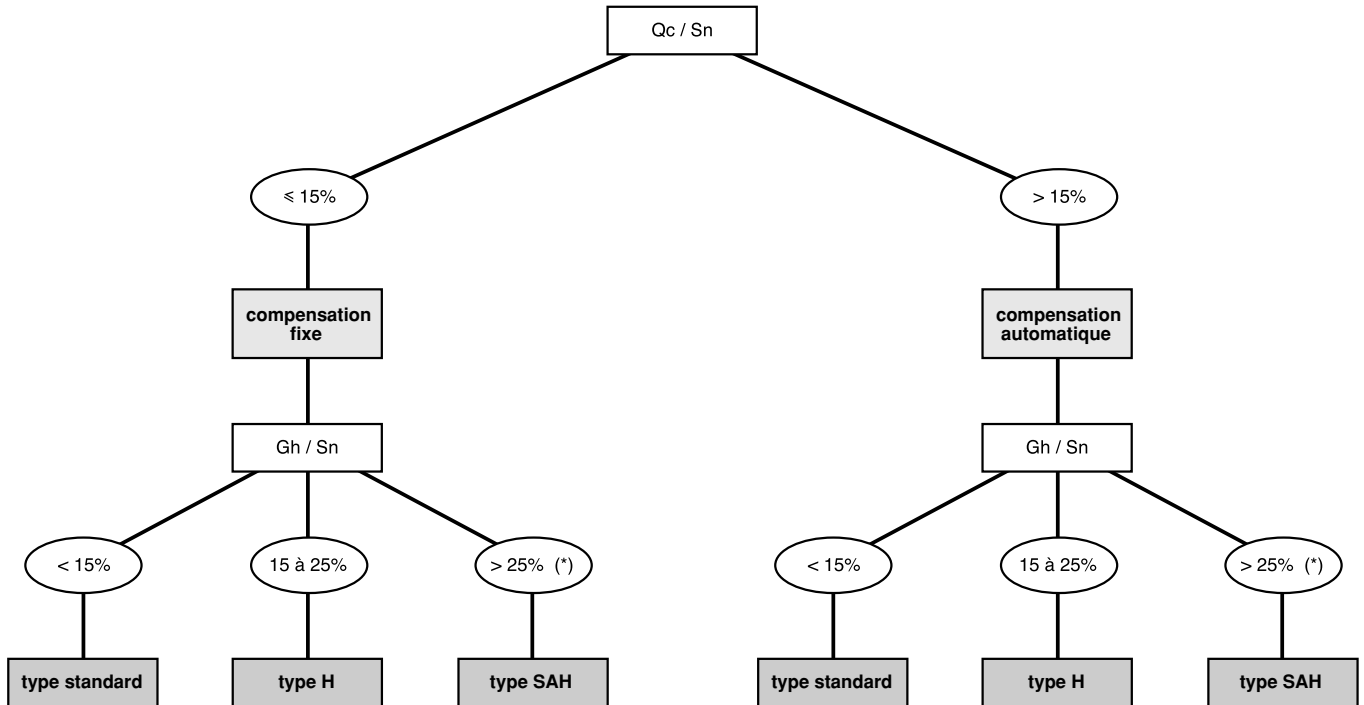
Q_c : puissance de l'équipement de compensation.



(*) au-delà de 50%, une étude de filtrage d'harmoniques est recommandée par Rectiphase.

Tableau de synthèse

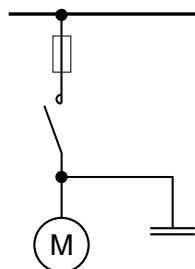
Réseau 400V/50Hz



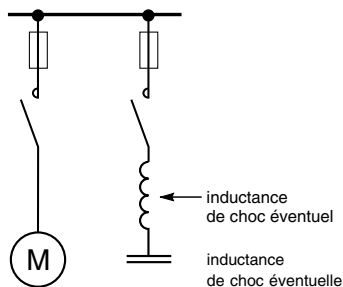
(*) au-delà de 50%, une étude de filtrage d'harmoniques est recommandée par Rectiphase.

Compensation des moteurs asynchrones et des transformateurs

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.



Montage des condensateurs aux bornes du moteur



Montage des condensateurs en parallèle avec commande séparée

Compensation 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 peut donc être utile d'installer des condensateurs pour ce type de récepteurs.

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.

Compensation de transformateurs

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

1- une partie fixe qui dépend du courant magnétisant à vide I_0 : $Q_0 = \sqrt{3} U_n I_0$

2- 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 données à titre indicatif 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

Généralités

Les matériels en amont des condensateurs sont déterminés à partir de règles d'installation et des courants absorbés par les appareils. Il faut donc connaître le courant à prendre en compte pour dimensionner ces équipements.

Les condensateurs en fonctionnement sont traversés par du courant qui dépend de la tension appliquée, de la capacité et des composantes harmoniques de la tension.

Les variations de la valeur de la tension fondamentale et des composantes harmoniques peuvent conduire à une amplification de courant. La norme admet 30 % comme valeur maximum admissible.

A cela, il faut ajouter les variations dues aux tolérances sur les condensateurs.

Les disjoncteurs

Leur calibre doit être choisi, pour permettre un réglage de la protection thermique, à :

- $1,36 \times I_n$ ⁽¹⁾ pour les équipements standard
- $1,43 \times I_n$ pour les équipements type H
- $1,12 \times I_n$ pour les équipements type SAH - accord 2,7
- $1,19 \times I_n$ pour les équipements type SAH - accord 3,8
- $1,31 \times I_n$ pour les équipements type SAH - accord 4,3.

Les seuils de réglage de protections de court-circuit (magnétique) devront permettre de laisser passer les transitoires d'enclenchement :

- $10 \times I_n$ pour les équipements standard, type H ou type SAH.

$$(1) I_n = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \times U_n} = \text{courant nominal sous la tension réseau } U_n$$

Exemple 1

50 kvar / 400 V - 50 Hz - standard

$$I_n = \frac{50000}{400 \sqrt{3}} = 72 \text{ A}$$

Protection thermique : $1,36 \times 72 = 98 \text{ A}$

Protection magnétique $> 10 I_n = 720 \text{ A}$



Exemple 2

50 kvar / 400 V - 50 Hz - SAH (accord 4,3)

$$I_n = 72 \text{ A}$$

Protection thermique : $1,31 \times 72 = 94 \text{ A}$

Protection magnétique $> 10 I_n = 720 \text{ A}$



Les câbles de puissance

Courant de dimensionnement

Ils doivent être dimensionnés pour un courant de $1,5 \times I_n$ minimum

Section

Elle doit également être compatible avec :

- la température ambiante autour des conducteurs
- le mode de pose (goulotte, caniveau, ...).

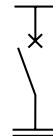
Se référer aux recommandations du fabricant de câbles.

Exemple

50 kvar / 400 V - 50 Hz - SAH (accord 3,8)

$$I_n = 72 \text{ A}$$

I dimensionnement = 108 A



Nota : certains fabricants de câbles indiquent directement dans leur catalogue les valeurs à prendre en compte pour les batteries de condensateurs.

Section minimum de câbles préconisées (câbles U1000 R02V à titre indicatif)
pour les raccordements condensateurs avec une température ambiante de 35 °C

puissance (kvar)		section (mm ²)	
230 V	400 V	cuivre	alu
15	25	6	16
20	30	10	16
25	45	16	25
30	60	25	35
40	75	35	50
50	90	50	70
60	110	70	95
70	135	95	2 x 50
900	150	120	2 x 70
100	180	2 x 50	2 x 70
120	200	2 x 70	2 x 95
135	240	2 x 70	2 x 150
165	275	2 x 95	2 x 150
180	300	2 x 120	2 x 185
210	360	2 x 150	2 x 240
240	400	2 x 185	2 x 300

Les câbles de commande

Section

■ Les câbles de circuit de commande (secondaire du transformateur auxiliaire) doivent avoir une section d'au moins 1,5 mm² en 230 V CA

■ Pour le secondaire du TC, il est recommandé d'utiliser du câble de section $\geq 2,5 \text{ mm}^2$

Règles de protection et de raccordement de l'équipement

Précautions d'installation d'un Turbovar

Le Turbovar enclenche son relais ampéremétrique entre 85 et 90% de son calibre.

Il ne faut donc jamais mettre un Turbovar de puissance supérieur à celle préconisée, car dans ce cas, le relais de seuil intensité ne s'enclenchera jamais et l'installation ne sera pas compensée.

Le Turbovar est conçu uniquement pour compenser les installations en tarif jaune.

Il ne peut être raccordé sur une installation en tarif vert.

Turbovar : choix du disjoncteur de protection et des câbles de puissance

Turbovar	TJ50	TJ75	TJ100	TJ125	TJ150	TJ175	TJ200	TJ250
disjoncteur								
modèle	C60	C60	C120	C120	NG125	NS160	NS160	NS250
calibre (A)	20	40	63	80	100	125	160	200
section des câbles								
cuivre	2,5	4	6	10	16	25	35	50
aluminium	16	16	16	16	25	35	50	70

Exemple

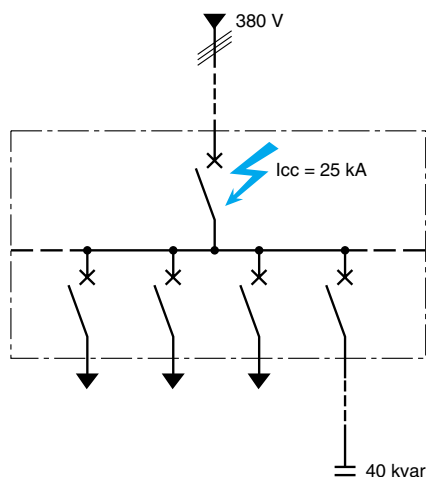
Réseau triphasé 400 V

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

Soit une batterie de condensateurs 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 premier tableau préconise une section minimale de 10 mm² cuivre ou 16 mm² alu
 ■ le second tableau 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.



Les harmoniques sont générés par les dispositifs électroniques de puissance. Lorsque ceux-ci représentent une part significative de la puissance consommée dans une installation, une analyse des harmoniques s'impose. Ceci pour éliminer les possibles nuisances et pour rendre l'installation conforme aux règles et recommandations des distributeurs, garantes d'un bon fonctionnement.

Les harmoniques circulant dans les réseaux apportent de nombreuses nuisances :

- surcharge et vieillissement des condensateurs de compensation d'énergie réactive
- surcharge des conducteurs de neutre en raison de la sommation des harmoniques de rang 3 créés par les charges monophasées
- déformation de la tension d'alimentation pouvant perturber des récepteurs sensibles
- surcharge des réseaux de distribution par l'augmentation du courant efficace
- surcharge, vibrations et vieillissement des alternateurs, transformateurs, moteurs
- perturbation des lignes téléphoniques...

Toutes ces nuisances ont un impact économique important, en coût de matériel qui doit être surdimensionné ou dont la durée de vie est réduite, en pertes énergétiques supplémentaires et en perte de productivité.

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Utilisant l'électronique de puissance, ils sont de plus en plus nombreux et leur part dans la consommation d'électricité ne cesse de croître. On en dresse ici une liste non exhaustive :

- appareils domestiques : téléviseurs, lecteurs CD, lampes fluo-compactes, fours à micro-ondes
- bureautique : PC, alimentations sans interruptions, imprimantes, photocopieuses
- variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu
- machines à souder, fours à arc, fours à induction
- redresseurs : chargeurs de batteries, électrolyse...

Le filtrage des harmoniques permet d'éliminer les nuisances.

Rappels sur les harmoniques

Tout signal périodique se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux (théorie de Fourier) :

- un signal à la fréquence fondamentale (50 Hz)
- des signaux de fréquence multiple de la fréquence fondamentale : les harmoniques.

On définit le taux de distorsion harmonique THD d'un signal X par la formule suivante :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n X_h^2}}{X_1} 100$$

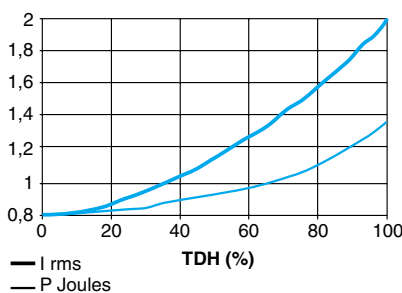
X_1 : amplitude du fondamental,
 X_h : amplitude des harmoniques

Les dispositifs à base d'électronique de puissance, comme les variateurs de vitesse, onduleurs, redresseurs, mais aussi les téléviseurs, PC, imprimantes, absorbent sur le réseau un courant non sinusoïdal. Ces charges sont dites non linéaires.

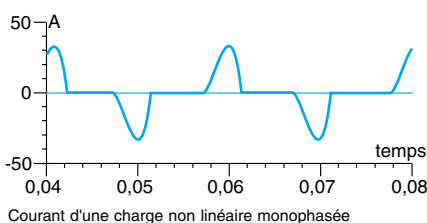
Ce courant non sinusoïdal circulant à travers l'impédance de la source déforme la tension (cf. exemple), ce qui peut perturber certains récepteurs.

Pour une même puissance active consommée, une charge non linéaire va absorber au réseau un courant efficace plus important, créateur de pertes Joules supplémentaires.

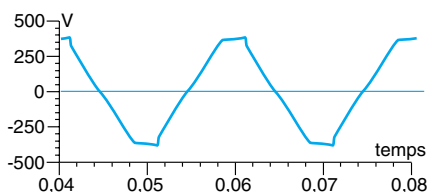
Les courbes suivantes représentent l'accroissement du courant efficace et des pertes Joules en fonction du taux de distorsion du courant, pour une puissance constante.



Exemple



Courant d'une charge non linéaire monophasée



Tension d'alimentation résultante

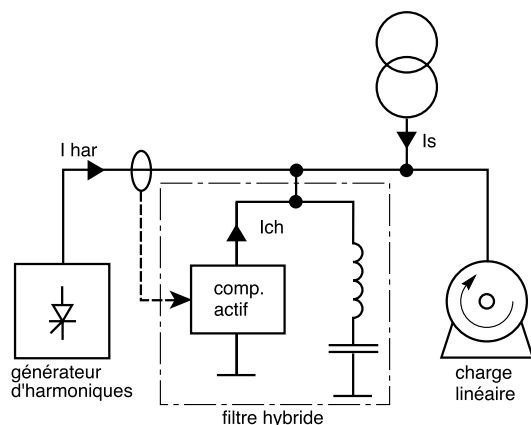
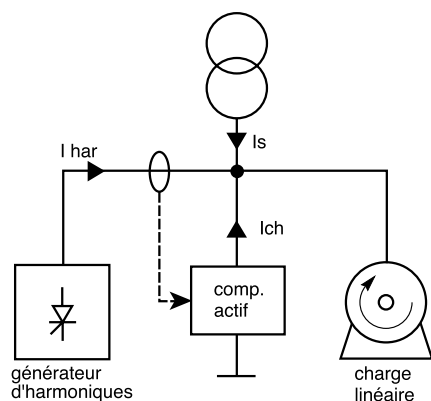
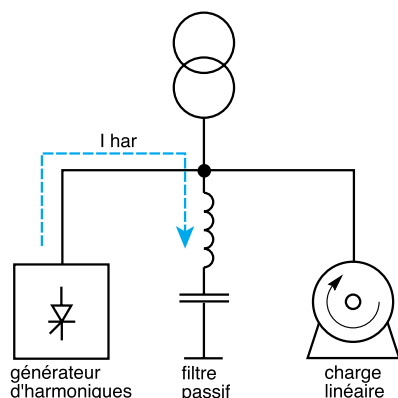
Le filtrage des harmoniques

Les harmoniques générés par certains équipements d'électronique de puissance (ponts redresseurs, variateurs de vitesse, les fours à arcs, machines à souder), nuisent au fonctionnement des installations électriques, leur filtrage permet :

- de garantir le bon fonctionnement d'une installation
- d'éliminer les surcoûts générés par les harmoniques.

Plusieurs solutions de filtrage sont possibles en BT :

- filtre passifs
- filtre actifs
- filtre hybrides.



Filtres passifs BT

Principe :

On place un circuit LC accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, en parallèle sur le générateur d'harmoniques. Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'alimentation. En général, le filtre passif est accordé à une fréquence proche de celle de l'harmonique à éliminer. Plusieurs branches de filtres en parallèle peuvent être utilisées lorsque l'on souhaite une réduction forte du taux de distorsion sur plusieurs rangs.

Caractéristiques spécifiques :

- permet de filtrer des courants d'harmoniques de valeurs importantes (en général les rangs 5, 7, 11 et 13)
- assure également la compensation d'énergie réactive (permettant, si besoin, une régulation automatique par gradins)
- élimine jusqu'à 80% des courants harmoniques choisis.

Avantages particuliers :

- c'est la solution la plus économique pour l'élimination d'un rang d'harmonique défini
- simple d'utilisation et de maintenance.

Applications typiques :

- installations industrielles avec un grand nombre de générateurs d'harmoniques (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs,...)
- installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive
- nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles
- nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

Filtres actifs BT

Principe :

Ce sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge.

Le filtre actif réinjecte en opposition de phase les harmoniques présents sur l'alimentation de la charge, de telle sorte que le courant de ligne I_s soit sinusoïdal.

Caractéristiques spécifiques :

- permet le filtrage d'un grand nombre d'harmoniques (Sinewave : du rang 2 au rang 25 / AccuSine : jusqu'au rang 50)
- s'adapte aux évolutions de l'installation en autorise les extensions par mise en parallèle de plusieurs unités
- pas de risque de surcharge.

Avantages particuliers :

- solution permettant un traitement simple et efficace de plusieurs rangs d'harmoniques
- évite les risques de phénomènes de résonance
- les performances très élevées de l'AccuSine (temps de réponse < 8ms) lui permettent également de traiter les phénomènes de Ficker.

Applications typiques :

- installations tertiaires avec de nombreux générateurs d'harmoniques (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs,...)
- nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges
- le filtre actif Sinewave est également une solution idéale pour l'élimination du courant harmonique de rang 3 circulant dans le neutre des installations comportant de nombreuses charges non-linéaires monophasées.

Filtres hybrides BT

Principe :

Un filtre passif et un filtre actif peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride.

Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages des solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performances.

Caractéristiques spécifiques :

- combine les avantages des filtres actifs et des filtres passifs
- permet de filtrer des courants harmoniques de valeurs importantes (en général les rangs 5, 7, 11 et 13)
- assure également la compensation d'énergie réactive (permettant, si besoin, une régulation automatique par gradins)
- assure le filtrage global des harmoniques des rangs 2 à 25.

Avantages particuliers :

- simplicité d'installation
- c'est un compromis idéal pour assurer le filtrage de plusieurs harmoniques tout en assurant une compensation d'énergie réactive.

Applications typiques :

- installations industrielles avec un grand nombre de générateurs d'harmoniques (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs,...)
- installations présentant un besoin de compensation d'énergie réactive
- nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles,
- nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges
- recherche de conformité à des limites d'émission harmonique.