

Harmoniques et convertisseurs de fréquence



Table des matières

1.	Introduction	5
2.	Les phénomènes harmoniques	6
3.	Sources et effets des émissions harmoniques	8
4.	Calculer la distorsion harmonique avec le programme DriveSize	9
4.1	Schéma pour l'exemple de calcul	9
4.2	Données à entrer pour la charge moteur	9
4.3	Sélection du moteur	10
4.4	Sélection de l'onduleur	10
4.5	Données du redresseur	10
4.6	Données à entrer pour le réseau et le transformateur	10
4.7	Courant et tension harmoniques calculés	11
4.8	Représentation graphique des courants harmoniques calculés	11
4.9	Partie de l'état imprimé	11
5.	Normes de limites d'émissions harmoniques	12
5.1	EN 61800-3 (CEI 1800-3) Entraînements électriques de puissance à vitesse variable	12
5.2	CEI 1000-2-2, Compatibilité électromagnétique (CEM)	13
5.3	CEI 1000-2-4, Compatibilité électromagnétique (CEM)	13
5.4	CEI 1000-3-2, Compatibilité électromagnétique (CEM)	13
5.5	CEI 1000-3-4, Compatibilité électromagnétique (CEM)	13
5.6	IEEE519 : Exigences et recommandations pratiques de l'IEEE pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance	14
6.	Evaluer les émissions harmoniques	16
7.	Réduire les harmoniques en modifiant la structure du système d'entraînement c.a.	17
7.1	Paramètres d'un entraînement c.a. influant sur les émissions harmoniques	17
7.2	Tableau : différents paramètres et leurs effets	18
7.3	Utilisation d'un redresseur à diodes 6 pulses	18
7.4	Utilisation d'un redresseur à diodes 12 ou 24 pulses	19
7.5	Utilisation d'un redresseur contrôlé à thyristors ..	20
7.6	Utilisation d'un pont d'IGBT	21
7.7	Utilisation d'une grosse inductance c.a. ou c.c. ..	22

8.	Autres méthodes de réduction des émissions harmoniques	25
8.1	Filtre passif accordé monobranche	25
8.2	Filtre passif accordé multibranche	25
8.3	Filtre actif externe	26
9.	Récapitulatif des méthodes d'atténuation des harmoniques	28
9.1	Redresseur 6 pulses sans inductance	28
9.2	Redresseur 6 pulses avec inductance	28
9.3	Redresseur 12 pulses avec transformateur en polygone	28
9.4	Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement	28
9.5	Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements	29
9.6	Redresseur actif à IGBT	29
10.	Définitions	30
11.	Index	32

Chapitre 1 - Introduction

Généralités

Ce guide, qui fait partie de la série des guides techniques ABB, décrit les perturbations harmoniques, leurs origines et leurs effets ; il décrit également le mode de calcul et d'évaluation des émissions harmoniques. Nous y présentons plus spécifiquement les méthodes de réduction des harmoniques générés par les entraînements électriques de puissance (c.a.) à vitesse variable.

Chapitre 2 - Les phénomènes harmoniques

Les courants et tensions harmoniques sont créés par des charges non linéaires raccordées au réseau de distribution. La distorsion harmonique est une forme de pollution du réseau électrique susceptible de poser des problèmes si la somme des courants harmoniques est supérieure à certaines valeurs limites.

Tous les convertisseurs électroniques de puissance utilisés dans différents types de systèmes électroniques peuvent accroître les perturbations harmoniques en injectant directement des courants harmoniques dans le réseau. La figure 2.1 montre comment les harmoniques de courant (i_h) du courant d'entrée (i_s) d'un convertisseur à électronique de puissance affectent la tension d'alimentation (u_t).

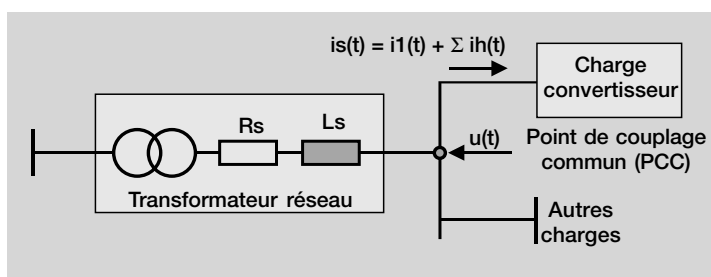


Figure 2.1 Installation électrique avec convertisseur, transformateur réseau et autres charges.

Le courant réseau d'un redresseur triphasé en montage hexaphasé (6 pulses) peut être calculé à partir du courant continu de sortie avec la formule suivante :

$$I_1' = \sqrt{\frac{2}{3}} * I_d, \text{ où}$$

$$I_1' = \text{courant efficace total et}$$

$$I_d = \text{courant continu de sortie du redresseur} \\ \text{(valable pour un courant continu idéal} \\ \text{filtré)}$$

Le courant fondamental est alors

$$I_1 = I_1' * \frac{3}{\pi}$$

Dans un cas théorique où le courant de sortie est considéré comme du courant continu "propre", les fréquences de courant harmonique d'un redresseur triphasé en montage hexaphasé (6 pulses) représentent n fois la fréquence fondamentale (50 ou 60 Hz). Les informations ci-dessous s'appliquent lorsque l'inductance réseau est insignifiante par rapport à l'inductance de la self c.c. Le courant réseau est alors rectangulaire avec des blocs de 120 °. Les rangs n sont calculés avec la formule suivante :

$$n = 6k \pm 1, \text{ où } k = 1, 2, 3, \dots$$

Les valeurs efficaces des composantes harmoniques sont :

$$I_{ni} = \frac{I_1}{n}$$

et ces composantes harmoniques sont montrées dans la figure 2.2.

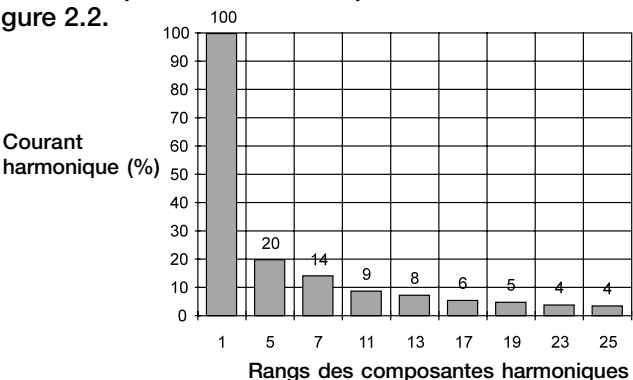


Figure 2.2 Teneur en harmoniques du courant rectangulaire théorique d'un redresseur 6 pulses.

Le mode de superposition des composantes harmoniques au courant fondamental est illustré à la figure 2.3, où seul l'harmonique de rang 5 est montré.

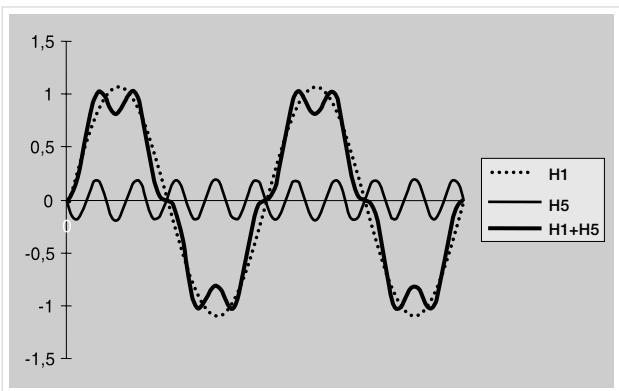


Figure 2.3 Le courant total est la somme du fondamental et de l'harmonique de rang 5.

Chapitre 3 - Sources et effets des émissions harmoniques

Les charges non linéaires les plus courantes sont les démarreurs électroniques des moteurs, les variateurs électroniques de vitesse, les ordinateurs et autres dispositifs électroniques, les éclairages électroniques, les postes à souder et les alimentations sans interruption (ASI).

Les harmoniques peuvent provoquer l'échauffement des transformateurs, câbles, moteurs, générateurs et condensateurs raccordés à la même alimentation que les dispositifs générateurs d'harmoniques. Les afficheurs des appareils électroniques et les éclairages se mettent à papilloter, les disjoncteurs peuvent déclencher, les ordinateurs dysfonctionner et les instruments de mesure donner des valeurs erronées.

Si l'origine de ces symptômes n'est pas connue, il est alors préconisé de rechercher la source des émissions harmoniques dans le réseau interne de l'usine. Les effets se feront probablement sentir dans le réseau interne du client avant d'apparaître dans le réseau du distributeur d'électricité. Ce guide technique a été réalisé pour aider les clients à comprendre les éventuels problèmes d'harmoniques et à s'assurer que les niveaux d'émissions harmoniques restent tolérables.

Chapitre 4 - Calculer la distorsion harmonique avec le programme DriveSize

Les courants harmoniques provoquent une distorsion de la tension réseau. En principe, les harmoniques de tension peuvent être calculés en tout point du réseau si les courants harmoniques et les impédances de source correspondantes sont connues. La figure 4.1 montre le réseau alimentant le variateur de vitesse et les autres éléments de base de l'installation. Le programme DriveSize d'ABB est utilisé pour cet exemple de calcul.

4.1 Schéma pour l'exemple de calcul

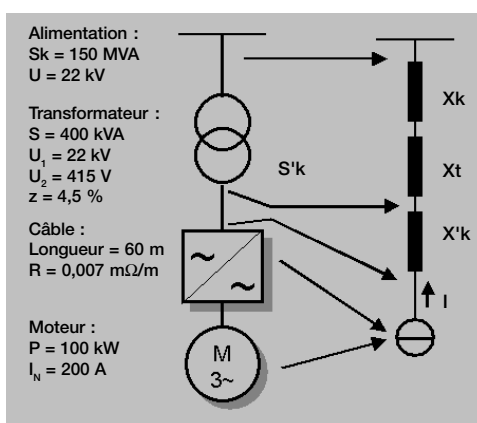


Figure 4.1. Réseau alimentant un convertisseur de fréquence (milieu) et schéma équivalent (droite). Les données pour cet exemple sont sur la gauche.

4.2 Données à entrer pour la charge moteur

Motor load

Load type: **Const. torque/power**

Overload type: **One overload**

	min	base	max
Speed [rpm]	0	1450	1500
Power [kW]	0	100	100
Overload [%]		100	100

Overload time [s]: **60** every [s]: **600**

Figure 4.2. La donnée indispensable de charge moteur pour le calcul des harmoniques est la puissance de base en kW.

4.3 Sélection du moteur

Selected motor data	
M2BA 315 SMC 6	
Selection	DriveSize
Voltage [V]	415
Connection	D
Frequency [Hz]	50
Power [kW]	110
Poles	6
Speed [rpm]	992
Max mech. speed [rpm]	2300
Current [A]	197
Torque [Nm]	1060
T max/Tn	3,2
Power factor	0,82
Efficiency [%]	95,6
Insulation class	F

Figure 4. 3. Le programme sélectionne le moteur pour la charge définie. Au besoin, l'utilisateur peut sélectionner un moteur différent de celui spécifié par DriveSize.

4.4 Sélection de l'onduleur

Selected inverter data	
ACS607-0140-3	
Selection	User
Selection method	Current (normal)
Voltage [V]	400
Drive power [kVA]	140
Pn [kW]	110
Normal Icont [A]	216
Normal Imax [A]	238
Phd [kW]	90
Heavyduty Icont [A]	178
Heavyduty Imax [A]	267
Pulse	6
Frame type	R8
P&F 12Nsq [A]	260

4.4. L'onduleur sélectionné est fonction du moteur spécifié à l'étape précédente. Ici également, l'utilisateur peut imposer son propre choix.

4.5 Données du redresseur

Supply unit data	
Pulse #	6
Lv [μ H]	110
Cdc [mF]	4,95
Udc [V]	560
Idc [A]	191

Figure 4.5. Les données du redresseur sont définies par DriveSize en fonction du type d'onduleur spécifié.

4.6 Données à entrer pour le réseau et le transformateur

Network and Transformer data	
Primary voltage [V]	22000
Frequency [Hz]	50
Network Sk [MVA]	150
Transformer Sn [kVA]	400
Transformer Pk [kW]	3,0
Transformer Zk [%]	3,8
Supply cable type	☒ Cable ☐ Busbar
Cable quantity	3
Cable lenght [m]	60
Secondary voltage [V]	415
☐ unknow	
Impedance [$\mu\Omega$]	70

Figure 4.6. Les données du réseau et du transformateur sont affichées dans cette fenêtre. Pour les transformateurs standard ABB, les données sont automatiquement affichées.

4.7 Courant et tension harmoniques calculés

THD							
	Current	Voltage	n	f [Hz]	Current [A]	In/I1	Voltage [V]
Result	47,1%	0,2%	1	50	2,8	100,0 %	21996,6
IEEE Calc	0,2%/	0,2%/	5	250	1,2	41,2 %	32,9
IEEE Limit	15,0%	0,5%	7	350	0,6	19,5 %	21,7
			11	550	0,2	8,6 %	15,1
			13	650	0,2	5,6 %	11,7
			17	850	0,1	4,2 %	11,3
			19	950	0,1	2,7 %	8,1
			23	1150	0,1	2,3 %	8,2
			25	1250	0,0	1,4 %	5,5
			29	1450	0,0	1,2 %	5,3
			31	1550	0,0	0,8 %	3,7
			35	1750	0,0	0,5 %	3,0
			37	1850	0,0	0,6 %	3,3

Data
☒ Primary side
☐ Secondary side
Show Mode
☒ Table
☐ Graph

Figure 4.7. Les harmoniques sont calculés par transformation discrète de Fourier du courant de phase simulé de la section d'arrivée. Différents types de modèles de montage sont utilisés, un pour variateur SingleDrive avec inductances c.a. et un pour redresseur à diodes et thyristors avec inductances c.c. D'autres modèles existent pour les redresseurs 6, 12 et 24 pulses.

4.8 Représentation graphique des courants harmoniques calculés

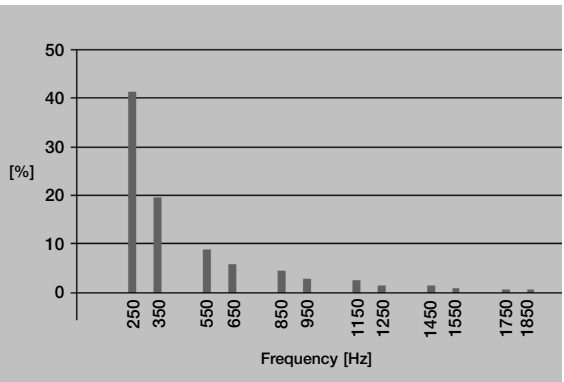


Figure 4.8. Les résultats des calculs peuvent être représentés sous forme de tableau (figure 4.7) ou de graphique comme ci-dessus.

4.9 Partie de l'état imprimé

									
Network check						ACS607-0140-3			
Network and Transformer data						Supply unit data			
Normal voltage [V]	22000 (primary side)					Pulse #	6		
Frequency [Hz]	50					Lv [μH]	110		
Network Sk [MVA]	150					Cdc [mF]	4,95		
Transformer Sn [kVA]	400					Udc [V]	560		
Transformer Pk [kW]	3,0					Idc [A]	191		
Transformer Zk [%]	3,8								
Supply cable type	Cable								
Cable quantity	3								
Cable lenght	60								
Result						IEEE 519 limits			calc/limit
Cosfi	0,999					THD Current	47,1 %	THD Current	0,2 %/15,0 %
Tot. power factor	0,90					THD Voltage	0,2 %	THD Voltage	0,2 %/5,0 %
Unmax mot.	98 %								

Figure 4.9. Les données entrées et les résultats des calculs peuvent être imprimés sous forme d'état, dont une partie est illustrée.

Chapitre 5 - Normes de limites d'émissions harmoniques

Nous reprenons ci-dessous les principales normes internationales et nationales qui définissent des limites d'émissions harmoniques. La figure 5.1 montre un exemple de limites de distorsion harmonique.

5.1 EN 61800-3 (CEI 1800-3) Entraînements électriques de puissance à vitesse variable

Partie 3: Norme de produit relative à la CEM incluant des méthodes d'essais spécifiques

Les pays de l'Espace Economique Européen (EEE) se sont mis d'accord pour définir des règles minimales communes pour garantir la libre circulation des produits au sein de l'EEE. Le marquage CE indique que le produit est conforme aux directives applicables. Les directives fixent les principes qui doivent être mis en oeuvre. Les normes spécifient les exigences à respecter. La norme EN 61800-3 est la norme de produit relative à la CEM pour les entraînements électriques de puissance à vitesse variable (également désignés PDS, *Power Drive Systems*). Le respect des exigences de cette norme est la condition minimale pour la libre circulation des convertisseurs électroniques de puissance au sein des pays de l'EEE.

La norme EN 61800-3 précise que le constructeur doit donner dans la documentation du PDS, ou sur demande, le niveau des harmoniques de courant, aux conditions de charge assignées, en pourcentage du courant fondamental assigné sur l'accès puissance. Les courants harmoniques doivent être calculés à chaque rang et au moins jusqu'au rang 25 inclus. Le taux de distorsion harmonique total en courant THD (jusqu'au rang 40 inclus) et sa composante haute fréquence PHD (des rangs 14 à 40 inclus) doivent aussi être évalués. Pour ces calculs standard, on doit supposer que le PDS est raccordé à un PC avec $R_{sc} = 250$ et ayant un taux de distorsion harmonique initial en tension inférieur à 1%. On doit également supposer que l'impédance interne du réseau est une inductance pure.

Dans un réseau public basse tension, les limites et les exigences de la CEI 1000-3-2 s'appliquent aux équipements de courant assigné ≤ 16 A. L'utilisation de la future norme CEI 1000-3-4 est préconisée pour un équipement de courant assigné > 16 A.

Un PDS destiné à une installation industrielle doit être pris en compte en examinant l'installation complète ; cela représente une approche économique raisonnable. Cette approche est basée sur la puissance convenue, que le réseau peut fournir à tout moment. La méthode de calcul des harmoniques de l'installation complète est convenue

et les limites soit de distorsion de tension, soit d'émissions de courant harmonique total, sont convenues. Les limites de compatibilité données dans la CEI 1000-2-4 peuvent être utilisées comme limites de distorsion de tension.

5.2
CEI 1000-2-2,
Compatibilité
électromagnétique
(CEM)

Partie 2 : Environnement - Section 2 : Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation à basse tension
Cette norme fixe les limites de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les **réseaux publics d'alimentation basse tension**. Les phénomènes perturbatoires incluent les harmoniques, interharmoniques, fluctuations de tension, creux de tension, déséquilibres de tension transitoires, etc. Cette norme définit essentiellement les critères de conception pour le constructeur de l'équipement et les niveaux d'immunité mini de cet équipement. La norme CEI 1000-2-2 est en accord avec les limites fixées par la norme EN 50160 en ce qui concerne la qualité de la tension que le distributeur d'électricité doit fournir aux bornes du réseau du client.

5.3
CEI 1000-2-4,
Compatibilité
électromagnétique
(CEM)

Partie 2 : Environnement - Section 4 : Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence
La norme CEI 1000-2-4 est similaire à la norme CEI 1000-2-2, mais fixe les niveaux de compatibilité pour les **réseaux industriels et non publics**. Elle couvre les réseaux basse tension de même que les alimentations moyenne tension, à l'exclusion des réseaux des navires, des avions, des plates-formes offshore et des installations ferroviaires.

5.4
CEI 1000-3-2,
Compatibilité
électromagnétique
(CEM)

Partie 3 : Limites - Section 2 : Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils <16 A par phase)
Cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des matériels individuels raccordés aux **réseaux publics**. La date d'entrée en vigueur de cette norme est fixée au 1er janvier 2001, mais d'importants travaux sont actuellement en cours pour sa révision avant cette date. Les deux raisons principales pour sa révision sont, d'une part, la nécessité pour la norme de couvrir également les tensions inférieures à 230 V et, d'autre part, les difficultés et contradictions à appliquer la différenciation des matériels donnée dans la norme.

5.5
CEI 1000-3-4,
Compatibilité
électromagnétique
(CEM)

Cette norme a été publiée sous la forme d'un rapport technique de Type II. Les travaux se poursuivent pour le convertir en norme. Il spécifie les limites d' émissions de courant harmonique des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16 A et jusqu'à 75 A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales entre 230 V (monophasée) et 600 V (triphasée).

Cette norme distingue trois étapes pour les procédures de raccordement des équipements. Le respect des taux limites d'harmonique individuels de l'Etape 1 autorise le raccordement des équipements en tout point du réseau d'alimentation. L'Etape 2 spécifie des taux individuels de courant harmonique de même que le taux de distorsion harmonique total THD et sa contrepartie le taux de distorsion haute fréquence pondéré PWhd. Les limites sont classées et tabulées en fonction du rapport de court-circuit. La troisième étape de raccordement est basée sur un accord entre l'utilisateur et le distributeur d'électricité, à partir de la puissance active contractuelle de l'installation du consommateur. Si le courant assigné est supérieur à 75 A, l'Etape 3 s'applique dans tous les cas.

La structure de cette norme est, de manière générale, bien accueillie, mais la question est de savoir si les équipements monophasés et triphasés doivent avoir des limites différentes à l'Etape 2. Il est vraisemblable que la norme conservera sa structure, mais que la version ayant statut de norme réelle spécifiera différentes limites pour les équipements monophasés et triphasés.

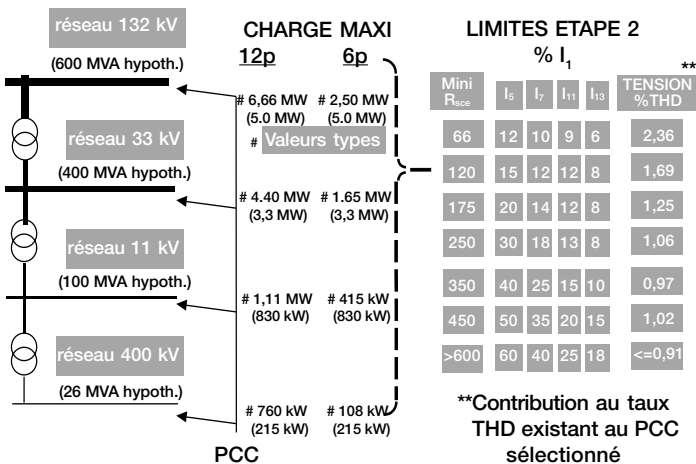


Figure 5.1 Limites de distorsion harmonique dans la proposition de norme EN 61000-3.

**5.6 IEEE519 :
Exigences et
recommandations
pratiques de
l'IEEE pour le
contrôle des
harmoniques
dans les
systèmes
électriques de
puissance.**

La philosophie de définition de limites de distorsion harmonique dans ce guide de pratiques recommandées est de limiter l'injection d'harmoniques par les clients individuels pour éviter qu'elle ne provoque des niveaux de distorsion de tension inacceptables pour un réseau normal et de limiter le taux de distorsion harmonique global de la tension réseau fournie par le distributeur. Cette norme est également reconnue par l'instance américaine de normalisation et est largement utilisée aux USA, plus particulièrement par les exploitants de réseaux municipaux.

La norme ne spécifie pas de limites pour les équipements individuels, mais pour les clients individuels. Les clients sont classés en fonction du rapport entre le courant de court-circuit disponible (I_{sc}) et le courant de charge maximum demandé (I_L) au point de couplage commun (PCC). Le courant de charge maximum demandé est la somme des charges linéaires et non linéaires. Dans un réseau industriel, le point de couplage commun est clairement défini comme le point entre la charge non linéaire et les autres charges.

Les courants harmoniques individuels autorisés et le taux de distorsion harmonique total (THD) sont tabulés en fonction du rapport de courant de court-circuit disponible sur le courant de charge maximum demandé (I_{sc}/I_L) au point de couplage commun. Les limites sont exprimées en pourcentage de I_L pour tous les harmoniques de rangs pairs et impairs de 2 à l'infini. Le taux de distorsion harmonique total THD est appelé taux de distorsion de puissance et doit également être calculé jusqu'à l'infini. De nombreux auteurs limitent le calcul des taux individuels et du taux de distorsion de puissance au rang 50.

Le tableau 10.3 de la norme est parfois mal interprété, certaines personnes pensant qu'il fixe des limites pour les émissions d'harmoniques d'un appareil unique en utilisant le R_{sc} de l'équipement au lieu du I_{sc}/I_L de l'installation complète. Les limites du tableau ne doivent pas être utilisées de cette manière, étant donné que c'est le rapport du courant de court-circuit sur le courant total de charge demandé d'une installation qui doit toujours être utilisé.

Chapitre 6 - Evaluer les émissions harmoniques

Le "Guide d'application des limites d'émissions harmoniques des systèmes d'entraînement" P519A/D6 Janv. 1999 présente quelques règles générales d'évaluation des limites d'émissions harmoniques au sein d'une installation industrielle. La procédure est illustrée à la figure 6.1.

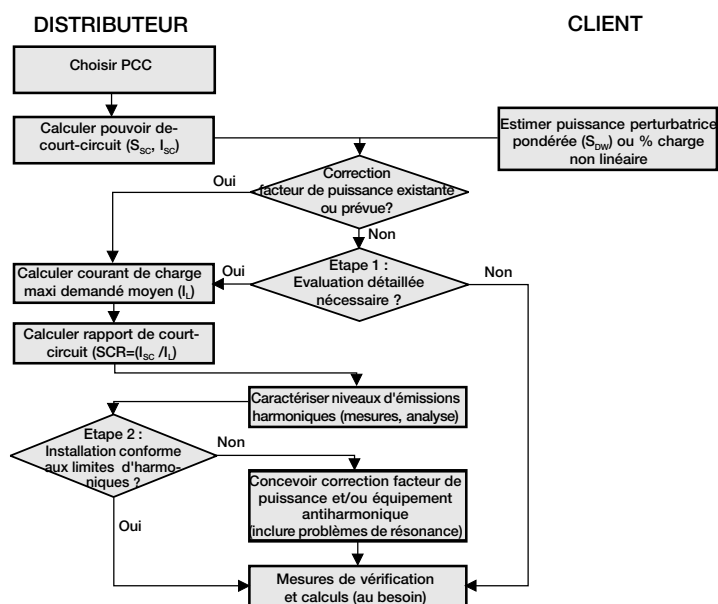


Figure 6.1 Procédure d'évaluation des émissions harmoniques.

Chapitre 7 - Réduire les harmoniques en modifiant la structure du système d'entraînement c.a.

Les harmoniques peuvent être réduits soit par modification de la structure du système d'entraînement, soit par filtrage externe. Les modifications de structure peuvent viser à renforcer l'alimentation, à utiliser un variateur à redresseur 12 pulses ou plus, à utiliser un redresseur contrôlé, ou encore à améliorer le filtrage interne de l'entraînement.

7.1 Paramètres d'un entraînement c.a. influant sur les émissions harmoniques

La figure 7.1 récapitule les paramètres d'un système d'entraînement c.a. qui influent sur les émissions harmoniques. Les harmoniques de courant varient selon la configuration de l'entraînement et les harmoniques de tension correspondent aux harmoniques de courant multipliés par les valeurs d'impédance du réseau.

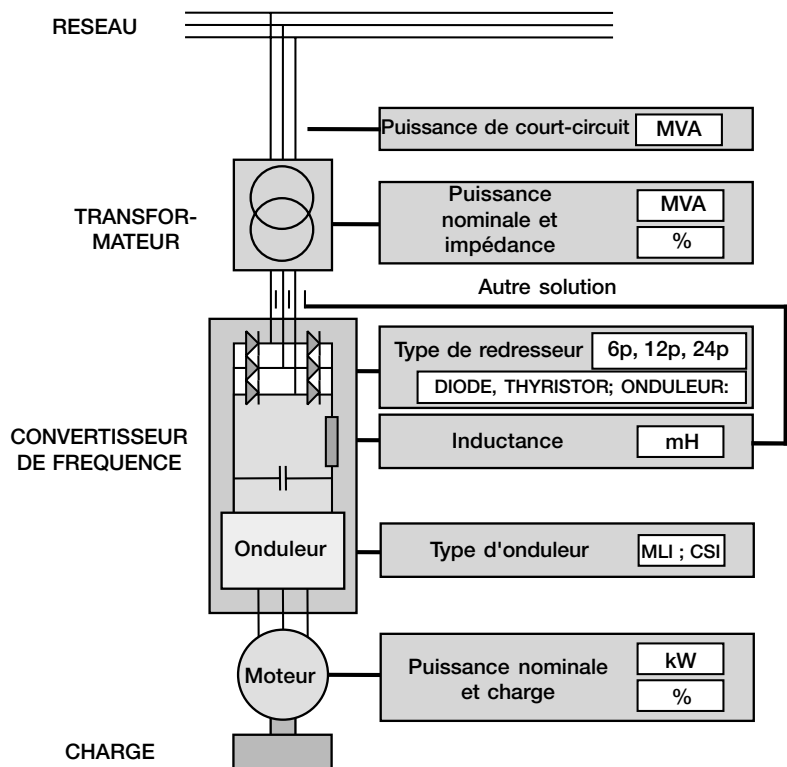


Figure 7.1 Paramètres d'un système d'entraînement influant sur les émissions harmoniques

7.2 Tableau :
différents
facteurs et
leurs effets

Facteur	Effet
Plus le moteur est gros...	plus les harmoniques de courant sont élevés
Plus la charge moteur est élevée...	plus les harmoniques de courant sont élevés
Plus l'inductance c.a. ou c.c. est élevée...	plus les harmoniques de courant sont faibles
Plus l'indice de pulsation du redresseur est élevé...	plus les harmoniques de courant sont faibles
Plus le transformateur est puissant...	plus les harmoniques de tension sont faibles
Plus l'impédance du transformateur est faible...	plus les harmoniques de tension sont faibles
Plus la puissance de court-circuit de l'alimentation est élevée...	plus les harmoniques de tension sont faibles

7.3 Utilisation
d'un
redresseur à
diodes 6
pulses

Le raccordement de différents types de redresseur est illustré à la figure 7.2. Dans les variateurs de fréquence, le circuit redresseur le plus courant est un pont de diodes 6 pulses. Il est constitué de six diodes non commandées et d'une inductance qui, avec un condensateur c.c., forment un filtre passe-bas pour le lissage du courant continu. L'inductance peut être placée côté c.a. ou c.c., ou même être absente. Le redresseur 6 pulses est simple et bon marché, mais génère de nombreux harmoniques de rangs faibles (5, 7, 11) en particulier avec une petite inductance de lissage.

La forme du courant est illustrée à la figure 7.2. Si la majeure partie de la charge est constituée de convertisseurs avec un redresseur 6 pulses, le transformateur d'alimentation doit être surdimensionné et le respect des exigences normatives peut s'avérer difficile. Souvent, le filtrage de certains harmoniques est nécessaire.

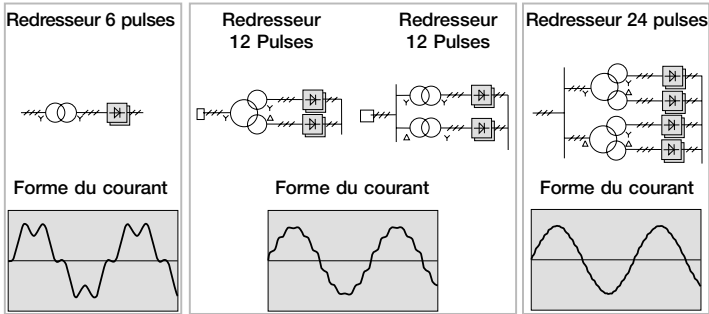


Figure 7.2 Harmoniques de courant réseau avec différents types de redresseur.

7.4 Utilisation d'un redresseur à diodes 12 ou 24 pulses

Le redresseur 12 pulses est réalisé en raccordant en parallèle deux redresseurs 6 pulses pour alimenter un bus continu commun. Côté entrée, les redresseurs sont alimentés par un transformateur à trois enroulements ou par deux transformateurs à deux enroulements. Dans les deux cas, les secondaires des transformateurs sont déphasés de 30°. Avantage de cette solution : côté réseau, certains harmoniques sont en opposition de phase et donc supprimés. En théorie, la composante harmonique de plus faible fréquence vue côté primaire du transformateur est l'harmonique de rang 11.

Inconvénient majeur de cette solution : le recours à des transformateurs de conception spéciale et le surcoût par rapport à un redresseur 6 pulses.

Le principe du redresseur 24 pulses est également illustré à la figure 7.2. Il comporte deux redresseurs 12 pulses en parallèle avec deux transformateurs à trois enroulements dont les enroulements primaires sont déphasés de 30°. Avantage de cette solution : pratiquement tous les harmoniques basse fréquence sont supprimés. Inconvénient : son coût élevé. Dans le cas d'une installation mono-entraînement de forte puissance ou multientraînement importante, un système 24 pulses peut constituer la solution la plus économique avec les distorsions harmoniques les plus faibles.

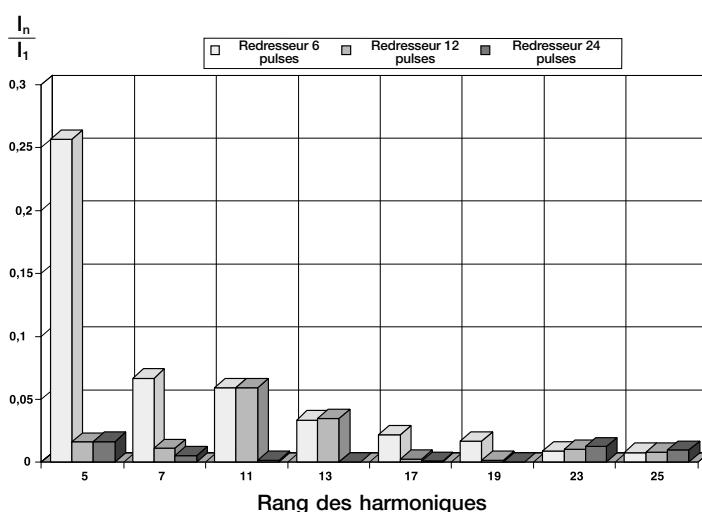


Figure 7.3 Composantes harmoniques avec différents redresseurs.

7.5 Utilisation
d'un
redresseur
contrôlé à
thyristors

Un redresseur contrôlé est réalisé en remplaçant les diodes d'un redresseur 6 pulses par des thyristors. Sachant qu'un thyristor nécessite une impulsion d'allumage pour passer de l'état bloqué à l'état passant, l'angle de phase auquel le thyristor commence à conduire le courant peut être retardé. En retardant l'angle d'allumage de plus de 90°, la tension du bus c.c. devient négative. Cette solution permet le renvoi d'énergie du bus c.c. sur le réseau.

Les configurations standard bus c.c. et onduleur n'autorisent pas le changement de polarité de la tension c.c. et il est plus fréquent de raccorder un autre pont de thyristors en montage antiparallèle avec le premier pour permettre l'inversion du sens du courant. Dans cette configuration, le premier pont conduit en mode moteur et l'autre en mode régénératif.

La forme des ondes de courant d'un redresseur contrôlé est identique à celle du redresseur à diodes 6 pulses, mais sachant qu'il décale l'onde de courant suivant l'angle d'allumage, le facteur de puissance total à charge partielle est assez faible. Ce faible facteur de puissance entraîne un courant apparent élevé et les courants harmoniques absolus sont plus élevés qu'avec un redresseur à diodes.

En plus de ces problèmes, les redresseurs contrôlés provoquent des encoches de commutation sur l'onde de tension réseau. La position angulaire des encoches varie avec l'angle d'allumage.

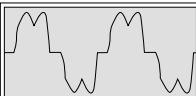
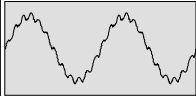
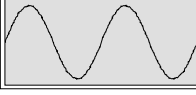
Type de redresseur	TDH courant (%)	TDH tension (%) RSC=20	TDH tension (%) RSC=100	Forme d'ondes de courant
Redresseur 6 pulses	30	10	2	
Redresseur 12 pulses	10	6	1,2	
Redresseur à IGBT	4	8	1,8	
Distorsion en % des valeurs efficaces				

Figure 7.4 Distorsion des différents types de redresseur. Les valeurs peuvent varier d'un cas à l'autre.

7.6 Utilisation d'un pont d'IGBT

L'utilisation d'un pont redresseur constitué de composants à commutation naturelle présente plusieurs avantages et atouts par rapport aux ponts à commutation contrôlée. Tout comme un redresseur contrôlé, cette configuration matérielle autorise à la fois le redressement et la régénération, mais permet, en plus, de régler séparément le niveau de tension c.c. et le facteur de déphasage, quel que soit le sens de circulation du courant.

Les principaux avantages sont :

- fonctionnement sûr en cas de perte réseau.
- Dynamique élevée de la commande de l'entraînement même dans la plage d'affaiblissement de champ.
- Possibilité de générer de la puissance réactive, voire de compenser les courants harmoniques des charges en parallèle
- Courant d'alimentation quasi sinusoïdal avec faible teneur en harmoniques. Les mesures réalisées sur un entraînement avec redresseur IGBT sont illustrées à la figure 7.5. En comparant celle-ci à la figure 7.3, on observe une différence nette. Le pont d'IGBT présente de très faibles harmoniques aux plus basses fréquences mais légèrement plus élevés aux plus hautes fréquences.
- Possibilité d'un "boost" de tension. Dans le cas d'une tension réseau faible, la tension c.c. peut être augmentée pour maintenir la tension moteur au-dessus de la tension d'alimentation.

Le principal inconvénient est le surcoût important lié au pont d'IGBT et au filtre supplémentaire requis.

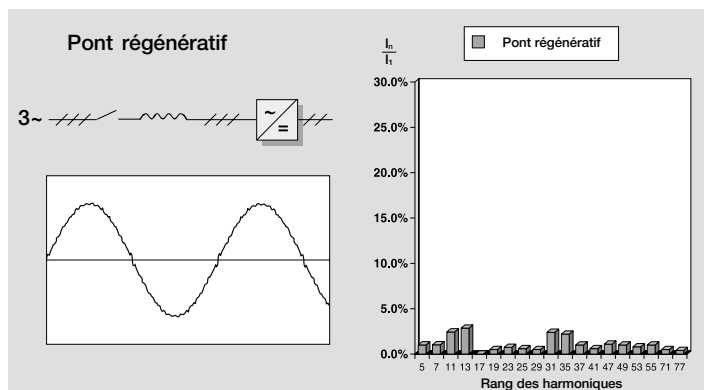


Figure 7.5 Harmoniques de courant réseau dans le pont d'IGBT régénératif.

7.7 Utilisation d'une grosse inductance c.a. ou c.c.

Les harmoniques d'un convertisseur de fréquence à source de tension peuvent être fortement réduits en plaçant une inductance suffisamment grosse côté c.a. ou côté bus c.c. La tendance veut que l'on réduise la taille du convertisseur, tout en réduisant également la taille de l'inductance, voire en n'en mettant aucune. L'incidence de cette inductance est illustrée à la figure 7.6.

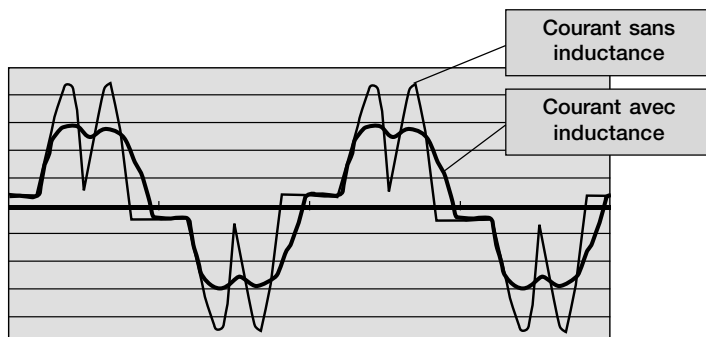


Figure 7.6 Incidence de l'inductance sur le courant réseau.

La figure 7.7 montre l'incidence de la taille de l'inductance c.c. sur les harmoniques. Pour les 25 premiers rangs, le THD minimum théorique est 29%. Cette valeur est pratiquement atteinte lorsque la valeur d'inductance propre est 100 mH divisée par la puissance (kW) du moteur, soit 1 mH pour un moteur de 100 kW (415 V, 50 Hz). L'idéal est une valeur de 25 mH divisée par le nombre de kW du moteur, ce qui donne un THD d'environ 45%. Cela correspond à 0,25 mH pour un moteur de 100 kW.

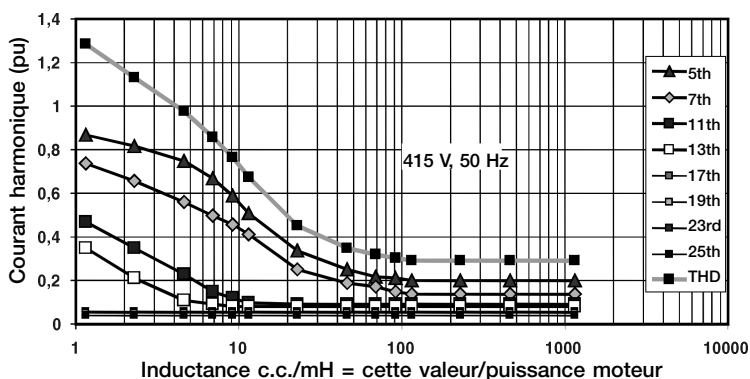


Figure 7.7 Courant harmonique en fonction de l'inductance c.c.

La distorsion de tension avec un niveau de distorsion de courant donné est fonction du rapport de court-circuit R_{sc} de l'alimentation. Plus ce rapport est élevé, plus la distorsion de tension est faible. Cf. figure 7.8.

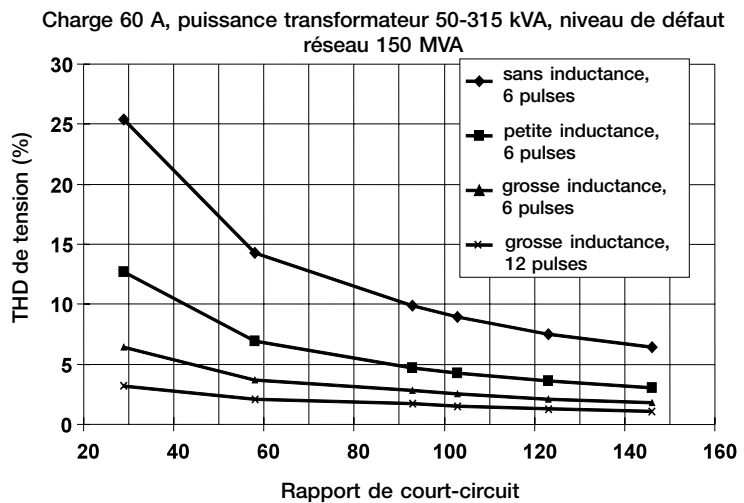


Figure 7.8 Comparatif tension de THD / type de convertisseur de fréquence et taille du transformateur.

La figure 7.9 présente une méthode simple de calcul des tensions harmoniques. Sur le graphique du bas à droite, sélectionnez la puissance du moteur (kW) et ensuite celle du transformateur (kVA) ; déplacez-vous à l'horizontale jusqu'à la diagonale où vous remontez pour vous arrêter à la courbe de votre application. Déplacez-vous enfin vers la gauche (axe y) pour lire le taux de distorsion harmonique en tension.

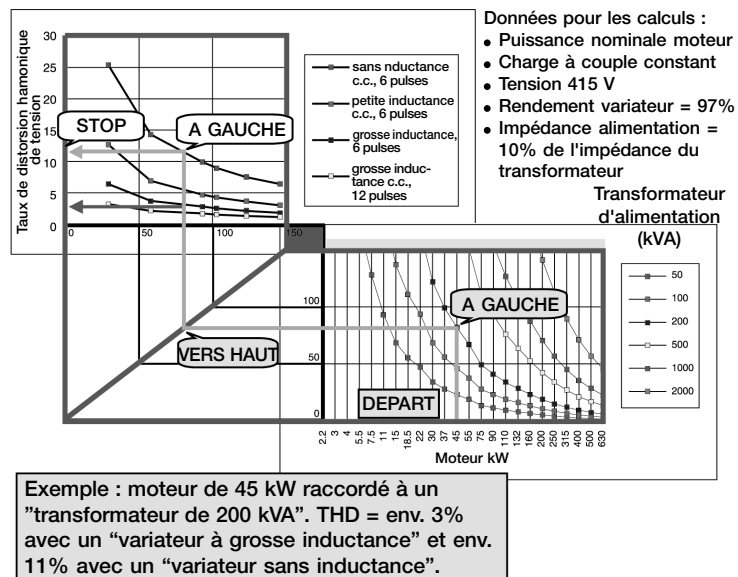


Figure 7.9 Détermination du taux de distorsion harmonique total.

Les résultats des essais en laboratoire sur des variateurs de différentes fabrications sont illustrés à la figure 7.10. Le variateur A avec une grosse inductance c.c. présente la distorsion de courant harmonique la plus faible, les variateurs sans inductance présentent la distorsion la plus élevée.

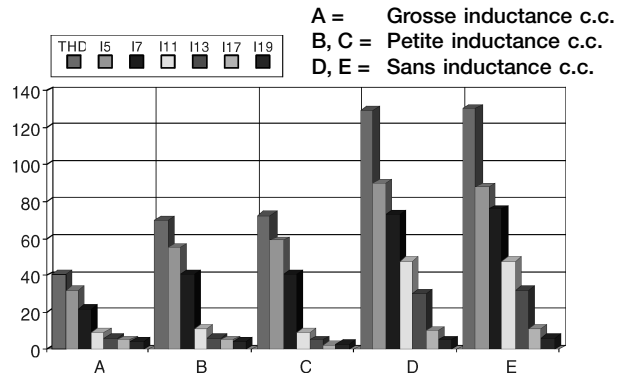


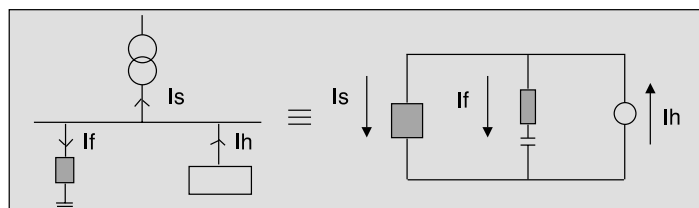
Figure 7.10. Courant harmonique avec différentes inductances c.c.

Chapitre 8 - Autres méthodes de réduction des émissions harmoniques

Le filtrage est une méthode de réduction des émissions harmoniques au sein d'un site industriel où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site. On distingue deux techniques de base : les filtres passifs et les filtres actifs.

8.1 Filtre passif accordé monobranche

Le principe d'un filtre passif accordé monobranche est illustré à la figure 8.1. Ce type de filtre doit être déterminé au droit de la composante harmonique la plus basse où il y a importante génération d'harmoniques dans le réseau. Pour les réseaux qui alimentent essentiellement une charge industrielle, il s'agira probablement de l'harmonique de rang 5. Au-dessus de la fréquence d'accord, les harmoniques sont absorbés, mais en-dessous de cette fréquence, ils peuvent être amplifiés.



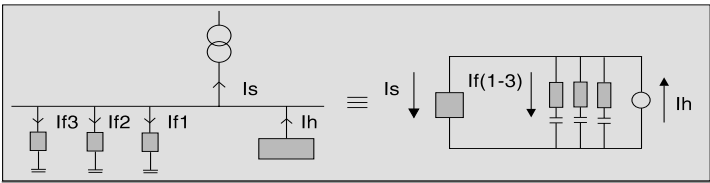
- Désaccordé - fréquence d'accord unique
- Au-dessus de la fréquence d'accord, harmoniques absorbés
- En-dessous de la fréquence d'accord, harmoniques susceptibles d'être amplifiés
- Réduction des harmoniques limitée par surcompensation éventuelle de la fréquence d'alimentation et du réseau lui-même

Figure 8.1 Filtre passif accordé monobranche.

Ce type de filtre est constitué d'une inductance en série avec une batterie de condensateurs, le meilleur emplacement pour le filtre passif étant au plus près des charges génératrices d'harmoniques. Cette solution n'est normalement pas utilisée pour les installations neuves.

8.2 Filtre passif accordé multibranche

Le principe de ce filtre est illustré à la figure 8.2. Il comporte plusieurs branches accordées sur un ou plusieurs harmoniques qui sont en général les fréquences harmoniques de rangs les plus faibles. Le filtre multiple offre une meilleure absorption des harmoniques que les filtres monobranche.



- Capacitif sous la fréquence d'accord/inductif au-dessus
- Meilleure absorption des harmoniques
- Mesures tenant compte de l'amplification des harmoniques par le filtre
- Limité par KVar et réseau

Figure 8.2 Filtre passif accordé multibranche.

Les filtres passifs multibranches sont souvent utilisés pour les gros systèmes d'entraînement à courant continu où un transformateur dédié alimente l'ensemble de l'installation.

8.3 Filtre actif externe

Un filtre passif accordé introduit de nouvelles résonances qui peuvent être à l'origine de problèmes d'harmoniques supplémentaires. Les nouveaux développements en électronique de puissance permettent de réaliser des produits qui peuvent contrôler la distorsion harmonique de manière active. Ces filtres actifs (cf. figure 8.3) compensent les harmoniques présents dans le réseau électrique sur la base des harmoniques générés à tout instant dans le temps.

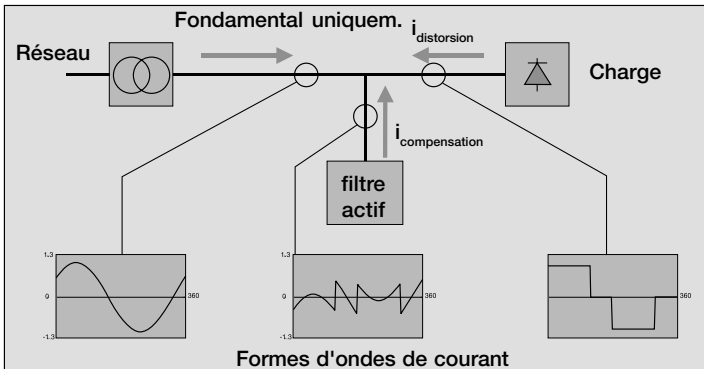


Figure 8.3 Schéma de principe du filtre actif externe.

Le filtre actif compense les harmoniques générés par les charges non linéaires en générant les harmoniques de même rang en opposition de phase comme illustré sur la figure 8.4. Les filtres actifs externes sont la solution la mieux adaptée aux installations comprenant de nombreux variateurs de petite puissance. Ils sont relativement chers par rapport aux autres méthodes.

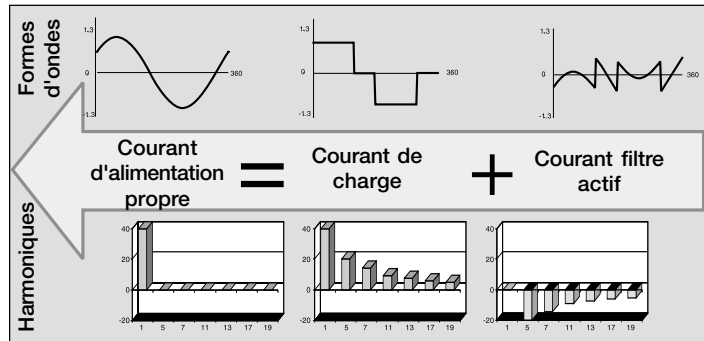


Figure 8.4 Formes d'ondes et harmoniques du filtre actif externe.

Chapitre 9 - Récapitulatif des méthodes d'atténuation des harmoniques

Il existe de nombreuses méthodes pour atténuer les harmoniques au sein même du système d'entraînement ou en externe. Elles présentent toutes des avantages et des inconvénients, et impliquent toutes un surcoût. La meilleure solution sera fonction de la charge totale, de l'alimentation du site et du niveau de distorsion autorisé.

Dans les tableaux suivants, différentes solutions internes sont comparées au système de base sans inductance. La teneur en harmoniques est donnée à 100% de charge. Les éléments de coût sont valables pour des petits entraînements. Pour une configuration multi-entraînement, la solution avec redresseur 12 pulses est beaucoup moins chère.

9.1 Redresseur 6 pulses sans inductance

Coût de fabrication 100%

Composantes de courant harmonique types.

Rang	5	7	11	13	17	19
100%	63%	54%	10%	6,1%	6,7%	4,8%

9.2 Redresseur 6 pulses avec inductance

Coût de fabrication 120%. Self c.a. ou c.c. ajoutée

Composantes de courant harmonique types.

Rang	5	7	11	13	17	19
100%	30%	12%	8,9%	5,6%	4,4%	4,1%

9.3 Redresseur 12 pulses avec auto- transformateur

Coût de fabrication 200%

Composantes de courant harmonique types.

Rang	5	7	11	13	17	19
100%	11%	5,8%	6,2%	4,7%	1,7%	1,4%

9.4 Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement

Coût de fabrication 200%

Composantes de courant harmonique types.

Rang	5	7	11	13	17	19
100%	3,6%	2,6%	7,5%	5,2%	1,2%	1,3%

**9.5 Redresseur
24 pulses avec
deux
transformateurs
à trois
enroulements**

Coût de fabrication 200%
Composantes de courant harmonique types.

Rang	5	7	11	13	17	19
100%	4,0%	2,7%	1,0%	0,7%	1,4%	1,4%

**9.6 Redresseur
actif à IGBT**

Coût de fabrication 250%. Non significatif si freinage
électrique également requis.
Composantes de courant harmonique types.

Rang	5	7	11	13	17	19
100%	2,6%	3,4%	3,0%	0,1%	2,1%	2,2%

Chapitre 10 - Définitions

S: Puissance apparente

P: Puissance active

Q: Puissance réactive

Rsc: Le rapport de court-circuit est défini comme la puissance de court-circuit au PCC divisée par la puissance apparente nominale de l'équipement en question.

$$R_{sc} = S_s / S_n.$$

ω_1 : Pulsation de la composante fondamentale

$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$, où f_1 est la fréquence fondamentale (ex., 50Hz ou 60Hz).

n: Nombre entier $n = 2, 3, \dots \infty$. Les fréquences harmoniques sont définies comme $\omega_n = n \cdot \omega_1$.

I_n : Valeur efficace de la composante harmonique n du courant réseau.

Z_n : Impédance à la fréquence $n \cdot \omega_1$.

% U_n : Composante de tension harmonique en pourcentage de la tension (réseau) fondamentale.

THD: Le taux de distorsion harmonique total du courant d'entrée est défini comme :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

où I_1 est la valeur efficace du courant de la fréquence fondamentale. Le taux THD de la tension peut être calculé de manière similaire. Exemple pour les 25 premiers rangs d'harmoniques avec les valeurs théoriques :

$$THD = \frac{\sqrt{20^2 + 14,3^2 + 9,1^2 + 7,7^2 + 5,9^2 + 5,3^2 + 4,4^2 + 4^2}}{100}$$

$$THD = 29\%$$

PWHD: Le taux de distorsion harmonique partiel pondéré est défini comme :

$$PWHD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}$$

PCC : Point de couplage commun. Dans ce document, désigne le point commun de raccordement au réseau d'alimentation électrique public de l'équipement en question et d'autres équipements. Le PCC est défini différemment dans différentes normes et interprété de manières encore plus diverses dans la littérature. La définition retenue ici est pour nous la plus justifiée en terme technique.

PF : Facteur de puissance défini comme $PF = P/S$ (puissance/ volt-ampère) = $I_1 / I_s * DPF$ (avec le courant sinusoïdal PF égal à DPF).

DPF : Le facteur de déphasage est défini comme $\cos\phi_1$, où ϕ_1 est l'angle de phase entre le courant de fréquence fondamentale prélevé par l'équipement et la composante de fréquence fondamentale de la tension d'alimentation.

Chapitre 11 - Index

A

ABB 6, 10
accès puissance 12
afficheurs des appareils
électroniques 8
alimentation sans interruption 8
atténuation 5, 28

B

boost de tension 21
bus continu commun 19

C

câble d'alimentation 18
calcul 5, 9, 11, 12, 15, 16, 23
calcul de la distorsion 5, 6
charge convertisseur 6
charge moteur 9
charge non linéaire 6, 8, 15, 16
compatibilité électro-magnétique (CEM) 22
composantes harmoniques 7, 19, 22, 25, 26, 30
condensateur c.c. 18
convertisseur 6, 9, 12, 18, 20, 21
courant continu 18
courant rectangulaire 7
courant réseau 6, 18, 21
courants harmoniques 6, 7, 9, 11, 12, 13, 15, 20, 21, 22, 23, 28, 29
coût de fabrication 28, 29

D

démarrateurs électroniques
des moteurs 8
détermination du taux
de distorsion 23
disjoncteur 8
dispositifs électroniques 8
distributeur d'électricité 14
distribution d'électricité 6
données du redresseur 10
DriveSize 9, 10, 11

E

échauffement 8
éclairages électroniques 8
effets 5, 6, 8, 17, 18, 21, 22
émissions harmoniques 6, 8, 9, 12, 14, 15, 16, 19, 23, 26, 30
encoche de commutation 20
entraînement à vitesse
variable 8
Espace Economique Européen (EEE) 12
essais en laboratoire 24
état 11
évaluer les émissions
harmoniques 16

F

facteur de déphasage 21, 31
facteur de puissance 16, 20, 31
filtrage 17, 18, 21, 25
filtrage externe 17
filtre actif 5, 26, 27
filtre passe-bas 18
filtre passif 25, 26
filtre passif accordé 25
filtre passif multibranche 5, 25, 26
fréquence 9, 12, 13, 14, 19, 25, 30, 31
fréquence fondamentale 7, 30, 31

H

harmonique de rang 5 7

I

impédance de source 4, 9
inductance 5, 18, 21, 22, 23, 25, 28
inductance c.a. 21
installation 9, 12, 14, 15, 19, 25, 26
installation du consommateur 14
installation industrielle 12

instance américaine de
normalisation 14
instrument de mesure 8

L

limite de compatibilité 12, 13
limite d'émissions harmoniques
12, 13, 14, 15, 16

M

marquage CE 12
mode redressement 20
mode régénératif 20
modification de la structure 17,
18, 19, 20, 21, 22, 23
montage antiparallèle 20

N

norme 12, 13, 14, 15, 18, 20, 31
norme de produit relative à la
CEM 12

O

ordinateur 8

P

PHD 12
phénomènes harmoniques 6, 7
point de couplage commun 15,
31
pont d'IGBT 20, 21
postes à souder 8
puissance active 14, 30
puissance apparente 30
puissance de court-circuit 14,
16, 17, 30
puissance réactive 21, 30
PWHF 14, 31

R

rapport de court-circuit 23, 30
redresseur 12 pulses 18, 19, 20
redresseur 24 pulses 18, 19

redresseur 5, 6, 7, 17, 18, 19, 20,
28, 29
redresseur 6 pulses 7, 18, 19, 20
redresseur contrôlé 20
redresseur triphasé 6 pulses 7
réduction des harmoniques 17,
25, 26
réseau 10
réseau public 12

S

sélection de l'onduleur 10
sélection du moteur 10
source 6, 8, 9, 21
système d'entraînement de
puissance 12

T

taux de distorsion de puissance
15
taux de distorsion harmonique
total 10, 15, 23, 30
TDD 15
tension 6, 9, 11, 12, 13, 14, 17,
18, 19, 20, 21, 22, 23
tension d'alimentation 6, 21, 31
tension harmonique 23, 30
THD 12, 14, 22, 23, 30
thyristor 17, 19, 20
transformateur 9, 10
transformateur à double
enroulement 19
transformateur à trois
enroulements 19
transformateur d'alimentation
18
transformateur réseau 6

V

valeur d'inductance 17, 18, 22,
23



Siege social

ABB Automation

100, rue de Paris

91342 Massy

Tél: 01 64 47 20 00

Fax: 01 64 47 20 16

Etablissements

ABB Automation

15, rue Sully

69150 Décines Charpieu

Tél: 04 72 05 40 40

Fax: 04 72 05 41 30

ABB Automation

Rue du Général de Gaulle

Champagne sur Seine

77811 Moret sur Loing cedex

Tél: 01 60 74 65 00

Fax: 01 60 74 65 65

Agences

ABB Automation

1109, rue J. Cartier

Immeuble B4

Parc héliopolis/Zone Atlantis

44811 Saint Herblain

Tél: 02 40 38 25 00/01

Fax: 02 40 92 01 23

ABB Automation

Parc d'Activité Europarc

Rue de la Performance

59650 Villeneuve d'Ascq

Tél: 03 20 41 42 00

Fax: 03 20 41 42 09

Internet: <http://www.abb.com/motors&drives>

