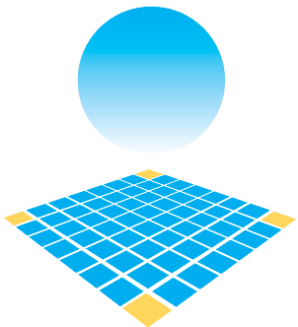


Médiathèque



INTRODUCTION À L'ÉLECTROTECHNIQUE ET À L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE



Université
Montpellier II

Professeur Christian GLAIZE
Université Montpellier 2
Laboratoire d'Électrotechnique de Montpellier
Case Courrier 079
Place Eugène Bataillon
34095 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél : 04 67 14 34 17 - Fax : 04 67 04 21 30
E-mail : glaize@univ-montp2.fr



IUT de Nîmes

AVANT-PROPOS

*Dans le cadre de la mutualisation des enseignements
proposé par la Médiathèque e-EEA du Club EEA,
je serais très heureux que des collègues me fassent part de leurs remarques
voire actualisent certaines données
afin d'améliorer ce texte
qui deviendrait ainsi une œuvre collective.*

SOMMAIRE

CHAPITRE 1. INTRODUCTION À L'ÉLECTROTECHNIQUE	8
CHAPITRE 2. PLACE DE L'ÉLECTROTECHNIQUE EN FRANCE	11
2.1. PRODUCTION ÉLECTRIQUE EN FRANCE	11
2.2. DÉTAILS DES CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES EN FRANCE	13
2.3. PERSONNES EMPLOYÉES DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION ÉLECTRIQUE EN FRANCE	15
2.4. ÉVOLUTION DES FACTURATIONS DU SECTEUR CONSTRUCTION ÉLECTRIQUE EN FRANCE de 1991 à 1996	15
2.5. ÉVOLUTION DE LA BALANCE COMMERCIALE EXTÉRIEURE FRANÇAISE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION ÉLECTRIQUE de 1991 à 1996	16
2.6. PRINCIPALES INDUSTRIES DU SECTEUR DU GÉNIE ÉLECTRIQUE	17
Grands ensembliers	17
Autres ensembliers de stature internationale	17
Fabricants de composants électrotechniques de stature internationale	17
Équipementiers automobiles	18
Construction ferroviaire	18
Électroménager, Électronique Grand Public,...	18
Secteurs public et parapublic	18
CHAPITRE 3. INTRODUCTION À L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE	19
3.1. DÉFINITIONS	19
3.2. FONCTIONS DE BASE ET TERMINOLOGIE DES CONVERTISSEURS STATIQUES	20
3.2.1. Réversibilité des convertisseurs	20
3.2.2. Conversion alternatif-continu	21
3.2.3. Conversion continu-alternatif	21
3.2.4. Conversion continu-continu	22
3.2.5. Conversion alternatif-alternatif	22

3.3. ASSOCIATIONS DE FONCTIONS DE BASE - CASCADE DE CONVERTISSEURS	23
3.4. EXEMPLES D'APPLICATIONS DES CONVERTISSEURS STATIQUES	25
3.4.1. Applications domestiques	25
3.4.2. Locaux commerciaux et tertiaires	26
3.4.3. Applications industrielles	26
3.4.4. Société	26
3.4.5. Télécommunications	26
3.4.6. Aéronautique et Spatial	27
3.4.7. Transports terrestres et marins	27
3.4.8. Compagnies de production et de distribution de l'électricité	28
3.4.9. Espaces culturels et de loisirs (Monuments, Scènes, Théâtres, Discothèques,...)	28
3.4.10. Appareils de laboratoires	28
3.4.11. Médical	28
3.5. GAMME DE PUISSANCE DES CONVERTISSEURS STATIQUES et exemples d'applications	29
3.6. CONSTITUTION DES CONVERTISSEURS STATIQUES	37
3.6.1. Caractéristiques des convertisseurs statiques	37
3.6.2. Intérêt d'un dispositif de conversion d'énergie à pertes minimales.	37
Gradation par rhéostat	38
Gradation par autotransformateur à rapport variable	38
Gradation par convertisseur statique	39
3.6.3. Composants utilisables	40
Exemple : calcul de la puissance instantanée pour un condensateur	41
3.7. MOYENS D'ÉTUDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES	43
3.7.1. Schémas partiels de fonctionnement	43
Exemple : Schémas partiels de fonctionnement d'un hacheur dévolteur sur charge R, L, E.	44
3.7.2. Détermination des conditions de fin d'étapes et des successions de d'étapes	46
Exemple : Détermination des conditions de fin d'étapes sur un hacheur dévolteur	46
3.7.3. Calcul des grandeurs	47
Exemple de calcul de valeurs moyennées	48
Exemples de calculs à l'aide de SIMUL	49
CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE	56
4.1. ÉLECTROTECHNIQUE	56
4.1.1. Ouvrages de base	56
4.1.2. Autres ouvrages traitant de points plus spécifiques	56
4.1.3. Autres publications	57

4.2. ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE	57
4.2.1. Ouvrages de base	57
4.2.2. Polycopiés d'école	57
4.2.3. Autres ouvrages traitant de points plus spécifiques	58
4.3. VARIATION DE VITESSE DES MACHINES ÉLECTRIQUES	58
4.4. ALIMENTATIONS À DÉCOUPAGE	59
4.5. AUTOMATIQUE pour Électrotechniciens	59
4.6. COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM)	59
4.7. DIVERS	60

CHAPITRE 1. INTRODUCTION À L'ÉLECTROTECHNIQUE

Étymologiquement, l'Électrotechnique est l'étude¹ des applications techniques de l'électricité. En France, on réserve plutôt ce terme aux applications qui mettent en jeu plutôt une énergie qu'un signal. En France toujours, on l'appelle aussi Génie Électrique. Son domaine d'intervention est la production, le transport, la distribution, le traitement, la transformation², la gestion et l'utilisation de l'énergie électrique.

Si l'électricité est déjà connue des Grecs, l'Électrotechnique a commencé à exister avec la domestication de l'énergie électrique. On situe ce moment à l'invention de la dynamo par Zénobe GRAMME en 1869.

L'énergie électrique est invisible (avec les dangers que cela peut occasionner) mais omniprésente et indispensable à notre civilisation. Imaginons les conséquences d'une grève des électrons... L'Électrotechnique est une composante majeure du développement de notre monde.

L'Électrotechnique se rencontre partout : dans l'industrie, mais aussi dans l'automobile ou chez soi. Elle est tellement présente qu'elle passe inaperçue. On remarque sa présence universelle quand... elle n'est plus disponible (panne, grève,...).

En traitement de l'énergie, on rencontre des alimentations de plus en plus sophistiquées sur tous les appareils électriques (alimentations à découpage dans les ordinateurs, téléviseurs, chaînes haute-fidélité,...). Dans ce type d'application, la puissance unitaire de chaque appareil tend à diminuer. Mais le nombre d'unités en service est en constante augmentation. Dans les applications où l'on désire convertir l'énergie électrique en énergie mécanique (ou vice-versa), on utilise des moteurs ou génératrices. On peut compter le nombre de moteurs dans une automobile (démarrateur, ventilateur de radiateur, essuie-glace avant et arrière, essuie phares, lève-glaces, ventilateur d'air chaud, d'air froid, pompes de lave-glace,...) ou chez soi (aspirateur, machines à laver le linge et la vaisselle - tambour ou pompe de lavage, pompe de vidange, programmateur -, robots ménagers, aérateurs, ventilateurs, hottes aspirantes, rasoirs électriques, magnétophones, magnétoscopes, platines disques ou compacts (rotation, tiroir), appareils photos (avance du film, mise au

¹ On entend par "étude", le développement et l'application de concepts, de méthodes, de moyens et d'outils, tant théoriques qu'expérimentaux, qui permettent l'analyse de matériels et situations existants ainsi que la conception de nouveaux dispositifs.

² L'énergie électrique peut être issue de ou transformée en une autre forme d'énergie (mécanique, thermique, chimique, lumineuse,...).

point,...), machines de bricolage,... Contrairement aux convertisseurs statiques utilisés seuls, la puissance demandée aux moteurs a tendance à augmenter et le nombre de moteurs s'accroît. De plus, les machines sont de plus en plus utilisées en association avec des convertisseurs ce qui leur donne une plus grande souplesse d'utilisation grâce à la vitesse variable. C'est le cas sur les perceuses, en électroménager (lave-linge, aspirateur,...).

L'Électrotechnique se rencontre aussi dans l'industrie. Les usines emploient un très grand nombre de moteurs et de variateurs pour la ventilation, le pompage, l'entraînement à vitesse variable de machines (machines-outils, laminoirs,...).

Le monde des transports utilise aussi beaucoup l'énergie électrique aussi bien dans le domaine ferroviaire (TGV³, motrices classiques, métros) que dans le domaine du transport urbain (tramways, trolleybus). L'aéronautique fait aussi un large appel à l'électricité (réseau de bord 400 Hz, commandes électriques d'Airbus A320⁴,...). Le développement du véhicule électrique urbain permettra de diminuer la pollution des zones fortement urbanisées.

Le domaine de l'Électrotechnique est très vaste. Les actionneurs les plus petits ont des puissances de l'ordre du nW (micromoteurs électrostatiques dans les artères) ou de l'ordre du μ W (montre à quartz). Les installations les plus importantes ont des puissances de quelques milliers de MVA (centrales de production électrique, liaisons haute tension courant continu,...).

La particularité de l'Électrotechnique par rapport à l'Électronique, l'Automatique et l'Informatique vient du fait que la première s'intéresse essentiellement au traitement et à la conversion de l'énergie électrique plutôt qu'au traitement du signal (ou de l'information). La figure 1 illustre cette complémentarité.

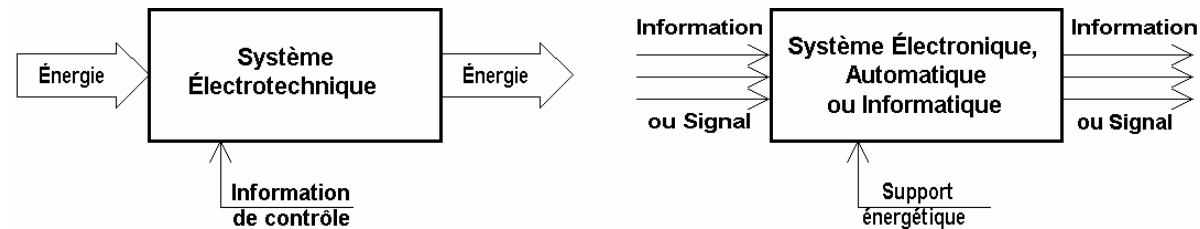


Fig. 1 : Complémentarité de l'Électrotechnique par rapport à l'Électronique, l'Automatique et l'Informatique

³ La puissance de la chaîne de traction d'un TGV est de l'ordre de 6 MW.

⁴ Les besoins énergétiques à bord des avions sont de plus en plus importants. En 1959, une Caravelle disposait de 27 kW (en continu). En 1972, un Airbus A300 a une puissance installée de 270 kVA (en alternatif 400 Hz). Les avions civils du futur demanderont de 300 à 600 kVA.

Cette différence impose une manière différente de percevoir et de gérer les phénomènes électriques. Bien qu'utilisant les mêmes lois physiques que l'Électronique, l'Électrotechnique a ses propres hypothèses simplificatrices, ses propres développements, ses propres raisonnements qui sont spécifiques à son domaine.

Cependant, tous ces domaines se rejoignent dès que l'on doit considérer les problèmes d'évacuation de chaleur, de performances massiques ou volumiques, de pollution électromagnétique,...

En conclusion, on peut noter que l'Électrotechnique d'aujourd'hui est une science pluridisciplinaire au carrefour de :

- l'Électrotechnique traditionnelle (machines tournantes, transformateurs),
- l'Électronique de Puissance (convertisseurs statiques),
- l'Électronique du signal (composants, commandes),
- l'Automatique et l'Informatique (commande d'ensembles),
- la Physique du Solide (étude interne des composants),
- la Thermique (évacuation des pertes),
- la Mécanique (charges entraînées),
- l'Électrochimie (piles et accumulateurs),
- la Physique en général (compréhension des processus, choix des capteurs).

Toutes ces sciences doivent être simultanément utilisées lorsqu'il s'agit de concevoir des systèmes aux caractéristiques poussées.

Note : l'Électrotechnique est à la fois une science et une technologie encore que ces deux termes ne soient pas si éloignés, la technologie étant (Petit Larousse Illustré 2000) l'ensemble de savoirs et de pratiques fondé sur des principes scientifiques dans un domaine technique.

CHAPITRE 2. PLACE DE L'ÉLECTROTECHNIQUE EN FRANCE

2.1. PRODUCTION ÉLECTRIQUE EN FRANCE

En 2002, la production annuelle d'énergie électrique par EdF en France⁵ s'est élevée à 481,2 milliards de kWh (481,2 TWh). 416,5 TWh ont été produits par des centrales nucléaires (58 réacteurs nucléaires), 44,1 TWh par des centrales hydrauliques et 20,6 TWh par des centrales thermiques à flamme (18 tranches au charbon, 8 au fuel, 4 au gaz, 7 turbines à combustion⁶). EdF a exporté 93,7 TWh.

En 2002, la capacité de production totale du groupe EdF est de 121 136 MW (121,136 GW) dont 117 462 en Europe. Cette capacité se décompose en 54 % par les centrales nucléaires, 19,4 % par les centrales hydrauliques, 26,4 % par les centrales thermiques à flamme et 0,2 par les énergies renouvelables (EnR).

La part de production d'énergie éolien est faible. En 2001, ont été mis en service les centrales de Widehem dans le Nord Pas de Calais (4,5 MW et 6 aérogénérateurs) et de Petit Canal en Guadeloupe (3,3 MW).

À titre de comparaison, les besoins en énergie électrique de la population et de l'industrie de la Martinique s'élevaient, en 1993, à 137 MW. En trois ans, ils ont progressé de plus de 30 % pour atteindre 180 MW.

En 2002, EdF⁷ a 31 millions de clients résidentiels et 2,3 millions de clients des secteurs tertiaire et industriels (avec 3,6 millions de points de livraison).

⁵ Source www.edf.fr et http://www.edf.fr/html/RA_2001/intro4.htm.

⁶ Sans intermédiaire vapeur.

En 1999, son chiffre d'affaires s'est élevé à 32 milliards d'euros (210 milliards de francs).

⁷ Comparaison entre deux entreprises de service de taille comparable : Électricité de France et France Telecom.

	Électricité de France	France Telecom
Nombre de salariés	112 729 en 2001 pour la maison-mère	206 184 dont 145 264 en France en 2001
Nombre d'abonnés	31 millions en 2002	43,2 en mobile en 2001 (dont 17,8 en France), 40 millions en filaire en 2001 (dont 34 en France), 6,3 millions sur Internet (dont 3 en France), 2,2 millions sur le câble (dont 0,8 en France).
Chiffre d'affaires mondial	40,7 milliards d'euros en 2001	43 milliards d'euros en 2001 dont 15,4 hors de France.

2.2. DÉTAILS DES CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES EN FRANCE

Chiffres extraits d'une étude réalisée pour l'ADEME⁸ par l'INESTENE⁹, classés par usage et portant sur l'année 1995.

Usages	Consommation		
	en GWh	en % de la consommation du secteur	en % de la consommation totale
Industrie	154 985		41,9 %
Moteurs	78 763	50,8 %	21,3 %
Usages thermiques	20 793	13,4 %	5,6 %
Combustibles minéraux et fossiles	17 694	11,4 %	4,8 %
Électrolyse	13 124	8,5 %	3,6 %
Distribution d'énergies	10 055	6,5 %	2,7 %
Éclairage	4 392	2,8 %	1,2 %
Chaudière électrique	4 092	2,6 %	1,1 %
Chauffage urbain	1 371	0,9 %	0,4 %
Chauffage	718	0,5 %	0,2 %
Autres usages	3 983	2,6 %	1,1 %

⁸ ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.

⁹ INESTENE : Institut d'Évaluation des Stratégies sur l'Énergie et l'Environnement en Europe.

Habitat	113 770		30,8 %
Chauffage	44 916	39,5 %	12,2 %
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	18 478	16,2 %	5,0 %
Froid	15 864	13,9 %	4,3 %
Éclairage	13 649	12,0 %	3,7 %
Lave-linge, lave-vaisselle	8 199	7,2 %	2,2 %
Cuisson	4 499	4,0 %	1,2 %
Téléviseurs	3 686	3,2 %	1,0 %
Sèche-linge	1 352	1,2 %	0,4 %
Fer à repasser, aspirateur	1 288	1,1 %	0,3 %
Autres usages	1 840	1,6 %	0,5 %

Tertiaire	82 222		22,3 %
Éclairage des locaux	21 061	25,6 %	5,7 %
Chauffage	20 465	24,9 %	12,2 %
Ventilation	9 158	11,1 %	2,5 %
Eau Chaude	5 711	6,9 %	1,5 %
Éclairage public	4 500	5,5 %	1,2 %
Cuisson	4 131	5,0 %	1,1 %
Information	3 243	3,9 %	0,9 %
Froid	2 911	3,5 %	0,8 %
Ascenseurs	2 830	3,4 %	0,8 %
Climatisation	2 519	3,1 %	0,7 %
Blanchisserie	404	0,5 %	0,1 %
Autres usages	5 289	6,4 %	1,4 %
Artisanat - BTP	6 132		1,7 %
Transports	9 730		2,6 %
Agriculture	2 620		0,7 %
TOTAL	369 459		100,0 %

2.3. PERSONNES EMPLOYÉES DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION ÉLECTRIQUE EN FRANCE

En 1994, 62 100 personnes travaillaient en France dans le domaine de la construction électrique (Chiffre extrait d'une documentation GIMELEC¹⁰). Ce chiffre est à comparer aux 116 462 salariés de EdF en 1997.

Fin 1998, ALSTOM (Énergie, transports, transmission et distribution de l'énergie électrique, construction navale,...), c'est 110.000 employés dans 60 pays et un chiffre d'affaires de 14 milliards d'euros.

2.4. ÉVOLUTION DES FACTURATIONS DU SECTEUR CONSTRUCTION ÉLECTRIQUE EN FRANCE de 1991 à 1996

Chiffres (en millions de francs HT) extraits de documentations GIMELEC

Groupes de matériels	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Matériels de production, de transport de l'énergie électrique et d'installations industrielles de grande puissance	5 147	5 517	5 619	5 365	5 742	4 694
Matériels de distribution de l'énergie électrique	5 145	5 445	5 194	5 135	5 167	4 935
Constituants industriels	17 434	16 871	14 435	16 805	18 353	18 450
Équipements industriels	12 168	11 815	11 005	11 731	14 359	15 140
Équipements électriques de traction	2 389	3 123	2 919	3 023	2 383	1 946
Groupes électrogènes	1 747	1 977	2 368	2 502	2 919	2 756
Isolateurs et matériels spéciaux	774	852	825	776	731	626
TOTAL	44 804	45 600	43 365	45 337	49 654	48 547

Ce chiffre d'affaires de 48,547 milliards de francs est à comparer aux 186,5 milliards de francs de chiffre d'affaires de EdF en 1997.

¹⁰ GIMELEC : Groupement des industries de matériels d'équipement électrique et de l'électronique industrielle associée.

2.5. ÉVOLUTION DE LA BALANCE COMMERCIALE EXTÉRIEURE FRANÇAISE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION ÉLECTRIQUE de 1991 à 1996

Données (en millions de francs HT) extraites de documentations GIMELEC.

Dans chaque case, le chiffre du haut (+) correspond à une exportation de matériel. Le chiffre du bas (-) correspond à une importation de matériel.

Groupes de matériels	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Matériels de production, de transport de l'énergie électrique et d'installations industrielles de grande puissance	+ 2 297 - 198	+ 2 493 - 262	+ 2 768 - 212	+ 2 910 - 217	+ 2 777 - 278	
Matériels de distribution de l'énergie électrique	+ 4 719 - 1 105	+ 5 367 - 1 050	+ 3 079 - 669	+ 3 002 - 588	+ 3 316 - 605	+ 7 008 - 1 974
Isolateurs et matériels spéciaux	+ 596 - 497	+ 750 - 539	+ 777 - 463	+ 754 - 621	+ 967 - 688	
Groupes électrogènes	+ 716 - 320	+ 700 - 351	+ 726 - 474	+ 834 - 495	+ 965 - 459	
Équipements industriels	+ 4 061 - 3 086	+ 4 297 - 3 040	+ 3 954 - 3 067	+ 4 716 - 3 522	+ 5 207 - 4 315	+ 5 096 - 4 193
Constituants industriels	+ 14 207 - 9 220	+ 15 760 - 9 993	+ 17 572 - 10 189	+ 19 181 - 9 872	+ 20 430 - 11 006	+ 22 025 - 12 379
Équipements électriques de traction	+ 966 - 283	+ 1 856 - 257	+ 1 232 - 542	+ 1 463 - 1 191	+ 495 - 459	
TOTAL	+ 27 562 - 14 709	+ 31 223 - 15 492	+ 30 108 - 15 616	+ 32 681 - 16 507	+ 33 998 - 17 505	+ 34 129 - 18 546

Les chiffres précédents montrent :

- 1/ que le secteur de la construction électrique exporte environ deux fois plus qu'il n'importe,
- 2/ que plus de la moitié de la production est exportée.

2.6. PRINCIPALES INDUSTRIES DU SECTEUR DU GÉNIE ÉLECTRIQUE

Grands ensembleurs

ALSTOM et ses nombreuses filiales (voir § 2.3.)

ABB

ANSALDO

GENERAL-ELECTRIC

mitsubishi

SIEMENS

TOSHIBA

Autres ensembleurs de stature internationale

SCHNEIDER ELECTRIC (fusion des sociétés MERLIN-GÉRIN, SQUARE D
et TÉLÉMÉCANIQUE)

MATRA

AEROSPATIALE

GIAT Industries

WESTINGHOUSE

Fabricants de composants électrotechniques de stature internationale

ST Microelectronics

(composants semiconducteurs)

SEMIKRON

(composants semiconducteurs)

GEC-PLESSEY

(composants semiconducteurs)

HARRIS (composants semiconducteurs)

SIEMENS

MOTOROLA

(composants semiconducteurs)

SCHNEIDER ELECTRIC

(appareillage électrique)

ALSTOM T&D (appareillage électrique de réseau)

HAEFELY (appareillage électrique haute tension).

LEGRAND (appareillage électrique).

PIRELLI (câbles)

LEROY-SOMER (moteurs), filiale de l'américain EMERSON.

CROUZET AUTOMATISMES

(composants pour automatismes). Groupe SEXTANT AVIONIQUE.

AUXILEC (moteurs)

PRECILEC

SAGEM

FRANCE TRANSFO (transformateurs)

HAZEMEYER

JEUMONT-SCHNEIDER TRANSFORMATEURS (transformateurs)

MGE UPS SYSTEMS (onduleurs)

SOCOMEK (Appareillage électrique, Électronique de Puissance)
FERRAZ SHAWMUT (fusibles)
SOULÉ (parafoudres)
SAFT (piles, batteries)
BOLLORÉ
OLDHAM
(batteries stationnaires, de traction
CEAC et FULMEN (accumulateurs).
ENTRELEC INDUSTRIES
JEUMONT-INDUSTRIE

Équipementiers automobiles

VALEO
BOSCH

Construction ferroviaire

ALSTOM
MATRA
ABB

Électroménager, Électronique Grand Public,...

SOMFY

Secteurs public et parapublic

EDF
SNCF
RATP

AMP-SIMEL
MAEC
MECELEC INDUSTRIES
SAREL
SEDIVER
SEW-USOCOME
SPIE-ENERTRANS
TOSHIBA
TRANSFIX TOULON

DELFI (DELCO)
MAGNETTI-MARELLI

ANSALDO
GENERAL-ELECTRIC
SIEMENS

SEB et sa filiale ROWENTA

COGEMA
FRAMATOME

CHAPITRE 3. INTRODUCTION À L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

3.1. DÉFINITIONS

Définition : L'Électronique de Puissance est la branche de l'Électrotechnique qui a pour objet l'étude de la conversion statique d'énergie électrique

(notamment les structures, les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement¹¹,...).

L'Électronique de Puissance traite l'énergie électrique par voie statique. Elle permet :

- une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique,
- une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique,
- une discrétion par une réduction des masses et des volumes ainsi que par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseurs statiques.

Définition : Un convertisseur statique est un dispositif qui transforme de l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge.

¹¹ C'est, en particulier, le domaine de la Compatibilité Électro-Magnétique (CEM).

3.2. FONCTIONS DE BASE ET TERMINOLOGIE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateur) soit sous forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu, alimentation par caténaire,...). La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu. On définit donc quatre classes de convertisseurs transformant directement l'énergie électrique. Ce sont les "fonctions de base" des convertisseurs statiques. Ces fonctions de base peuvent toutes être remplies par des **convertisseurs monoétages**.

3.2.1. Réversibilité des convertisseurs

Traitant de l'énergie, une notion importante en Électronique de Puissance (et en Électrotechnique) est la notion de réversibilité.

Définitions (fig. 2) :

- *Un convertisseur statique est dit réversible lorsque l'énergie peut transiter (en général, être contrôlée) de manière bidirectionnelle, c'est-à-dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes.*
- *Un convertisseur non-réversible transfère (et convertit) l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice. L'énergie ne peut pas transiter dans l'autre sens.*

Certains convertisseurs statiques sont naturellement réversibles (onduleurs,...). D'autres sont naturellement non-réversibles (redresseur à diodes,...). Suivant le schéma de leur structure, certains pourront être réversibles ou non (hacheur,...).

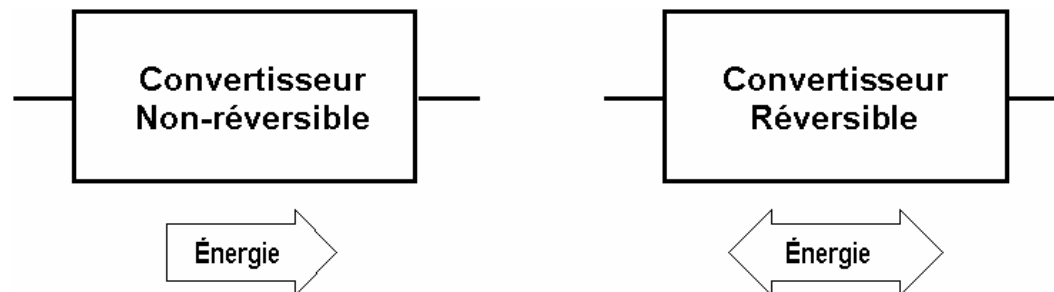


Fig. 2 : Réversibilité (et non-réversibilité) des convertisseurs statiques

3.2.2. Conversion alternatif-continu

Le convertisseur qui transforme l'énergie électrique délivrée sous forme alternative¹² pour alimenter une charge en continu est le "**redresseur**" (fig. 3).

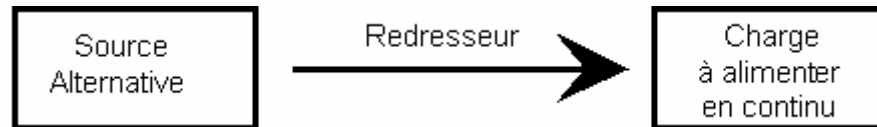


Fig. 3 : Convertisseur alternatif-continu : redresseur

Il est le plus souvent alimenté par un réseau à fréquence industrielle éventuellement polyphasé. Mais il peut aussi être alimenté en haute fréquence. La tension (ou le courant) de sortie peut être ou non réglable par rapport à la grandeur d'entrée (tension ou courant).

Il existe des redresseurs monophasés, triphasés et polyphasés. Ils peuvent être constitués de diodes ou de diodes et de thyristors (ils sont dits mixtes). Ils ne sont alors pas **réversibles** en énergie. C'est-à-dire que l'énergie ne peut être transférée que de la source alternative vers la charge continue. Les redresseurs réversibles sont composés uniquement de thyristors.

3.2.3. Conversion continu-alternatif

Le convertisseur qui transforme l'énergie électrique délivrée sous forme continue pour alimenter une charge en alternatif est "**l'onduleur**" (fig. 4).

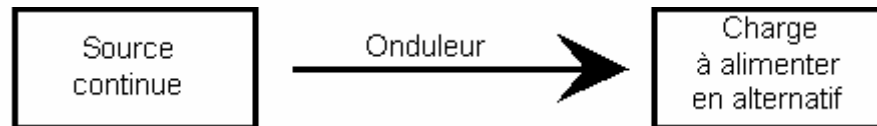


Fig. 4 : Convertisseur continu-alternatif : onduleur

¹² Le terme alternatif est ici improprement employé. On devrait dire bidirectionnelle. De même, le terme continu devrait être remplacé par unidirectionnelle.

La charge alternative peut être de plusieurs types. Si elle peut aussi délivrer de la puissance et présente des forces électro-motrices (réseau de distribution électrique, machine synchrone, alternateur,...), l'onduleur pourra avoir une structure identique à celle d'un redresseur. C'est le fonctionnement réversible d'un même convertisseur. On parle alors "d'**onduleur assisté**" (ou "non-autonome").

Si la charge est constituée par un circuit oscillant, on pourra utiliser les propriétés de ce dernier pour adapter la structure de l'onduleur. Il prend alors le nom "d'**onduleur à résonance**".

Dans tous les autres cas, on emploie un "**onduleur autonome**" qui ne suppose aucune caractéristique particulière de la charge.

Remarque : il ne faut pas confondre le terme onduleur, employé ici pour désigner un convertisseur continu-alternatif, et le terme onduleur employé pour le dispositif de sauvegarde informatique qu'on devrait appeler ASI (Alimentation Sans Interruption) ou UPS (Uninterruptible Power Supply).

3.2.4. Conversion continu-continu

Le convertisseur qui transforme l'énergie électrique délivrée sous forme continue pour alimenter une charge en continu est le "**hacheur**" (fig. 5).

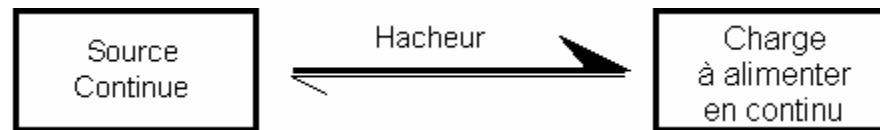


Fig. 5 : Convertisseur continu-continu : hacheur

Le hacheur règle la tension ou le courant appliqué à la charge. Il peut être réversible ou non.

3.2.5. Conversion alternatif-alternatif

La conversion de l'énergie électrique délivrée sous forme alternative pour alimenter une charge en alternatif peut se faire avec ou sans changement de fréquence. Dans le premier cas, on parle de "**cycloconvertisseur**". Dans le second cas, on parle de "**gradateur**" (fig. 6).

Le schéma d'un cycloconvertisseur triphasé-triphasé comprend 36 thyristors (il peut être considéré comme la juxtaposition de 3 redresseurs tête-bêche, soit 3*2 ponts à 6 thyristors). Il n'est quasiment utilisé que pour des puissances très importantes (> 1 MVA).

Le gradateur est un convertisseur de structure extrêmement simple. Il est principalement utilisé en éclairage (lampadaire halogène, éclairage de scène, discothèque,...) et sur moteur universel (perceuse, aspirateur,...) car, pour ces applications, la fréquence des courants d'alimentation n'a que peu d'importance. Il est aussi utilisé sur des moteurs asynchrones à cage pour de la variation de vitesse industrielle et domestique économique en pompage et ventilation.

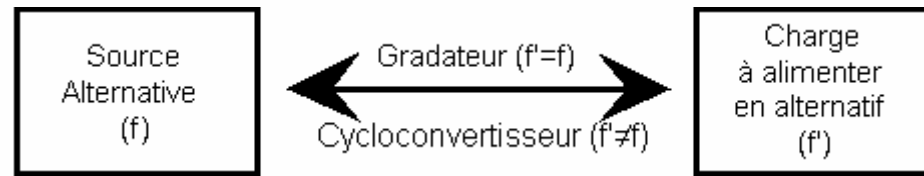


Fig. 6 : Convertisseur alternatif-alternatif

3.3. ASSOCIATIONS DE FONCTIONS DE BASE - CASCADE DE CONVERTISSEURS

La transformation de l'énergie peut aussi se faire par une association en cascade de plusieurs convertisseurs monoétages. Si le rendement diminue, on peut cependant en tirer plusieurs avantages. On peut ainsi découpler diverses fonctions. Le nombre de combinaisons possibles est infini. On peut citer quelques exemples particuliers.

Alimentation à découpage. À partir du secteur alternatif, une alimentation d'ordinateur ou de téléviseur doit assurer, pour une puissance de l'ordre d'une centaine de watts, les fonctions suivantes : redresser, abaisser, isoler, délivrer plusieurs sorties, "filtrer", réguler les tensions de sortie. La fonction isoler impose l'utilisation d'un transformateur. Ce transformateur permet d'assurer aussi la fonction abaisser et fournit aisément plusieurs sorties.

La solution ancienne (encore utilisée pour les faibles puissances, i.e. quelques watts) utilise un transformateur 50 Hz. Chaque secondaire est suivi d'un redresseur et, éventuellement, d'un régulateur linéaire. La réalisation est alors lourde (transformateur 50 Hz) et d'un rendement peu élevé¹³ (régulateur linéaire). Sa structure est dessinée figure 7).

¹³ Ce qui est une raison supplémentaire qui impose un transformateur lourd. Plus le rendement est faible, plus le transformateur doit être dimensionné de manière importante pour fournir une puissance de sortie donnée puisqu'il doit fournir puissance de sortie et pertes.

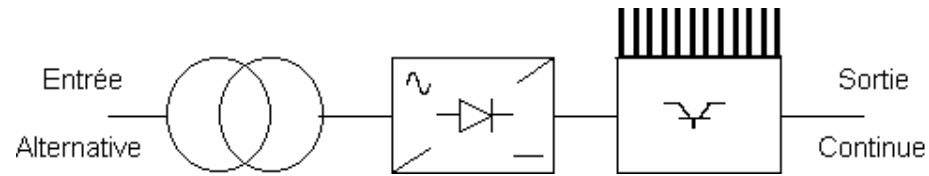


Fig. 7 : Alimentation linéaire

Pour diminuer la taille du transformateur¹⁴, il faut utiliser un composant fonctionnant à plus haute fréquence (généralement entre quelques dizaines ou centaines de hertz). Il est alors nécessaire d'utiliser la cascade redresseur - onduleur autonome ou à résonance - redresseur (fig. 8). La régulation se fait simplement par contrôle de l'onduleur qui fonctionne en découpage donc avec un bon rendement. Il est même possible de réaliser une absorption de courant sinusoïdale sur le réseau, propriété impossible à obtenir avec une structure sans électronique de puissance.

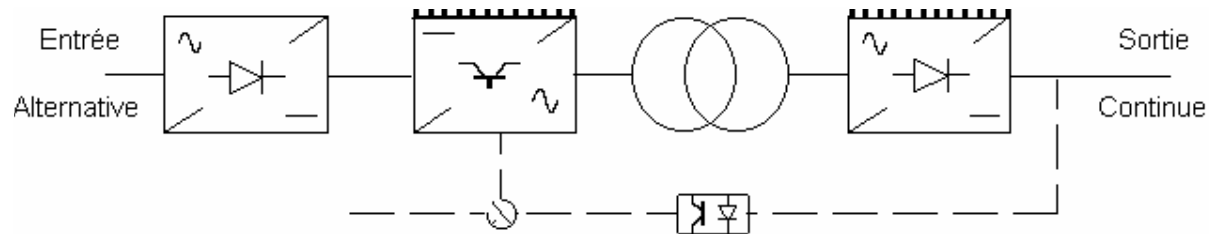


Fig. 8 : Alimentation à découpage à isolation galvanique

¹⁴ Relation de Boucherot (voir le cours sur la bobine à noyau de fer, qui précède l'étude du transformateur) : $U = 4,44.N.f.S.B_m$.

Variateur de vitesse pour machine asynchrone. Pour être d'utilisation universelle, la variation de vitesse d'une machine asynchrone demande une alimentation à fréquence et tension variables. À partir du réseau de distribution électrique à fréquence et tension fixes, on peut utiliser une cascade redresseur - onduleur autonome (fig. 9). Le redresseur transforme l'énergie alternative en énergie continue en absorbant le minimum de puissance réactive au réseau. En commandant les interrupteurs de l'onduleur en modulation de largeur d'impulsions (MLI), on règle la tension et la fréquence de sortie. Cette association a des performances souvent plus intéressantes que celles du cycloconvertisseur tant du point de vue de la source (taux d'harmonique constant) que de la charge (gamme de fréquence indépendante de celle de la source). De plus, le coût de l'ensemble des convertisseurs est inférieur à celui du cycloconvertisseur dans le cas des puissances inférieures à la centaine de kVA. Par contre, un tel ensemble est rarement réversible.

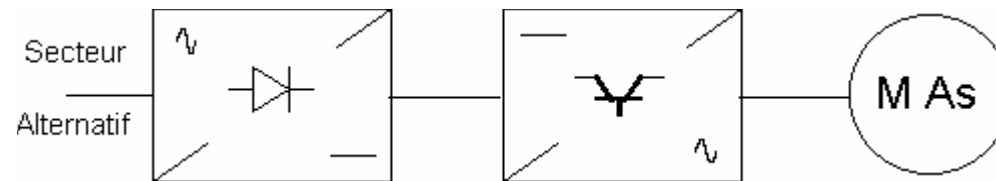


Fig. 9 : Alimentation d'une machine asynchrone

3.4. EXEMPLES D'APPLICATIONS DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Le spectre des applications des convertisseurs statiques est très varié.

3.4.1. Applications domestiques

Éclairage
 Chauffage
 Climatiseurs / Ventilateurs
 Réfrigérateurs / Congélateurs
 Gros électroménager (lave-linge, lave-vaisselle, aspirateur,...)
 Cuisine (plaques à induction, four à micro-ondes)
 Eau chaude sanitaire (cumulus)
 Alimentation des appareils électroniques (TV, ordinateur, appareils de reproduction du son,...)

Petit Électroménager (robot,...)
 Appareillage électroportatif (perceuse,...)
 Pompes
 Chaudières à gaz et à fioul
 Actionneurs domotiques (volets roulants, stores électriques,...),...
 Ascenseurs / Monte-charges
 Régulateur de charge pour aérogénérateur (éolienne) et/ou générateur photovoltaïque

3.4.2. Locaux commerciaux et tertiaires

Chauffage / Ventilation / Climatisation
Éclairage
Ordinateurs et équipements de bureaux

3.4.3. Applications industrielles

Pompes, Compresseurs, Souffleries
Machines-outils / Robots
Convoyeurs
Chariots électriques
Transpalettes, transgerbeurs
Chariots filoguidés
Grues
Fours (à arcs, à résistance, à plasmas)
Appareils de soudage
Éclairage

3.4.4. Société

Éclairage public
Publicité lumineuse

3.4.5. Télécommunications

Émetteurs de radiodiffusion
Chargeurs de batterie

Caisses enregistreuses
Onduleurs de secours
Ascenseurs / Monte-charges

Lasers
Chauffage par induction
Séchage
Générateurs à ultrasons
Laminoirs
Électrolyse
Transfert d'énergie par plasmas thermiques (fours à arcs en sidérurgie)
Projection de poudres réfractaires
Traitement de déchets industriels par torches à plasmas
Production de photons UV et visibles,...

Émetteurs de radiodiffusion et télévision
Journaux électroniques

Onduleurs de secours et alimentations secourues (en alternatif et en continu)

3.4.6. Aéronautique et Spatial

Réseaux de bord d'avion
Commandes électriques

Réseaux de bord de satellites
Générateurs photovoltaïques de satellites

3.4.7. Transports terrestres et marins

Traction électrique (trains, métros, trolleybus, voiture électrique, 2 roues)

Génération d'électricité à bord des avions

Génération d'électricité à bord de navires civils. *Exemple : la production d'énergie à bord du Queen Mary II est assurée par deux turbines à gaz et quatre groupes diesel pour un total de 118 MW. La Vie du Rail 15.XI.2000, p. 48a.*

Génération d'électricité à bord de navires militaires

Propulsion électrique de navires civils. *Exemple 1 : Plus des 2/3 de l'énergie produite à bord du Queen Mary II (118 MW) est utilisée pour la propulsion. La Vie du Rail 15.XI.2000, p. 48a.*

Exemple 2 : La propulsion électrique de deux thoniers est effectuée par 6,2 MW en moteur synchrone/synchrodrive. Le journal de l'Ingénierie électrique (Cégélec) N°35, XII.95.

Propulsion électrique de navires militaires

Propulsion électrique silencieuse de sous-marins

Téléphériques. Remonte-pentes

Pompage, chauffage, ventilation et climatisation

Chargeurs de batterie

Véhicules à moteur thermique (allumage, injection, actionneurs sans collecteur, "booster" d'autoradio, multiplexage de puissance,...)

Éclairage (extinction progressive, lampes à décharge)

Motorisation de ponts roulants ou basculants. *Exemple : motorisation du pont basculant du port d'Anvers. 37kW contrôle vestoriel. Le journal de l'Ingénierie électrique (Cégélec) N°35, XII.95.*

Ascenseur à bateaux. *Exemple : ascenseur à péniches de 2000 tonnes sur le canal du centre de Belgique. Le journal de l'Ingénierie électrique (Cégélec) N°35, XII.95.*

3.4.8. Compagnies de production et de distribution de l'électricité

Compensateurs de puissance réactive et Filtrage actif (remise en phase et élimination d'harmoniques)
Dispositifs de stockage de l'énergie
Auxiliaires et démarreurs d'alternateurs

Transport haute tension courant continu
Ventilation
Pompes de circulation
Aérogénérateur (éolienne) et/ou générateur photovoltaïque

3.4.9. Espaces culturels et de loisirs (Monuments, Scènes, Théâtres, Discothèques,...)

Éclairage (Sources lumineuses, Gradateurs, Modulateurs,...)
Extraction d'air / Ventilation / Chauffage

Alimentations à découpage d'amplificateur de puissance

3.4.10. Appareils de laboratoires

Alimentations d'appareils de mesure (oscilloscopes,..)

Moteurs pas-à-pas (traceurs, imprimantes, enregistreurs,...),...

3.4.11. Médical

Microactionneurs
Bobines de champ pour l'imagerie médicale (IRM, Scanners,...)
Alimentations d'appareils de laboratoire

Générateurs de rayons X
Onduleurs de secours
Alimentations secourues

3.5. GAMME DE PUISSANCE DES CONVERTISSEURS STATIQUES et exemples d'applications

La gamme de puissance d'utilisation des convertisseurs statiques est très vaste : on en trouve des applications à partir de quelques watts (alimentations à découpage) et jusqu'à quelques milliers de mégawatts (liaisons haute tension en courant continu). Les tensions mises en jeu s'échelonnent de quelques volts à plusieurs centaines de kilovolts. Les courants utilisés varient entre une fraction d'ampère et quelques centaines de kiloampères.

Les figures suivantes¹⁵ illustrent les grands domaines d'applications des convertisseurs statiques.

¹⁵ D'après H. BUHLER dans son ouvrage "Électronique de Puissance" paru aux Éditions Georgi.

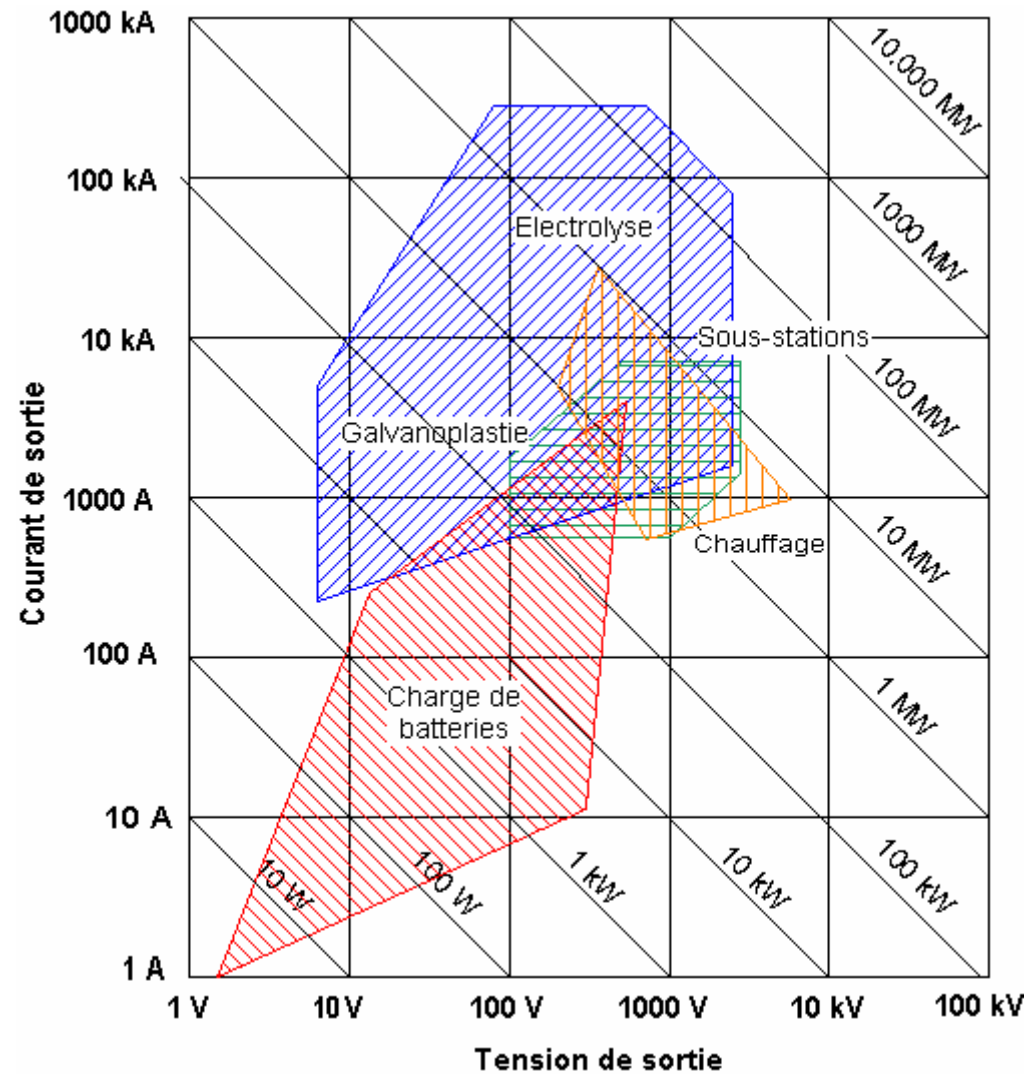


Fig. 10 : Exemples d'applications des redresseurs non-réversibles

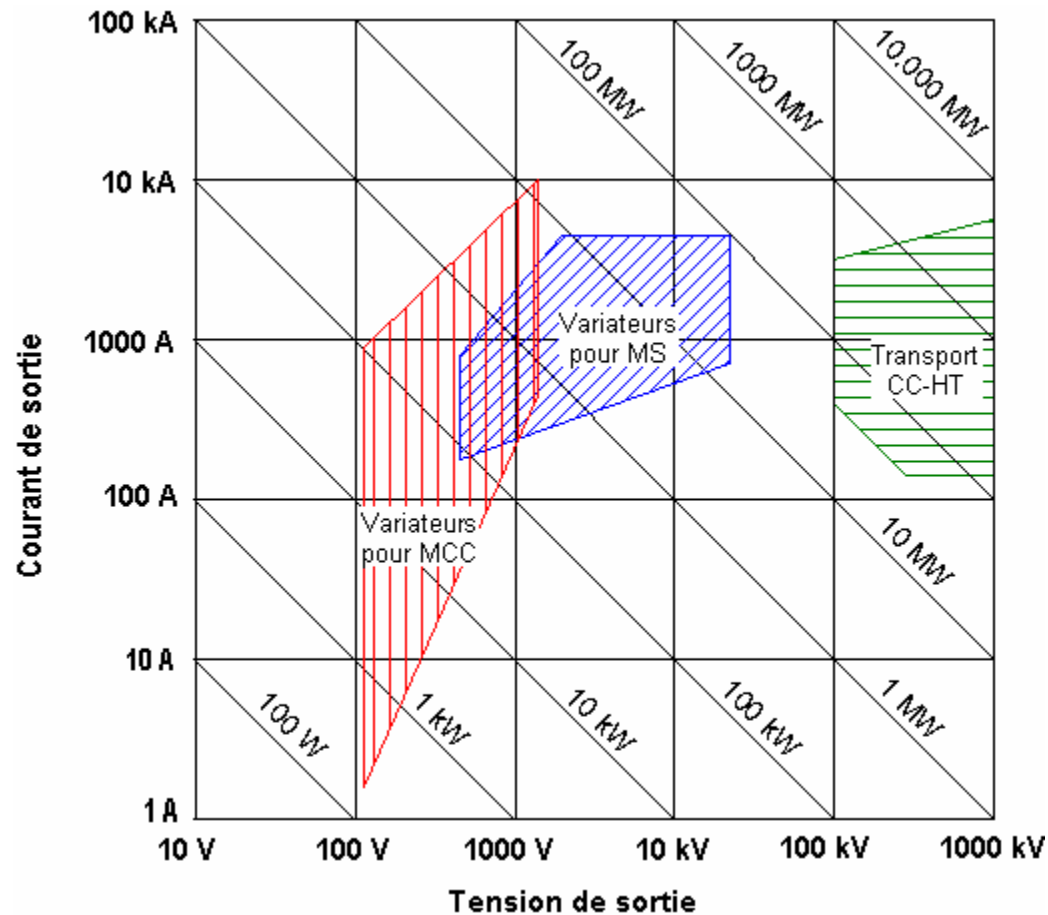


Fig. 11 : Exemples d'applications des redresseurs-onduleurs assistés (et des cycloconvertisseurs)

Le polygone noté "transport CC-HT" représente les applications les plus puissantes des convertisseurs statiques. Il s'agit de transport d'énergie électrique en courant continu et en haute tension. Cette technique est utilisée soit pour l'interconnexion de réseaux fonctionnant à des fréquences différentes (50 Hz et 60 Hz) ou dont les méthodes de réglage sont différentes, soit pour le transport d'énergie électrique sur de longues distances (supérieures à 40 km en

câble et à 600 km en ligne aérienne), l'économie sur le coût des conducteurs (3 en alternatif, 2, voire 1 seul, en continu) payant le coût des convertisseurs d'extrémités. On en utilise aussi pour modifier les transferts d'énergie dans une ligne de transport (station back-to-back). En 1992, il y avait, dans le monde, environ 50 liaisons CC-HT installées soit une capacité voisine de 40.000 MW (soit 80.000 MW de convertisseurs installés). L'interconnexion France-Angleterre¹⁶ (IFA 2000) peut transiter 2.000 MW. Ces puissances sont du même ordre de grandeur que celle d'une centrale de production d'énergie

¹⁶ La station française (arrivées et départs alternatifs et continus, bâtiments de l'électronique de puissance) s'étend sur 32 ha. Du côté français, les convertisseurs statiques utilisent 9216 thyristors.

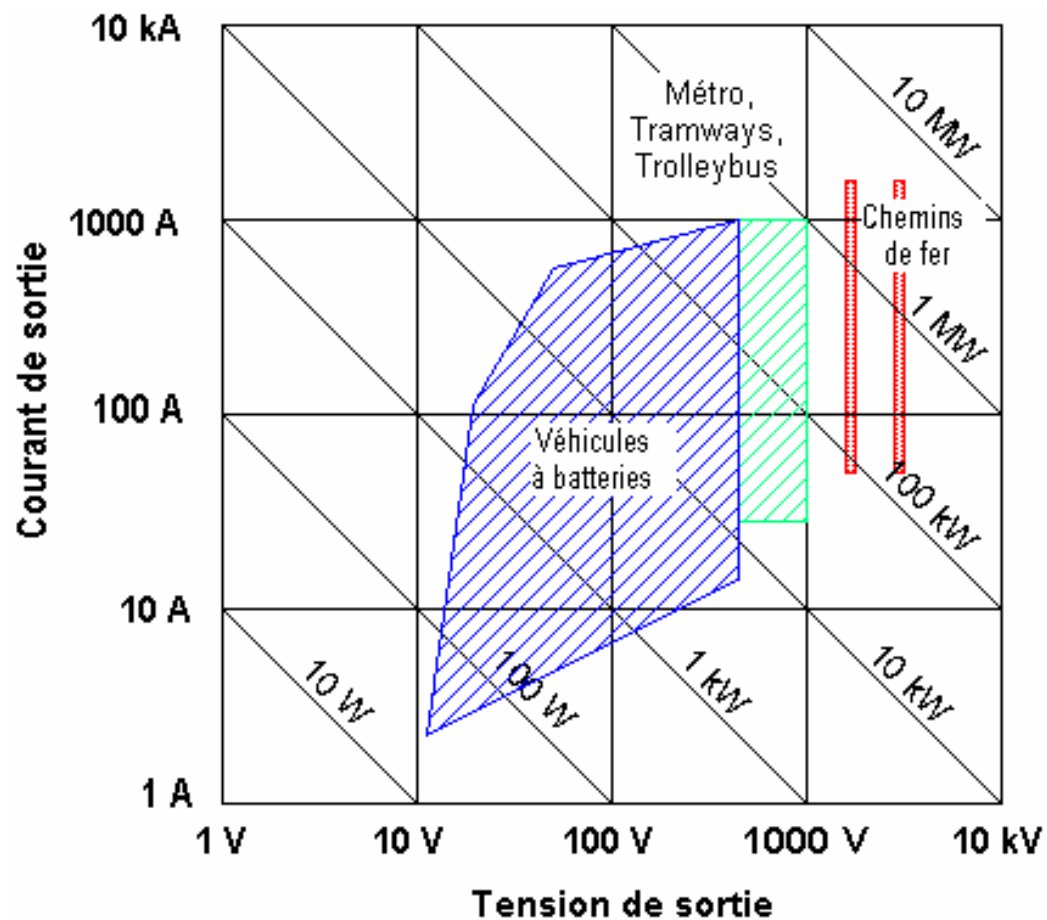


Fig. 12 : Exemples d'applications des hacheurs

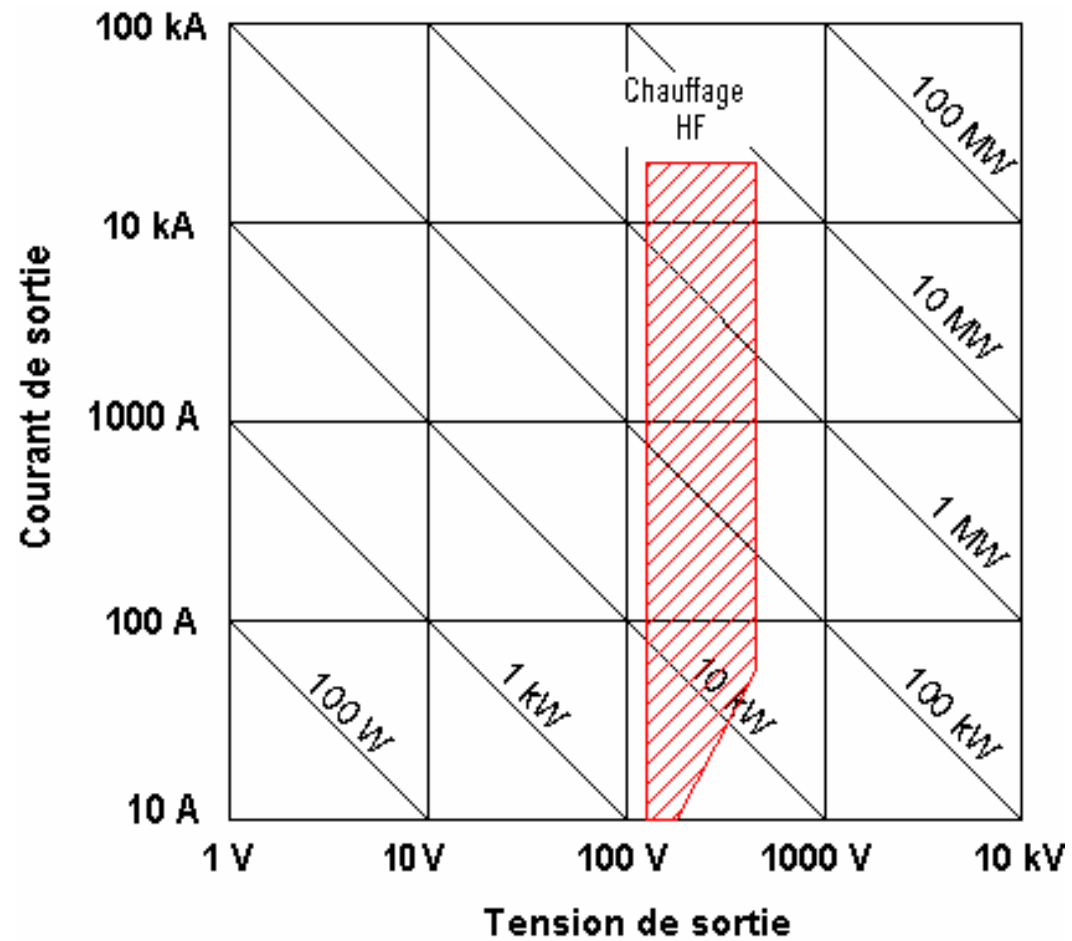


Fig. 13 : Exemples d'applications des onduleurs à résonance

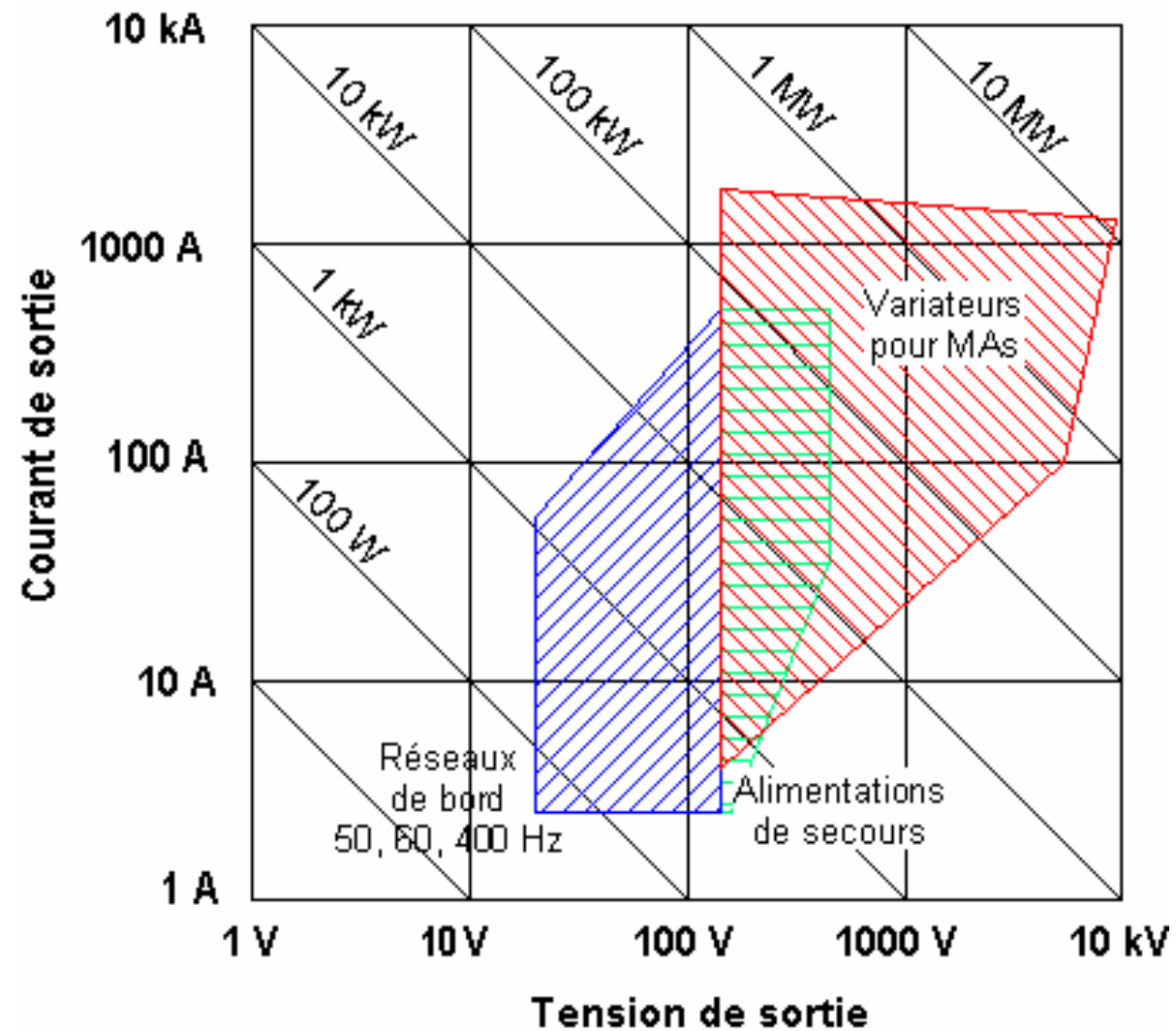


Fig. 14 : Exemples d'applications des onduleurs autonomes

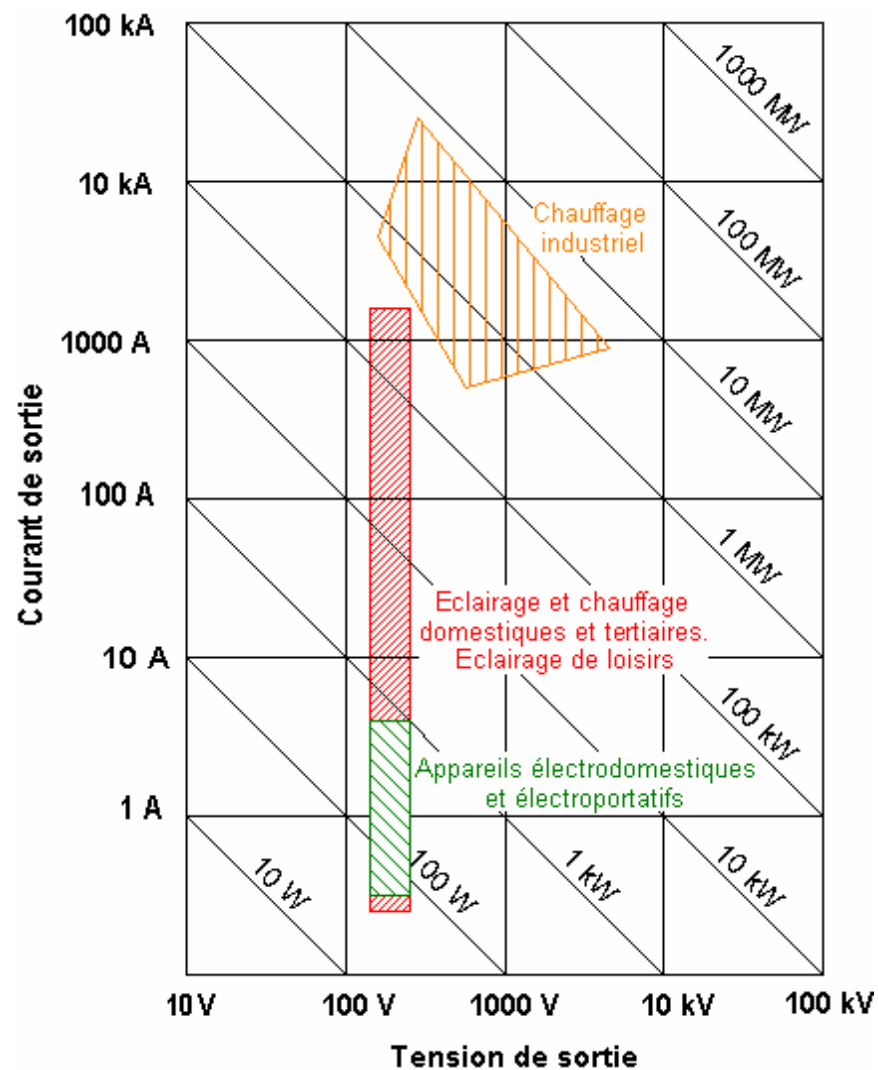


Fig. 15 : Exemples d'applications des gradateurs (et des contacteurs statiques)

3.6. CONSTITUTION DES CONVERTISSEURS STATIQUES

3.6.1. Caractéristiques des convertisseurs statiques

Une conversion d'énergie doit être faite avec le meilleur rendement, et ce, pour plusieurs raisons :

- on ne peut pas évacuer/dissiper les pertes (sources de chaleur) si elles sont trop importantes ;
- le coût des dispositifs dissipateurs de chaleur (radiateurs, ventilateurs¹⁷,...) est important ;
- la fiabilité d'un composant ou d'un système diminue quand sa température de fonctionnement augmente ;
- il faut assurer une autonomie suffisante des appareils fonctionnant sur piles ou batteries ;
- et, enfin, il est nécessaire de conserver un bilan économique satisfaisant.

3.6.2. Intérêt d'un dispositif de conversion d'énergie à pertes minimales.

Pour montrer l'intérêt d'utiliser un dispositif de conversion d'énergie à pertes minimales, on peut prendre l'exemple du lampadaire halogène communément utilisés en éclairage domestique. Le réseau d'alimentation électrique étant à tension constante et la variation d'intensité lumineuse étant obtenue par le réglage de la tension ou du courant alimentant la lampe halogène, il faut utiliser un dispositif inséré entre le secteur et la lampe.

Pour fixer les idées, on prendra une lampe de 300 W et on supposera la valeur de la résistance constante en fonction du courant qui la traverse¹⁸.

¹⁷ Il faut aussi mentionner l'augmentation du niveau sonore apportée par les ventilateurs.

¹⁸ En réalité, la résistivité d'un métal augmente avec la température et la résistance d'une lampe alimentée à tension nominale est beaucoup plus importante que celle à froid.

Gradation par rhéostat

Un rhéostat est branché en série avec la lampe halogène.

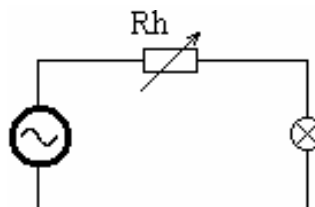


Fig. 16 : Gradation par rhéostat

Pour obtenir l'intensité lumineuse maximale, le rhéostat a une valeur nulle. Ses pertes sont nulles. La puissance absorbée au réseau est égale à la puissance consommée par la lampe. Le rendement est égal à l'unité.

Pour une alimentation de la lampe au $\frac{1}{4}$ de sa puissance nominale (intensité lumineuse réduite), le rhéostat doit créer une chute de tension égale à la moitié de la tension d'alimentation (un courant moitié du courant nominal et une tension moitié de la tension nominale donnent bien une puissance égale au $\frac{1}{4}$ de la puissance nominale). La lampe et le rhéostat étant parcourus par le même courant et ayant des tensions aux bornes identiques, ils dissipent une puissance identique. Le rendement est donc égal à $\frac{1}{2}$. La puissance consommée sur le secteur est donc de 150 W pour une puissance délivrée à la lampe de 75 W. En plus de gaspiller dans la résistance autant de puissance que dans la lampe, il faut un rhéostat d'une taille conséquente pour évacuer ces pertes. Le volume, la masse et le coût d'un tel rhéostat ne sont pas négligeables par rapport à celui de la lampe. Cette solution n'est plus utilisée depuis fort longtemps.

Gradation par autotransformateur à rapport variable

Pour avoir un rendement proche de l'unité, on pourrait utiliser un autotransformateur à rapport variable branché entre le secteur et la lampe.

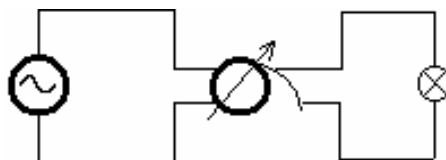


Fig. 17 : Gradation par autotransformateur

Pour tous les points de fonctionnement, le rendement est proche de 1. Cependant le volume, la masse et le coût d'un tel autotransformateur, beaucoup plus importants que ceux du rhéostat précédent, condamnent cette solution. De plus, ce montage impose une distribution 3 fils plus coûteuse qu'une simple insertion série (montage 2 fils).

Gradation par convertisseur statique

Pour avoir un rendement proche de l'unité, on peut aussi utiliser un dispositif à découpage branché en série entre le secteur et la lampe : un gradateur.

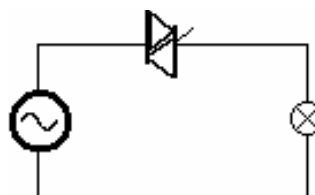


Fig. 18 : Utilisation d'un gradateur

Pour tous les points de fonctionnement, le rendement est proche de 1. Le faible coût et le faible encombrement d'un triac et des composants de commande associés ont permis le développement à grande échelle de la gradation d'intensité lumineuse domestique.

3.6.3. Composants utilisables

Pour obtenir ce maximum de rendement, il ne faut utiliser que des composants pas ou peu dissipatifs, c'est-à-dire absorbant une puissance minimale (idéalement nulle).

Pour un dipôle (fig. 19), la puissance instantanée¹⁹ absorbée p est le produit du courant instantané i qui le traverse par la tension à ses bornes u .

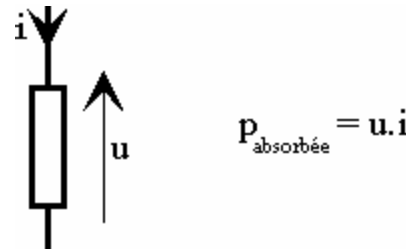


Fig. 19 : Puissance instantanée aux bornes d'un dipôle

Pour qu'un composant ne présente aucune perte, la puissance moyenne qu'il dissipe doit être nulle.

$$\mathbf{P_{\text{absorbée}} = 0}$$

Ceci peut se réaliser de deux manières :

- soit la puissance instantanée est nulle à tout instant,
- soit la valeur moyenne sur une période de fonctionnement est nulle.

Dans le premier cas, il faut et il suffit que i ou u soit nul à tout instant. C'est la fonction interrupteur parfait. Un interrupteur parfait fermé présente une chute de tension négligeable et les pertes y sont donc nulles quel que soit le courant qui le traverse. Un interrupteur parfait ouvert n'a pas de courant de fuite, les pertes y sont donc nulles quelle que soit la tension qu'il supporte. En pratique, les interrupteurs seront réalisés à partir de **semi-conducteurs fonctionnant en commutation**. Sont donc utilisables en électronique de puissance, les diodes, les thyristors, les triacs, les GTOs. Les transistors (bipolaires, MOS, IGBTs,...) seront utilisés uniquement en régime de commutation.

¹⁹ On rappelle que les valeurs instantanées sont représentées par des lettres minuscules. Puisqu'elles sont instantanées, les grandeurs correspondantes sont dépendantes du temps. Les lettres minuscules i, v, \dots constituent un raccourci d'écriture de $i(t), v(t), \dots$

Les lettres majuscules correspondent à des valeurs constantes ou moyennées (valeurs moyennes, valeurs efficaces,...).

Dans le second cas, le produit $u.i$ peut être tantôt positif (énergie emmagasinée), tantôt négatif (énergie restituée) mais la condition :

$$P = \frac{1}{T} \int_T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_T u \cdot i \cdot dt = 0$$

doit être vérifiée. Les composants qui répondent à cette définition sont les composants réactifs (inductances et condensateurs).

Exemple : calcul de la puissance instantanée pour un condensateur

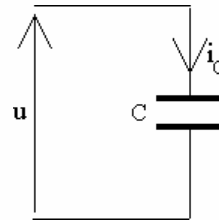


Fig. 20 : Condensateur alimenté par une tension u

Un condensateur est branché (fig. 20) sur une source de tension sinusoïdale $u = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$. Le courant qui circule dans le condensateur a pour expression :

$$i = +C \frac{du}{dt} = C\omega \cdot U\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t)$$

Cette dernière expression fait apparaître l'impédance Z du condensateur :

$$Z = \frac{1}{C\omega}$$

ainsi que le déphasage avant du courant qui traverse le condensateur sur la tension appliquée (fig. 21).

La puissance instantanée qui entre dans le condensateur a pour expression :

$$p = u.i = C\omega.U^2 .2. \sin(\omega t) .\cos(\omega t) = C\omega.U^2 .\sin(2\omega t)$$

Sur une période, la valeur moyenne d'un sinus est nulle (ce que confirme la représentation temporelle de la figure 21). La puissance moyenne absorbée par le condensateur est nulle. Il répond bien au critère émis précédemment pour la constitution de convertisseurs statiques.

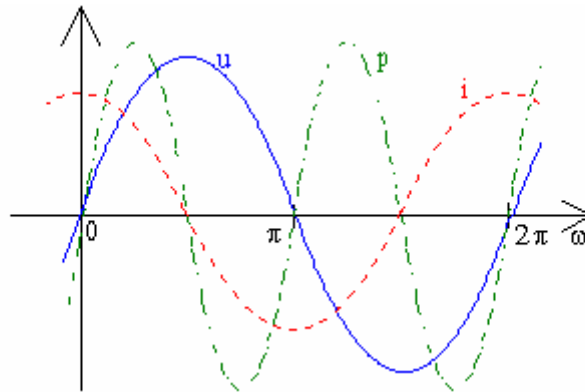


Fig. 21 : Tension, courant et puissance instantanée relatifs à un condensateur alimenté par une tension sinusoïdale sinusoïdale.

Cette notion de puissance dissipée nulle peut être extrapolée aux multipôles. Le **transformateur** (parfait) répond à ce critère et peut donc être utilisé dans un convertisseur statique. À l'opposé, les résistances ou les semi-conducteurs fonctionnant en régime linéaire sont donc exclus²⁰.

Définition : Un convertisseur statique est constitué d'éléments à dissipation minimale : principalement des semi-conducteurs fonctionnant en interrupteur, des inductances, des condensateurs et des transformateurs.

L'utilisation d'interrupteurs à semi-conducteurs permet d'obtenir des convertisseurs statiques présentant de nombreux avantages sur les groupes tournants : entretien réduit, temps de réponse plus courts et surtout spectre d'application beaucoup plus vaste.

²⁰ L'Électronique de Puissance utilise donc essentiellement des semiconducteurs fonctionnant en régime de commutation, des inductances et des condensateurs alors que l'Électronique Analogique utilise préférentiellement des semiconducteurs fonctionnant en régime linéaire, des résistances, des condensateurs et peu d'inductances.

L'Électronique de Puissance étudie un convertisseur statique sur trois niveaux : le niveau **composant** (interrupteurs semi-conducteurs et éléments réactifs), le niveau **structure de puissance** (schéma du convertisseur) et le niveau **commande**. Ce dernier se décompose à son tour en commande rapprochée, commande de fonction et commande de système (les convertisseurs utilisent généralement des boucles de régulation). Ces trois niveaux ont de nombreuses interactions. En particulier, les contraintes subies par un composant dépendent de la structure dans laquelle il est employé et de la commande. De même, la stratégie de commande possible dépend des interrupteurs employés et de la structure du convertisseur.

De l'ensemble des composants qui constituent un convertisseur statique, seuls certains possèdent une électrode sur laquelle la commande (l'opérateur) peut agir : ce sont les semi-conducteurs commandables (transistors,...). Il n'est pas possible d'agir sur les éléments réactifs et sur les diodes.

3.7. MOYENS D'ÉTUDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Un certain nombre d'outils mathématiques et de simulation permettent l'analyse et la synthèse des convertisseurs statiques. Dans tous les cas, l'étude du fonctionnement des convertisseurs statiques passe par l'établissement des schémas partiels de fonctionnement.

3.7.1. Schémas partiels de fonctionnement

Définition : Le fonctionnement d'un convertisseur statique est basé sur les modifications séquentielles des liaisons entre la source et la charge.

L'étude du comportement du convertisseur ne peut être connue que par l'écriture des équations différentielles de fonctionnement correspondant à chaque **phase (on dit aussi état ou encore étape) de fonctionnement**. Une nouvelle étape de fonctionnement est obtenue à chaque fois qu'un semiconducteur change d'état²¹. L'étude du convertisseur et la détermination des équations différentielles sont largement facilitées par l'établissement des **schémas partiels de fonctionnement** (SPF) encore appelés circuits réduits équivalents (CRE). À chaque étape de fonctionnement est associé un schéma partiel de fonctionnement. Il résulte de cette succession d'étapes, une succession de régimes transitoires, même si le régime permanent du convertisseur est atteint.

²¹ Le changement d'état d'un semiconducteur peut soit être commandé soit être spontané ou naturel (Voir § 1.).

Obtention des SPF :

Les schémas partiels de fonctionnement sont extraits du schéma complet : on enlève tous les composants qui ne participent au fonctionnement d'une étape.

Les semiconducteurs passants sont remplacés par des courts-circuits.

Les semiconducteurs bloqués sont purement et simplement enlevés (circuit ouvert).

Chaque interrupteur présentant 2 états possibles (bloqué ou conducteur), il y a, en théorie, 2^n SPF possibles. En pratique, certains d'entre eux ne pourront exister (si ce n'est, pour certains, en régime transitoire : ce sont des équilibres instables, des courts-circuits de source de tension, des sources de courant en circuit ouvert,...).

Exemple : Schémas partiels de fonctionnement d'un hacheur dévolteur sur charge R, L, E.

Pour illustrer la notion de schéma partiel de fonctionnement, prenons l'exemple d'un hacheur dévolteur dessiné fig. 22 formé d'un interrupteur bicommandable K et d'une diode D. Il est alimenté par la tension U et débite sur une charge R, L, E.

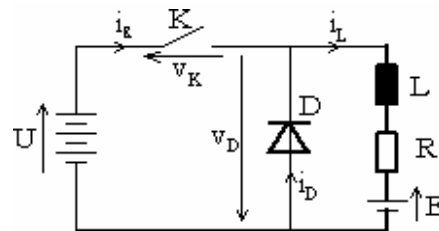


Fig. 22 : Hacheur dévolteur sur charge R, L, E.

~ Si l'interrupteur K est conducteur, la diode D est polarisée en inverse : elle est bloquée. Le schéma partiel de fonctionnement correspondant est dessiné fig. 23.

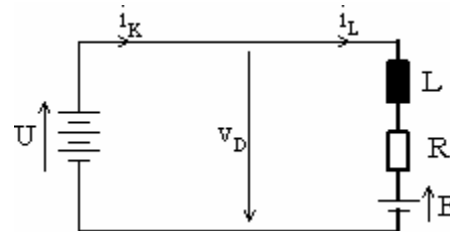


Fig. 23 : Schéma partiel de fonctionnement pour K conducteur et D bloquée

On en déduit que $v_D = -U < 0$ et que $i_K = i_L$. La tension aux bornes de la charge ($v_{ch} = -v_D$) est égale à U. Les courants sont régis par l'équation différentielle :

$$L \frac{di_L}{dt} + R \cdot i_L = U - E$$

€ Si l'interrupteur K est bloqué et si le courant dans la charge est positif, la diode D conduit. Le schéma partiel de fonctionnement est dessiné fig. 24.

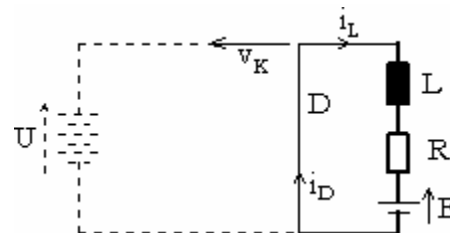


Fig. 24 : Schéma partiel de fonctionnement pour D conductrice et K bloqué

On en déduit que $v_D = -v_{ch} = 0$, $v_K = U > 0$ et que $i_K = 0$. Le courant i_L est régi par l'équation différentielle :

$$L \frac{di_L}{dt} + R \cdot i_L = -E$$

Note : en écrivant cette équation sous la forme $L \frac{di_L}{dt} = -(E + R \cdot i_L)$, on remarque que le courant i_L **ne peut que décroître** puisque les termes E, R et i_L sont tous positifs.

, Si l'interrupteur K est bloqué et si le courant dans la charge est nul, la diode D est bloquée. Le schéma partiel de fonctionnement est dessiné fig. 25.

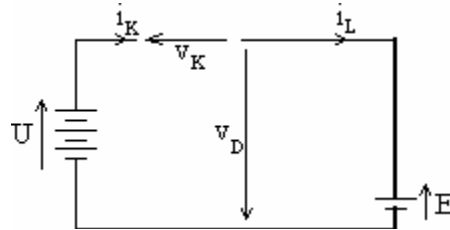


Fig. 25 : Schéma partiel de fonctionnement pour D et K bloqués

On en déduit que $v_D = E$, $v_K = U - E > 0$, que $i_K = i_L = 0$ et que la tension aux bornes de la charge est égale à E .

f L'état correspondant à l'interrupteur K et la diode D à la fois conducteurs ne peut exister. Il conduirait à un court-circuit de la source de tension d'alimentation, créant un courant dans la maille E, K, D dans un sens et avec une amplitude tels que la diode D ne peut que se bloquer. Cette étape ne peut exister qu'un très court instant et amène directement à l'étape ~ pour lequel l'interrupteur K est conducteur et la diode D est bloquée.

3.7.2. Détermination des conditions de fin d'étapes et des successions de d'étapes

Après avoir déterminé les différentes étapes de fonctionnement possibles, il est nécessaire de connaître leurs enchaînements. Il faut déterminer pour chaque étape de fonctionnement la (ou les) condition(s) de fin d'étapes. Ces conditions de fin d'étape peuvent être imposées par l'extérieur : envoi d'un ordre de commande de mise en conduction ou de blocage sur un (ou des) interrupteur(s). On parle alors de fin d'étape commandée. Les conditions de fin d'étape peuvent être aussi dépendre de grandeurs internes au convertisseur : passage par zéro d'un courant ou d'une tension. On parle alors de fin d'étape spontanée ou naturelle. Il faut aussi déterminer quelle étape succédera alors à l'étape qui se termine.

Exemple : Détermination des conditions de fin d'étapes sur un hacheur dévolteur

Nous reprenons le hacheur dévolteur sur charge R, L, E étudié précédemment.

La condition de fin de l'étape ~ est le blocage de l'interrupteur K. C'est une fin d'étape commandée. Elle amène directement à l'étape €.

Pour l'étape €, il y a deux conditions de fin d'étape :

- Soit le courant dans la charge s'annule. La diode D se bloque. L'interrupteur K étant toujours bloqué, c'est l'étape , qui commence. C'est une fin d'étape spontanée.

- Soit l'interrupteur K est rendu conducteur avant l'annulation du courant dans la charge. C'est une fin d'étape commandée qui amène directement à l'étape ~ .

La condition de fin de l'étape , est la mise en conduction de l'interrupteur K. C'est une fin d'étape commandée. Elle amène directement à l'étape ~ .

Il y a deux séquences de fonctionnement du hacheur dévolteur (représentées fig. 26) :

- fonctionnement en conduction discontinue :
étape ~ - étape € - étape , - étape ~ - ...
- fonctionnement en conduction non-discontinue encore dit en conduction continue :
étape ~ - étape € - étape ~ - ...

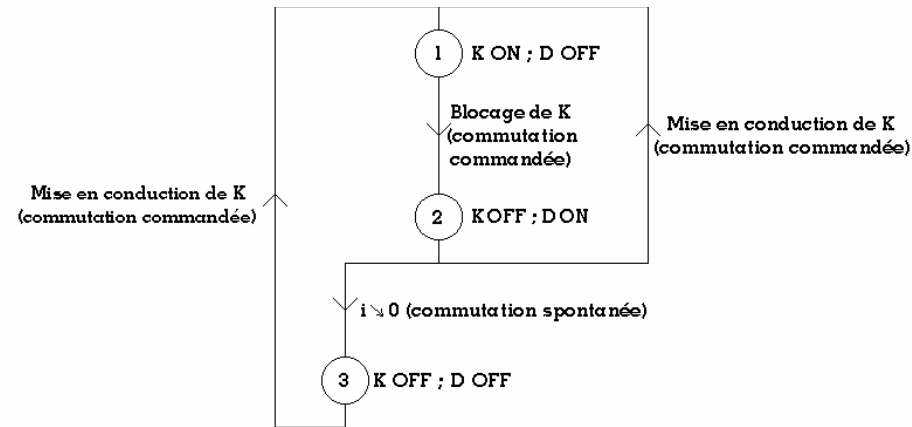


Fig. 26 : Séquences de fonctionnement du hacheur dévolteur

3.7.3. Calcul des grandeurs

Suivant le type de convertisseur étudié et les résultats désirés, on peut avoir besoin de valeurs moyennées sur une période ou de valeurs instantanées. Dans le premier cas, on aboutit rapidement au résultat cherché en intégrant les expressions des courants ou des tensions sur une période de fonctionnement. Dans le second cas, il faut résoudre les équations différentielles. Si l'ordre du système est élevé, on peut utiliser avec profit un calculateur numérique muni d'un logiciel de mise en équation et de résolution automatiques des convertisseurs statiques (par exemple, SIMUL).

Exemple de calcul de valeurs moyennées

Calcul de la tension moyenne aux bornes de la charge. En conduction continue, l'interrupteur K est conducteur pendant un temps θ et la diode D pendant une durée $T-\theta$. La tension moyenne aux bornes de la charge s'écrit :

$$\bar{v}_{ch} = \frac{1}{T} \left[\int_0^\theta U \cdot dt + \int_{T-\theta}^T 0 \cdot dt \right] = U \cdot \frac{\theta}{T} = \alpha \cdot U$$

en notant α la quantité θ/T appelé rapport cyclique.

Calcul du courant moyen dans la charge. En régime permanent, le courant moyen dans la charge alimentée par le hacheur ci-dessus se calcule aisément en écrivant l'équation différentielle régissant la charge :

$$L \frac{di_L}{dt} + R \cdot i_L + E = v_{ch}$$

En intégrant sur une période, il vient :

$$\frac{1}{T} \int_{t_x}^{t_x+T} L \frac{di_L}{dt} \cdot dt + \frac{1}{T} \int_{t_x}^{t_x+T} R \cdot i_L \cdot dt + \frac{1}{T} \int_{t_x}^{t_x+T} E \cdot dt = \frac{1}{T} \int_{t_x}^{t_x+T} v_{ch} \cdot dt$$

soit encore :

$$\frac{1}{T} \int_{i_L(t_x)}^{i_L(t_x+T)} L \cdot di_L + R \cdot \bar{i}_L + E = \bar{v}_{ch} = \alpha \cdot U$$

Or, par définition du régime périodique permanent, $i_L(t_x+T) = i_L(t_x)$. La première intégrale est donc nulle. Le courant moyen dans la charge s'écrit :

$$\bar{i}_L = \frac{\bar{v}_{ch} - E}{R}$$

En conduction continue, le courant moyen dans la charge s'écrit :

$$\bar{i}_L = \frac{\alpha \cdot U - E}{R}$$

L'exemple traité montre que, en fonction du résultat désiré, on peut utiliser une équation différentielle sans la résoudre.

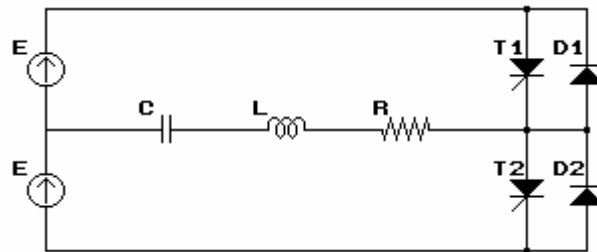
Exemples de calculs à l'aide de SIMUL

Quand il est nécessaire de résoudre une équation différentielle d'ordre élevé (ou une équation différentielle du second ordre avec amortissement et deux conditions initiales non nulles), il est indispensable d'utiliser un outil de calcul. Ce peut être un calculateur analogique, parfaitement adapté pour résoudre des équations différentielles linéaires. Mais on utilise de le plus souvent un calculateur numérique car, d'une part, les ordinateurs sont universellement répandus et, d'autre part, ils peuvent automatiquement déterminer la succession des étapes de fonctionnement et faire les mises en équation correspondantes.

Contrairement à la résolution analytique des équations différentielles, les programmes de simulation de fonctionnement des convertisseurs statiques ne donnent pas la solution analytique des courants et tensions. Ils déterminent les formes d'ondes pour un jeu de conditions de fonctionnement et de valeurs de composants donné.

Comme exemple, voici la simulation d'un onduleur à résonance avec SIMUL²². La difficulté réside ici dans la résolution d'une équation différentielle du second ordre dont les deux conditions initiales sont non nulles. De plus, pour déterminer le régime permanent, les conditions initiales et finales sont liées.

Dans un premier temps, il faut donner au programme la topologie du circuit :

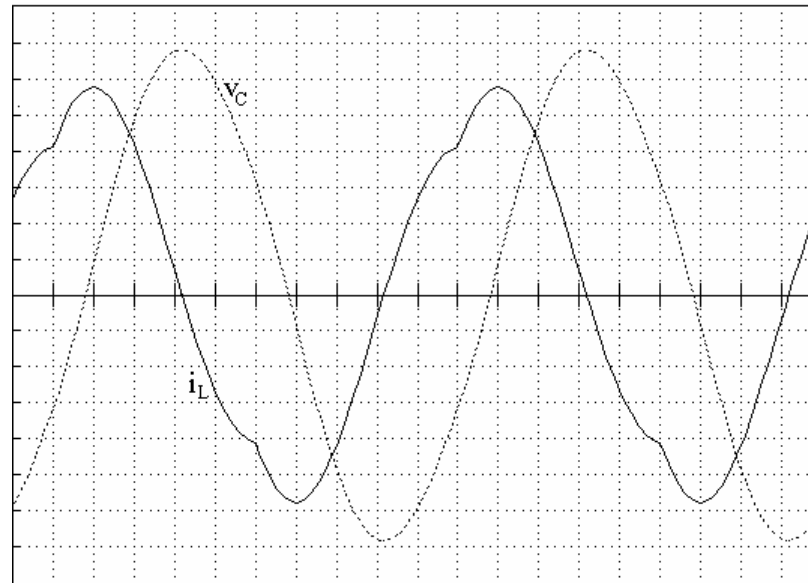


Il faut ensuite donner les valeurs des composants : $E = 100 \text{ V}$, $R = 0,2 \Omega$, $C = 130 \mu\text{F}$ et $L = 130 \mu\text{H}$. La fréquence de déclenchement des thyristors est fixée à 1 kHz .

Le programme effectue ensuite la simulation et affiche les formes d'ondes demandées correspondant au jeu de paramètres proposé.

²² SIMUL est un logiciel de simulation de convertisseurs statiques mis au point et diffusé par le Laboratoire d'Électrotechnique de Montpellier (LEM) qui fonctionne sur PC. Il utilise une modélisation en topologie variable.

Après avoir laissé la simulation se dérouler pendant plusieurs périodes, SIMUL fournit la solution en régime établi. Deux périodes sont représentées ci-après. Elles donnent les allures du courant dans le circuit résonnant (en trait plein, échelle : 50 A/div) ainsi que la tension aux bornes du condensateur (en trait pointillé, échelle 50 V/div) en fonction du temps (échelle 100 μ s/div) :

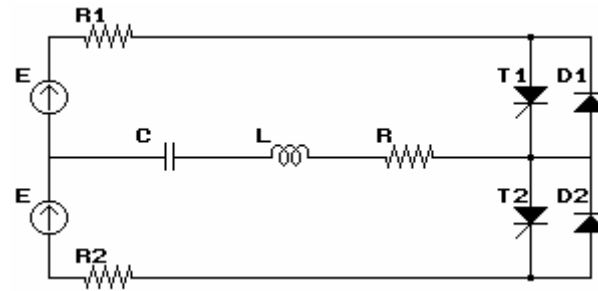


SIMUL donne aussi les valeurs de fonctionnement :

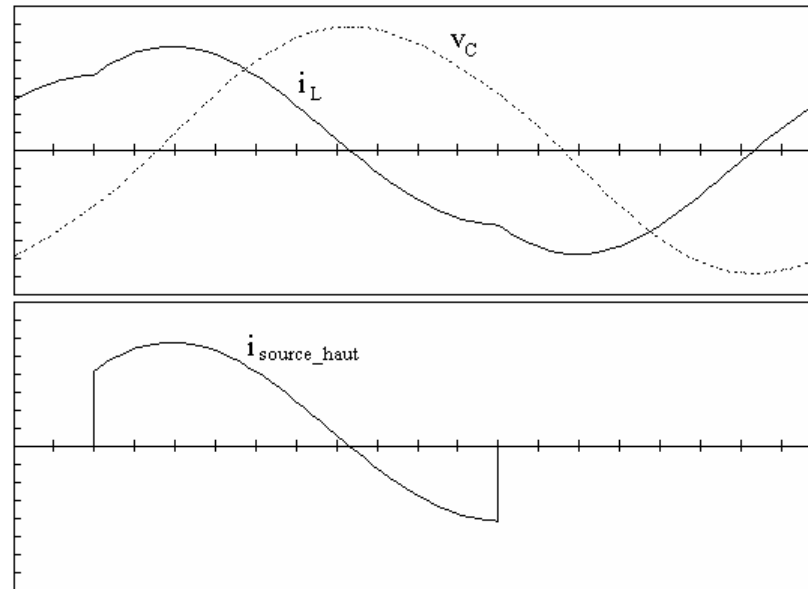
- courant crête dans le circuit résonnant : 289 A,
- courant efficace dans le circuit résonnant : 198 A,
- tension crête aux bornes du condensateur : 343 V,
- tension efficace aux bornes du condensateur : 241 V.

On peut alors calculer la puissance dissipée dans la résistance : $R.I^2 = 0,2.(198)^2 = 7,84$ kW.

Il est possible de vérifier cette valeur en s'intéressant à la puissance totale fournie par les sources. Cette puissance totale est égale à deux fois (car il y a deux sources) le produit de la tension de la source par le courant moyen qu'elle débite puisque les semiconducteurs et les composants réactifs n'engendrent pas de pertes. Pour déterminer ce courant moyen, on peut encore utiliser SIMUL en insérant une résistance de très faible valeur en série avec les sources (ici R1 et R2 valent 1 mΩ, valeur suffisamment inférieure à 200 mΩ pour ne pas perturber le montage).



Le courant et la tension relatifs au circuit résonnant sont donnés ci-après. La figure suivante représente le courant de source (échelles : 50 A/div, 50 V/div, 50 μ s/div) :



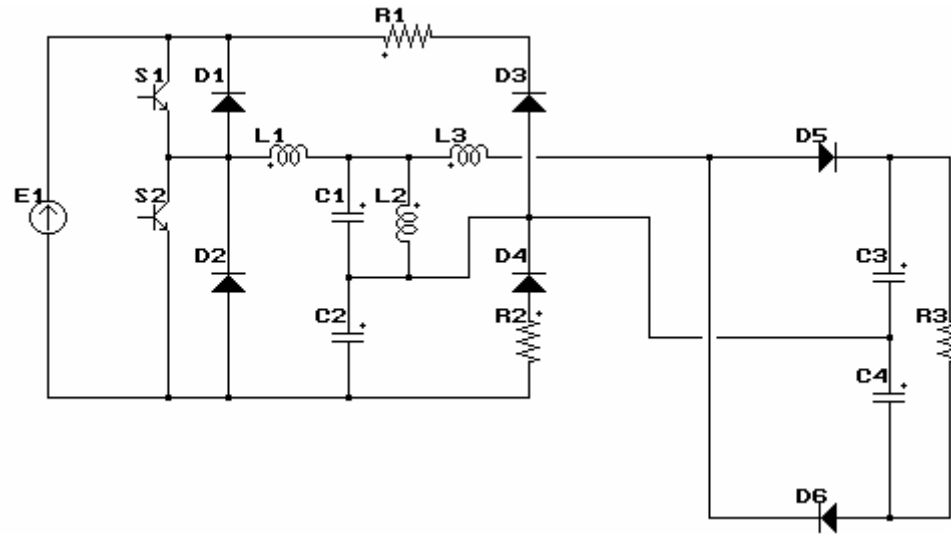
SIMUL donne aussi le courant moyen dans une source : 40 A. Soit une puissance par source de $40 \cdot 100 = 4$ kW. Soit encore 8 kW pour l'ensemble des deux sources. Cette valeur est à 2% près celle obtenue précédemment (7,84 kW) ce qui est une précision raisonnable pour ce type de simulation²³.

Bien entendu, si on désire étudier ce même circuit pour d'autres valeurs de composants et/ou de conditions de fonctionnement (retard à l'amorçage, par exemple), il faut relancer une simulation.

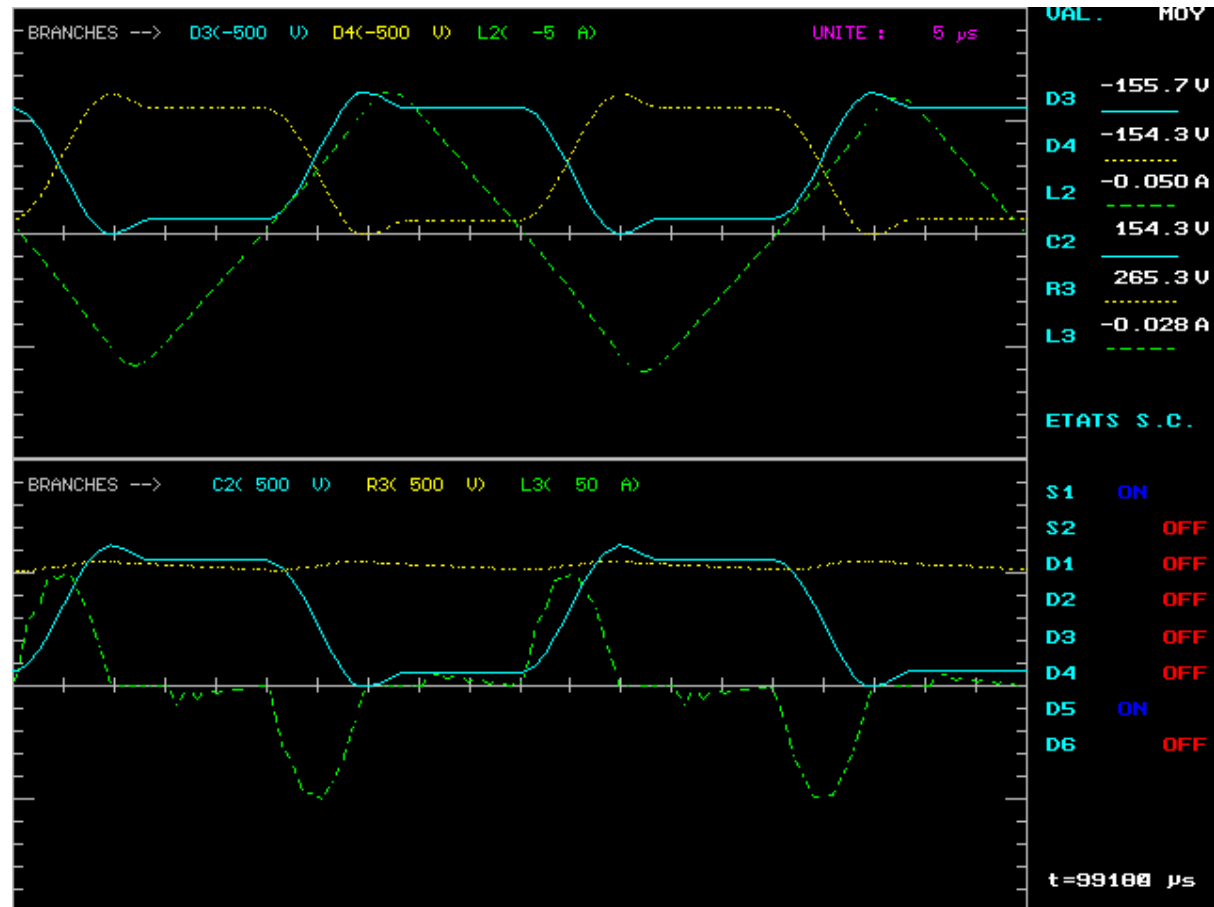
Les simulateurs ont aussi un grand intérêt quand la complexité du circuit ne permet plus de prédéterminer les étapes de fonctionnement d'un convertisseur. L'exemple ci-après est un onduleur à résonance faisant intervenir un transformateur (modélisé par $L1 = 18 \mu\text{H}$, $L2 = 480 \mu\text{H}$, $L3 = 760 \text{nH}$ et $C1 = 18 \mu\text{F}$ comme capacité parasite) et un condensateur ($C2 = 600 \text{nF}$). La tension aux bornes de ce dernier condensateur est "clampée", c'est à dire limitée à une valeur comprise entre 0 et la tension d'alimentation par D3 et D4. Cet onduleur fonctionne à 20 kHz grâce aux transistors S1 et S2. Il est

²³ Notons que avec un courant efficace de 200A (soit 1% d'écart avec la valeur de 198A), on aurait retrouvé 8kW. La relation RI^2 fait passer de 1 à 2% d'erreur.

alimenté par la source continue E1 (310 V). Le secondaire du transformateur débite sur un redresseur doubleur de tension (D5, D6, C3 = C4 = 4,94 μ F) et une résistance de charge (R3 = 80 Ω).



Les différents courants et tensions obtenus sont représentés ci-dessous :



Qualitativement, on vérifie bien que la tension aux bornes de C2 est bien toujours comprise entre 0 et la tension d'alimentation (310 V), que les courants moyens dans L2 et L3 sont nuls. Il est aussi possible de déterminer quantitativement toutes les valeurs moyennes, crêtes, efficaces concernant tous les composants.

Les deux exemples ci-dessus montrent l'intérêt des simulateurs numériques pour la détermination du fonctionnement des convertisseurs statiques. Comme avec tout simulateur, il est indispensable de vérifier la cohérence des résultats obtenus par une connaissance du fonctionnement de base des dits convertisseurs.

CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

4.1. ÉLECTROTECHNIQUE

4.1.1. Ouvrages de base

- G. SEGUIER, F. NOTELET Électrotechnique Industrielle (TEC-DOC)
BOURGEOIS, COGNEL Mémento Électrotechnique (EDUCALIVRE)
CHAUVEAU Mémento Électronique (EDUCALIVRE)
M. IVANES, R. PERRET Éléments de Génie Électrique (HERMÈS)
CHATELAIN Machines Électriques (DUNOD)
P. TOUSSAINT, M. LAVABRE Cours d'Électrotechnique (DUNOD)
J. BONAL Utilisation industrielle des moteurs à courants alternatifs (TEC-DOC)

4.1.2. Autres ouvrages traitant de points plus spécifiques

- M. KANT Les actionneurs électriques pas à pas (HERMÈS)
Guide de l'ingénierie électrique des réseaux internes d'usines (TEC-DOC)
P. LAGONOTTE Les installations électriques. Collection SEE (Hermès)
Application de l'électricité dans les procédés industriels (Coll. Électra - Diff. Lavoisier)

Les plasmas dans l'industrie (Collection Electra - Diffusion Lavoisier)

Enseignement de l'Électrothermie. Recueil d'exercices et projets (Collection Électra - Diffusion Lavoisier)

4.1.3. Autres publications

Les publications des constructeurs

Les publications du Comité Français pour l'Électrothermie

La Revue de l'Électricité et de l'Électronique (ex-Revue Générale de l'Électricité)

Les Techniques de l'Ingénieur (Série D : Électrotechnique),...

4.2. ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

4.2.1. Ouvrages de base

G. SEGUIER Électronique de Puissance (DUNOD)

B. BRICHANT Électronique de Puissance (ETSF)

4.2.2. Polycopiés d'école

ENSEEIH Toulouse Hacheurs et Onduleurs Autonomes²⁴

²⁴ Disponible sur le net à l'adresse www.cict.fr.

4.2.3. Autres ouvrages traitant de points plus spécifiques

G. SEGUIER Les convertisseurs de l'Électronique de Puissance. Tome 1 : La conversion alternatif-continu (TEC-DOC LAVOISIER)

C. ROMBAUT, G. SEGUIER, R. BAUSIERE Les convertisseurs de l'Électronique de Puissance. Tome 2 : La conversion alternatif-alternatif. 2ème édition. (TEC-DOC LAVOISIER)

R. BAUSIERE, F. LABRIQUE, G. SEGUIER Les Convertisseurs de l'Électronique de Puissance. Tome 3 : La conversion continu-continu (TEC-DOC LAVOISIER)

F. LABRIQUE, G. SEGUIER, R. BAUSIERE Les convertisseurs de l'Électronique de Puissance. Tome 4 : La conversion continu-alternatif (TEC-DOC LAVOISIER)

F. LABRIQUE, H. BUYSE, G. SEGUIER, R. BAUSIERE Les convertisseurs de l'Électronique de Puissance. Tome 5 : Commande et comportement dynamique (TEC-DOC LAVOISIER)

B. BRICHANT Les Onduleurs autonomes (DUNOD)

S. ELBERG et P. MANTHONNET Évacuation de la chaleur dissipée dans les équipements électroniques (EYROLLES)

R. BESSON Technologie des composants électroniques (Ed. RADIO)

H. BUHLER Traité d'Électricité. Vol. XVI : Électronique de réglage et de commande (GEORGI-DUNOD)

H.P. HEMPEL Power Semiconductor Handbook (SEMIKRON)

B. BRICHANT L'Ondistor (DUNOD)

J.L. DALMASSO Électronique de Puissance - Commutation (Belin - Dia)

4.3. VARIATION DE VITESSE DES MACHINES ÉLECTRIQUES

R. CHAUPRADE Commande Électronique des moteurs à courant continu (EYROLLES)

R. CHAUPRADE et F. MILSANT Commande Électronique des moteurs à courant alternatif (EYROLLES)

J. BONAL Entraînements électriques à vitesse variable. Volume 1 : Rappels d'Électrotechnique et de mécanique. Les procédés de variation de vitesse. (TEC-DOC LAVOISIER)

J. BONAL Entraînements électriques à vitesse variable. Volume 2 : Rappels d'Électronique de puissance et d'automatique. Les variateurs électroniques de variation de vitesse. (TEC-DOC LAVOISIER)

J. BONAL et G. SÉGUIER Entraînements électriques à vitesse variable. Volume 3 : Interactions convertisseur-réseau et convertisseur-moteur-charge. (TEC-DOC LAVOISIER)

4.4. ALIMENTATIONS À DÉCOUPAGE

J.P. FERRIEUX et F. FOREST Les alimentations à découpage (MASSON)

D. SADARNAC Les alimentations à fréquence de découpage élevée (EYROLLES - Collection "Les cours de l'ESE").

J.L. COQUERELLE L'électronique de commutation (TECHNIP)

4.5. AUTOMATIQUE pour Électrotechniciens

GUYENOT et HANS Régulation et asservissement (EYROLLES)

GUYENOT, HANS et FILIPINI Asservissement numérique (EYROLLES)

BIANCHI, CUNIERES Systèmes asservis linéaires continus (SOFIEDIT)

Ch. GILLES Théorie des asservissements linéaires (DUNOD)

MAREST Régulation automatique (PRESSES POLYTECHNIQUES ROMANDES)

DINDELESC Technique de la régulation industrielle (EYROLLES)

J.-P. HAUTIER, J.-P. CARON Systèmes Automatiques. Tome 2. Commande des processus. Cours et exercices corrigés. (Ellipses).

4.6. COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM)

A. CHAROY Compatibilité électromagnétique. Parasites et perturbations des électroniques. Tome 1 : Sources, couplages, effets. Ed. Radio – DUNOD Tech.

A. CHAROY Compatibilité électromagnétique. Parasites et perturbations des électroniques. Tome 2 : Terres, masses, câblages. Ed. Radio – DUNOD Tech.

A. CHAROY Compatibilité électromagnétique. Parasites et perturbations des électroniques. Tome 3 : Blindages, filtres, câbles blindés. Ed. Radio – DUNOD Tech.

A. CHAROY Compatibilité électromagnétique. Parasites et perturbations des électroniques. Tome 4 : Alimentation, foudre, remèdes. Ed. Radio – DUNOD Tech.

J.-L. COCQUERELLE C.E.M. et Électronique de Puissance (Technip, 1999)

Maîtrise de la CEM – technologie, réglementation, normes – Les référentiels DUNOD (mise à jour permanente)

4.7. DIVERS

ASCH Les capteurs en instrumentation industrielle (DUNOD)

AGATI et MATTERA Mécanique appliquée (DUNOD)

MALVINO Principes d'Électronique (Mac Graw Hill)

P. BORNE, N. QUAYLE, O. BORNE, M.G. SINGH Dictionnaire d'Automatique, de Génie Électrique et de Productique (Technip, 1998)

E. SEMAIL Physique du Génie Électrique. (TEC-DOC LAVOISIER)