Une méthode de conception en électronique de puissance, à l'aide d'éléments caractérisés

Hubert Piquet, Henri Foch, Houssem Eddine Demni

▶ **To cite this version:**

Hubert Piquet, Henri Foch, Houssem Eddine Demni. Une méthode de conception en électronique de puissance, à l'aide d'éléments caractérisés. Electronique de Puissance du Futur EPF'2000, Dec 2000, Lille, France. hal-02520087

HAL Id: hal-02520087
https://hal.science/hal-02520087

Submitted on 26 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Une méthode de conception en électronique de puissance, à l'aide d'éléments caractérisés

Hubert PIQUET, Henri FOCH, Houssem Eddine DEMNI
Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle
Unité Mixte de Recherche INPT-ENSEEIHT / CNRS
BP 7122 – 2 Rue Camichel
31071 TOULOUSE CEDEX 7 – France

Résumé : *nous présentons une approche de la conception des systèmes de conversion d'énergie, par association d'éléments caractérisés. En réponse à un cahier des charges, les objectifs sont de définir une structure dont chacun des éléments constitutifs fonctionne dans de bonnes conditions et de permettre la mise en évidence des interactions entre ces constituants. Nous proposons donc un mode de caractérisation de ces éléments, utilisable pour construire le système étudié et susceptible de couvrir les différents points de vue à prendre en compte au cours de la conception. Les éléments sont représentés de façon graphique ; la construction et l'étude de la structure s'apparentent à un jeu de puzzle, guidé par la satisfaction du cahier des charge, à l'aide de pièces dont les contours expriment les règles de bonne utilisation.*

1. INTRODUCTION

Nous adoptons pour objectif initial le problème de la construction d'une chaîne de conversion à l'aide d'éléments préexistants ; le choix de ces éléments doit pouvoir être argumenté et les constructions a priori non viables ne doivent pas être envisagées.

Dans un premier temps, nous dégageons les propriétés que nous utiliserons pour caractériser les éléments ainsi que les critères que nous utiliserons pour assembler les éléments. Pour certaines de ces propriétés, nous proposons une représentation graphique

Puis nous décrivons le processus de conception, basé sur la manipulation des concepts dégagés en premier lieu, en exploitant la représentation graphique pour garantir une construction saine.

2. TRANSFERTS DE PUISSANCE

2.1. Introduction de la caractérisation

Procédons par induction pour dégager une approche permettant de considérer le point de vue des échanges énergétiques dans une chaîne de conversion. Soit donc le dispositif de la Fig. 1, correspondant à une machine à courant continu alimentée par un hacheur quatre quadrants ; l'alimentation de ce hacheur est réalisée à partir du réseau alternatif grâce à un redresseur MLI :

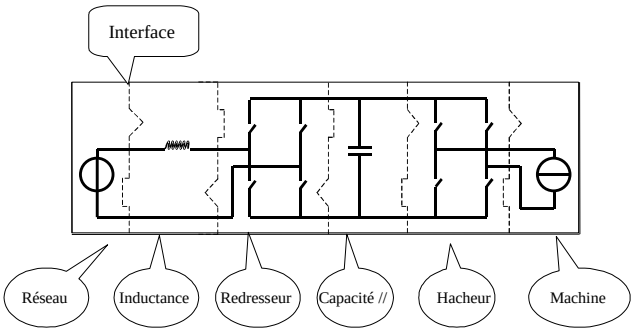


Figure 1: *chaîne de conversion électromécanique*

Les éléments assemblés peuvent donc être énumérés : le réseau (source sur laquelle on prélève l'énergie) , l'inductance placée en amont du redresseur MLI, le redresseur MLI, la capacité placé à sa sortie, le hacheur quatre quadrants, la machine à courant continu (qui est le récepteur à alimenter). Nous considérons, aux interfaces de ces différents éléments, la façon dont s'effectuent les échanges d'énergie, en utilisant les conventions qui apparaissent à la Fig. 2 :

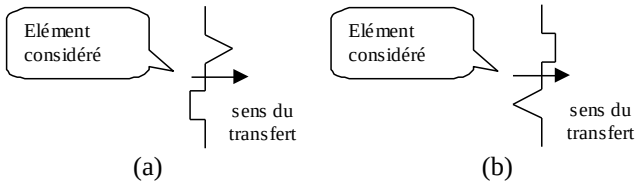


Figure 2 *: caractérisation des transferts de puissance : à « tension imposée » (a) et à « courant imposé » (b)*

Nous faisons apparaître les 2 alternatives possibles pour une interface et définissons les conventions graphiques que nous proposons :
- dans tous les cas, l'excroissance ayant la forme d'un « V » rappelle le symbole V de la tension ; celle qui a la forme d'un « I » rappelle le symbole I du courant.
- pour l'interface (a), l'élément qui est situé à la gauche de cette interface, impose la tension et subit le courant que lui impose le bloc situé à sa droite.
- l'interface (b) correspond à la situation inverse : l'élément situé à sa gauche impose le courant et subit la tension définie par le bloc connecté à droite de l'interface.

En mettant en place ces interfaces sur le schéma de la Fig. 1, nous faisons apparaître les différents éléments qui interviennent dans le système considéré comme autant de pièces assemblées, dont les profils s'emboîtent les uns dans les autres. On peut alors constater que :
- le réseau apparaît comme un dipôle qui impose sa tension,
- l'inductance placé en série sur le réseau, associée à deux interfaces, impose le courant circulant côté réseau et côté redresseur,

- le redresseur effectue une conversion courant-courant entre ses deux interfaces,
- la capacité impose la tension en sortie du redresseur et à l'entrée du hacheur,
- le hacheur effectue une conversion tension-tension entre ses deux interfaces,
- la machine apparaît comme un dipôle qui subit la tension fournie par le hacheur et lui impose son courant.

2.2. Généralisation

En inventoriant et classifiant les différentes combinaisons d'interfaces possibles, nous introduisons les familles de composants présentées au tableau suivant.

Les familles « transformateur » et « gyrateur » révèlent une grande richesse de représentation en terme de conversion de l'énergie grâce à leur relation entre entrée et sortie. Par exemple, pour le transformateur, la tension « d'entrée » est imposée par la pièce qui est connectée à sa gauche et il impose sa tension « de sortie » à la pièce qui est connectée à sa droite. Il subit le courant « de sortie » qui lui est imposé par cette dernière pièce et impose son courant « d'entrée » à celle qui est connectée à sa gauche.

Cet élément transformateur est également caractérisé par un gain K = Vs/Ve = Ie/Is ; ce gain peut être :
- *constant* : dans ce cas la pièce considérée correspond au transformateur idéal (au fait près que rien n'interdit que la tension à ses bornes ait une valeur moyenne non nulle),
- *modulé*, avec des valeurs valant soit 0 soit 1 : la pièce ainsi définie correspond à une cellule de commutation dont la fonction de connexion prend pour valeur instantanée ce gain modulé ; on retrouve ici la caractéristique du hacheur.

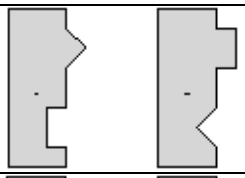
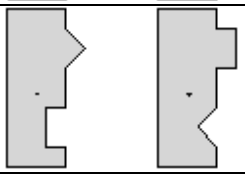
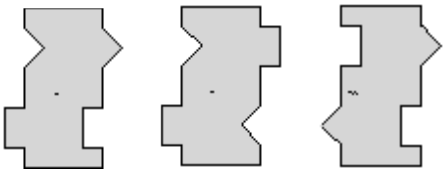
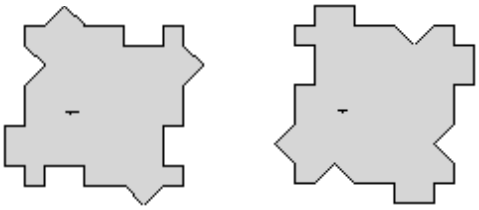
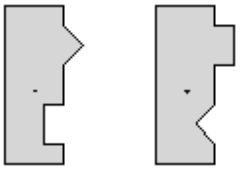
sources : • de tension : cet élément impose la tension sur son interface et subit le courant que lui « renvoie » le bloc qui lui est connecté ; • de courant : impose le courant et subit la tension.	
gains : la grandeur de sortie est proportionnelle à celle d'entrée ; ces deux éléments sont susceptibles de représenter une résistance.	
transformateurs : conversion tension > tension ou courant > courant **gyrateurs** : conversion tension > courant ou courant > tension Ces blocs conservent la puissance mais peuvent présenter un gain entre grandeurs d'entrée et de sortie.	
éléments de connexion : • à tension imposée (CET) : une des interfaces impose la tension à l'ensemble des autres ; elle subit un courant égal à la somme des courants imposés par les autres interfaces de l'élément ; • à courant imposé (CEC) : les rôles de la tension et du courant sont inversés	
intégrateurs : • de courant : la tension qu'impose cet élément est l'intégrale du courant qu'il subit ; on retrouve la fonction condensateur. • de tension : le courant qu'impose cet élément est l'intégrale de la tension qu'il subit ; on retrouve la fonction inductance.	

Table des éléments

3.2. Autres points de vue

3.2.1. Polarités

Les grandeurs électriques (tension et courant) qui sont échangées au niveau des différentes interfaces de chaque élément peuvent être caractérisées en termes de polarités. Une grandeur imposée par un élément au niveau d'une interface peut être : toujours positive, toujours négative ou bidirectionnelle. Le tableau suivant décrit, selon les caractéristiques d'une grandeur qu'un élément (« élément de référence ») impose, quelles sont les caractéristiques de la grandeur subie par les pièces (« élément connectable ») qui peuvent être connectées à la première.

Grandeur de l'élément de référence (imposée)	Grandeur d'un élément connectable (acceptée)
toujours positive	toujours positive, bidirectionnelle
toujours négative	toujours négative, bidirectionnelle
bidirectionnelle	bidirectionnelle

Ces règles d'interconnexion peuvent être traduites graphiquement (Fig. 3, pour l'exemple d'une interface à tension imposée) de sorte que l'assemblage des pièces les respecte.

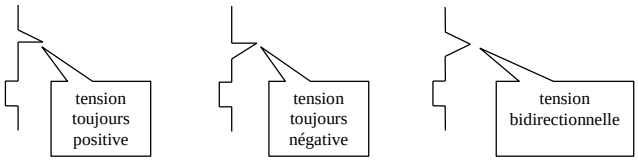


Figure 3: *Polarité des grandeurs sur une interface*

3.2.2. Validité fréquentielle des représentations

Considérons le cas d'un dispositif correspondant à un hacheur dévolteur contrôlé en courant et associant une source de tension et une inductance série, à travers un élément transformateur dont le gain modulé est issu d'une boucle de contrôle ; vu des interfaces, cette association apparaît comme une source de courant (Fig. 4).

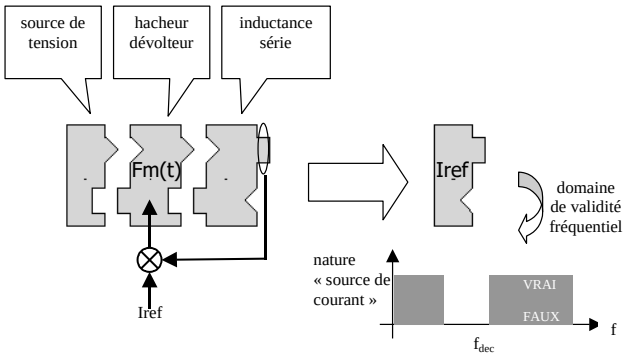


Figure 4 : *domaine de validité de la représentation*

Cependant, cette propriété n'est effective que dans certains domaines de fréquence :
- en basses fréquences (dans un domaine limité par la fréquence de coupure du correcteur), la boucle de contrôle assure la validité de la représentation sous forme d'une source de courant.
- en hautes fréquences (au delà de la fréquence de commutation du hacheur), l'inductance joue son rôle de source de courant instantanée
- entre ces deux plages de fréquence, la caractérisation en terme de source de courant perd a priori sa validité.

Le choix d'une large bande passante pour la régulation de courant et d'une valeur élevée pour l'inductance permet cependant de garantir la propriété « source de courant » du macro-élément dans tout le domaine de fréquence.

3.2.3. Fonctionnalités des éléments

D'autres propriétés sont également utilisées pour caractériser les éléments constitutifs d'un système et justifier leur utilisation :
- la présence d'un isolement galvanique,
- le caractère élévateur (en tension ou en courant) ou abaisseur d'un élément,
- la réversibilité en puissance d'un dispositif,
- le domaine fréquentiel de validité de la caractérisation d'un modèle : il est en effet très important de garantir l'homogénéité de la représentation de l'ensemble du système.

Il est possible de considérer ces points de vue pour la caractérisation des éléments en étendant leur représentation graphique ; notons cependant que ces points de vue ne sont pas pertinents quel que soit l'élément considéré. La gestion de ces propriétés permet de s'assurer (a posteriori ou en cours d'assemblage) de la satisfaction de certains éléments du cahier des charges et de la validité de la construction en cours (Fig. 5).

3. EXPLOITATION, CONCEPTION

3.1. Démarche de conception

Les éléments de conversion utilisables en électronique de puissance sont caractérisés selon les différents critères énumérés plus haut.

On crée ainsi une bibliothèque de composants utilisables pour concevoir une chaîne de conversion. Les propriétés de chaque composant apparaissent sur sa représentation graphique.

Une chaîne de conversion est construite en assemblant ces « pièces de puzzle ».

Ce concept interdit toute incohérence dans l'assemblage puisque les interfaces connectées sont forcément compatibles.

Une démarche de conception d'une chaîne de conversion consiste donc, dans un premier temps, à définir un objectif et un cahier des charges. Cela consiste à identifier les caractéristiques de la source d'énergie disponible, puis celles de la charge à alimenter et enfin le type et les caractéristiques des transformations à faire subir à la forme de l'énergie disponible pour l'adapter au besoin.

Ces éléments caractéristiques permettent, dans un deuxième temps, d'identifier les trois éléments de puzzle qui correspondent respectivement à la source d'énergie (élément à une seule interface), à la charge (élément à une seule interface) et à la conversion à réaliser entre les deux (élément à deux interfaces) (Fig. 7.(a)).

Cela signifie que le concepteur connaît suffisamment bien la source et la charge pour pouvoir les représenter par des « macro-éléments » qui englobent toutes leurs *caractéristiques significatives vis à vis de l'élément de conversion*. Rien ne l'empêche, cependant d' « éclater » ultérieurement ces macro-éléments pour préciser ou analyser leurs comportements intimes dans l'association.

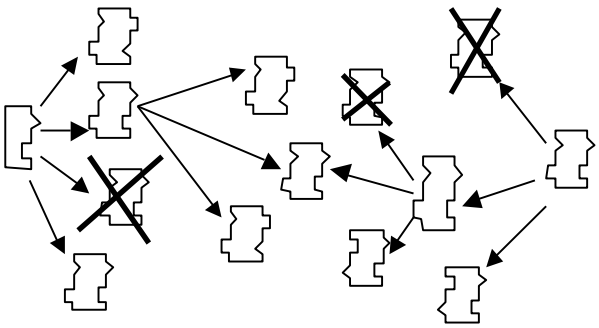


Figure 5 *: Construction d'un système par association de pièces compatibles : le cheminement du raisonnement*

La conception de l'élément de conversion va consister maintenant à décomposer l'élément unique représentant une fonction en sous-éléments de plus en plus précis se

rapprochant progressivement de la réalisation matérielle tout en respectant, à chaque étape, la cohérence avec les éléments déjà déterminés et placés.

Cette cohérence peut s'énoncer de manière simple : dès que l'on connaît les caractéristiques d'une interface à laquelle on souhaite associer un composant, seuls des éléments possédant une interface compatible sont candidats à cette association. C'est le respect du cahier des charges et les fonctionnalités représentées par les éléments qui guident le concepteur dans son choix parmi les éléments candidats (Fig. 5).

Si l'on désire placer le *dernier* élément d'une chaîne, seuls les éléments compatibles avec les caractéristiques des interfaces vacantes sont candidats (Fig. 6).

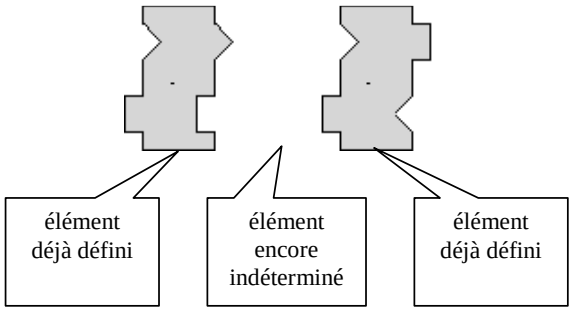


Figure 6 *: Synthèse d'un élément resté indéterminé*

En retournant cette proposition, on voit que l'on peut « éclater » un élément en un ensemble de sous-éléments pourvu que tous les sous-éléments respectent les mêmes règles d'association. En fait les caractéristiques des interfaces d'un élément représentent le cahier des charges des sous éléments candidats à sa représentation plus détaillées ou à plusieurs de ses modes de réalisation.

Ainsi, entre un générateur identifié comme une source de tension continue et une charge identifiée comme une source de courant alternatif, l'élément de conversion est de type « transformateur » (Fig. 7.a).

Le convertisseur statique direct susceptible de remplir cette fonction peut initialement se résumer à une simple « fonction de modulation » (sorte de rapport de transformation variable dans le temps) associée au transformateur. Pour affiner cette représentation, ce convertisseur peut, par exemple, se décomposer successivement en deux branches « transformateur » alimentées par une connexion équi-tension à partir de la source de tension et interconnectée avec la charge par une connexion équi-courant (Fig. 7.b) [3].

Chaque branche « transformateur » peut alors posséder sa propre fonction de modulation. Chaque branche peut, à son tour, être explicitée sous forme d'une cellule de commutation, associant deux interrupteurs en série, chaque interrupteur peut être représenté par un schéma équivalent faisant apparaître ses imperfections, les imperfections du câblage, l'électrode de commande, etc (Fig. 7.c et 7.d)

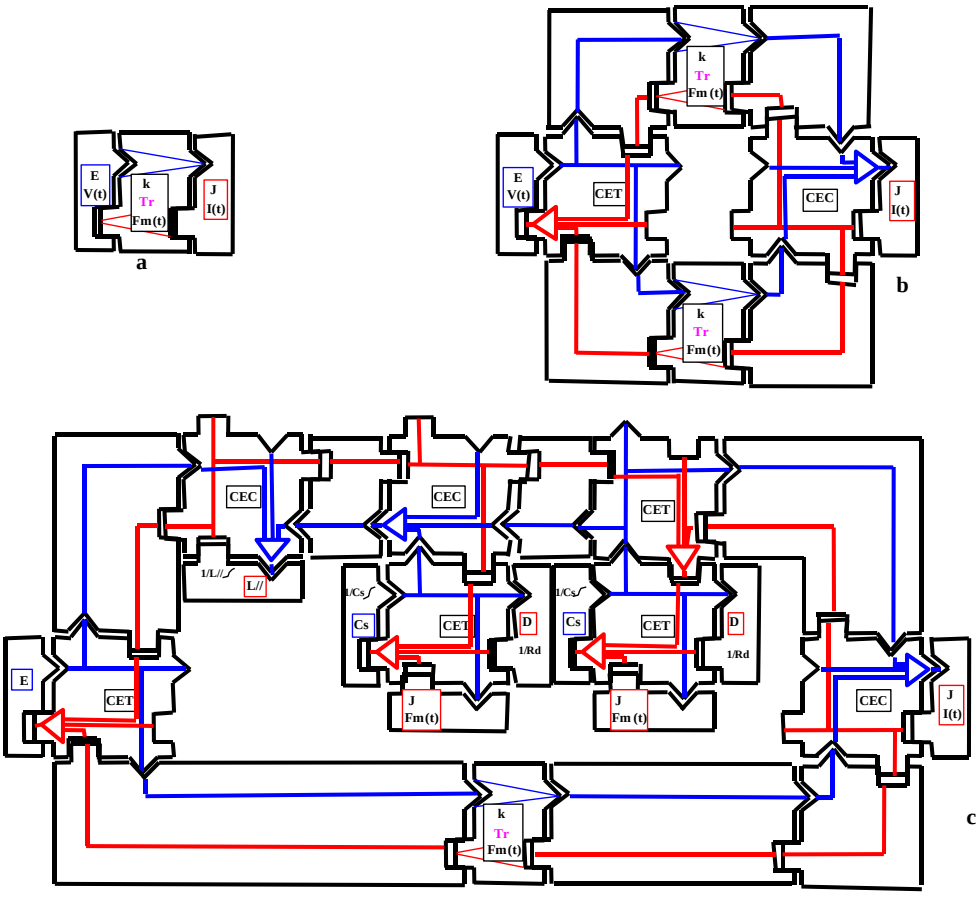


Figure 7 – a, b, c - *: Synthèse d'un élément encore indéterminé*

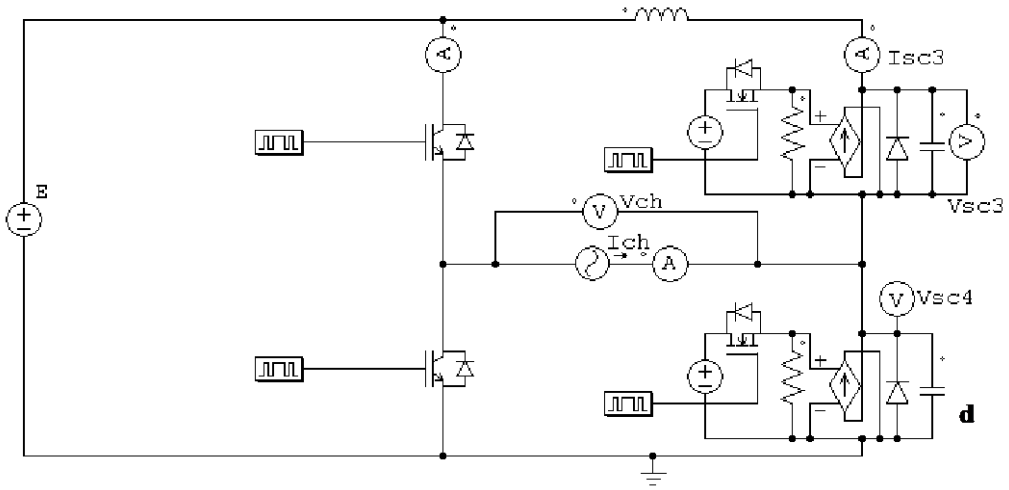


Figure 7 – d - *: Schéma filaire : seule la cellule de commutation de droite est décomposée en détail*

Nous venons de définir la notion de « zoom » qui représente une même fonction, avec différents grossissements, tout en gardant la *cohérence vue des bornes* avec son environnement.

Le niveau de finesse requis lors de la synthèse dépend évidemment des buts poursuivis, mais il faut d'ores et déjà remarquer que ces niveaux de finesse peuvent être modulés soit globalement si l'on désire avoir des vues plus ou moins fines de l'ensemble de la chaîne de conversion, soit localement si l'on souhaite mettre en évidence l'effet de l'ensemble de la chaîne sur un élément particulier de celle-ci.

La démarche de synthèse apparaît donc comme un « jeu de puzzle » dans lequel le concepteur doit relier l'élément source à l'élément charge par un ensemble d'éléments cohérents tout en respectant (et en affinant) tout au long de son chemin les objectifs de la conversion à réaliser. Plusieurs pistes (solutions) peuvent apparaître. Elles feront alors l'objet d'une évaluation et d'un classement selon des critères d'efficacité (optimisation).

Respecter les objectifs et contraintes de la conversion peut signifier que les chemins de la conception passent par un certain nombre d'étapes obligatoires (isolement galvanique, stockage d'énergie capacitive, …) pour relier le départ à l'arrivée. L'ordre de ces étapes obligatoires n'est pas forcément imposé mais ces étapes incontournables fractionnent la démarche de synthèse en une succession de synthèses partielles.

Avec la pratique, on se rend compte que des ensembles d'éléments reviennent de manière récurrente et forment de véritables macro-fonctions (filtre, convertisseurs, …). Il peut être intéressant de les isoler en qualité de macro-élément tout en gardant et connaissant le détail de leur structure. Nous définissons en fait les grossissements successifs connus dont dispose le « zoom » d'une certaine fonction.

3.2. Généralisation de la démarche - automatisation

Nous avons décrit une démarche de conception comme la construction entre le point de départ et le point d'arrivée d'un chemin constitué d'éléments s'emboîtant les uns dans les autres. Cette possibilité d'assemblage garantit le respect de toutes les règles *portées par le graphisme* de l'élément du puzzle. Le choix d'un élément à assembler au précédent doit cependant être fait, parmi tous les éléments candidats, en tenant compte de l'objectif général du cahier des charges. Le suivi du cahier des charges ainsi que la prise en compte des caractéristiques des éléments *non portées par leur graphisme* peut se faire, à chaque étape de la conception, par la confrontation de règles traduisant le cahier des charges et de règles complétant celles déjà portées par le graphisme des éléments à assembler. L'ensemble de ces règles peut être regroupé dans une *base de règles* dont une partie est propre au problème traité (cahier des charges) et l'autre propre aux divers éléments de puzzle (caractéristiques non portées par leur graphisme). Cette base de règle grandit toutes les fois qu'un macro-élément apparaît et hérite des caractéristiques, à la fois, du cahier des charges conduisant au macro-élément et des caractéristiques élémentaires de ses constituants.

On voit ainsi que le concept de « puzzle » doit être compris comme une sorte de système expert de conception qui interdit toute violation d'un certain nombre de règles élémentaires portées par le graphisme de ses éléments. En outre, il est apparu tout l'intérêt que pouvait revêtir la présence conjointe d'un système à base de règles pour guider le concepteur dans ses choix afin d'assurer le respect du cahier des charges et des autres règles de bon usage des éléments pré-caractérisés.

Un intérêt complémentaire réside dans le fait que si l'assemblage du « puzzle » procède d'une démarche de construction des chemins énergétiques et non pas seulement des chemin des courants électriques comme dans les schémas « filaires », la mise en équation du circuit électrique traduisant le circuit énergétique bâti est non seulement possible mais grandement facilitée par le

fait que le circuit obtenu ne peut comporter aucune anomalie topologique (mailles capacitives, coupures inductives, …). De ce fait, sa mise en équation est automatique, sa représentation graphique étant très voisine de celle des schémas de calcul analogique et pouvant être portée par le graphismes des éléments du « puzzle » (Fig. 8).

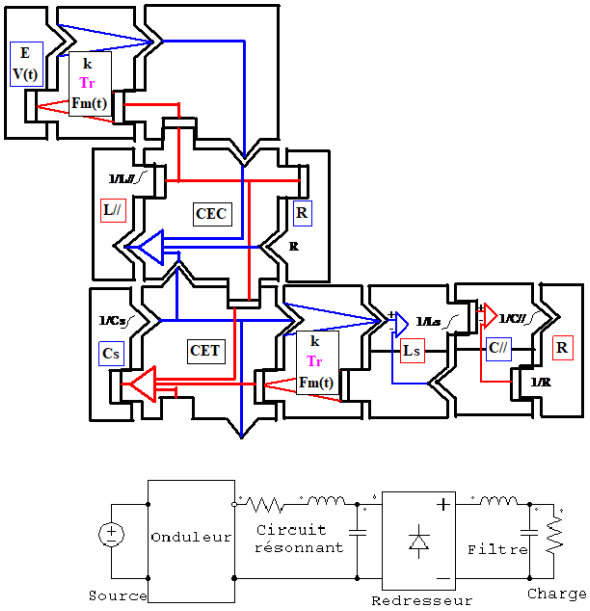


Figure 8 *: Convertisseur à résonance*

Chaque pièce porte en effet ses propres équations électriques ; en les exprimant, en identifiant les grandeurs échangées sur chaque interface et en éliminant les variables tension et courant liées aux éléments résistifs, on obtient alors les équations d'état du circuit. Ces manipulations peuvent être réalisées de façon entièrement automatique, à l'aide d'outils de calcul symbolique [4].

4. CONCLUSION

Dans le cadre de la conception des dispositifs de conversion d'énergie, nous avons décrit une approche basée sur l'assemblage d'éléments caractérisés.

Les propriétés retenues pour cette caractérisation concernent les grandeurs énergétiques – tension ou courant - échangées sur les interfaces des pièces d'assemblage et à ce titre notre approche est voisine de celle retenue dans la modélisation par bond graphs [1][7] et par GIC [2][5].

Ces propriétés sont complétées par les caractéristiques des grandeurs énergétiques (polarité, domaine fréquentiel de validité de cette représentation) et par la conversion réalisée.

L'ensemble des caractéristiques des éléments de conversion est exploité pour exprimer les règles d'interconnexion et de bon usage des éléments dans un système.

Une représentation graphique des propriétés et des règles d'association est proposée ; chaque élément caractérisé est associé à un symbole où ses propriétés sont représentées.

D'usage intuitif, la manipulation de ces symboles apporte un aspect ludique à la conception d'un système qui tend à s'apparenter à un jeu de puzzle. Les profils des pièces imposent le respect des règles d'assemblage et garantissent la construction de structures saines au plan des échanges énergétiques.

Les exemples que nous avons présentés ne concernent que des éléments considérés sous l'angle de leur propriétés électriques ; l'approche que nous proposons permet néanmoins de gérer des systèmes multi physiques. Il serait ainsi possible d'étendre l'exemple d'introduction de la Fig. 1 en prenant en compte la charge mécanique. On serait ainsi amené à introduire des interfaces à couple imposé, ou à vitesse imposée et de façon plus générale, recouvrant ainsi plusieurs domaines de la physique, à effort (tension, couple par exemple) imposé ou flux (courant, vitesse par exemple) imposé.

5. REFERENCES

[1] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis, *Modélisation et identification des processus*, Ed. TECHNIP

[2] J. P.Hautier - J.Faucher, *Le graphe informationnel causal, outil de modélisation et de synthèse des commandes de processus électromécaniques*, Bulletin de l'Union des Physiciens, 1996

[3] D. Fezzani – H. Piquet – Y. Chéron – M. Metz, *Design of static converters : an expert system approach*, EPE'93, Brighton, septembre 1993

[4] H. Piquet - J.P. Cambronne - S. Saadate - C. Glaize, *Conception des dispositifs et systèmes électrotechniques*, Electronique de Puissance du Futur 1994, Cachan, septembre 1994

[5] A. Bouscayrol, X. Guillaud, J-P. Hautier, P. Delarue, *Macromodélisation des conversions électromécaniques*, revue RIGE, vol 3 – n°2/2000, pp 257-282

[6] J-P. Laurent, M-R. Vescovi, *La représentation des connaissances et le raisonnement sur les systèmes physiques – Physique Qualitative* - , Ed. CEPADUES

[7] G. Dauphin-Tanguy, *Systèmes automatisés IC2 – Les bond graphs,* , Ed. HERMES