

Une librairie 20sim pour la simulation basée Bond Graphs de systèmes de commande de machines électriques

SERGIO JUNCO, GONZALO DIEGUEZ, FACUNDO RAMIREZ

Departamento de Electrónica, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Rosario, Ríobamba 245 bis, S2000EKE Rosario, Argentina

sjunco@fceia.unr.edu.ar

Résumé— Cet article présente une librairie 20sim® permettant de modéliser des systèmes de commande de machines électriques (SCME) par couplage graphique de sous modèles, et puis de les simuler. Ainsi, la librairie se compose des sous librairies suivantes, chacune d'elles associée à un des sous-systèmes faisant partie d'un SCME, et dont les deux premières notamment sont constituées par des modèles Bond Graph : i) Moteurs électriques ; ii) Convertisseurs en électronique de puissance ; iii) Algorithmes de commande des machines ; iv) Observateurs et simulateurs ; et v) Modèles auxiliaires. Quelques exemples d'application sont présentés avec de résultats de simulation afin d'illustrer l'utilité et les possibilités de l'outil.

Mots clés— Modélisation et simulation, Bond Graphs, 20sim, Machines électriques, Convertisseurs de puissance, Commande non linéaire.

I. INTRODUCTION

Omniprésents dans plusieurs domaines de la technique, de la production et d'autres activités, les SCME sont des systèmes composés de sources d'alimentation, de convertisseurs en électronique de puissance, de machines électriques et de charges mécaniques, le tout couplé par des liens de puissance et, en même temps, interagissant par la voie de liens d'information avec des systèmes de commande complexes incluant les algorithmes de contrôle et ses compléments (capteurs, filtres, observateurs de variables, estimateurs de paramètres, ...) [1].

Ainsi, la conception des SCME a impérativement besoin d'outils de modélisation et simulation, en particulier pour le dimensionnement, l'analyse dynamique et la synthèse des lois de commande [2]. Les Bond Graphs (BG) sont très adaptés à ce sujet, car ils permettent la modélisation acausale et assemblable de systèmes physiques multidomains et, de plus, leur couplage avec des schémas bloc (SB), convenablement utilisés dans l'automatique pour représenter le traitement causal de l'information exigé par les algorithmes de commande et ses compléments [3]. La non-causalité primaire des BG s'avère essentielle pour le prototypage des modèles, nécessaire au moment de s'attaquer à la conception de systèmes complexes. En effet, la causalité -incontournable lors du passage aux équations, au calcul formel, symbolique ou numérique, ou à l'analyse directe sur le BG- ne fait qu'encombrer le prototypage ou approche multimodèle, c à d, la considération de plusieurs options de construction issues d'hypothèses physiques et/ou critères de performance alternatifs. Comme bien connu d'ailleurs, les BG peuvent être augmentés dans une deuxième étape avec les interactions causales entre les variables du système, ce qui permet

accomplir toute sorte de manipulations du modèle, dont la simulation numérique [4].

Cet article présente une librairie 20sim® [5] permettant, dans un premier temps, la modélisation conjointe de ces deux aspects de SCME, l'aspect énergétique et transfert de puissance par BG, et l'aspect informationnel par SB, et, dans un deuxième temps, la simulation directe du système depuis le modèle graphique.

Le reste de l'article est organisé de la façon suivante : la section II introduit la structure général de SCME, des modèles associés, et des outils nécessaires pour les implanter sur 20sim®. Ensuite, la section III décrit la librairie et la section IV présente la modélisation et simulation d'un système de commande d'une machine asynchrone, exemple qui permet d'apprécier les avantages d'utiliser l'approche BG et cette librairie. Finalement, les conclusions du travail sont tirées dans la section V.

II. MODELISATION DE SCME

A. La structure générale d'un SCME

La figure 1 montre la structure générale d'un SCME. On y remarque deux axes principales : le vertical, exprimant le flux de puissance transféré vers la charge, et l'horizontal, mettant en évidence le flux d'information nécessaire pour la commande.

Dans l'industrie, on a normalement un système d'alimentation à courant alternatif, triphasé à partir de certaine puissance. Les convertisseurs les plus répandus sont le redresseur contrôlé chez les moteurs courant continu (CC), et l'agrégat redresseur-onduleur chez les machines courant alternatif (CA), où au moins le dernier est commandé. Les machines les plus utilisés sont les moteurs à courant continu dans ses différentes topologies d'excitation - surtout séparée ou indépendante, mais aussi série pour certaines applications-, et le moteur d'induction, avec, dernièrement, la machine synchrone à aimant permanent gagnant du terrain dans beaucoup de servomoteurs. Quand aux charges mécaniques, il y a un très large spectre en dépendance de l'application.

Le système de commande est composé de plusieurs boucles fermées connectées en une cascade que commence par la boucle extérieure, dans la plus haute hiérarchie, et se décline vers les hiérarchies inférieures à travers des contrôleurs, de la machine d'abord et du convertisseur de puissance après [1]. Le retour d'information indiqué en ligne pleine est toujours présent, notamment chez le moteur par voie de capteurs placés à ses bornes. Les lignes pointillées indiquent des liens d'information facultatifs, ils peuvent être présents de manière

physique (capteurs) ou virtuelle (observateurs, estimateurs), ou ne pas être présents. Par exemple, chez une machine asynchrone, la ligne pointillée sortant du moteur indique un capteur du flux rotorique qui, ne pas étant prévu dans les moteurs standards, est remplacé, si besoin, par un observateur asymptotique du flux. La ligne sortant de l'axe du moteur indique un capteur de vitesse ou de position angulaire, remplacé par un estimateur de la grandeur correspondante chez les systèmes sans capteurs mécaniques. Finalement, le retour de grandeurs électriques vers le contrôleur (modulateur) du convertisseur est présent dans le cas des convertisseurs commandés en courant et *normalement* absent s'ils sont commandés en tension.

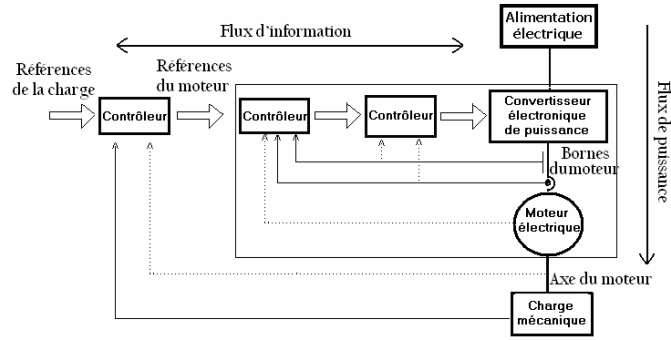


Figure 1: Structure générale d'un SCME.

B. Modélisation graphique des SCME

On considère que les formalismes les plus adaptés pour la modélisation de la structure générale présentée ci-dessus sont les SB pour la partie commande, et les BG pour la partie puissance. En effet, les SB représentent d'une façon causale la mathématique associée aux algorithmes de commande, ce qui correspond à la façon d'agir (ou la fonctionnalité) des contrôleurs. Par contre, la causalité, n'existant pas dans la nature au sens du calcul employé ici, et n'étant qu'une convention de représentation des lois de la physique aux effets de leur traitement, son emploi n'est pas convenable au moment de la modélisation. Les BG, admettant une formulation acausale dans un premier moment, et leur augmentation causale après, s'offrent alors comme la solution pour la modélisation physique de la partie puissance et le calcul associé dans des stages successifs.

Par la suite on présente la modélisation de quatre composants standards des SCME en guise d'exemples paradigmatiques de la technique de modélisation employée dans chaque sous bibliothèque. Il s'agit de la machine asynchrone, du pont onduleur CC-CA triphasé, d'un système de commande de la machine, et d'un système de modulation, ou commande, du pont.

1. *La machine asynchrone (MA).* On reprend ici le modèle BG présenté dans [6], développé à partir du circuit électrique équivalent de la figure 2 [7]. La machine est vue depuis un repère généralisé ou arbitraire dq tournant autour de l'axe homopolaire O (orienté avec l'axe de la machine) à la vitesse $\omega_F(t) = d\rho_F/dt$, où $\rho_F(t)$ est la position angulaire de l'axe d du repère. On considère un moteur à cage avec un stator de n_p paires de pôles connecté en étoile (ce qui entraîne l'annulation des grandeurs homopolaires), on suppose linéarité magnétique et une distribution spatiale sinusoïdale du champ magnétique dans un entrefer homogène, et on néglige hystérèse et courants parasites. On utilise les sous indices d, q et O pour les grandeurs des axes direct, quadrature et homopolaire, et s et r pour ceux du stator et rotor, respectivement. Le sous indice l

chez les inductances indique dispersion, et L_m représente l'inductance dite mutuelle, de magnétisation, ou d'entrefer.

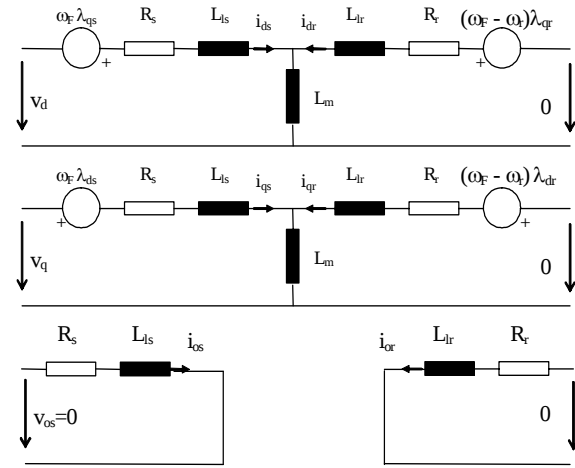


Figure 2: Circuit équivalent de la MA dans le repère dqO .

Il existe une correspondance biunivoque entre le circuit de la figure 2 et la partie électrique du BG scalaire de la figure 3. L'alimentation électrique se fait par trois sources de tension v_{dqO} résultantes de la conversion au repère rotatif des sources v_{RST} liées au stator. L'observation depuis ce repère fait apparaître les quatre sources dépendantes dont la tension vaut $\omega_F \cdot \lambda_{d/q,s/r}$ ($\omega_F \cdot \lambda_{ds}, \dots$), modélisées comme sources modulées par ω_F dans le BG. Comme l'on démontre dans [6] à l'aide de l'analyse BG, elles sont des sources virtuelles dans le sens que la somme de leur puissances est identiquement nulle, propriété exprimant qu'elles sont une conséquence mathématique ou formelle, pas physique, de la visualisation de la machine depuis le repère fictif. La signification physique des sources dépendantes $\omega_F \cdot \lambda_{dr}$ et $\omega_F \cdot \lambda_{qr}$ est mieux mise en valeur par le BG que par le circuit. En effet, dans le circuit elles apparaissent comme sources dépendantes (à droite, confondues avec deux des sources ci-dessus commentées), tandis que le BG montre clairement qu'elles constituent le côté électrique de deux MGY reflétant l'échange d'énergie entre les sous systèmes électriques et le mécanique.

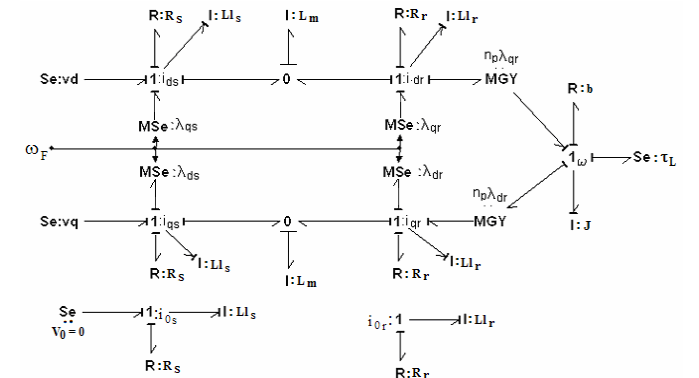


Figure 3: Modèle BG scalaire de la MA dans le repère dqO .

Le BG de la figure 3 montre aussi l'inactivité déjà commentée de sous système homopolaire. En le négligeant, on peut construire le BG vectoriel ou Multi-Bond Graph (MBG) de la figure 4, qui capture d'une façon compacte les phénomènes dans les axes d et q . Chaque multi-lien associe un vecteur $[e_d, e_q]$ de variables d'effort à un vecteur $[f_d, f_q]$ de variables de flux, dont le produit interne exprime la puissance transférée par le lien. Ce BG permet d'apprécier d'avantage les différents sous systèmes composant le modèle global et leur interaction. L'inertie $I : L_2$, représente l'inductance d'entrefer, sa valeur étant donnée en (1). La matrice unitaire antisymétrique J_2 , voir

également (1), sert à exprimer le couplage entre les axes d et q par voie des tensions de rotation et à travers des vecteurs de flux statorique λ_s et rotorique λ_r . Le MGY : $M(\lambda_r)$ emploie son module (voir (1)) pour calculer le vecteur $\mathbf{e} = [e_d, e_q]^T$ des forces contre-électromotrices de rotation agissant sur le sous BG du rotor comme $\mathbf{e} = M(\lambda_r) \cdot \omega_F$ (ici aussi s'exprime le couplage d - q), et le couple électromagnétique comme $T_{em} = M^T(\lambda_r) \cdot i_r$, où « T » dénote transposition et i_r le vecteur courant du rotor.

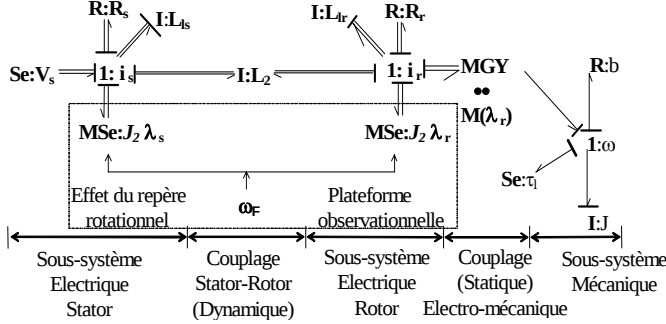


Figure 4: Modèle MBG de la MA dans le repère dq .

$$L_2 = \begin{bmatrix} L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m \end{bmatrix}, J_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, M(\lambda_r) = n_p J_2^T \lambda_r \quad (1)$$

En regroupant les champs d'inertie $I:L_{ls}$ et $I:L_{lr}$ (inductances de dispersion) avec le champ $I:L_m$ on évite la causalité dérivative visible figure 4, laquelle n'est pas convenable aux effets de la simulation numérique. Il en résulte le BG de la figure 5, dont l'inertie $I:L_1$ répond à la matrice (2).

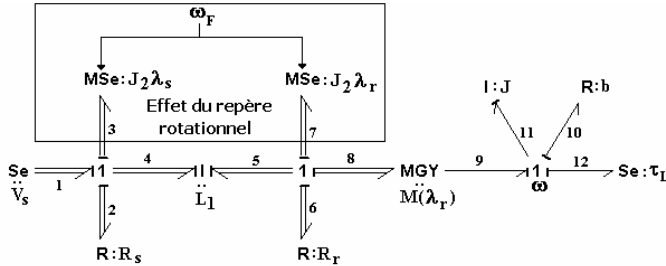


Figure 5: Modèle MBG de la MA en causalité intégrale pleine.

$$L_1 = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

La modélisation du couplage de la MA à travers ses bornes triphasées RST à une source d'alimentation quiconque, il faut compléter le modèle précédent de la façon indiquée figure 6. Le TF à module matriciel fixe M sert à relier les grandeurs des enroulements physiques RST, spatialement séparés de 120° électriques entre eux, avec celles d'un système orthogonal abO aussi solidaire au stator. La matrice satisfait la condition $M=M^T$, requise pour que le TF conserve la puissance qu'il transfère. Le MTF exprime l'interconversion, par rotation de repères, entre les variables abO et dqO , ce qui est une fonction de ρ_F , la position angulaire instantanée du repère arbitraire. Les deux transformations sont écrites sous la forme utilisée pour le calcul des efforts ; pour calculer les flux on utilise la forme transposée. Finalement, le bloc labellisé MA contient le modèle de la figure 5 augmenté du BG de la composante homopolaire inactive, dû au souhait de garder le modèle triphasé aussi dans le repère arbitraire.

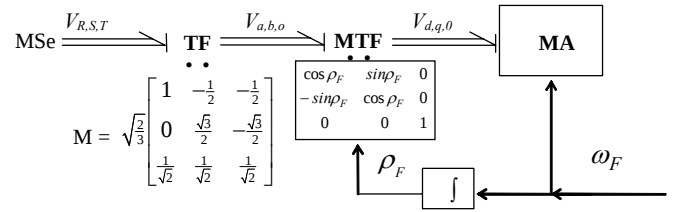


Figure 6: Modèle MBG complet de la MA.

Remarque. Le BG de la figure 6 est universel dans le sens où il est capable de modéliser la MA dans n'importe quel repère de la théorie des machines électriques. Il suffit de préciser le repère en spécifiant la variable ρ_F . Ainsi par exemple, on obtient le modèle dit stationnaire, ou solidaire avec le stator, en imposant $\rho_F=0$, ce qui implique $\omega_F=0$. La première condition, insérée dans la matrice du MTF (voir figure 6), donne la matrice $diag(1,1,1)$, ce qui confirme l'identité des coordonnées $abO \equiv dqO$, et la deuxième, imposée au BG MA (voir détail figure 5), fait disparaître les sources associées à l'effet du repère rotatif. Outre, le modèle en coordonnées orientées avec le vecteur du flux rotorique λ_r est obtenu par la simple imposition de ω_F d'après l'équation (3), évaluable avec des variables à disposition à l'intérieur du bloc MA (BG de la figure 5). Il faut noter que la singularité $\lambda_{dr}=0$ de (3) (qui ne parvienne qu'au démarrage de la machine et qu'on peut la contourner avec une faible initialisation de l'intégrateur associé) est extérieure ou étrangère au bloc MA, qui n'a aucune singularité, puisque il « ne sait pas » quel est le repère. Ceci n'est pas le cas dans la pratique, habituelle lors qu'on spécifie le modèle par équations d'état, de reformuler les équations en imposant $\lambda_{qr}=0$ et $d\lambda_{qr}/dt=0$ (l'axe direct du repère est orienté avec le vecteur du flux rotorique), et qui donne un modèle singulier.

$$\omega_F = \dot{\rho}_F = n_p \omega + \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}}{\lambda_{dr}} \quad (3)$$

La figure 7 montre le modèle implanté en 20sim®, qui a légères différences avec celui de la figure 6. Le TF additionnel à gauche sert à convertir les tensions de ligne d'un onduleur triphasé (ou d'autre source quiconque) aux tensions de phase V_{RST} . Le bloc IM ne coïncide pas complètement avec le bloc MA (càd, avec le BG de la figure 5) parce que la partie mécanique a été ramenée à l'extérieur du bloc, càd, la machine est conçue ici comme une source de couple. Le switch commandé par le signal « Control_A » permet de choisir soit un repère provenant de hors ce modèle, soit l'un de deux repères prévus dans le bloc, choisibles avec l'autre switch (« Control_B ») : le repère champ orienté, cas où on laisse passer le signal ω_F calculé après l'équation (3), ou le repère stationnaire, où ω_F prend la valeur zéro.

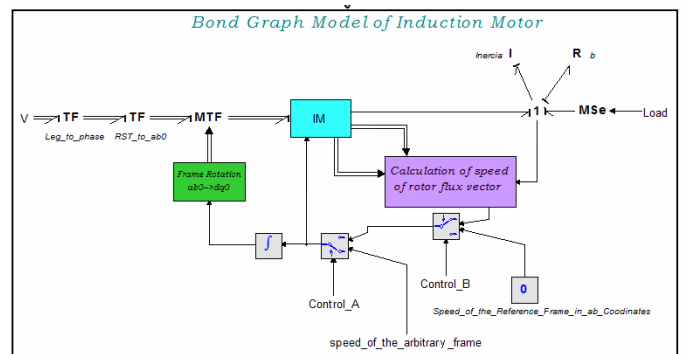


Figure 7: Modèle MBG de la MA implanté en 20sim®.

Le bloc 20sim® IM est montré en détail figure 8. On y voit deux capteurs du type ① pour capturer les flux magnétiques des axes d et q du stator et du rotor, servant à moduler les sources MSe et le MGY. Le port d'entrée p véhiculant les trois liens dq0, un splitter est utilisé pour séparer la composante homopolaire.

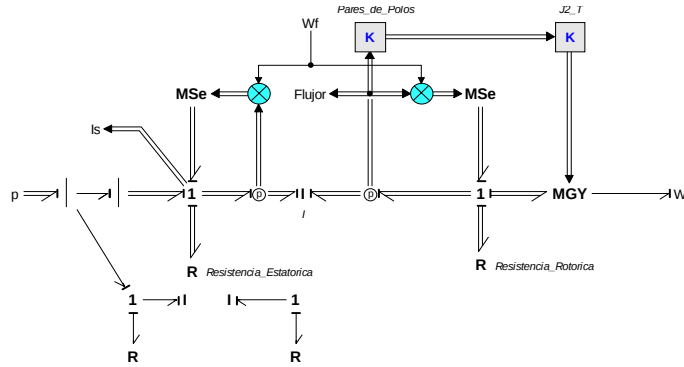


Figure 8: Détail du bloc IM de la figure 7.

2. *L'onduleur*. Par la suite on considère l'exemple du pont onduleur triphasé [8] de la figure 9, en supposant que chaque paire transistor-diode Q-D se comporte comme un switch idéal. Pour illustrer les principes de la technique de modélisation BG employée pour les sous systèmes en électronique de puissance commutée, on fait l'hypothèse de commutation par paires, c'est-à-dire que les deux switches de chaque colonne du pont ont des états logiques complémentaires.

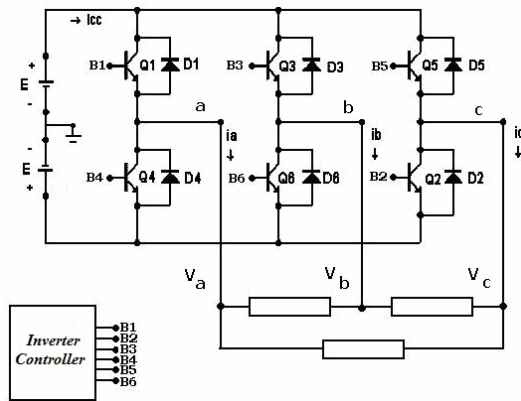


Figure 9: Pont onduleur triphasé à transistors.

Pour modéliser les commutations en puissance on a choisi le formalisme SPJ (Switched Power Junctions) introduit en [9] et revisité en vue de son implantation 20sim® et des applications techniques, dont l'onduleur ici traité, dans [10]. Une SPJ et une jonction 0 (ou 1) qui admet plus d'un lien de puissance lui imposant effort (ou flux) dans son représentation graphique, ce qui n'entraîne pas un viol des règles de la causalité parce que, du point de vue comportementale, seul un de ces liens est actif dans un instant arbitraire donné. Le lien actif est choisi par une variable de contrôle. On représente une SPJ comme une jonction standard sous indiquée de la lettre « s » (pour *switched*), comme l'on montre dans les exemples de la figure 10.

Mathématiquement, les 0_s et 1_s obéissent aux lois (4) et (5), respectivement, où les variables U_i sont les signaux logiques portés par le multibond activé (voir figure 10). Dans un instant arbitraire donné, une et seule une des variables U_i peut valoir 1. Supposons, dans le cas du 0_s par exemple, que ce soit $U_3 = 1$; ça veut dire que la SPJ reçoit, et transmet aux liens $n+1$ et $n+2$, l'effort e_3 provenant du lien 3, qui à son tour reçoit le flux (f_{n+1}).

Puisque $U_i = 0$ pour $i = 1, 2, 4, \dots, n$, tous ces efforts e_i sont ignorés, et tous les flux f_i valent 0, c'est-à-dire, les sous systèmes associés à ces liens sont déconnectés de la SPJ.

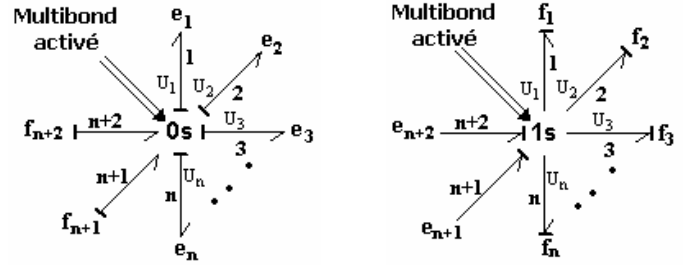


Figure 10: Exemples génériques de SPJ 0_s et 1_s .

$$\text{l'effort transmis} = U_1 e_1 + U_2 e_2 + \dots + U_n e_n \quad (4)$$

$$\text{les flux transmis} = f_i = U_i (f_{n+1} + f_{n+2}); i = 1, \dots, n$$

$$\text{le flux transmis} = U_1 f_1 + U_2 f_2 + \dots + U_n f_n \quad (5)$$

$$\text{les efforts transmis} = e_i = U_i (e_{n+1} + e_{n+2}); i = 1, \dots, n$$

La figure 11 montre la modélisation SPJ de la première colonne de l'onduleur, labellisé « a ». Les deux 1_s , commandées par U_1 et $\bar{U}_1$, modélisent les deux paires transistor-diode, et le 0_s , commandé par U_1 , modélise le basculement de la tension du point « a » entre les deux bornes de la source de CC.

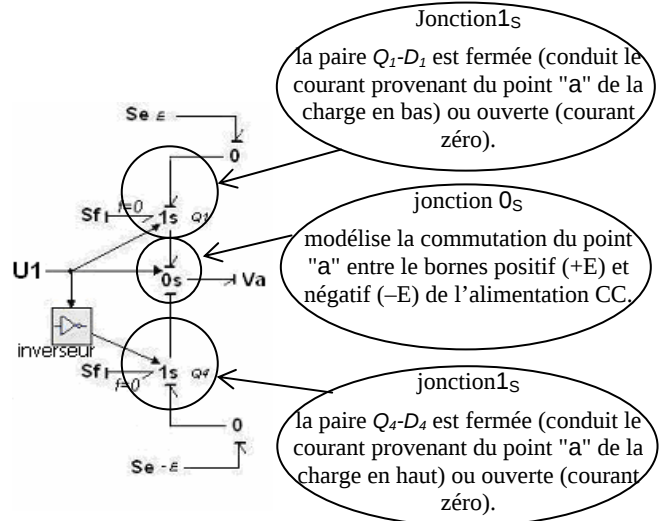


Fig. 11. Modèle SPJ d'une colonne de l'onduleur.

La figure 12 montre le modèle 20sim® de l'onduleur complet qui, commandé par une politique onde carrée, alimente une charge RL en triangle, comme l'on montre figure 9.

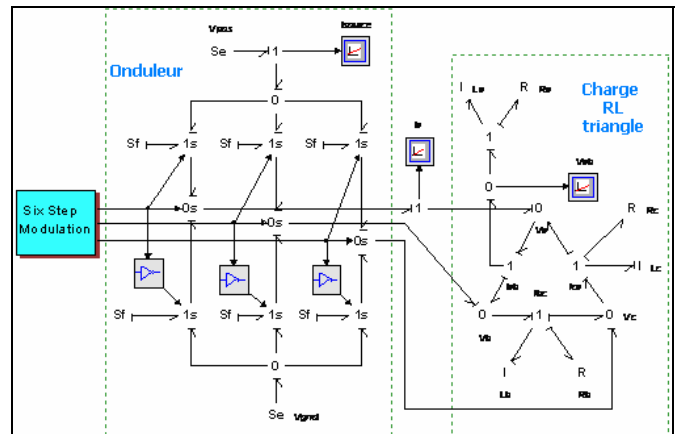


Figure 12: Modèle 20sim® de pont onduleur et charge électrique.

Sous les hypothèses données, on aurait pu modéliser chaque colonne avec simplement une jonction 0_s commandée par U_1 , car l'ouverture d'une paire Q-D coïncide avec la déconnexion du point « a » par la même paire, c'est-à-dire que le 0_s par soi-même remplit la tâche d'imposer zéro courant à la branche isolée. Mais on a choisi cette représentation parce que, un 1_s matérialisant sur le modèle une paire Q-D, elle est plus claire physiquement ; de plus, elle est utile aussi dans des situations plus complexes de commutation (avec retards, notamment) ou de modélisation (inclusion des composantes électriques auxiliaires dans le modèle).

3. *Commande à champ orienté.* Cette commande, comptant parmi les stratégies vectorielles les plus efficaces et les plus connues, on ne la présente ici que sommaire et directement à l'aide du SB implanté sur 20sim®, reproduit figure 13. L'algorithme peut être consulté dans [1], par exemple. On commande la vitesse du rotor et le module de son flux magnétique, dont on voit leur références à gauche. Les sorties du contrôleur doivent passer par le bloc auxiliaire de la figure 14, qui converti les références des tensions du repère stationnaire ab à références RST . Le bloc « Rectangular to Polar » calcule le module ψ_{rd} et l'angle ρ du vecteur flux rotorique à partir de ses coordonnées ab , il est donc alimenté par un bloc faisant la transformation $RST \rightarrow ab$ sur les tensions RST mesurées (l'inverse de la transformation couplée à la sortie).

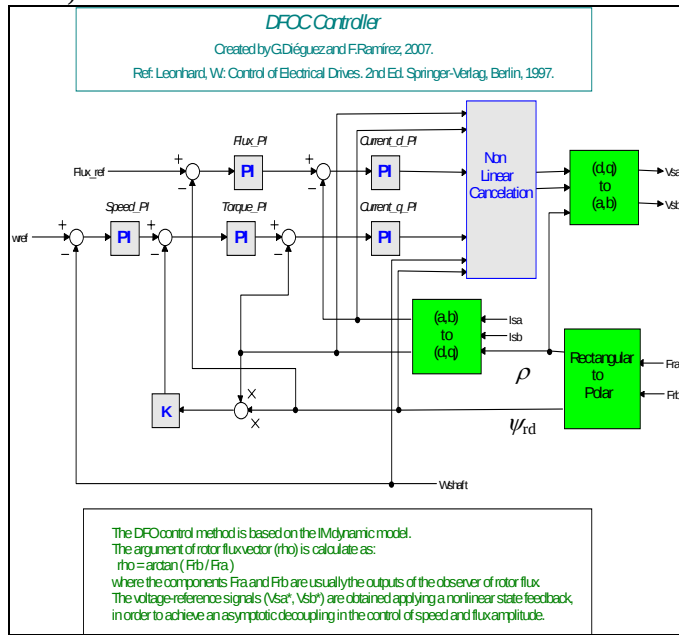


Fig. 13. SB 20sim® de la commande champ orientée directe.

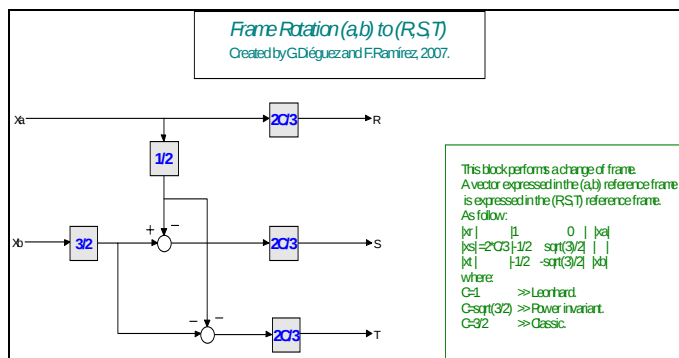


Fig. 14. Transformation de variables $ab \rightarrow RST$.

Comme l'on montre figures 13, 14 et 15 (pas chez les autres figures 20sim® par des raisons d'espace), chaque modèle est

documenté avec indication d'auteurs du bloc, source du modèle, et une description sommaire de ce qu'il implémente.

4. *La modulation de l'onduleur.* La figure 15 montre le SB de la méthode de modulation dite « Modified Suboscillation Method », qui rajoute des composantes homopolaires aux références de tension de la technique MLI (modulation par largeur d'impulsion) élémentaire (disponible dans la librairie 20sim® standard sous le label PWM) afin d'améliorer son indice de modulation, voir [8]. Les sorties de ce module fournissent les signaux d'amorçage des transistors de l'onduleur (dans la figure 12, ce bloc prendrait la place du bloc « Six Step ... », une autre méthode de modulation) ; s'il s'agissait de commander une MA par champ orientée, par exemple, les entrées du module seraient les références des tensions RST du stator du moteur, issues du module de la figure 14.

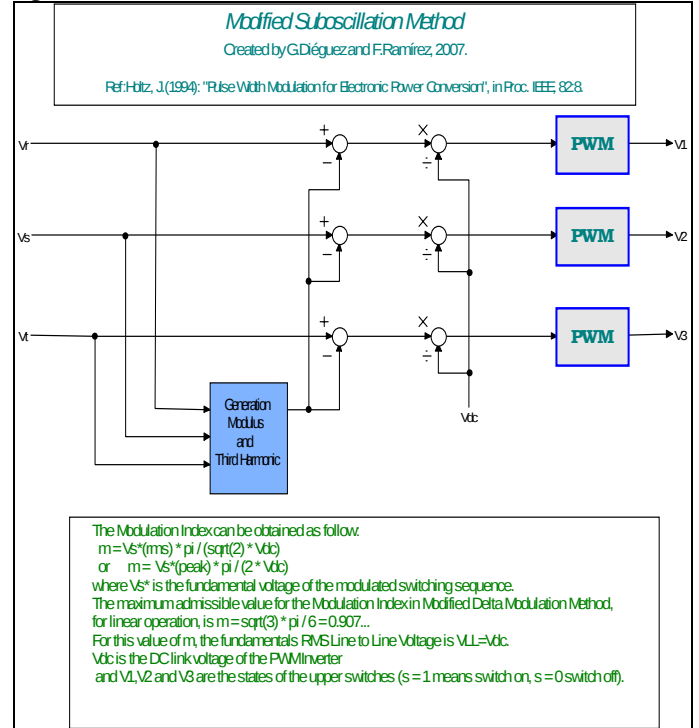


Fig. 15. Modèle de la modulation MLI modifiée

III. DESCRIPTION DE LA LIBRAIRIE

Comme l'on a déjà anticipé, la librairie est composée des cinq modules suivants :

1. *Le module Machines Electriques*, comprenant les moteurs CC à aimant permanent, à excitation indépendante et série (ce dernier avec un circuit pour l'affaiblissement du champ [10]), et le moteur asynchrone ou à induction exposé dans la section précédente.
2. *Le module Contrôleur de Moteurs*, ne consistant pour l'instant que des suivants contrôleurs pour la machine asynchrone (la librairie peut être librement étendue): scalaires du type V/f constant, V/f avec correction à base vitesse, et I/f constant ; et vectoriels du type champ orienté direct et indirect [1].
3. *Le module Convertisseurs en Electronique de Puissance*, avec le modèle d'onduleur déjà décrit en détail, et un sous module MLI (PWM). Ce dernier inclut les méthodes de modulation d'onde carrée (*six-step*), *suboscillation*, *suboscillation* modifiée, et modulation par vecteurs spatiaux.

4. Le module *Observateurs et Simulateurs*, comprenant un observateur réduit et un simulateur de flux rotorique, et un simulateur de flux statorique plus estimateur du couple électromagnétique [11].
5. Le module *Modèles Auxiliaires*, consistant essentiellement de transformations de coordonnées ou repères, et d'un calculateur du module d'un vecteur dans $\mathcal{H}^2$ (normalement appliqué au flux magnétique).

Pour utiliser la librairie, le dossier la contenant doit être rajouté à la librairie standard de 20sim®, comme l'on montre figure 16 à gauche. A droite on voit les fichiers associés au modèle moteur série : le modèle BG (fichier .em) et deux fichiers .txt qui servent à implémenter la caractéristique magnétique courant-flux du circuit d'excitation et son inverse. Ce sont les fichiers du type .em qui doivent être copiés et déplacés vers la fenêtre de travail de 20sim®, pour y être connectés par les ports correspondants.

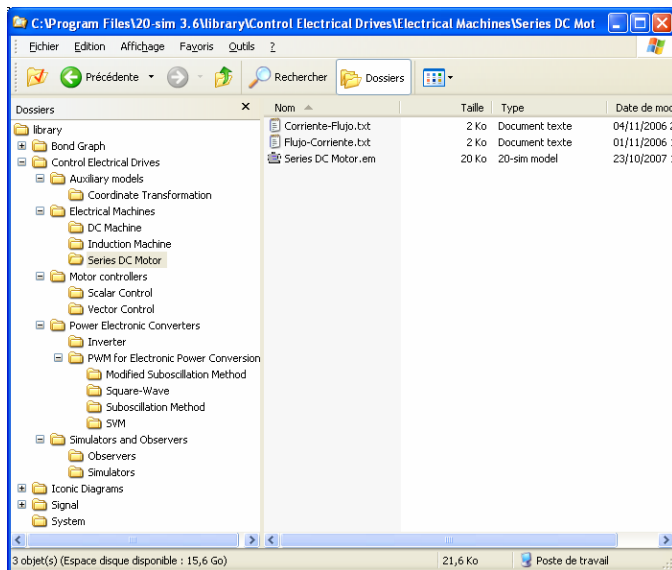


Fig. 16. La librairie 20sim® de SCME.

L'exemple montré figure 17 représente un système de commande champ orienté direct (DFOC) d'un moteur d'induction, dont l'icône cache le modèle de la figure 7 (sauf la source pour rentrer le couple de charge, ramenée à l'extérieur du bloc). Les signaux Control_A/B ont été paramétrés (les deux blocs avec le numéro 1) pour avoir une représentation dans le repère $dq0$. On y voit aussi l'interconnexion de sous modèles depuis les références vers la machine (DFOC, transformation de coordonnées, modulation de l'onduleur, onduleur), et de la machine vers le contrôleur (transformation de coordonnées, observateur de flux), et de blocs moniteurs des trajectoires à tracer par le simulateur.

IV. EXEMPLE D'APPLICATION

Les figures 18 et 19 montrent quelques trajectoires d'après une expérience de simulation conduit sur le modèle figure 17. Comme références on a mis flux de rotor nominal et le profil de vitesse de figure 19 (ligne bleue) ; un échelon de couple charge le moteur à partir de l'instant $t=7s$.

On voit figure 18 que le courant I_d de l'axe direct, chargé d'assurer le flux constant, maintient une valeur moyenne presque constante après le transitoire de démarrage, tandis que la moyenne du courant I_q varie selon la demande de couple lors qu'il y a une demande d'accélération ou un couple de charge. Le bruit chez les deux courants est dû à l'alimentation hachée fournie par l'onduleur. L'ampleur du ripple du courant I_d une

fois la machine chargée, permet d'apprécier que le découpage idéal des axes d et q , un attribut de l'algorithme DFOC utilisé, est (peu) perturbé par l'onduleur (pas tenu en compte au moment de concevoir l'algorithme).

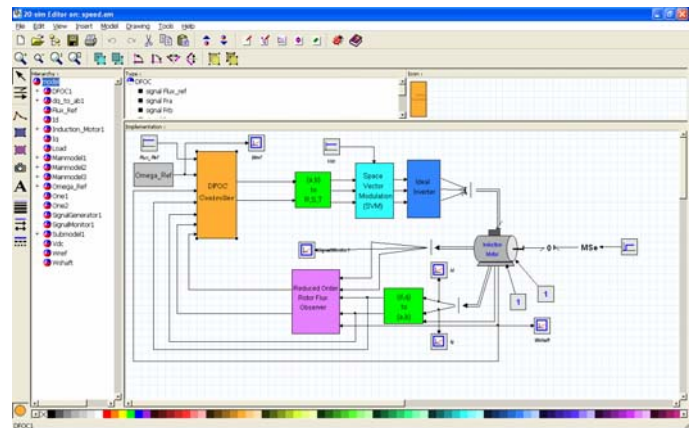


Fig. 17. Modèle d'un SCME construit à l'aide de la librairie.

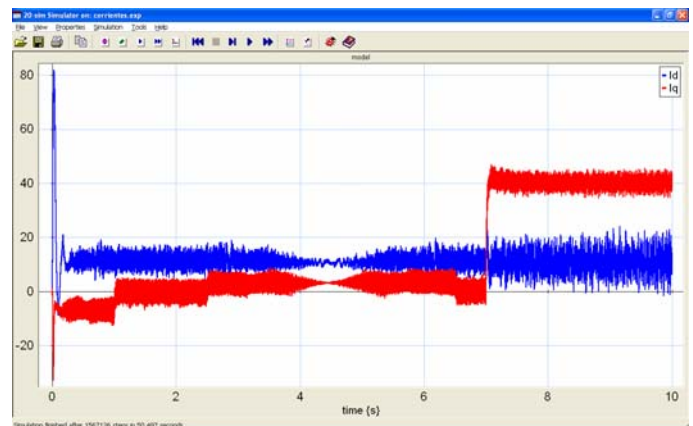


Fig. 18. Courants de stator dans le repère dq .

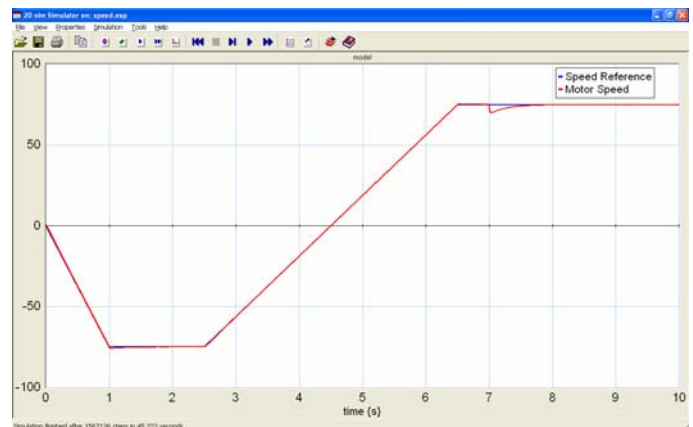


Fig. 19. La vitesse du rotor et sa référence.

V. CONCLUSION

On a présenté une librairie 20sim® de modélisation et simulation des systèmes de commande de machines électriques, composée par sous modules qui implémentent modèles graphiques bond graphes ou schémas blocs, selon convenance, de constituants typiques de ces classes de systèmes. Il s'agit d'un outil ouvert, librement disponible, et très simple de s'en servir, conçu pour venir à l'aide de l'ingénieur automaticien du domaine de la mécatronique en le facilitant la tâche de construction de modèles pour l'analyse de leur comportement dynamique.

VI. REMERCIEMENTS

Le premier auteur tient à remercier Mme. G. Dauphin Tanguy pour l'encouragement à rédiger cet article, et à l'Ecole Centrale de Lille, où, son dernier séjour durant, il a disposé du temps nécessaire à la rédaction.

VII. REFERENCES

- [1] Leonhard, W.: Control of Electrical Drives. 2nd Ed. Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [2] Mohan, N., W. P. Robbins, T. M. Undeland, R. Nilssen, and O. Mo (1994). "Simulation of Power Electronics and Motion Control Systems". Proc. IEEE, 82:8, 1287-1302.
- [3] G. Dauphin-Tanguy (direction d'Ouvrage Collectif): "Les Bond Graphs " Les Traités Hermès Science Publications, IC2 (Information-Commande-Communication), septembre 2000.
- [4] D. Karnopp, D. Margolis, R. Rosenberg, "System dynamics: Modeling and simulation of mechatronic systems", 3rd ed., Wiley Interscience, New York, 2000.
- [5] Controllab Products B.V., 20-sim™, www.20sim.com/.
- [6] S. Junco, 1999. "Real-and Complex-Power Bond Graph Modeling of the Induction Motor". In: Proc. ICBGM'99, San Francisco, Vol.31, No.1, pp.323-328.
- [7] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff. Analysis of Electric Machinery and Drive systems. 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [8] Holtz, J.(1994): "Pulse Width Modulation for Electronic Power Conversion", in Proceedings IEEE, 82:8.
- [9] A. C. Umarikar and L. Umanand. 2005, "Modelling of switching systems in bond graphs using the concept of switched power junctions", Journal of The Franklin Institute, 342, pp 131-147.
- [10] S. Junco, G. Diéguez, F. Ramírez, 2007. "On Commutation Modeling in Bond Graphs". In: Proc. ICBGM'07, San Diego, CA, pp. 115-119.
- [11] G. C. Verghese and Seth R. Sanders." Observers for Flux Estimation in Induction Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 35, N°1, 1988