

Institut FARMAN

Simulation, modélisation, tests virtuels de systèmes complexes



PROJET DE RECHERCHE

Titre du projet : **BOOST-II**

SIMULATION SYMBOLIQUE DE STRATEGIES DE CONTROLE DE CONVERTISSEURS MULTI-NIVEAUX

Responsables Scientifiques:

Bertrand Revol (SATIE), Laurent Fribourg (LSV)

Laboratoires :

LSV, SATIE

Mots-clés :

Convertisseurs multi-niveaux, Robustesse, Model Checking, Simulation, Vérification et Synthèse de Commande

Membres du projet

<i>Fonction</i>	<i>Membres du projet</i>	<i>Laboratoires</i>	<i>% temps de recherche consacré au projet</i>
MCF	Bertrand REVOL	SATIE	10%
PRAG	Gilles FELD	EEA-SATIE	20%
ATER	Denis LABROUSSE	SATIE	10%
PU	Stéphane LEFEBVRE	SATIE	10%
DR	Laurent FRIBOURG	LSV	10%
Doctorant	Romain SOULAT	LSV	50%

I TRAVAUX INITIAUX ET CONTEXTE DU PROJET

Le projet BOOST II que nous allons présenter est la continuation d'un projet Farman, appelé BOOST (janvier 2010 à décembre 2011) et fait coopérer majoritairement les mêmes équipes des laboratoires SATIE et LSV. Le sujet de BOOST concernait la simulation symbolique de convertisseurs DC-DC [1]. Ces dispositifs utilisés en électronique de puissance permettent de passer d'un niveau de tension ou de courant à une autre tout en assurant des très hauts rendements de conversion. Cette électronique de commutation utilise des interrupteurs de puissance qui de façon idéalisée fonctionnent en « tout ou rien ». Le transfert de puissance est réalisé de façon séquentielle en connectant périodiquement la source d'énergie électrique au récepteur. Si les structures conventionnelles de conversion (mono-interrupteur) sont très largement exploitées, l'utilisation des structures multi-niveaux adressant des puissances nettement plus élevées, est naturellement plus modeste mais devient capitale quant au conditionnement et à la distribution de l'énergie. Ces dispositifs exploitent deux principes simples par l'augmentation soit des tensions de fonctionnement soit des niveaux de courants. On distingue alors respectivement les structures multi-niveaux séries et parallèles suivant la façon dont les interrupteurs de puissance sont agencés. Les travaux menés dans le cadre d'une première collaboration entre le LSV et le SATIE au travers du projet BOOST visaient à connaître la robustesse d'architectures parallèles couplées par transformateurs intercellulaires (ICT) (Fig. 1). Ces structures innovantes et complexes nécessitent cependant un contrôle précis des interrupteurs pour assurer l'équilibrage des courants dans les ICT dans lequel une saturation des matériaux magnétiques est possible. L'une des questions posées dans le cadre du projet BOOST portait sur l'assurance, malgré une défaillance des composants semi-conducteurs, de conserver des niveaux de courant acceptables (i.e. un état magnétique acceptable). La connaissance a priori des séquences de commande permettant un fonctionnement dégradé mais sans risque avant la mise hors service de l'équipement permet de conserver un bon niveau de fiabilité mise à mal par l'augmentation des composants.

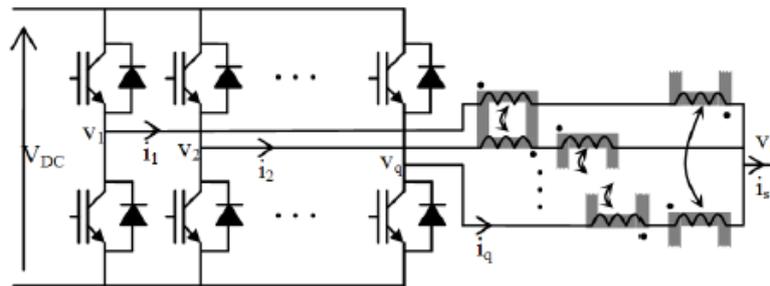


Fig. 1 : montage cascade cyclique d'une structure à ICT

L'équipe du SATIE a une bonne expérience de production de tels dispositifs. Leur expérimentation par simulation physique analytique et numérique présente cependant un certain nombre d'inconvénients, le nombre de tests à effectuer pour la validation d'un dispositif étant en effet très important, en raison du très grand nombre de conditions initiales ainsi que du grand nombre de situations de défauts potentiels (par court-circuit) pouvant intervenir. C'est pourquoi le LSV a utilisé dans le premier projet une méthode de simulation *symbolique*, qu'elle maîtrise, qui permet de regrouper de nombreuses trajectoires représentant l'évolution du système dans un voisinage de conditions initiales données en un « tube » unique. Cette coopération a permis de quantifier formellement la robustesse d'un dispositif imaginé et fabriqué par le SATIE dans le cadre d'une thèse [2]. Elle a donné lieu à une publication dans les actes d'un colloque international [3].

Les équipes de recherche travaillant sur les convertisseurs de forte puissance ne se focalisent naturellement pas que sur la topologie présentée ci-dessus. Les structures multi-niveaux série sont également une source importante d'études complexes nécessitant un travail de recherche. Par simple principe de dualité, les structures multi-niveaux série essentiellement développées pour des tensions élevées nécessitent une maîtrise de la tension aux bornes des condensateurs. Ces derniers permettent d'une part le fractionnement de la tension en niveaux acceptables pour les composants semi-conducteurs et d'autre part la création un système de sources de tension identiques dont l'association ordonnancée à l'aide d'interrupteurs permet de construire des tensions par paliers. Les interrupteurs peuvent s'apparenter à un sélecteur de niveau (Fig. 2).

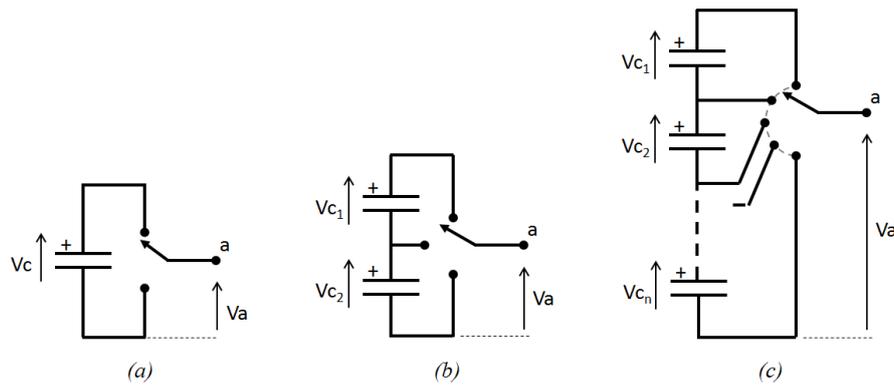


Fig. 2 : Schéma de principe : (a) à 2 niveaux, (b) à 3 niveaux, (c) à N niveaux

II THEMATIQUE DU PROJET BOOST II

Le projet Boost-II s'appuie sur des architectures de puissance relativement récentes, complexes à mettre en œuvre et dont les niveaux de puissance sont colossaux. Pour se donner une idée, l'unité de référence est la centaine de MW. Ces structures appelées MMC (Modular Multilevel Converter) appartenant à la famille des onduleurs Multi-niveaux série permettent d'associer des réseaux alternatifs « haute tension » parfois de fréquence différente à l'aide d'une liaison à tension continue. Ces structures constituent un ensemble de challenges technologiques (Fig. 3). A titre d'exemple, les niveaux de tension adressés ici (ex : 400 000V) sont totalement incompatibles avec les limites technologiques de tenue en tension des interrupteurs de puissance (ex 6500V). Le fractionnement de la tension devient alors inévitable et plutôt que de fabriquer des « macro-interrupteurs » composés d'une centaine de composants de puissance élémentaires dont la synchronisation serait trop complexe voire impossible, l'idée est d'associer en série des structures usuelles dont la modularité permet d'une part de construire des formes d'ondes de tension dont l'allure tend vers une sinusoïde (V_{MMC}) et d'autre part de piloter les courants circulant sur les phases du réseau (i_l). Le contrôle de la tension et du courant permet alors de gérer les transferts de puissances. Tous ces avantages ont malheureusement un coût en imposant des contraintes de fonctionnement particulièrement sévères que la stratégie de commande se doit en partie de respecter.

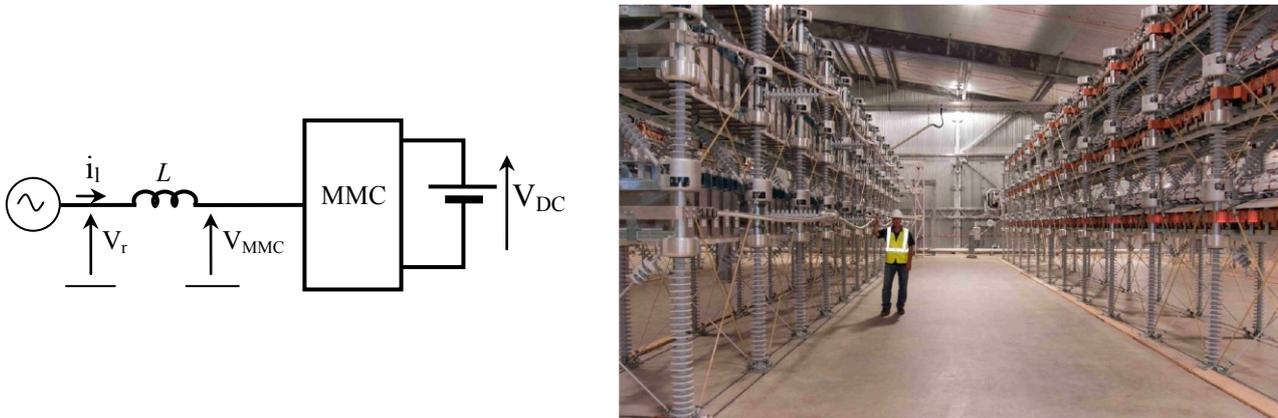


Fig. 3 : association sur un réseau d'un MMC et réalisation (Trans Bay Cable project-San Francisco)

Le premier convertisseur modulaire multi-niveaux assurant une liaison à tension continue (HVDC) est opérationnel depuis 2010. Il montre à la fois la viabilité industrielle et la jeunesse de ces systèmes. En effet, le Trans Bay Cable Project assure un transfert de puissance de 400 MW de Pittsburg à San Francisco (Californie, USA) via un câble sous-marin de 88 km. Cette mise en œuvre a clairement permis de valider les avantages théoriques de ce type de structure. Le volume d'occupation est très faible en raison de l'absence de filtres. Certains dispositifs à l'étude pourraient atteindre des capacités de transmission allant jusqu'à 1000 MW [4]. Ces systèmes permettront d'assurer les défis futurs imposés aux réseaux de transport, comme l'intégration de grandes quantités de sources d'énergie renouvelables ou en augmentant la capacité de transmission de puissance des réseaux existants.

Plus concrètement, ces structures basées sur le fractionnement d'une tension continue nécessitent

l'utilisation de condensateurs dont la tension aux bornes doit être maintenue constante à une valeur précise. Cette valeur est définie par le nombre de structures élémentaires associées en série (fig. 4). La stratégie d'équilibrage dite bas niveau usuellement adoptée nécessite le découpage par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) de chaque structure élémentaire [5]. Le réglage du rapport cyclique par un correcteur représente le degré de liberté simple pour maintenir la tension des condensateurs constante. Cette solution est satisfaisante si la fréquence de découpage est basse limitant ainsi des pertes liées à la commutation de chaque interrupteur. Pour de telles puissances (ex : 400 MW) et malgré des rendements théoriques élevés (ex : 95%), les pertes des constituants de ces convertisseurs représentent une puissance colossale (20 MW). En conservant la structure des MMC, seule une action sur la commande peut limiter ces pertes. La commande haut niveau se charge d'imposer la forme d'onde désirée de la tension de sortie (amplitude du fondamental) et du déphasage (décalage temporel) de cette dernière par rapport à la tension réseau. Cette combinaison permet de contrôler l'amplitude et le déphasage du courant de ligne quasi-sinusoïdal et définit ainsi le niveau puissance échangé [6], [7]. Comme nous pouvons nous en douter, les deux commandes sont absolument nécessaires et doivent fonctionner en parallèle. Toutefois, sans la commande équilibrante, la commande haut niveau ne peut correctement assurer le pilotage en amplitude de la tension de sortie. La complexité de mise en œuvre de la stratégie de commande est dès lors un réel problème que nous voulons traiter dans ce projet pour lequel les compétences du LSV et du SATIE sont nécessaires.

III DESCRIPTION DETAILLÉE DU PROJET

Dans un premier temps, l'étude portera sur des structures de conversion de faible complexité. Une première phase de simulation électrique servira de support à l'élaboration des stratégies de commande. Les premiers travaux, présentés ci-dessous, menés avec une vision différente de ceux trouvés dans la littérature mettent en évidence certaines limites de la technique de commande d'équilibrage proposée. En faisant évoluer des techniques du type « model checking » maîtrisées par l'équipe du LSV nous pensons pouvoir lever ces limites ou démontrer que la stratégie imaginée n'est pas viable. Chaque proposition de solution pourra et devra être validée par un test réel sur des démonstrateurs réalisés par le SATIE et le département EEA de l'ENS Cachan.

III.1) Sélection des structures retenues pour le projet

Deux structures de MMC sont envisagées pour ce projet et devront faire l'objet d'études parallèles [8]. Chacune d'elle possède ses avantages et ses inconvénients. Elles diffèrent principalement par leur nombre de composants actifs à semi-conducteurs et par les motifs de tension qu'elles peuvent créer. Si le schéma global ou de principe du MMC ne change pas (fig. 4), celui des cellules élémentaires est différent. Les sous modules (i.e. cellule) à $\frac{1}{2}$ pont (fig. 5 (a)) utilisent uniquement deux interrupteurs de puissance commandés de façon complémentaire. Ils sont non réversibles en tension autrement dit, ils permettent d'obtenir uniquement une tension nulle ou positive égale à la tension aux bornes du condensateur. Les cellules en pont complet permettent de gagner un degré de liberté supplémentaire sur les tensions puisqu'elles sont réversibles en tension. Elles autorisent également des tensions négatives à l'entrée au prix d'un doublement du nombre d'interrupteurs.

Afin d'utiliser les techniques de model checking pour ce projet, ces structures seront modélisées sous la forme de systèmes d'états.

Durée : 2 mois.

III.2) Recherche bibliographique sur les stratégies existantes

Une étude bibliographique plus poussée s'avère nécessaire pour clairement identifier les différentes stratégies de commande bas niveau existantes. Une étude bibliographique préliminaire sur les travaux menés à ce sujet révèle un point commun. Tous s'attachent à décrire le fonctionnement de ces structures et la stratégie avec laquelle le transfert de puissance est géré. Peu décrivent clairement la façon dont l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs est réalisé.

Le premier livrable de ce projet consistera à présenter les principales techniques bas niveau utilisées. Pour chacune d'elle des validations par simulations et/ou expérimentales pourront être faites avant d'analyser et de garantir leur robustesse.

Durée : 3 mois.

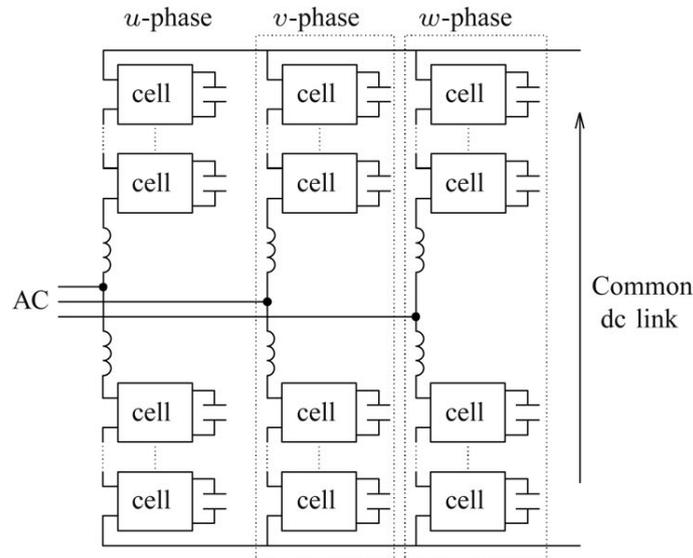


Fig. 4 : Exemple de MMC à 3 bras pour applications triphasées



Fig. 5 : (a) Cellule à 1/2 pont, (b) Cellule en pont complet

III.3) Adaptation des algorithmes de simulations symboliques

Les algorithmes de simulations symboliques développés et actuellement utilisés pour analyser la robustesse de système sont mis à mal dès que le nombre de paramètres devient important. Malheureusement les systèmes d'électronique de puissance sur lesquels nous souhaitons travailler sont décrits par un nombre très important de paramètres. La structure simple sur laquelle vont débiter ces travaux (fig. 6) est défini par 7 variables d'états, 4 variables de commande soit 11 grandeurs sur lesquelles les algorithmes doivent travailler. Sur ce simple exemple ces techniques symboliques d'analyses risquent de montrer leurs limites. Il sera alors nécessaire de faire évoluer ces algorithmes pour qu'ils puissent traiter dans un temps raisonnable ce type de problème.

Du point de vue du model-checking, l'objectif du projet peut se reformuler ainsi : il s'agit de déterminer la séquence de commande à appliquer après le déséquilibre d'une tension de façon à rétablir une propriété de bon fonctionnement tout en évitant des états indésirables du système.

Ce problème relève de la méthode de model-checking, à partir du moment où l'on a modélisé le système sous forme d'automates hybrides : un automate hybride est un graphe équipé de variables réelles correspondant aux variables physiques du système (typiquement l'intensité I et la tension V en différents points du circuit). Chaque nœud du graphe correspond à un mode de fonctionnement du circuit où les variables sont régies par des lois différentielles définies et des bornes de valeur minimales et maximales. On passe d'un nœud du graphe à un autre via un arc du graphe qui symbolise un changement de mode discret de fonctionnement, soit pour des raisons physiques (par ex., en cas d'inversion du sens du courant, de défaillance d'un élément ou d'une reconfiguration) soit pour des raisons de modélisation (par ex., dépassement par une variable physique d'une borne assignée au mode de fonctionnement du nœud courant). Dans un tel modèle, la description du circuit à un instant donné est caractérisée par un *état*. Un état est un couple (v, x) , où v représente le nœud du graphe, et x la valeur courante du vecteur des variables physiques. *L'analyse d'accessibilité* du model checking rend possible le calcul symbolique des états successifs au cours du temps à partir d'un état initial donné (correspondant, par exemple, à une configuration initiale où l'équilibrage est assuré).

On peut également envisager des scénarios de test de robustesse en intégrant dans le modèle des défaillances de composants et vérifier alors si, oui ou non, la réponse commandée (en terme d'état accessible) permet d'aboutir sans risque à un nouvel état d'équilibre.

Il est à noter que cette partie importante du travail d'analyse de la robustesse s'inscrit directement dans le travail de thèse de Romain Soulat du LSV.

Durée : 8 mois.

III.4) Méthodes d'exploration de graph

Le changement d'échelle imposé par ces dispositifs sur les algorithmes de simulations symboliques impose une seconde approche. Pour le type de commande bas niveau envisagée et qui sera mis en œuvre sur le premier démonstrateur, un graphe d'état est nécessaire (Fig. 6). Malheureusement plus le nombre de niveaux augmente, plus son élaboration est délicate et sa complexité importante (Fig. 7). Pour un nombre de niveaux supérieurs à 5, son élaboration devient quasiment impossible. Une recherche automatique de la solution consisterait à l'exploration du graphe de l'ensemble des configurations possibles tout en se limitant aux seules permettant de respecter les contraintes d'équilibrage. De plus, sur le premier type de solution que nous proposons, ni l'unicité ni la stabilité ne sont démontrées. C'est l'une des questions à laquelle nous aimerions répondre par cette recherche préalable de solution avant implémentation dans le système expérimental. Dans [9], la solution envisagée consiste à abstraire du système continu, un système abstrait discrétisé. La recherche de solutions sur ce système abstrait revient alors à l'exploration de graphes, qui est un problème classique en informatique [10].

Durée : 6 mois.

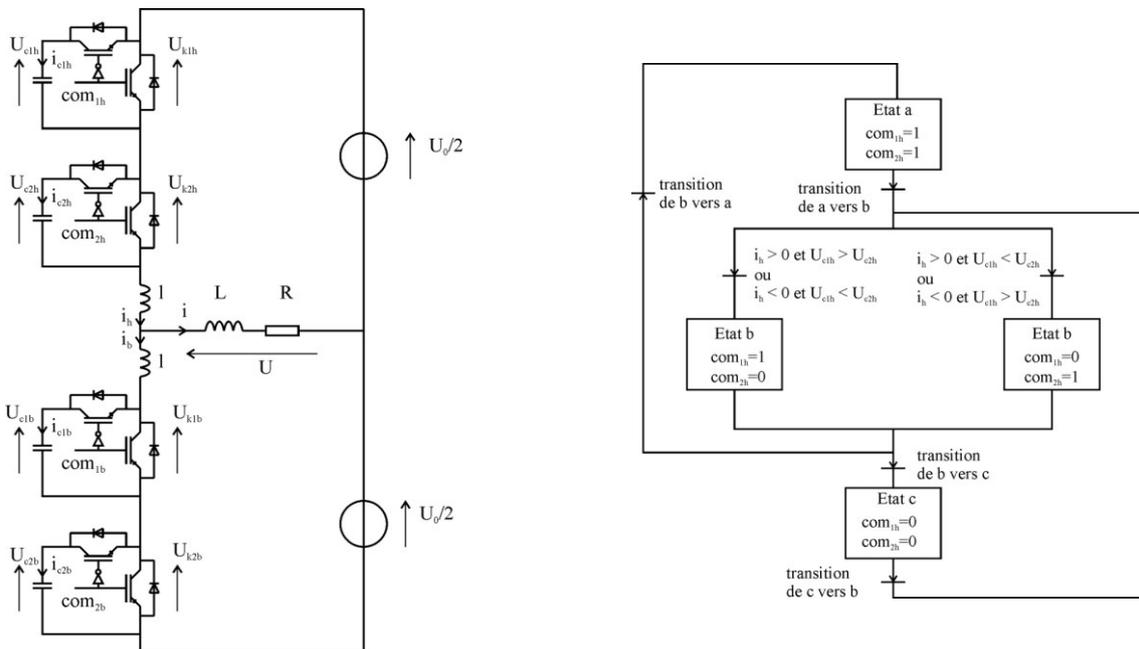


Fig. 6 : Structure à 3 niveaux à 1/2 pont et la machine d'état associée aux deux cellules hautes

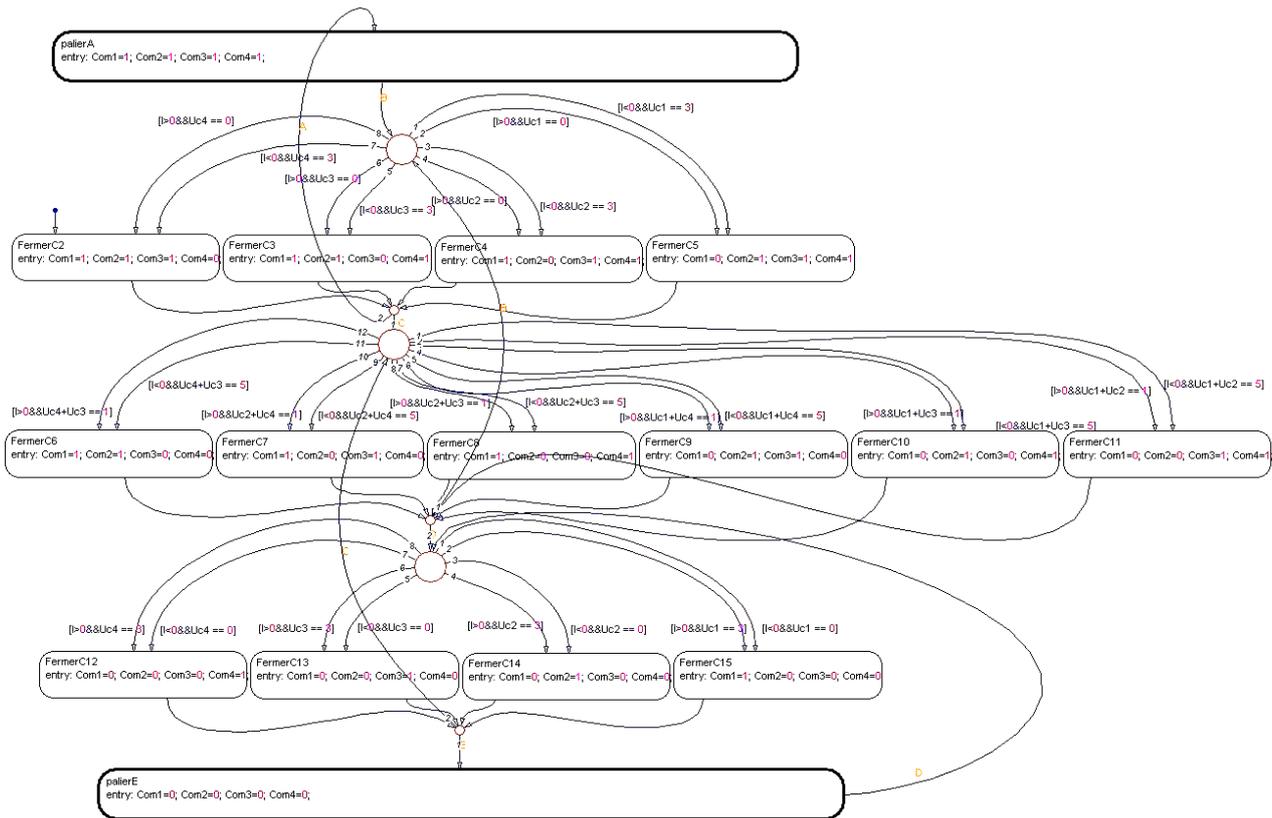


Fig. 7 : Machine d'état des cellules hautes du MMC ½ pont à 5 niveaux

IV VALIDATIONS EXPERIMENTALES

En termes de simulation, deux techniques seront utilisées :

- la simulation symbolique,
- la simulation des circuits par méthodes numériques usuelles.

Toutes deux seront confrontées aux mesures sur des prototypes développés par les équipes du SATIE et du département EEA. Les maquettes réalisées permettront également de tester directement les solutions déterminées par la simulation. Une structure simple sera préalablement conçue pour analyser la pertinence des dispositifs de mesure nécessaires au contrôle (capteur de courant et de tension). Des structures plus complexes et versatiles seront alors dimensionnées et réalisées.

Durée : 5 mois.

V ORIGINALITES DU PROJET

Dans ce nouveau projet, nous souhaitons de façon analogue appliquer le savoir-faire du LSV en matière de simulation symbolique à la validation de dispositifs d'électronique de puissance conçus par le SATIE. Nous souhaitons franchir un pas de complexité en nous intéressant, non plus à de simples convertisseurs comme dans le premier projet, mais à des systèmes de convertisseurs modulaires *multi-niveaux*. La robustesse de ces convertisseurs de très forte puissance est indispensable. Elle assure la fiabilité de ces équipements de conversion d'énergie utilisés sur les réseaux de transport électrique.

Par rapport aux outils classiques de simulation utilisés dans ce domaine d'application, le *model checking* permet de garantir la propriété sur une *plage continue de variation* des variables d'entrée (par ex., la tension d'entrée) ou les *petites perturbations* autour de la zone de fonctionnement moyenne. Cette prise en compte d'*incertitudes* est a priori impossible à simuler de façon exhaustive avec les méthodes de simulation traditionnelles (MATLAB, SIMULINK).

Le prix à payer pour les méthodes de Model Checking est leur *coût élevé* en termes de temps de calcul et mémoire de travail, et, par voie de conséquence leur *difficulté à passer à l'échelle* pour traiter de gros exemples réalistes. C'est pourquoi, nous traiterons dans un premier temps des exemples simplifiés pour élaborer une méthodologie adaptée au traitement du domaine d'étude considéré de commande des convertisseurs. Nous utiliserons également des techniques d'*approximation* et d'*abstraction* afin de faciliter le passage à l'échelle nécessaire.

Un but du projet BOOST II est d'enrichir et d'adapter les méthodes de simulation symbolique du LSV pour les appliquer à la validation d'un convertisseur MMC, conçu et fabriqué par le SATIE et le département EEA. Les expériences de simulation symbolique compléteront les observations faites par expérimentation physique et par simulation numérique (faites avec un logiciel comme SIMPLORER ou Matlab/Simulink).

Durée prévisionnelle : 2 ans

VI APPORTS SCIENTIFIQUES DES DIFFERENTS PARTENAIRES DU PROJET

- Bertrand Revol (SATIE): Electronique de puissance, CEM,
- Denis Labrousse (SATIE): Electronique de puissance, Structure,
- Gilles Feld (EEA-SATIE) : Electronique de puissance, Lois de commande,
- Stéphane Lefebvre (SATIE) : Modes de défaillance des composants de puissance,
- Laurent Fribourg (LSV) : Modélisation en automates hybrides,
- Romain Soulat (LSV) : Implémentation d'outils de vérification.

VII DEMANDE D'AIDE FINANCIERE:

Demandeur	Missions Congrès/déplacements	Fonctionnement /Equipe- ment Licences informatiques / réalisation de prototypes	Total
LSV	4400 €	3600	8000 €
SATIE	2400 €	5600	8000 €
Demande d'aide pour les 2 ans			16 000 €

REFERENCES

[1] LSV et SATIE, "Projet BOOST : Stratégie de commande en vue de l'amélioration de la robustesse de convertisseurs électroniques de puissance."

[2] F. Adam, "Onduleur multicellulaire parallèle à ICT : commande équilibrante, analyse, modélisation et optimisation des performances CEM," 10-Jan-2011.

[3] L. Fribourg, B. Revol, et R. Soulat, "Synthesis of Switching Rules for Ensuring Reachability Properties of Sampled Linear Systems," *IIII.3108*, Nov. 2011.

[4] L. Franquelo, J. Rodriguez, J. Leon, S. Kouro, R. Portillo, et M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 2, n°. 2, p. 28-39, 2008.

[5] J. Barrena, L. Marroyo, M. Vidal, et J. Apraiz, "Individual Voltage Balancing Strategy for PWM Cascaded H-Bridge Converter-Based STATCOM," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, n°. 1, p. 21-29, 2008.

[6] C. Schauder et H. Mehta, "Vector analysis and control of advanced static VAR compensators," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 140, n°. 4, p. 299-306, 1993.

[7] L. Gyugyi, "Application characteristics of converter-based FACTS controllers," in *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on*, vol. 1, p. 391-396 vol.1, 2000.

[8] H. Akagi, "Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC)," in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, p. 508-515, 2010.

[9] A. Girard, G. Pola, et P. Tabuada, "Approximately Bisimilar Symbolic Models for Incrementally Stable Switched Systems," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 55, n°. 1, p. 116-126, 2010.

[10] P. Fraigniaud, D. Ilcinkas, S. Rajsbaum, et S. Tixeuil, "The Reduced Automata Technique for Graph Exploration Space Lower Bounds," in *Theoretical Computer Science*, vol. 3895, O. Goldreich, A. Rosenberg, et A. Selman, Éd. Springer Berlin / Heidelberg, 2006, p. 1-26.