

Entraînement électrique avec deux machines tolérantes aux défaillances

Dans ce chapitre, les topologies onduleurs-machines tolérantes aux défaillances choisies pour une application aéronautique ou aérospatiale sont présentées et analysées. Cette analyse prend en compte leur fonctionnement en mode normal et en mode dégradé afin d'évaluer l'impact du mode dégradé sur leurs performances et sur le dimensionnement de l'ensemble onduleur-machine.

2.1. Topologies d'alimentation et de connexion étudiées

Afin de répondre au besoin du système TVC (section 1.2), les topologies qui sont étudiées plus en détail ont toutes les caractéristiques communes citées ci-dessous:

- 2 machines : le nombre minimum nécessaire de machines pour entraîner de façon indépendante les deux vérins qui composent le système TVC.
- Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP) : les MSAP sont les machines électriques présentant la densité de couple la plus importante, réduisant ainsi le poids du système, malgré le fait qu'elles soient plus coûteuses à cause des aimants terre rare utilisés, mais aussi malgré une gestion a priori plus délicate en cas de défaut de court-circuit du fait de la présence de forces électromotrices.
- Machines avec un minimum de 6 phases : ce nombre minimum de phases a été choisi afin d'assurer le fonctionnement en mode dégradé et également pour respecter des valeurs maximales de courant et de tension supportées par des transistors (type IGBT) et disponibles pour les sources de tension de la fusée. La valeur de tension du bus DC est imposée.
- Machines à phases électriquement indépendantes, à faible couplage magnétique et thermique entre phases: cette configuration présente une meilleure performance en mode dégradé parce que, lorsqu'une phase est défaillante, l'impact sur les autres phases est moindre. De plus, la tension que l'onduleur peut fournir à chaque phase est de $-V_{DC}$ à $+V_{DC}$, à condition d'avoir deux bras d'onduleur par phase.

En prenant en considération ces critères communs, 3 topologies ont été étudiées plus en détail. Pour chaque topologie, le nombre de phases de chaque machine peut être supérieur à 6, mais, en raison du matériel disponible dans le laboratoire, tous les résultats présentés sont pour les topologies avec 6 phases. Au long du mémoire, certains aspects des topologies à 7 et à 8 phases sont néanmoins abordés de façon théorique.

Le choix d'une machine à 6 phases correspond également à une demande des industriels. Cette machine est celle dont le comportement ressemble le plus à celui d'une machine standard triphasée. Cela permet aux industriels de faire évoluer par des modifications mineures des machines triphasées existantes au lieu de concevoir de nouvelles machines à 7 ou 8 phases. Par exemple, les machines utilisées comme base pour les essais de cette étude sont des machines à 12 bobines et 8 pôles

conçues pour être alimentées en triphasé. Puisque les 12 bobines étaient indépendamment accessibles, l'alimentation en machine à 6 phases a été possible.

2.1.1. Topologie Pont-H

La topologie Pont-H est la plus standard qui répond aux critères définis précédemment rassemblant les caractéristiques ci-dessous. Les valeurs entre parenthèses représentent les valeurs pour une topologie avec MSAP à 6 phases (Figure 22).

- une source de tension ;
- deux machines indépendamment alimentées ;
- 2 bras d'onduleur, totalisant 4 transistors, par phase et par machine (24 bras avec un total de 48 transistors pour une structure à 6 phases) ;

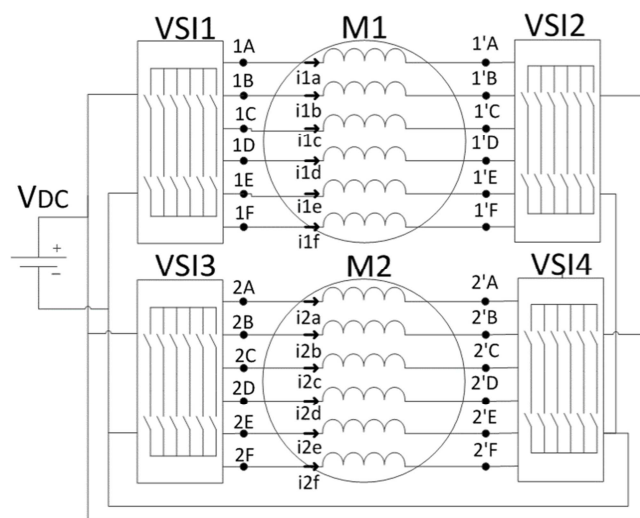


Figure 22: Schéma de la topologie Pont-H.

Le plus grand inconvénient de cette structure est évidemment le grand nombre de transistors nécessaire pour alimenter les machines, augmentant ainsi le poids et le volume de l'onduleur. En revanche, le contrôle de machines polyphasées avec cette structure est déjà assez présent dans l'industrie, représentant donc une solution mature et aisée à implémenter.

2.1.2. Topologie Multi-machine à Onduleur en Pont-H (HIMM)

La topologie HIMM (*H-bridge Inverter of Multiple Machines*) est une topologie où les deux machines électriques sont connectées en série et alimentées par 12 bras d'onduleurs et une source de tension (Figure 23).

- une source de tension ;
- deux machines électriquement connectées en série ;
- 2 bras d'onduleur, totalisant 4 transistors, par phase (12 bras avec 24 transistors pour une structure à 6 phases) ;

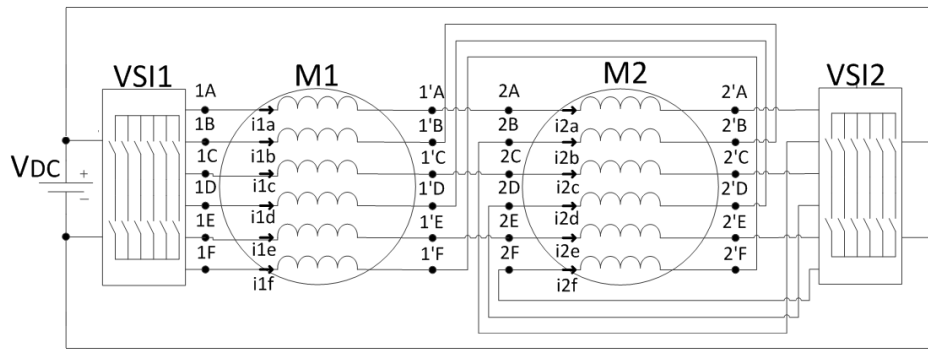


Figure 23: Schéma de la topologie HIMM.

Comme évoqué précédemment dans la section 1.5.2, le fait de mettre électriquement en série deux machines mutualise les transistors, réduisant ainsi le nombre de transistors de moitié en comparaison avec la topologie Pont-H. Cependant pour que cette réduction du nombre de transistors se traduise en réduction de coût, poids et volume du système, le dimensionnement des transistors pour la topologie HIMM ne doit pas être beaucoup plus important que celui obtenu avec la topologie standard Pont-H.

Pour un système avec deux machines à 6-phases connectées en série, 2 connexions électriques différentes entre les machines sont possibles. Cependant, dans ce cas, le choix parmi les deux couplages possibles n'a pas d'impact sur le dimensionnement de l'onduleur. En augmentant le nombre de phases des machines, le nombre de connexions possible augmente également avec des solutions plus ou moins intéressantes. Cette différence est expliquée en détail dans la section 2.2.3 lors de la modélisation des topologies en série. Le contrôle de cette structure innovante est présenté juste après dans la section 2.2.4.

2.1.3. Topologie Multi-machine à Onduleur Redondant (RIMM)

Le seul point distinguant la topologie RIMM (Figure 24) de la topologie HIMM est le nombre de sources de tension.

- deux sources de tension ;
- deux machines électriquement connectées en série ;
- 2 bras d'onduleur, totalisant 4 transistors, par phase (12 bras avec 24 transistors pour une structure à 6 phases) ;

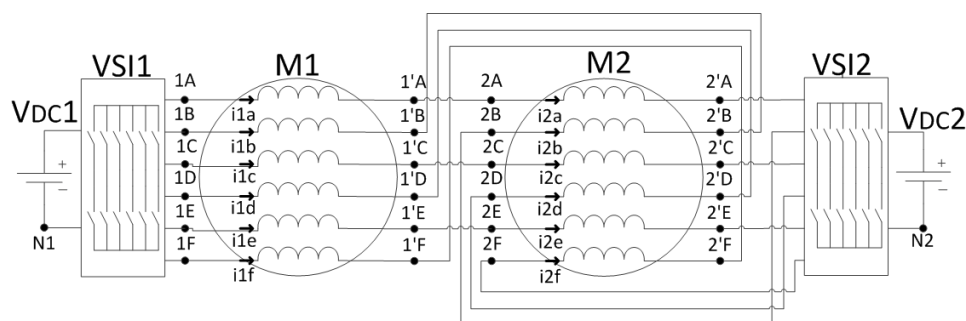


Figure 24: Schéma de la topologie RIMM

Le fait d'avoir deux sources de tension isolées empêche la circulation des courants dit classiquement homopolaires dont l'ordre « harmonique » est « 0 » ou un multiple du nombre de phases. Cette même propriété est assurée en triphasé par l'usage d'un couplage en étoile sans neutre sorti. Cette contrainte d'annulation structurelle a peu d'impact sur le comportement du système en mode de fonctionnement normal, car la commande recherche en général elle-même un courant homopolaire nul⁹. Par contre cette annulation structurelle peut être très bénéfique en mode dégradé. Puisque les courants deviennent déséquilibrés, ces courants homopolaires peuvent atteindre des valeurs très élevées dans certains cas. Si la structure bloque naturellement la circulation de certains courants homopolaires, l'amplitude du courant de phase peut être naturellement limitée ; ceci est présenté plus en détail dans la section 2.4.

Pour l'analyse qui suit, les deux sources sont identiques entre elles et l'amplitude de tension est la même que celles des structures HIMM et Pont-H. Ceci ne représente pas forcément une énorme augmentation du coût énergétique parce que l'énergie délivrée par chaque source de tension est en effet la moitié, en comparant avec la topologie HIMM. Cela impose néanmoins deux conditionnements avec les protections associées. Les avions et les fusées aérospatiales possèdent déjà une redondance au niveau des sources de tension, qui peut être exploitée afin d'alimenter une topologie RIMM.

2.2.Modélisation et contrôle avec approche par REM

Lors de la modélisation et du contrôle des topologies présentées dans la section précédente, on a rappelé deux outils développés au sein du L2EP (section 1.6):

- Décomposition en machines fictives ;
- Représentation énergétique macroscopique (REM) ;

La décomposition en machines fictives (section 1.6.1) simplifie la modélisation de machines polyphasées et, en conséquence, leur contrôle. Cela a été également utilisé pour démontrer l'indépendance de contrôle des machines connectées en série grâce au couplage spécial.

La REM, également présentée sur la section 1.6.2, permet d'organiser la structure du système étudié de façon à que cela soit facilement lisible, tout en respectant la causalité du système. En conséquence la structure de contrôle est automatiquement obtenue ainsi que les degrés de libertés à disposition pour implémenter des commandes plus complexes. Cela est particulièrement intéressant pour des structures complexes et nouvelles telles que les topologies HIMM et RIMM.

⁹ Il y a des cas particuliers de commande de MSAP triphasée où par exemple un harmonique de rang 3 de courant pourrait être intéressant en contribuant à la production du couple lorsqu'un harmonique 3 de FEM existe, mais ce cas est particulier.

2.2.1. Modélisation de la structure Pont-H

La Figure 25 présente la REM de la topologie Pont-H en présentant tous les éléments réels qui composent la structure onduleurs-machines.

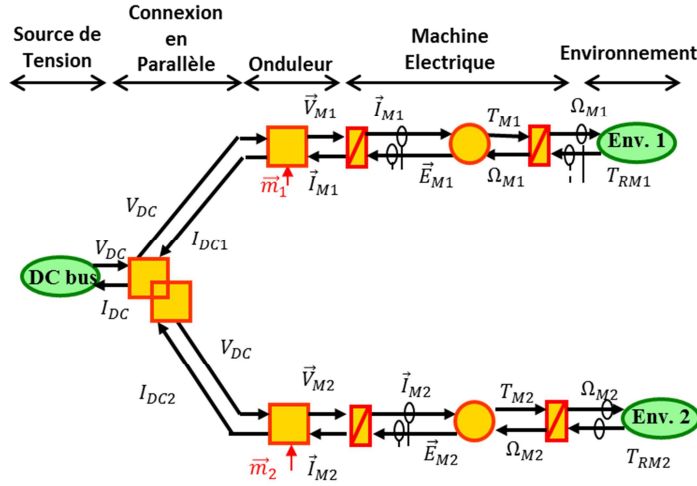


Figure 25 : Modèle de la topologie Pont-H.

Pour simplifier la commande, la décomposition en machines fictives a été implémentée (section 1.6.1). Cette méthode consiste à représenter une machine polyphasée par plusieurs machines diphasées et homopolaires, dont chacune interagit avec une certaine famille d'harmoniques du courant et des FEM. Le TABLEAU VII présente la distribution des harmoniques pour une machine à 6 phases symétrique.

TABLEAU VII : Distribution des harmoniques de machines fictives pour une machine à 6 phases symétrique.

Machine Fictive	Harmonique
Principale ($\alpha\beta 1$)	1, 5, 7, 11, ... $6k \pm 1$
Secondaire ($\alpha\beta 2$)	2, 4, 8, 10, ... $6k \pm 2$
Homopolaire 1 (h1)	6, 12, ... $6k$
Homopolaire 2 (h2)	3, 9, ... $6k \pm 3$

Les (Eq. 9) à (Eq. 14) présentent l'obtention des paramètres des machines fictives pour une machine à 6 phases symétrique. La matrice de résistances est normalement diagonale. Par contre, à cause des inductances mutuelles, la matrice des inductances ne l'est pas. Ainsi, on se sert de la matrice de Concordia (Eq. 11) pour la diagonaliser. En conclusion, les machines **principale ($\alpha\beta 1$)**, **secondaire ($\alpha\beta 2$)** et **homopolaire 1 et 2 (h1 et h2)** totalement découplées électro-magnétiquement entre elles sont obtenues (Eq. 14), pour être ensuite contrôlées indépendamment.

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + [E] \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \\ v_e \\ v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_p & M_1 & M_2 & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & L_p & M_1 & M_2 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & L_p & M_1 & M_2 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 & L_p & M_1 & M_2 \\ M_2 & M_3 & M_2 & M_1 & L_p & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & M_2 & M_1 & L_p \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_d \\ e_e \\ e_f \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$[C_6] = \sqrt{\frac{2}{6}} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{6}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{6}\right) & -1 & \cos\left(\frac{8\pi}{6}\right) & \cos\left(\frac{10\pi}{6}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{6}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{6}\right) & 0 & \sin\left(\frac{8\pi}{6}\right) & \sin\left(\frac{10\pi}{6}\right) \\ 1 & \cos\left(\frac{4\pi}{6}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{6}\right) & 1 & \cos\left(\frac{16\pi}{6}\right) & \cos\left(\frac{20\pi}{6}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{4\pi}{6}\right) & \sin\left(\frac{8\pi}{6}\right) & 0 & \sin\left(\frac{16\pi}{6}\right) & \sin\left(\frac{20\pi}{6}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$[V_{\alpha\beta}] = [C_6][R][C_6]^T [I_{\alpha\beta}] + [C_6][L][C_6]^T \frac{d[I_{\alpha\beta}]}{dt} + [E_{\alpha\beta}] \quad (\text{Eq. 12})$$

$$[V_{\alpha\beta}] = [R][I_{\alpha\beta}] + [L_{\alpha\beta}] \frac{d[I_{\alpha\beta}]}{dt} + [E_{\alpha\beta}] \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha 1} \\ v_{\beta 1} \\ v_{\alpha 2} \\ v_{\beta 2} \\ v_{h1} \\ v_{h2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \\ i_{\alpha 2} \\ i_{\beta 2} \\ i_{h1} \\ i_{h2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\alpha 1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\beta 1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{\alpha 2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{\beta 2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{h1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{h2} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \\ i_{\alpha 2} \\ i_{\beta 2} \\ i_{h1} \\ i_{h2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{\alpha 1} \\ e_{\beta 1} \\ e_{\alpha 2} \\ e_{\beta 2} \\ e_{h1} \\ e_{h2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 14})$$

Chaque machine fictive diphasée peut générer un couple constant, parce que les deux phases sont déphasées de 90°. En revanche, les machines homopolaires ne peuvent générer que du couple comportant nécessairement une composante oscillatoire. Le couple total généré par la machine est la somme du couple généré par chaque machine fictive.

En décomposant chaque machine polyphasée en machines fictives du modèle de la Figure 25, la Figure 26 est obtenue.

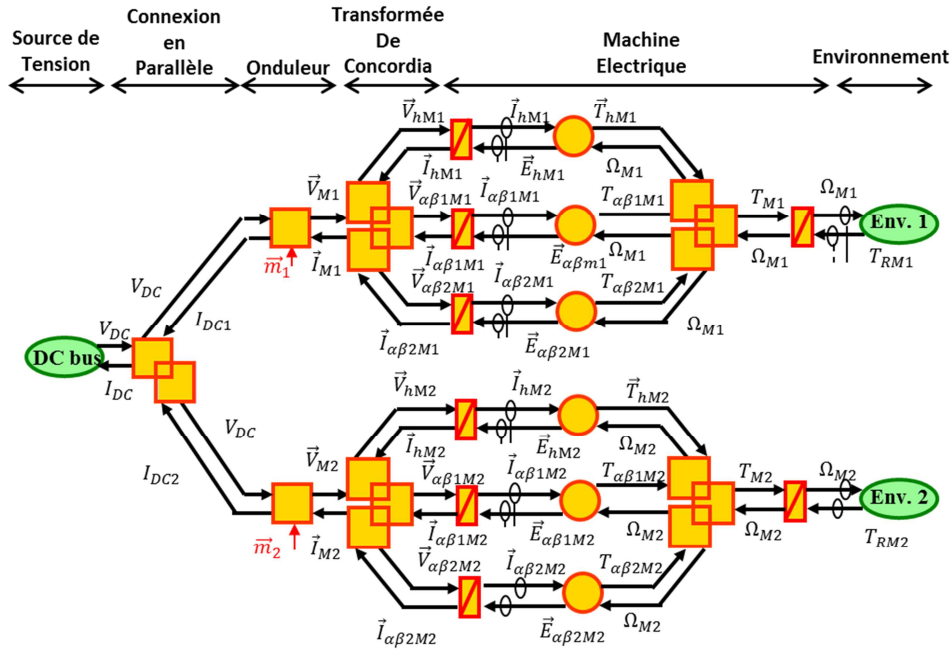


Figure 26: Modèle complet de la topologie Pont-H en REM.

Les MSAP symétriques à nombre pair de phases ont certaines machines fictives qui normalement ne peuvent pas générer du couple. Les machines secondaire et homopolaire 1 n'interagissent qu'avec des harmoniques pairs de courant et de forces électromotrices (TABLEAU VII). Or ces harmoniques pairs de la FEM sont nuls lorsque le rotor à aimants permanents est symétrique, ce qui s'avère être le cas pour la plupart des MSAP. En conséquence, le couple de ces machines fictives est nul. Ainsi, il est possible de simplifier le modèle présenté précédemment (Figure 27). Il faut souligner que le bloc responsable de la transformation électromécanique des machines homopolaire n'a qu'une seule dimension sur la Figure 27, parce que la dimension relative à l'homopolaire h1 a été supprimée lors de la simplification.

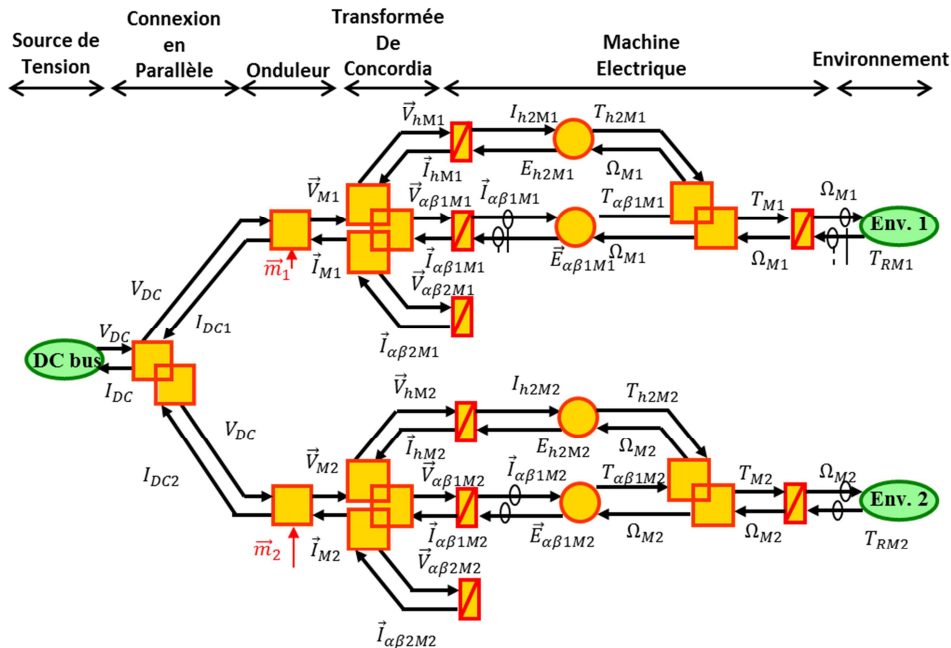


Figure 27 : Modèle simplifié de la topologie Pont-H en REM.

2.2.2. Contrôle de la structure Pont-H

En utilisant la REM, il est possible de définir le schéma de contrôle entre la variable qu'on souhaite contrôler et celle qu'on peut contrôler. Dans le cas d'un contrôle en vitesse pour un système onduleur-machine, il est souhaitable de contrôler la vitesse à partir des rapports cycliques des transistors de l'onduleur. Ainsi le contrôle est formé par des blocs en bleu représentant l'inverse des blocs du modèle entre les deux variables repérés précédemment. Sur la Figure 28, le chemin entre les deux variables est souligné, et la chaîne de contrôle est représentée.

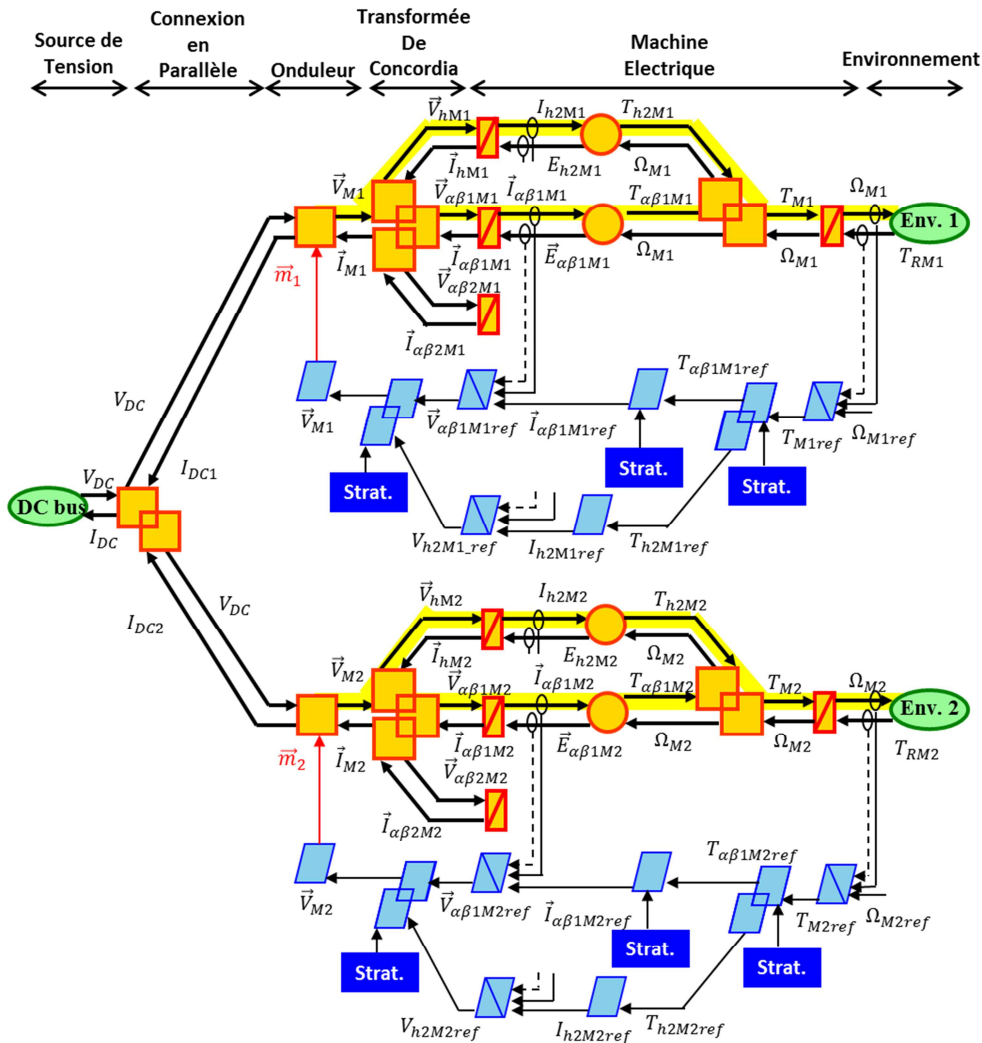


Figure 28 : REM de la topologie Pont-H avec la chaîne de contrôle complète.

A partir de la REM, il est possible de voir des blocs qui acceptent une stratégie. Ces blocs sont ceux de la stratégie dont le nombre des variables en entrée est inférieur à ceux en sortie du bloc. Par exemple, les blocs qui font la conversion entre le couple de référence et les courants en dq. Ces blocs ont une variable à l'entrée et deux à la sortie. Ainsi les 3 stratégies possibles par machine, représentées par des blocs bleu foncé sur la REM, sont listées ci-dessous :

- répartition du couple de la machine entre la machine principale et la machine homopolaire 2 ;
- détermination des courants de référence à partir du couple donné ;
- valeur des tensions de la machines secondaire et homopolaire 1 ;

Puisque les machines homopolaires ne génèrent pas de couple constant, il est plus intéressant de ne générer le couple qu'avec la machine principale. Ensuite, afin de contrôler le couple de la machine sur une stratégie MTPA (*Maximum Torque Per Ampere*), la composante I_q de chaque machine principale est définie selon le couple de référence et la composante I_d est nulle. A ce point de l'étude, sur les machines fictives qui ne génèrent pas du couple, une tension nulle est imposée. Ainsi, les courants des machines fictives ne générant pas de couple représentent les degrés de liberté pour le fonctionnement en mode dégradé, qui sont abordés en détail lors du chapitre 3.

Ainsi, les schémas de contrôle réduits tels que présentés dans la Figure 29 et la REM de la Figure 30 sont obtenus.

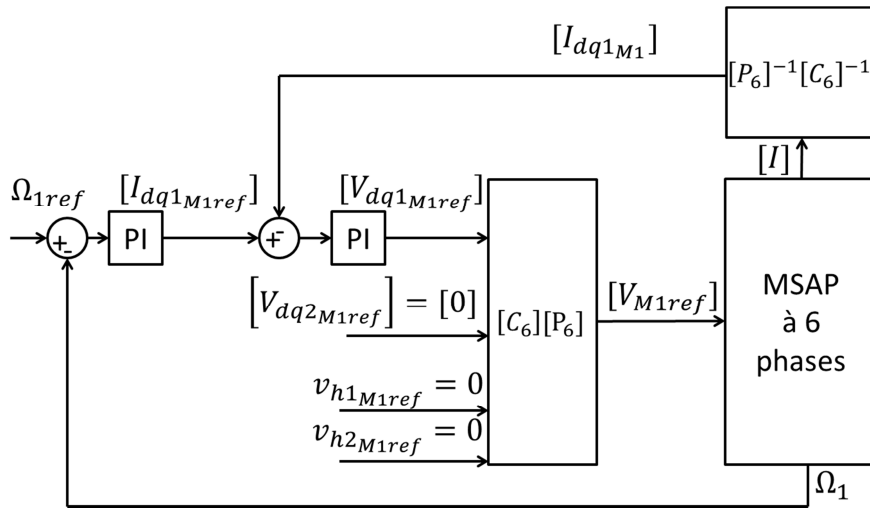


Figure 29 : Schéma de contrôle de la machine M1 de la topologie Pont-H.

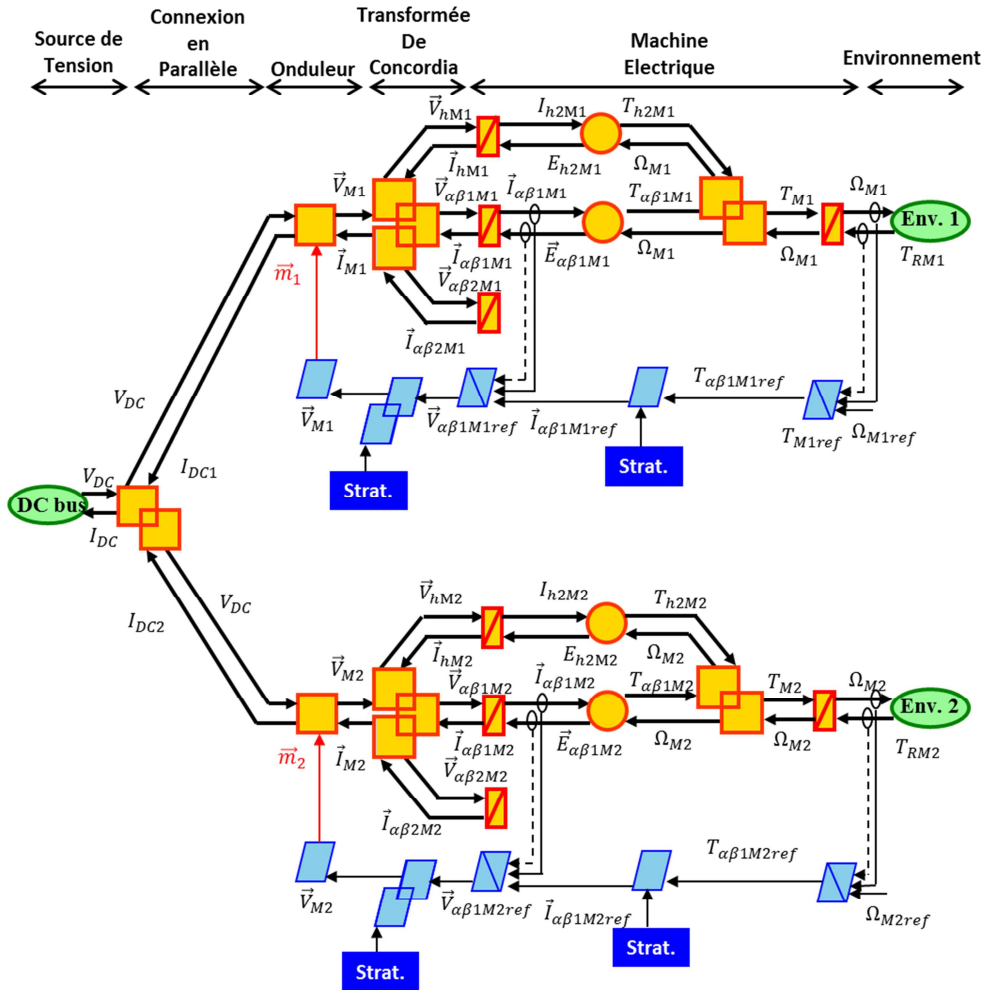


Figure 30: Modèle en REM de la topologie Pont-H avec la chaîne de commande réduite.

Finalement, le contrôle d'une machine à 6 phases devient aussi simple que celui d'une machine triphasée que l'on retrouve assez classiquement dans l'industrie. La REM présente des degrés de libertés supplémentaires, où une stratégie peut être implémentée plus tard.

2.2.3. Modélisation des topologies HIMM et RIMM

En raison du couplage en série la REM des topologies HIMM et RIMM représentant les éléments du système est présentée à la Figure 31 et Figure 32 respectivement. Ce modèle montre que, malgré le fait que la conversion électromécanique de chaque machine soit indépendante, la partie électrique des machines ne peut pas être découplée, parce que le courant qui passe par une machine passe obligatoirement par l'autre, en raison de la mise en série. Il est évident que la seule différence entre les deux topologies est le nombre de sources de tension.

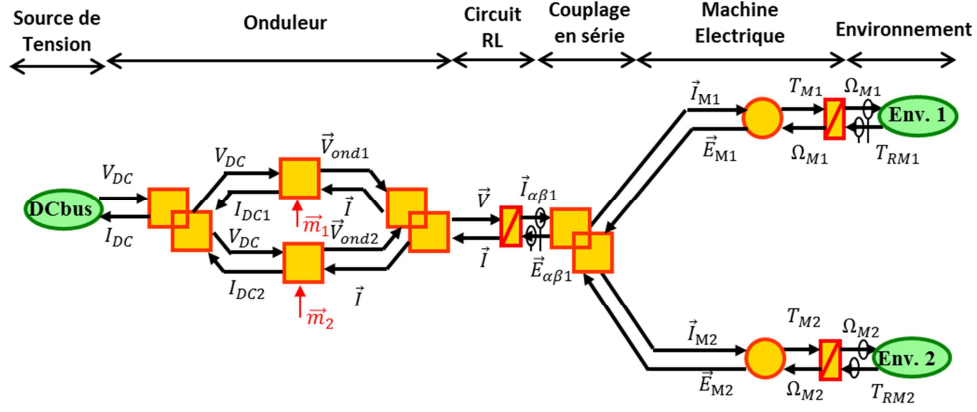


Figure 31 : REM complète de la topologie HIMM.

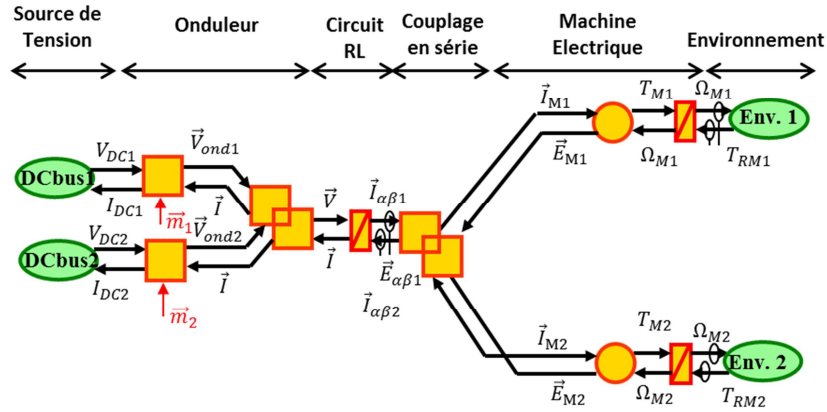


Figure 32: REM complète de la topologie RIMM.

Les machines de la topologie HIMM et RIMM sont également décomposées en machines fictives afin de concevoir la chaîne de commande. Dans ce cas, comme les deux machines réelles, les machines fictives sont couplées entre elles. Les (Eq. 15) à (Eq. 17) démontrent mathématiquement ce couplage entre les machines fictives des deux machines à 6 phases connectées en série.

$$[I_{M1}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} [I_{M2}] = [K]^{-1} [I_{M2}] \quad (\text{Eq. 15})$$

$$[I_{\alpha\beta M1}] = \begin{bmatrix} i_{\alpha 1 M1} \\ i_{\beta 1 M1} \\ i_{\alpha 2 M1} \\ i_{\beta 2 M1} \\ I_{h1 M1} \\ I_{h2 M1} \end{bmatrix} = [C_6][K]^{-1}[C_6]^T [I_{\alpha\beta M2}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1 M2} \\ i_{\beta 1 M2} \\ i_{\alpha 2 M2} \\ i_{\beta 2 M2} \\ I_{h1 M2} \\ I_{h2 M2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} I_{\alpha\beta 1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_{\alpha 1 M1} \\ I_{\beta 1 M1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\alpha 2 M2} \\ -I_{\beta 2 M2} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} I_{\alpha\beta 1 M1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\alpha\beta 2 M2} \end{bmatrix}^* \\ \begin{bmatrix} I_{\alpha\beta 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\alpha 2 M1} \\ I_{\beta 2 M1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\alpha 1 M2} \\ -I_{\beta 1 M2} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} I_{\alpha\beta 2 M1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\alpha\beta 1 M2} \end{bmatrix}^* \end{cases}
\end{cases}
\end{aligned}
\quad (\text{Eq. 17})$$

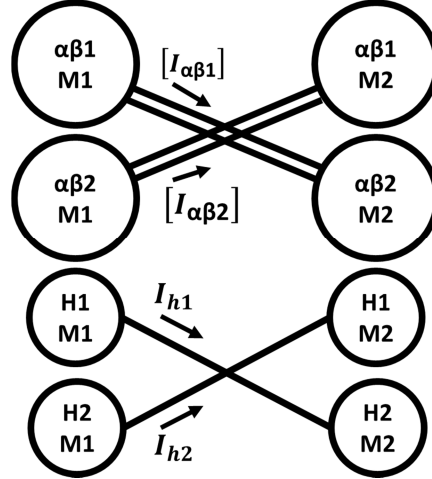


Figure 33 : Couplage entre les machines fictives de deux machines à 6 phases connectées en série.

Le couplage entre les machines fictives montré à la Figure 33 met en évidence l'indépendance de contrôle entre les deux machines connectées en série. En effet, les deux machines principales sont découplées entre elles, c'est-à-dire que le courant générant le couple au sein de la machine principale de M1 ne génère pas de couple au sein de la machine principale de M2 et vice-versa. Cela ne signifie pas que les deux machines sont totalement découplées. En effet, la machine principale d'une machine est couplée à la machine secondaire de l'autre comme le fait apparaître la Figure 33.

Afin d'assurer l'indépendance du contrôle des deux machines couplées en série, les machines secondaires ne doivent pas générer de couple. Pour cela, deux solutions sont proposées :

- Compenser le couple généré par la machine secondaire par la commande ;
- Eliminer les harmoniques de force électromotrice de la machine secondaire lors de la phase de conception de la machine ;

La première solution est présentée en [120]. Cette stratégie met à profit les degrés de libertés supplémentaires du système pour créer un couple qui compense celui généré par la machine fictive secondaire.

La deuxième solution peut paraître coûteuse ou trop contraignante à première vue, mais cela est naturellement acquis pour les machines à 6 phases. Comme déjà mentionné précédemment, les courants de la machine secondaire (TABLEAU VII) de la machine à 6 phases n'interagissent qu'avec des harmoniques pairs de la FEM qui sont nuls grâce à la symétrie du rotor et, par conséquent, ne génèrent pas de couple.

Pour les topologies en série, le couplage entre machines fictives d'harmoniques impairs avec des machines d'harmoniques pairs est par conséquent un avantage. Cela est possible entre machines à 6 et à 10 phases par exemple, mais pas possible pour des machines dont le nombre de phases est un

multiple de 4, comme des machines à 8 ou 12 phases. Une façon de vérifier cela est par le nombre des machines fictives avec d'harmoniques pairs et impairs. La machine à 8 phases peut être décomposée en trois machines fictives diphasées, dont une interagit avec des harmoniques pairs et les deux autres avec les impairs. Lors d'une connexion en série de deux machines à 8 phases symétrique, un couplage entre deux machines fictives d'harmoniques impaires est donc inévitable.

Concernant les machines à nombre impair de phases, comme les machines à 7 phases, toutes les machines fictives interagissent autant avec des harmoniques pairs qu'avec des impairs (TABLEAU VI). Ainsi, il est évident que des machines à 7 ou 8 phases nécessitent soit une commande spécifique soit une conception machine spécifique afin d'assurer l'indépendance du contrôle entre les deux machines connectées en série.

La Figure 34 présente la REM de la topologie HIMM avec décomposition des machines polyphasées en machines fictives. La REM de la topologie RIMM est similaire à celle de la topologie HIMM, et diffère seulement par le nombre des sources de tension.

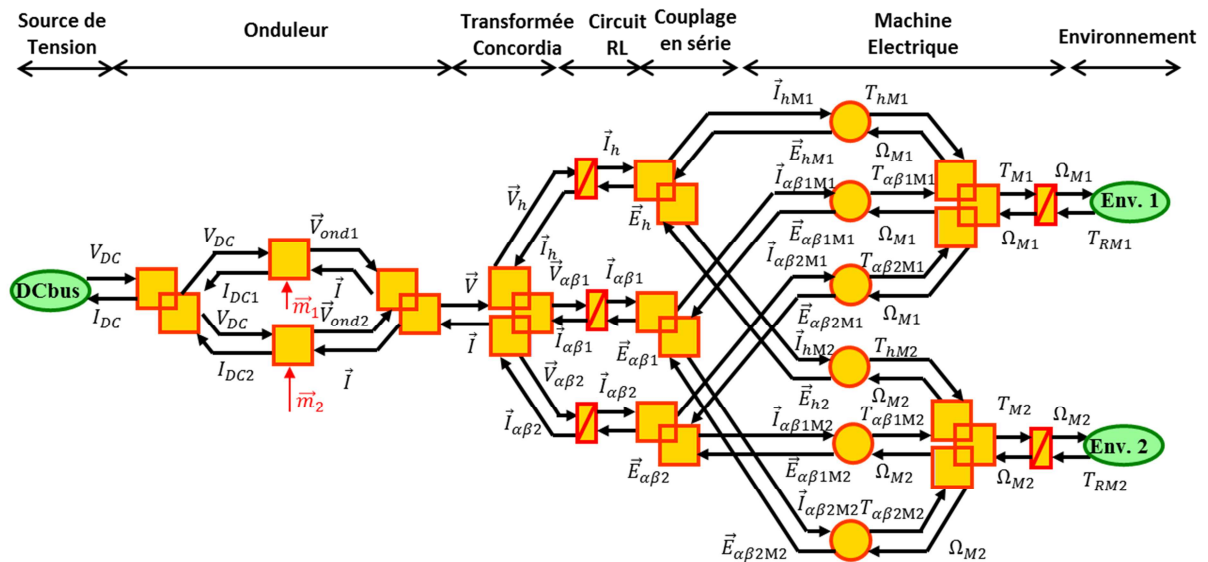


Figure 34 : REM du modèle de la topologie HIMM.

En simplifiant par élimination des machines fictives qui ne peuvent pas générer du couple, la REM de la Figure 35 est obtenue pour la topologie HIMM. On constate que la REM simplifiée de la topologie RIMM (Figure 36) a une différence en plus en le comparant au modèle de la topologie HIMM. Pour chaque machine, la seule machine fictive homopolaire qui peut générer du couple est la machine homopolaire 2 parce qu'elle interagit avec des harmoniques impairs. Dans la topologie HIMM, chaque courant homopolaire alimente la machine homopolaire 2 d'une des deux machines. En raison du couplage, le courant I_{h1} , qui est nul pour la topologie RIMM, est celui qui alimente la machine homopolaire 2 de la machine M2. Par conséquent, aucune machine homopolaire de la machine M2 ne peut générer du couple. Ceci montre une asymétrie entre les deux machines couplées en série. Une peut subir plus d'ondulation de couple que l'autre.

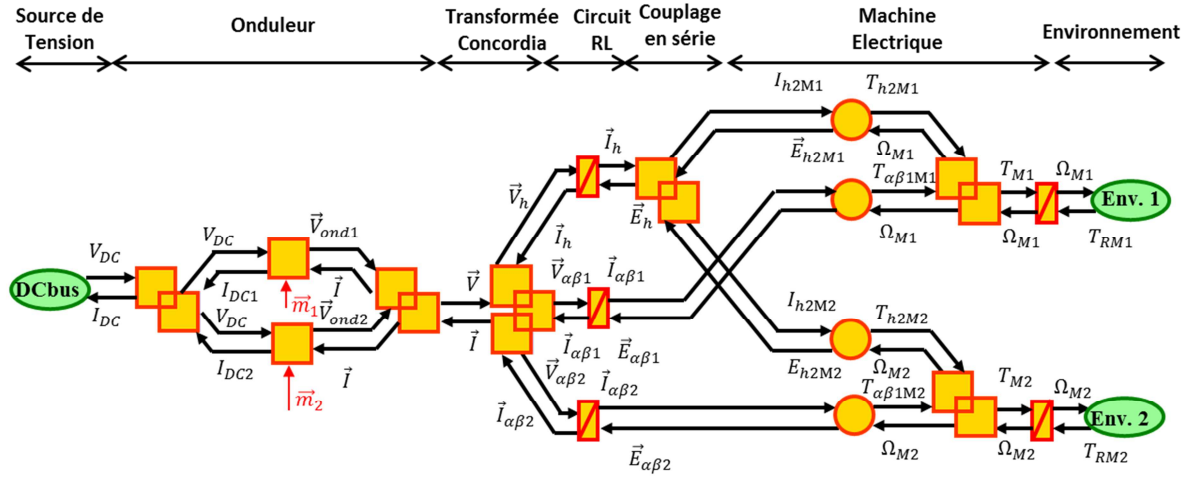


Figure 35 : Modèle réduit de la topologie HIMM.

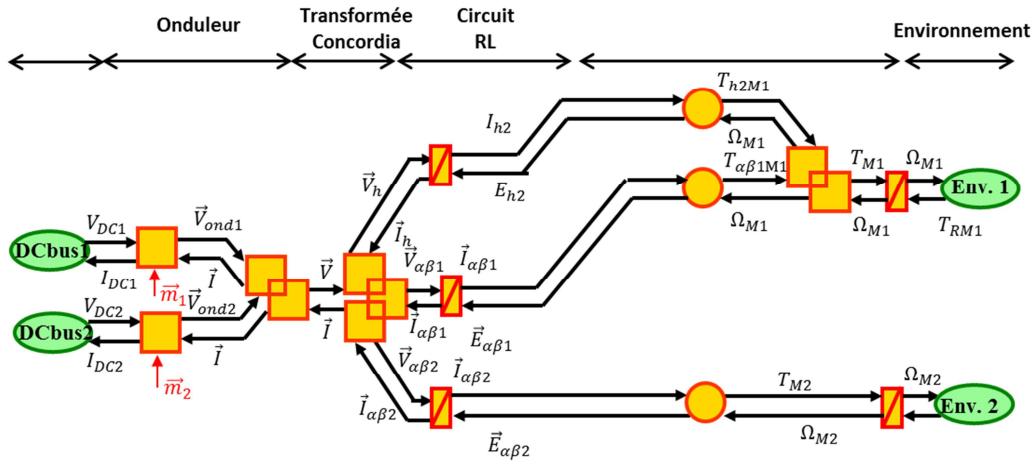


Figure 36 : Modèle réduite de la topologie RIMM.

La Figure 35 et la Figure 36 montrent que la machine principale de chaque machine est totalement découplée de n'importe quelle autre machine fictive, représentant ainsi de façon visuelle le découplage du contrôle de chaque machine. Ce découplage est aussi présenté sur le schéma de la Figure 37.

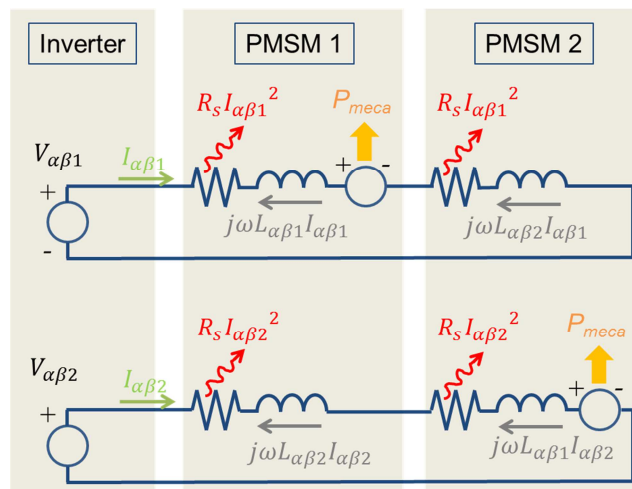


Figure 37: Schéma de couplage de machines fictives pour la structure HIMM ou RIMM.

2.2.4. Contrôle des structures HIMM et RIMM

Similairement à la topologie Pont-H, la vitesse est la variable que l'on souhaite contrôler, alors que les rapports cycliques sont les variables que l'on peut effectivement commander. Ainsi nous obtenons le schéma de commande de la Figure 38 pour la topologie HIMM.

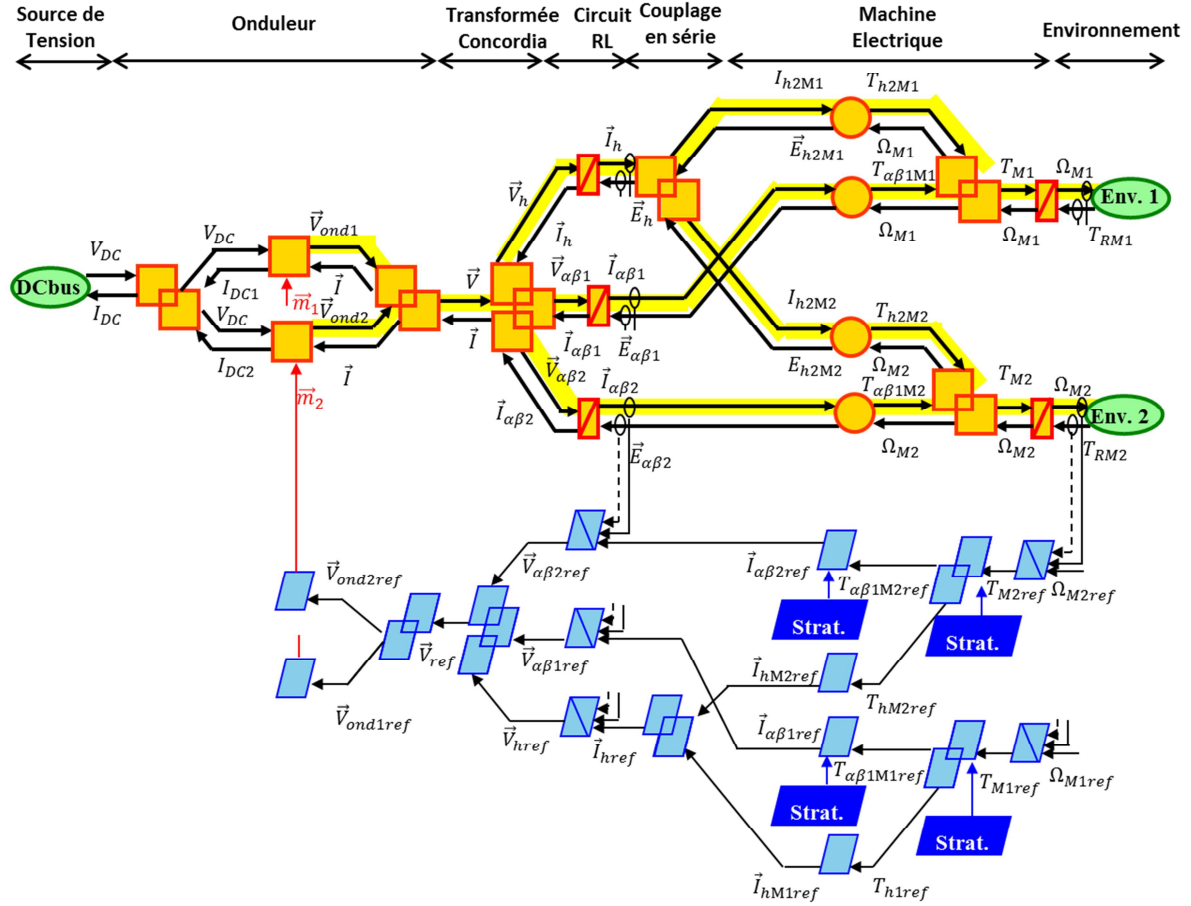


Figure 38 : Modèle en REM de la topologie HIMM avec la chaîne de commande.

La différence entre le nombre de sources de tension entre les deux topologies n'a aucun impact sur la chaîne de commande. La seule réelle différence concerne le contrôle du courant I_{h1} . Puisque ce courant est nul pour la topologie RIMM en raison des deux sources de tension indépendantes, son contrôle est donc impossible.

Au niveau des stratégies possibles, celles-ci diffèrent à peine de celles de la topologie Pont-H. Puisque les stratégies implémentées sont les mêmes, les simplifications du modèle sont similaires à celles du Pont-H.

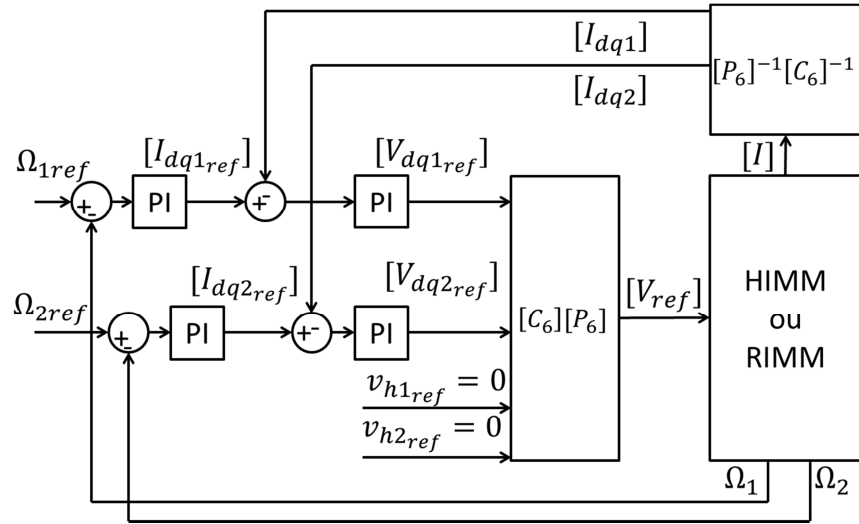


Figure 39 : Schéma de contrôle de la topologie HIMM ou RIMM.

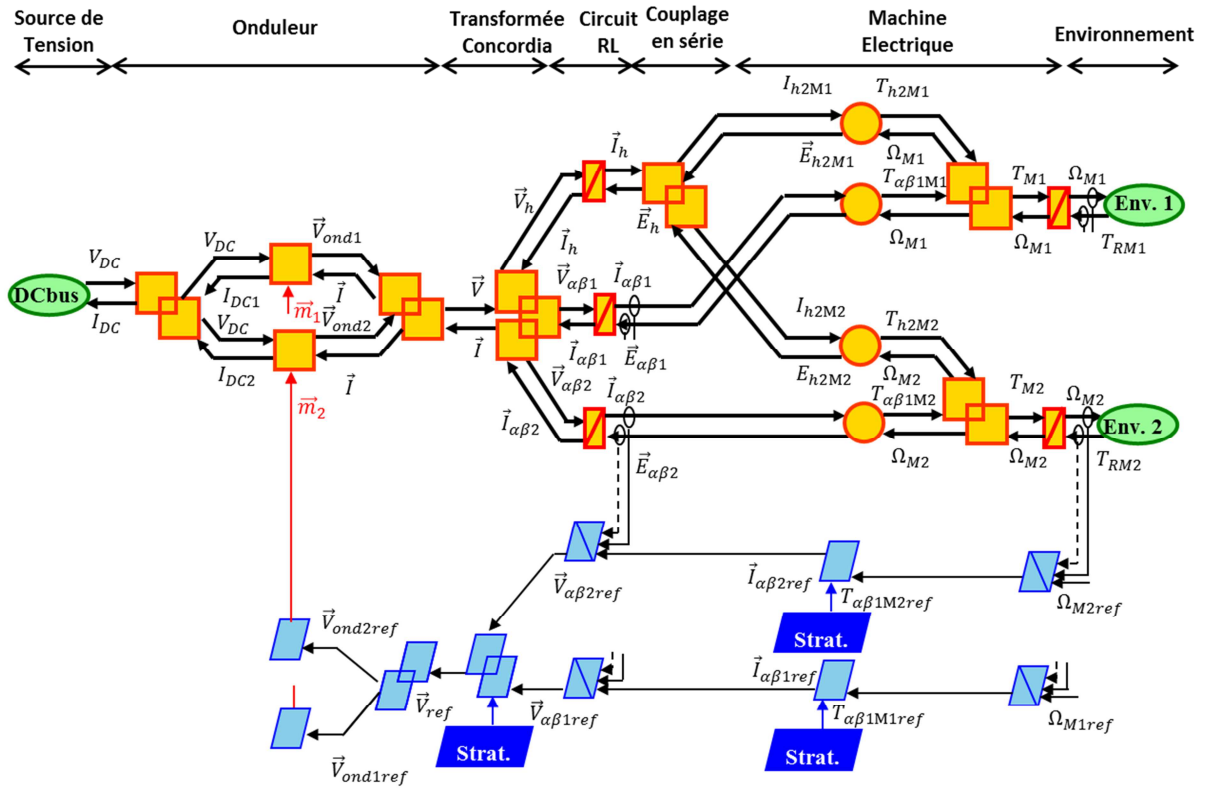


Figure 40 : Modèle en REM de la topologie HIMM avec la chaîne de commande.

Finalement, chaque machine principale peut être contrôlée séparément, grâce au couplage électrique spécial. Cependant, afin de dimensionner les correcteurs, il faut prendre en compte les paramètres de la machine principale en série avec les paramètres de la machine secondaire, (Eq. 18) à (Eq. 23).

$$[V] = [V_1] + [K]^{-1}[V_2] \quad (\text{Eq. 18})$$

$$[V] = [R][I] + L \frac{d}{dt} [I] + [E_1] + [K]^{-1} \left([R][I] + L \frac{d}{dt} [I] + [E_2] \right) \quad (\text{Eq. 19})$$

$$[V] = ([R] + [K]^{-1}[R]) [I] + ([L] + [K]^{-1}[L]) \frac{d}{dt} [I] + [E_{eq}] \quad (\text{Eq. 20})$$

$$[V_{\alpha\beta}] = [C_6]([R] + [K]^{-1}[R])[C_6]^T [I_{\alpha\beta}] + [C_6]([L] + [K]^{-1}[L])[C_6]^T \frac{d}{dt} [I_{\alpha\beta}] + [E_{\alpha\beta}] \quad (\text{Eq. 21})$$

$$[C_6]([R] + [K]^{-1}[R])[C_6]^T = \begin{bmatrix} 2R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2R \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$[C_6]([L] + [K]^{-1}[L])[C_6]^T = \begin{bmatrix} L_p + L_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_p + L_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_p + L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_p + L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{h1} + L_{h2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{h1} + L_{h2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 23})$$

2.2.5. Modèle de simulation et Banc d'essai

Les résultats présentés dans ces mémoires sont issus de simulations et d'essais expérimentaux.

Les simulations ont été intégralement réalisées en utilisant MatLab SimuLink®, plus précisément la librairie SimPowerSystems. Cette librairie fournit des modèles assez complets d'éléments complexes et non-linéaires comme les transistors. Ces transistors, comme ceux de l'onduleur appartenant au banc d'essais, possèdent une diode en antiparallèle (Figure 41). Ces éléments permettent une simulation de représenter assez fidèlement le comportement réel, en particulier lors du fonctionnement en mode dégradé.

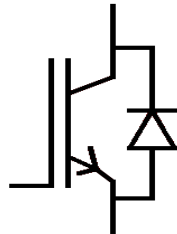


Figure 41 : Représentation du transistor avec une diode en antiparallèle. Source : MatLab SimuLink®

Un banc d'essai a été utilisé afin de reproduire des résultats expérimentaux pour l'analyse de cette étude. La Figure 42 présente le banc d'essais et ses éléments dont la valeur des paramètres se trouvent dans l'Annexe 5.2.

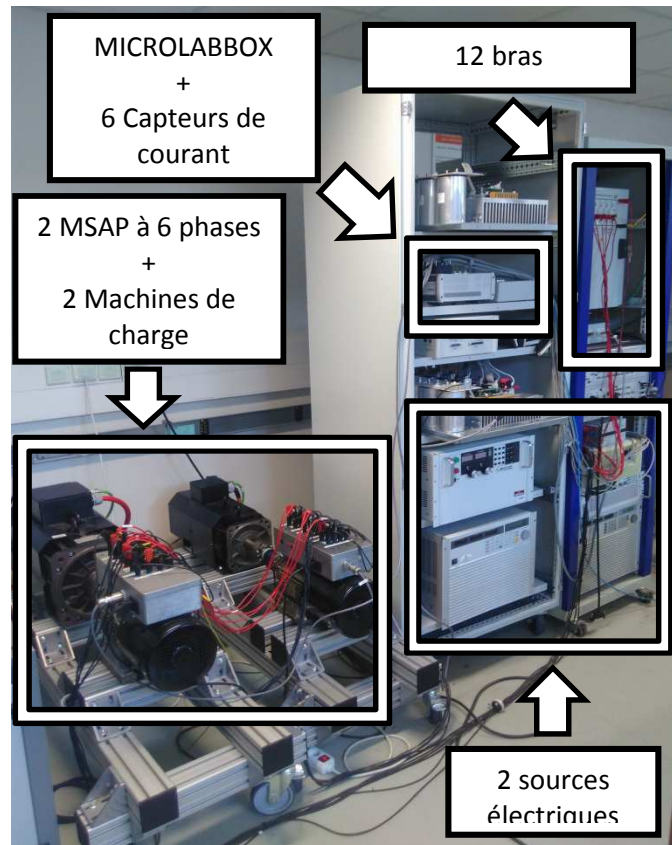


Figure 42 : Photo du banc d'essais.

De même, puisque 2 MSAP à 6 phases se trouvaient déjà au laboratoire avant le début de cette étude, elles n'ont donc pas été dimensionnées pour cette application. Malgré cela, les FEM de ces machines sont presque sinusoïdales, engendrant ainsi une réduction conséquente du couple pulsatoire en mode dégradé. Cependant, ces machines, qui ont 12 bobines et 4 paires de pôles, ont été premièrement conçues pour fonctionner en triphasé sans considération pour un éventuel fonctionnement en mode dégradé.

Tous les éléments disponibles permettent de reproduire le fonctionnement des trois topologies ici étudiées. La seule adaptation concerne la topologie Pont-H. Puisque que le banc ne dispose que de 12 bras d'onduleur, il n'est pas possible d'alimenter les deux machines, il serait nécessaire 24 bras pour cela. Dans ce cas une seule machine est entraînée. Cela ne gêne pas l'analyse, parce que le contrôle des deux machines est totalement découplé. De plus, aucune analyse énergétique n'est faite au niveau de la source.

Lors de toutes les analyses, les MSAP à 6-phases sont contrôlées en vitesse alors que les machines de charges sont contrôlées en couple afin de respecter la valeur de référence du courant I_q définie pour chaque topologie.

2.3.Comparaison des trois topologies choisies en mode normal

Les modes de fonctionnement normal et dégradés sont analysés dans ce chapitre. Concernant l'analyse du fonctionnement en mode normal, les objectifs consistent à :

- définir les points de fonctionnement les plus critiques pour l'analyse en mode dégradé ;
- obtenir les pertes Joule pour chaque topologie ;
- dimensionner l'onduleur en mode normal ;

Le point de fonctionnement est défini par le couple et la vitesse de référence de chaque machine. Dans le cas de cette étude, le point de fonctionnement le plus critique est donc celui où les courants de phase et les tensions de référence sont les plus élevés. Dans le cas de la topologie Pont-H, ce point est évident en raison du découplage électrique entre les machines. En revanche, cela n'est pas le cas pour les topologies en série. Une analyse des pertes en mode de fonctionnement normal quantifie les effets non-désirés des topologies en série. Les pertes Joule totales sont généralement plus élevées pour ces topologies ; cependant ce critère ne prend pas en compte le profil de fonctionnement de l'application TVC. Ainsi les pertes supplémentaires des topologies HIMM et RIMM sont théoriquement quantifiés afin d'établir une comparaison avec la topologie standard Pont-H.

La puissance de dimensionnement est une image du coût, du volume et du poids du système. Ces variables sont en effet proportionnelles à la puissance de dimensionnement de l'onduleur (P_{dim}) définie par le produit du nombre de transistors du système (Nb_{trans}) et de leur puissance de dimensionnement individuelle, le produit du courant maximal (I_{MAX}) et de la tension de référence maximale (V_{MAX}) de chaque transistor (Eq. 24). L'onduleur est finalement dimensionné en mode dégradé afin que le système soit tolérant aux défaillances. Le calcul du dimensionnement en mode normal permet d'évaluer le surdimensionnement du système induit par la contrainte d'un fonctionnement en mode dégradé.

$$P_{dim} = Nb_{trans} * I_{MAX} * V_{MAX} \quad (\text{Eq. 24})$$

Les paramètres des machines, présentés dans l'annexe 5.2, sont exactement les mêmes pour les trois topologies. Un choix plus judicieux serait de dimensionner les machines à la tension disponible à chacune d'entre elles. Il est possible d'alimenter chaque phase de la machine de la topologie Pont-H avec la tension du bus DC. Cependant, pour les topologies en série, la tension par phase est divisée par deux, parce que la tension du bus DC est la même pour les trois topologies. Cette réduction de tension demanderait l'augmentation du nombre de spires afin de respecter le flux généré par phase, augmentant en conséquence les valeurs des inductances et résistances des machines.

Les trois topologies peuvent fonctionner dans les modes de fonctionnement normal ou dégradé avec un profil de vitesse dynamique. Cependant, afin d'estimer les critères de comparaison définis précédemment, les essais sont réalisés en statique, c'est-à-dire, avec une référence de vitesse constante.

Pour les topologies en série, le comportement du système est étudié pour différentes vitesses et différents couples. Ainsi, l'objectif est d'une part de montrer que ce fonctionnement est possible et d'autre part de se familiariser avec le comportement de ces topologies innovantes.

2.3.1. Courant et tension de la topologie Pont-H en mode normal

Le point de fonctionnement utilisé pour les essais de la topologie Pont-H est défini par la vitesse maximale à laquelle une machine électrique peut tourner. Ceci signifie une inclinaison maximale ($\theta=6^\circ$) sur l'axe d'un des deux vérins ($\varphi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ou 270°). Le couple généré par chaque machine a été choisi afin que celui-ci soit proportionnel à la vitesse. Pour l'application TVC, les deux vérins ont le même dimensionnement et peuvent subir les mêmes efforts. En conclusion, quel que soit le choix opéré parmi les quatre valeurs de φ listées, le couple est défini par les valeurs du composant de courant I_q . Ceci est proportionnel au couple généré et comprend déjà le couple de résistance et le coefficient de frottement de l'ensemble comprenant la machine de traction et la machine de charge. Cette valeur est assez faible pour réduire la saturation de la tension demandée par l'onduleur en mode dégradé et est proportionnelle à la vitesse de référence.

Tous les essais pour la topologie Pont-H sont réalisés sur le point de fonctionnement correspondant aux valeurs présentées ci-dessous :

$$\theta = 6^\circ ; \varphi = 0^\circ$$

$$\Omega_{1REF} = 50 \text{ rad/s} ; I_{q1REF} = 1,4 \text{ A}$$

$$\Omega_{2REF} = 0 \text{ rad/s} ; I_{q2REF} = 0 \text{ A}$$

La Figure 43 et la Figure 44 présentent les courants mesurés et les références de tension expérimentalement obtenues pour une machine de la topologie Pont-H. Puisqu'une seule machine tourne dans ce cas, les données présentées ci-dessous sont évidemment de celle qui tourne.

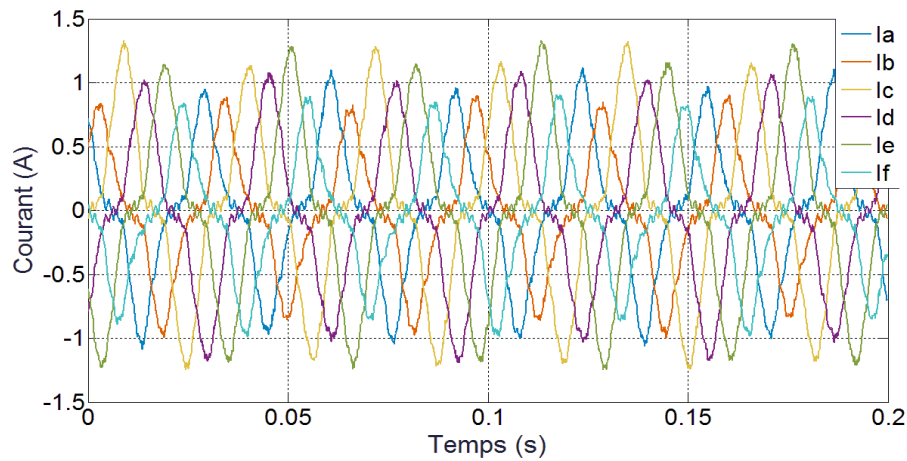


Figure 43: Courants mesurés EXPERIMENTALEMENT d'une machine de la topologie Pont-H.

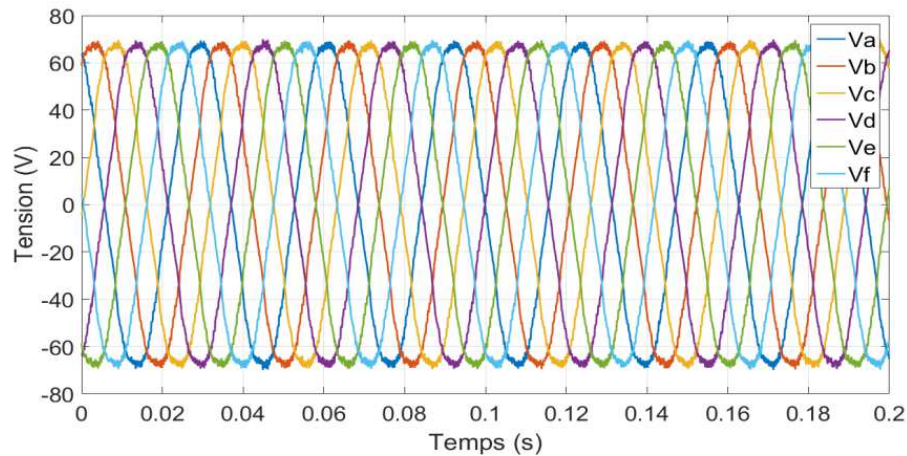


Figure 44 : Tensions de référence obtenues EXPERIMENTALEMENT pour une machine Pont-H.

Les tensions de référence (Figure 44) sont parfaitement sinusoïdales et équilibrées en déphasage et amplitude. Ceci est dû à la stratégie de commande relativement simple qui vise à contrôler uniquement les composantes de courant de la machine principale. Par ailleurs, certains harmoniques à basse fréquence sont visibles sur les courants mesurés.

Puisque les courants des machines fictives secondaire et homopolaire ne sont pas contrôlés, leur amplitude dépend des harmoniques de FEM, des harmoniques de tension générés par l'onduleur et par les résistances et inductances de ces machines fictives qui sont assez faible (Annexe 5.2). La Figure 45 montre que les valeurs crête de courant I_{h1} et I_{h2} représentent respectivement 70% et 58% du courant I_{q1} . Malgré ces valeurs relativement élevées, ces harmoniques de courant n'empêchent pas le bon fonctionnement du système puisque ils n'ont pas d'influence sur la valeur du couple.

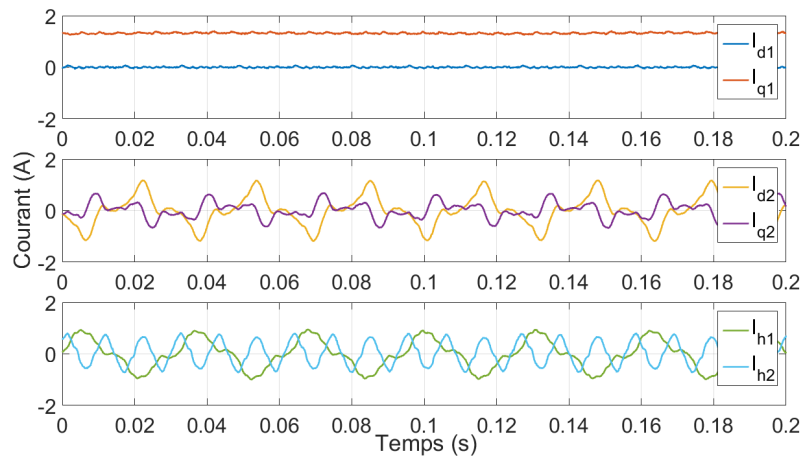


Figure 45 : Courants des machines fictives obtenus EXPERIMENTALEMENT d'une machine de la topologie Pont-H.

2.3.2. Démonstration expérimentale du contrôle indépendant des machines connectées en série

Afin de vérifier que le contrôle est effectué de manière indépendante sur les deux machines, la Figure 46 et la Figure 47 présentent des résultats obtenus expérimentalement alors qu'une machine est contrôlée en vitesse constante et la deuxième avec un profil trapézoïdal.

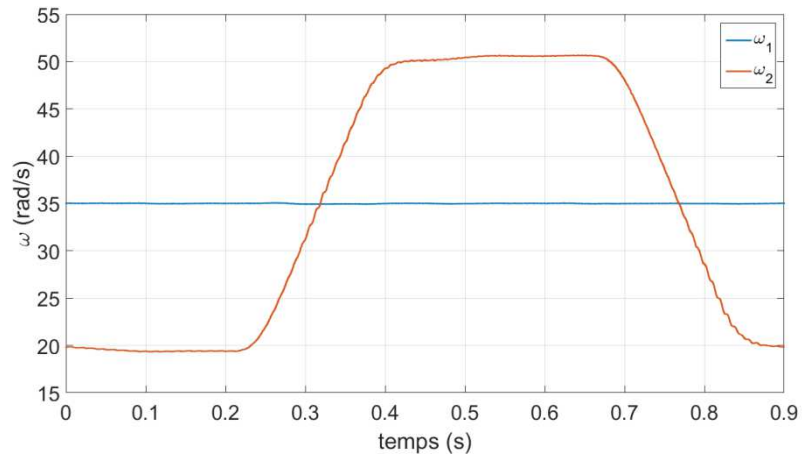


Figure 46 : Vitesses mesurées EXPERIMENTALEMENT des deux machines connectées en série pour un profil de vitesse où une machine est à vitesse variable.

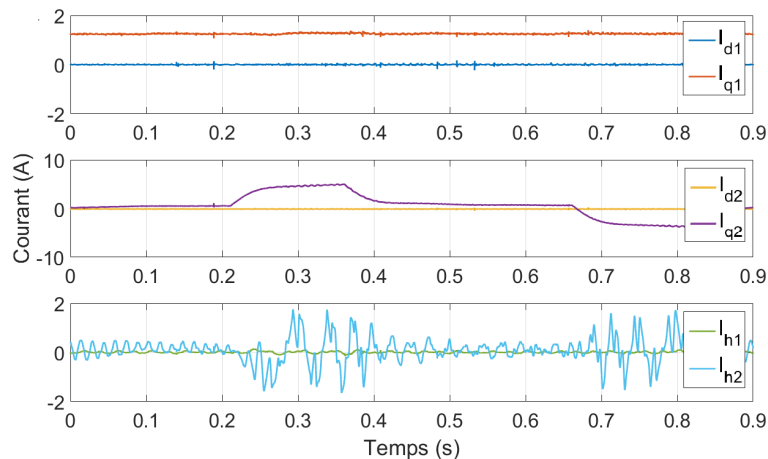


Figure 47 : Courants mesurés EXPERIMENTALEMENT des machines fictives pour un profil de vitesse où une machine est à vitesse variable.

La Figure 46 et la Figure 47 montrent l'indépendance de contrôle entre les machines. En effet, pour que le contrôle des deux machines soit indépendant l'un de l'autre, la variation de couple ou de vitesse sur une machine ne doit pas influencer l'évolution de la vitesse et du couple de l'autre machine. Cette condition est vérifiée par la Figure 46 et la Figure 47 qui présentent, respectivement, les vitesses mesurées et le composant I_q de chaque machine fictive.

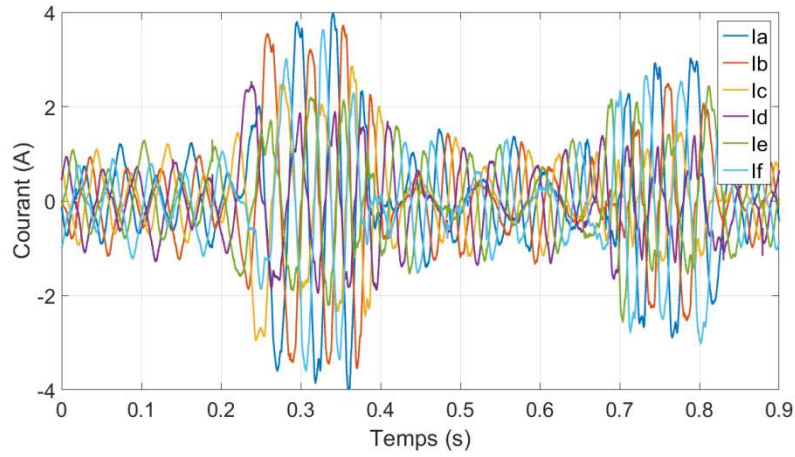


Figure 48 : Courants de phase mesurés EXPERIMENTALEMENT pour un profil de vitesse où une machine est à vitesse variable.

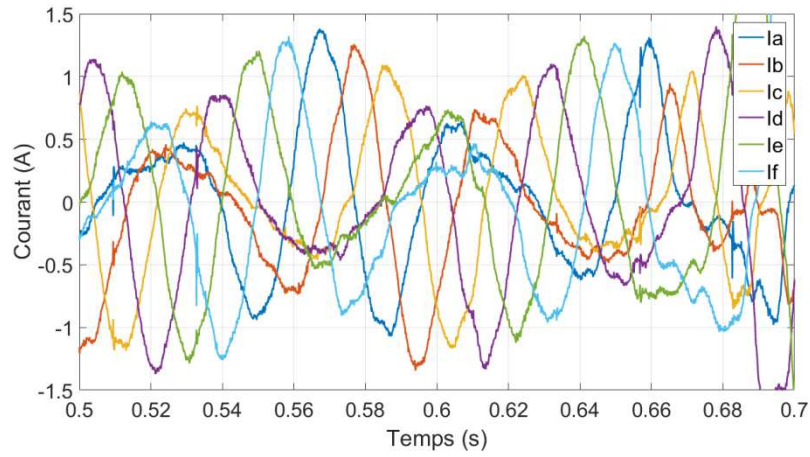


Figure 49 : Zoom sur les courants mesurés EXPERIMENTALEMENT pour un profil de vitesse où une machine est à vitesse variable.

La Figure 48 présente les courants de la structure relatifs au profil de vitesse présenté sur la figure 5. La Figure 49 est obtenue en zoomant sur la Figure 48. Sur celle-ci, il est plus visible que les courants n'ont pas l'allure habituelle, comme celle obtenue sur la topologie standard Pont-H (Figure 43). Les courants ne sont pas équilibrés et deux composantes se superposent, dont les fréquences fondamentales sont liées à la différence de vitesse électrique de chaque machine. Ces courants peuvent être obtenus analytiquement à partir des expressions (Eq. 25) et (Eq. 26).

$$[I_{ref}] = [C_6] \begin{bmatrix} I_{\alpha 1} \\ I_{\beta 1} \\ I_{\alpha 2} \\ -I_{\beta 2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [C_6] \begin{bmatrix} I_{\alpha 1} \\ I_{\beta 1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + [K][C_6] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{\alpha 2} \\ I_{\beta 2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$[I_{ref}] = \begin{bmatrix} I_1 \cos(\omega_1 t) + I_2 \cos(\omega_2 t + \phi) \\ I_1 \cos\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{6}\right) - I_2 \cos\left(\omega_2 t + \frac{2\pi}{6} + \phi\right) \\ I_1 \cos\left(\omega_1 t + \frac{4\pi}{6}\right) + I_2 \cos\left(\omega_2 t + \frac{4\pi}{6} + \phi\right) \\ I_1 \cos\left(\omega_1 t + \frac{6\pi}{6}\right) - I_2 \cos\left(\omega_2 t + \frac{6\pi}{6} + \phi\right) \\ I_1 \cos\left(\omega_1 t + \frac{8\pi}{6}\right) + I_2 \cos\left(\omega_2 t + \frac{8\pi}{6} + \phi\right) \\ I_1 \cos\left(\omega_1 t + \frac{10\pi}{6}\right) - I_2 \cos\left(\omega_2 t + \frac{10\pi}{6} + \phi\right) \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 26})$$

2.3.3. Définition du point de fonctionnement critique pour les topologies HIMM et RIMM

Le point de fonctionnement le plus critique pour les topologies en série est celui où les deux machines fonctionnent en même temps. Les (Eq. 1) et (Eq. 2) (Section 1.2), représentant le fonctionnement de l'application aérospatiale TVC, ont montré que le fait d'augmenter la vitesse de la machine électrique d'un vérin, réduit celle de l'autre. Pour cela, un maximum d'effort commun est atteint quand les deux machines tournent à la même vitesse. Donc, l'inclinaison est toujours maximale ($\theta=6^\circ$), mais sa direction (ϕ) est d'un angle égal à 45° , 135° , 225° ou 315° .

Ces quatre points de fonctionnement peuvent être séparés en deux cas de figure :

- les deux machines tournent dans le même sens, en sens horaire par exemple ;
- chaque machine tourne dans un sens différent : une machine tournant en sens horaire alors que l'autre tourne en sens antihoraire ;

Pour cela deux points de fonctionnement sont pris en compte pour la suite. La valeur de référence du couple ou de I_q est proportionnelle à la vitesse.

Le Points de fonctionnement 1 (PF1) et 2 (PF2) sont respectivement définis par les valeurs suivantes :

TABLEAU VIII : Valeurs référents aux points de fonctionnement PF1 et PF2

Point de Fonctionnement	PF1	PF2
θ	6°	
ϕ	45°	315°
Ω_{1REF}	$35,35 \text{ rad/s}$	
Ω_{2REF}	$35,35 \text{ rad/s}$	$-35,35 \text{ rad/s}$
I_{q1REF}	$1,0 \text{ A}$	
I_{q2REF}	$1,0 \text{ A}$	$-1,0 \text{ A}$

En mode normal les différences entre les topologies HIMM et RIMM sont négligeables, pour cela seules les valeurs relatives à la topologie RIMM sont présentées ici. Les graphiques de la Figure 50 à la Figure 53 présentent les courants et les références de tension pour les deux points de fonctionnement.

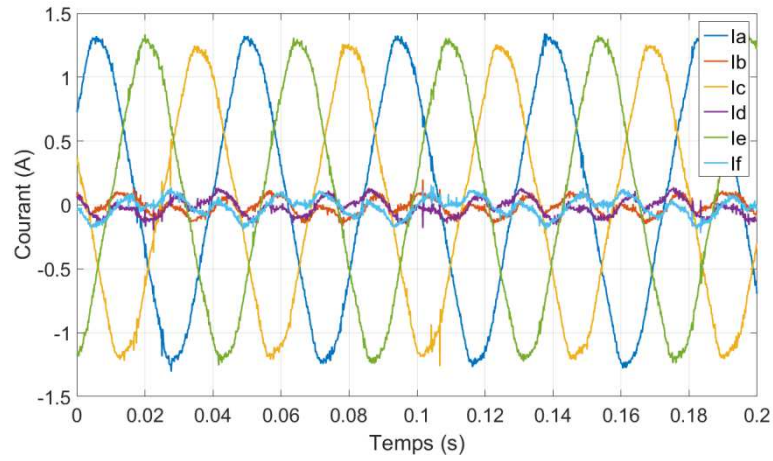


Figure 50: Courants mesurés EXPERIMENTALEMENT de la topologie RIMM pour PF1.

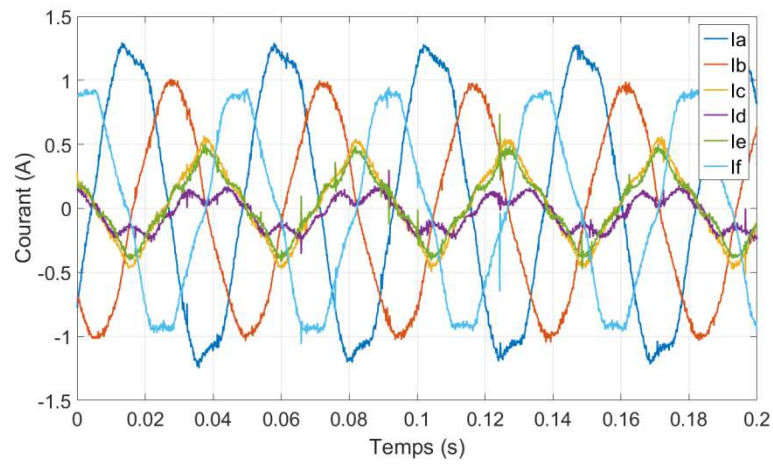


Figure 51 : Courants mesurés EXPERIMENTALEMENT de la topologie RIMM pour PF2.

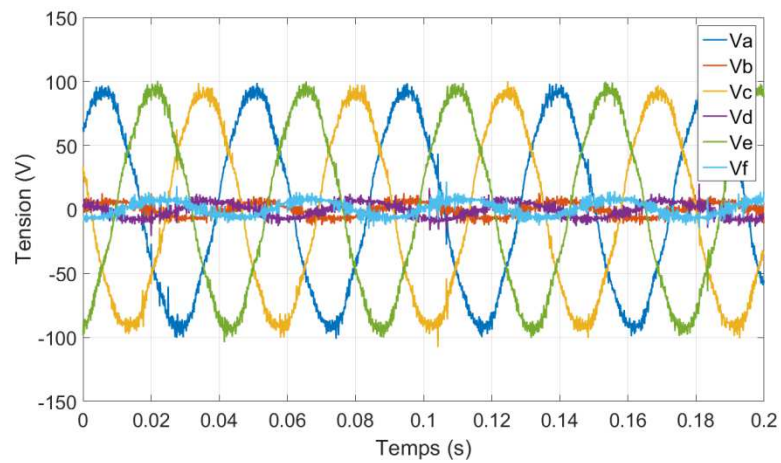


Figure 52: Tensions de référence obtenues EXPERIMENTALEMENT de la topologie RIMM pour PF1.

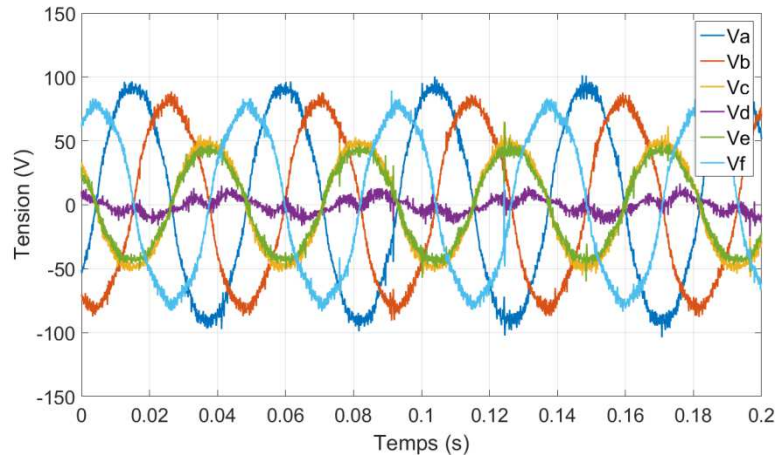


Figure 53 : Tensions de référence obtenues EXPERIMENTALEMENT de la topologie RIMM pour PF2.

Le fait que les courants soient une combinaison des courants nécessaires pour entraîner chaque machine implique cette différence entre les deux points de fonctionnement. Les courants de référence pour entraîner la machine 1 et machine 2 sont respectivement notés $[I_{\alpha\beta 1}]$ et $[I_{\alpha\beta 2}]$.

En reprenant l'(Eq. 25) et l'(Eq. 26) de courant de phase en fonction des composants $\alpha\beta$ entraînant chaque machine, lorsque les deux machines tournent à la même vitesse, les courants des phases A, C et E simplement se somment, alors que celles des phases B, D et F se soustraient en raison de connexions directes ou inversés entre les phases. En fonction des amplitudes de courant ($[I_1]$ et $[I_2]$) et des déphasages électriques entre les FEM des deux machines (ϕ) (Eq. 26), il est possible d'annuler les courants des 3 parmi les 6 phases, ce qui explique les résultats obtenus en Figure 50. Dans ce cas, $[I_1]$ et $[I_2]$ ont la même valeur et le déphasage électrique entre les FEM de deux machines est nul. Un déphasage de ϕ égal à 180° génère le même effet, mais annule les courants des trois autres phases. Si une telle combinaison de facteurs est possible, elle représente un cas peu probable étant donné que les turbulences « aléatoires » autour d'une fusée génèrent des mouvements eux aussi « aléatoires » entre les deux vérins. De plus, cette situation peut être évitée par un contrôle du déphasage électrique entre les machines afin que celui-ci vaille 90° ou 270° , c'est-à-dire une valeur qui génère une distribution homogène de la puissance entre les six phases comme le montre la Figure 54. Ce contrôle est détaillé dans l'annexe 5.3.

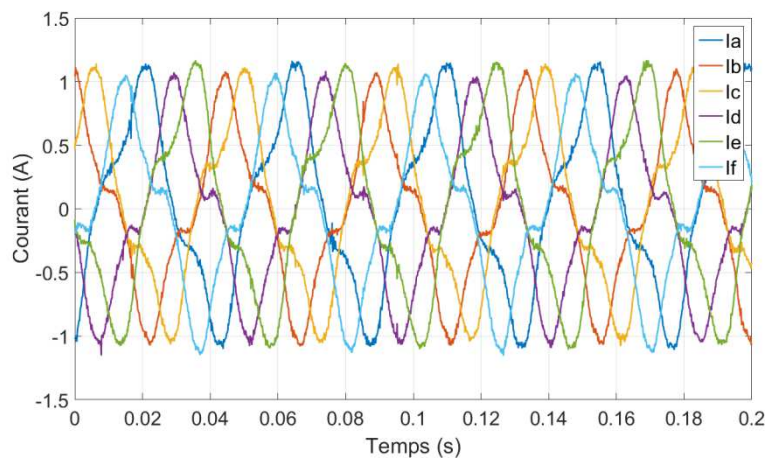


Figure 54: Courants de la topologie RIMM pour PF1 avec un contrôle du déphasage électrique entre les machines.

Quand les vitesses sont rigoureusement de même valeur mais de sens opposés, le courant d'une seule phase peut être nul. Par exemple, dans le cas de la topologie RIMM avec le point de fonctionnement PF2 présenté sur la Figure 51, I_1 est égale à I_2 et le déphasage ϕ égal à π . Ces conditions annulent le courant de la phase D, il vient alors que le courant de la phase A soit le double du courant nécessaire pour entraîner une seule machine. Différents déphasages électriques entre les machines peuvent annuler le courant d'autres phases puisque lorsque le courant d'une phase est nul celui de la phase électriquement déphasé de π est le plus élevé. Ainsi, la Figure 53 montre que le courant et la tension de référence de la phase D sont presque nuls tandis que ceux de la phase A sont les plus élevés.

Malgré les différences entre les points de fonctionnement PF1 et PF2, les valeurs crêtes du courant et de la référence de tension sont identiques. Puisque la situation la plus contraignante pour PF1 peut être évitée par un contrôle du déphasage électrique entre les machines, qui a été expérimentalement implémenté, la comparaison avec la topologie Pont-H ainsi que les essais en mode dégradé sont réalisés avec chaque machine tournant dans un sens différent (PF2).

2.3.4. Comparaison du dimensionnement de l'onduleur pour les topologies en mode normal

Le graphique ci-dessous compare les tensions de référence crête, courant crête mesuré et dimensionnement de l'onduleur entre les trois topologies (TABLEAU IX et Figure 55).

TABLEAU IX : Dimensionnement des trois topologies.

	I_{MAX} (PU)	V_{MAX} (PU)	P_{dim} (PU)
Pont-H	1,00	1,00	1,00
HIMM	1,23	1,27	0,78
RIMM	1,00	1,35	0,68

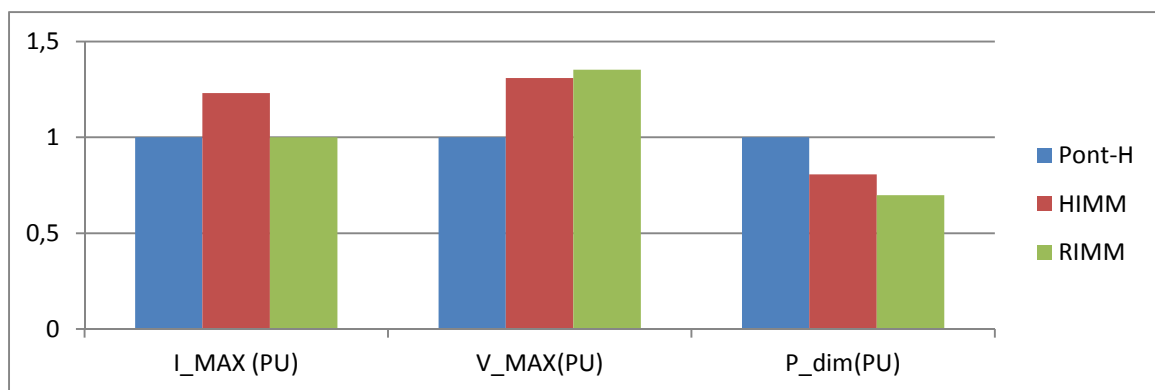


Figure 55 : Comparaison des trois topologies en dimensionnement

Théoriquement, l'amplitude du courant des topologies en série devrait être $\sqrt{2}$ ($\approx 1,41$) fois plus élevée que celle de la topologie Pont-H. Cependant, le courant I_{h1} de la topologie RIMM est nul et la mise en série des HIMM et RIMM réduit également les courants homopolaires. En conséquence, le courant max de la topologie RIMM est similaire à celui du Pont-H et le courant de la topologie HIMM n'est que 23% plus élevé au lieu de 41% prévu.