

Commande en mode dégradé

Ce chapitre analyse différentes stratégies de commande pouvant améliorer la performance du système en mode dégradé. Dans le chapitre 2, la cause de la forte augmentation du dimensionnement de l'onduleur a été détectée : la composante constante, de valeur très élevée, du courant homopolaire apparaissant lors du défaut de court-circuit. Dans ce chapitre, les stratégies proposées agissent spécifiquement sur cette cause et permettent une réduction significative du dimensionnement.

Ces stratégies de contrôle ici présentées sont de deux types :

- « stratégies sans reconfiguration » ;
- « stratégies avec reconfiguration » ;

Pour les « stratégies sans reconfiguration », on agit sur les machines fictives dites « **creuses** », c'est à dire qui ne peuvent pas générer de couple du fait de l'absence de forces électromotrices, et sur les machines homopolaires. Ces stratégies ont comme but d'améliorer le fonctionnement en mode dégradé par rapport à la commande exposée au chapitre 2. Ces nouvelles stratégies s'appliquent aussi en mode normal et peuvent aussi apporter des améliorations au fonctionnement, même avant l'apparition du défaut.

Les « stratégies avec reconfiguration » ne sont implémentées que lorsque le système est en défaut. La reconfiguration se caractérise par des modifications au niveau de la commande en mode dégradé. Pour cela, ces stratégies nécessitent que le défaut soit détecté et localisé et que le système réagisse assez rapidement.

Ces deux stratégies sont expliquées plus en détail dans ce chapitre, dans les sections 3.1 et 3.2. Des résultats expérimentaux et de simulation sont utilisés pour une analyse comparative multicritère entre les différentes topologies et stratégies de commande.

3.1.Stratégie sans reconfiguration – Contrôle des machines fictives non-principales

Le chapitre précédent a présenté les résultats pour les topologies en cas de défaut. Le surdimensionnement dû au fonctionnement en mode dégradé est assez important pour toutes les topologies. La raison principale pour cette augmentation importante est la présence de courants homopolaires qui ne sont pas contrôlés et dont la valeur est très élevée.

Les courants homopolaires sont ceux qui alimentent les machines fictives de même nom. Ces machines fictives ne peuvent pas générer de couple constant parce qu'elles n'ont qu'une seule phase. Cependant, il est possible de générer avec ces machines un couple de moyenne non-nulle et de compenser la pulsation de couple avec les machines fictives diphasées. Dans ce cas, les consignes de la machine principale, même dans le repère tournant, ne sont plus constantes, complexifiant donc la commande. Pour ces raisons, les systèmes électriques ont généralement intérêt à réduire au maximum les courants homopolaires.

Concernant la topologie Pont-H ou des topologies HIMM et RIMM avec machines à 7 et à 8 phases, certaines machines diphasées qui ne sont pas les machines principales peuvent générer du couple constant. Cependant, ce couple est généré par l'interaction des harmoniques de courant et les harmoniques de la FEM. Lors d'un dimensionnement standard d'une MSAP, les harmoniques de FEM sont d'amplitudes plus faibles que le fondamental. Dans ce cas, l'obtention d'un accroissement significatif du couple (>10%) à l'aide de ces machines secondaires n'est possible qu'au prix de l'injection de courant d'amplitude élevée diminuant le rendement et impliquant un dimensionnement élevé de l'onduleur.

Finalement, dans cette étude, les **machines fictives non-principales**, c'est-à-dire toutes les machines fictives autres que les machines principales, ne sont pas contrôlées afin de générer du couple. Ainsi, deux stratégies sont proposées pour être appliquées individuellement à chacune de ces machines fictives :

- « tension nulle » (« $V=0$ ») ;
- « courant nul » (« $I=0$ ») ;

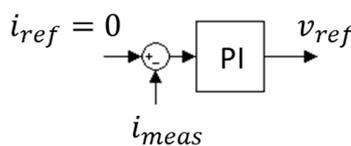
Dans le chapitre antérieur, la stratégie utilisée pour les trois topologies étudiées a été celle consistant à contrôler le courant des machines principales, selon le couple de référence, et imposer une tension moyenne nulle (« $V=0$ ») aux autres machines fictives. L'avantage de cette stratégie réside dans la réduction de la tension de référence au niveau de l'onduleur et dans le fait de disposer de plus de degrés de liberté pour le fonctionnement en mode dégradé.

Cependant lorsqu'un défaut survient, un couplage électrique entre les machines apparaît. A cause de cela, l'absence de contrôle de courant des machines fictives non-principales peut engendrer des courants d'amplitude très élevée en mode dégradé, comme cela avait été mentionné lors du chapitre précédent, dans l'explication concernant les courants homopolaires.

D'un autre côté, la nouvelle stratégie à « courant nul » (« $I=0$ ») annule les courants dans certaines machines fictives, dans le but de réduire les courants de phase en mode dégradé. Par conséquent, la référence de tension de ces mêmes machines fictives n'est plus nulle, principalement après l'apparition d'une défaillance. Dans ces conditions, la tension de référence de chaque phase peut être encore plus élevée et dans certains cas peut atteindre la valeur maximale définie par la source de tension continue. Dans ce cas, l'onduleur et les correcteurs sont saturés, générant des fortes pulsations de couple et de courant.

Chaque stratégie est implémentée comme montré sur le TABLEAU XVI.

TABLEAU XVI: Stratégies de contrôle.

Stratégie de commande	Référence de tension
« $V = 0$ »	$v_{ref} = 0$
« $I = 0$ »	

De la Figure 86 à la Figure 88, les schémas de commande pour les topologies Pont-H, HIMM et RIMM sont présentés. Il est donc possible de voir les possibilités de contrôles pour ces machines fictives qui ne sont pas contrôlées dans cette étude pour générer du couple.

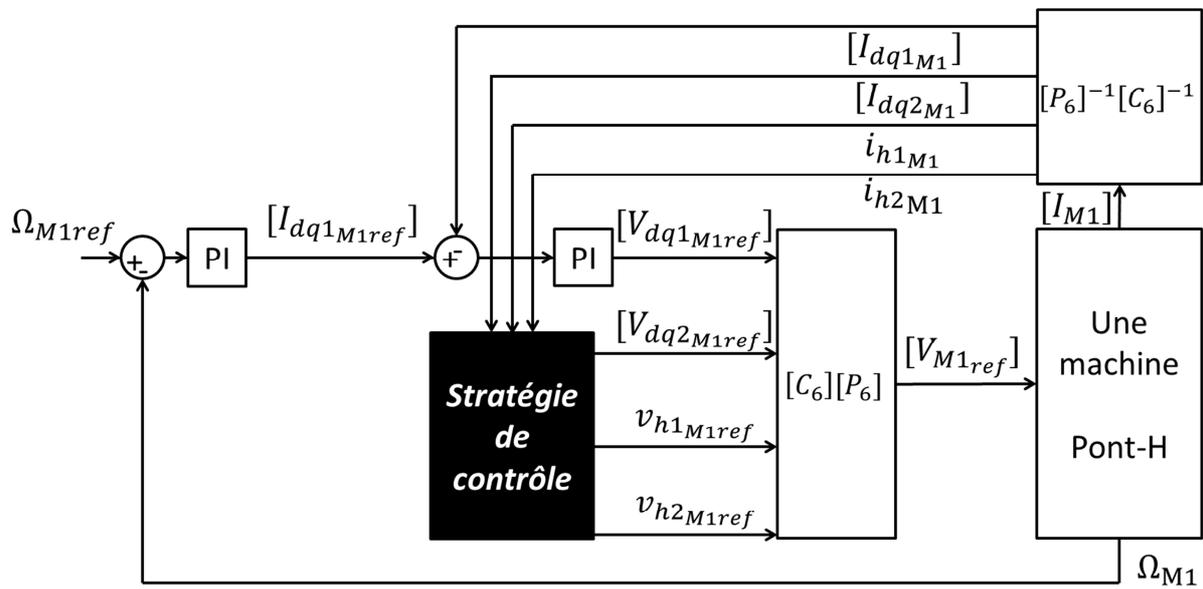


Figure 86 : Schéma de commande d'une machine de la topologie Pont-H.

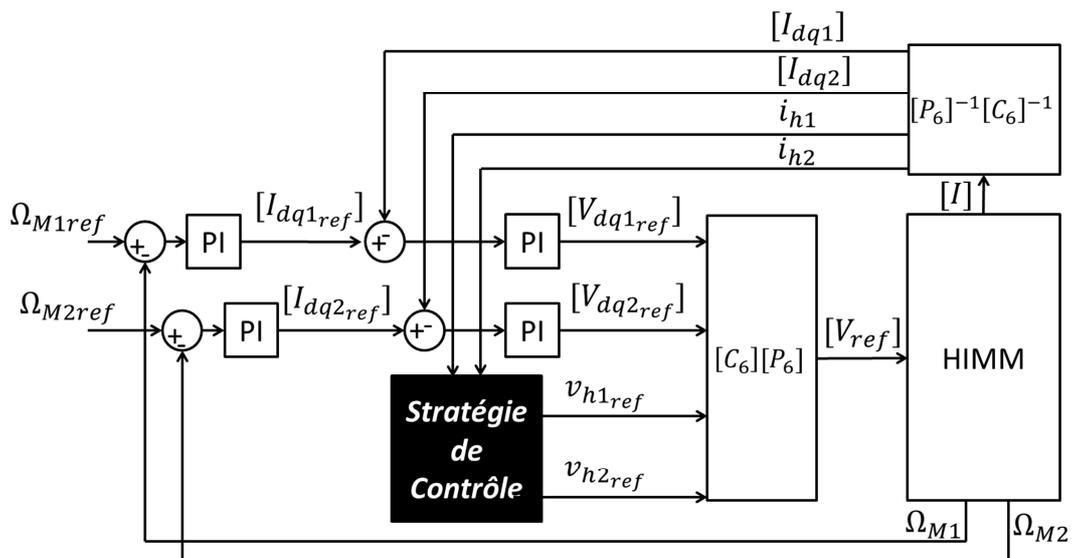


Figure 87 : Schéma de commande d'une machine de la topologie HIMM.

commande différentes pour chaque machine. Comme mentionné auparavant, le dimensionnement du système considère que les deux vérins ou deux machines subissent des contraintes similaires. Par conséquent, les deux machines ont toujours la même stratégie de contrôle.

Dans la suite de ce chapitre, les résultats expérimentaux et de simulation sont analysés séparément pour chaque topologie. Toutes les stratégies pour les trois topologies sont comparées sur les mêmes trois critères de comparaison qu'au Chapitre 2 : puissance de dimensionnement, pertes Joule en mode dégradé et l'ondulation de couple. La puissance de dimensionnement est le produit de valeur crête de courant, de tension, et du nombre de transistors composant la topologie. L'ondulation de couple est définie par le rapport entre l'amplitude crête-crête de la pulsation du couple divisé par le couple moyen.

3.1.1. Stratégies de contrôle pour les machines fictives non-principales de la topologie Pont-H

Dans cette section les résultats sont présentés pour deux stratégies différentes¹¹ la « 011 » et la « 100 », le choix de ces deux stratégies a été défini pour mettre en évidence deux comportements distincts. Dans la dernière partie de cette section, des valeurs numériques obtenues pour toutes les stratégies de contrôle sont comparées afin de conclure sur l'impact de différentes stratégies.

3.1.1.1. Défaut de court-circuit

Les résultats ci-dessous ont été obtenus en simulation parce que le courant-crête est trop élevé pour les machines en mode dégradé pour permettre des essais expérimentaux.

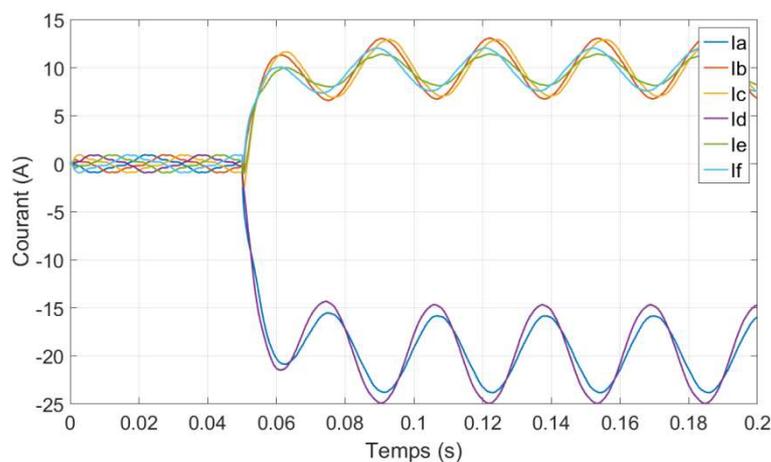


Figure 89 : Courants de phase obtenus en SIMULATION pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 011 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

¹¹ 011 : $[V_{dq2}]$, I_{h1} and I_{h2} nuls ; 100 : $[I_{dq2}]$, V_{h1} and V_{h2} nuls

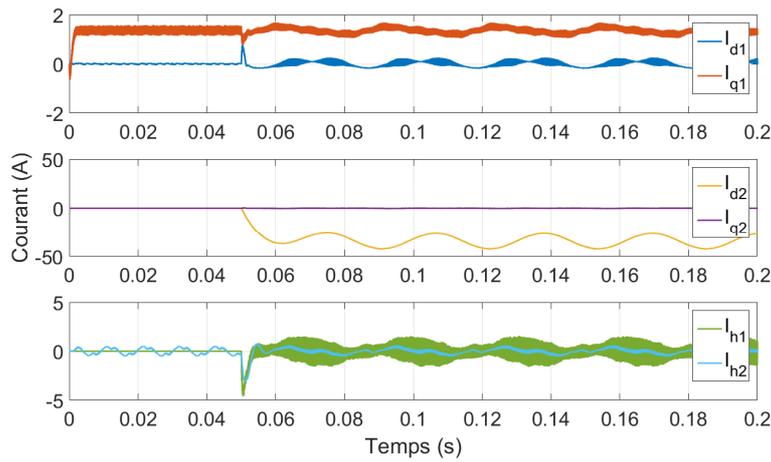


Figure 90 : Courants des machines fictives obtenus en SIMULATION pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 011 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

La Figure 89 montre que la stratégie « 011 » n'élimine pas la composante V_{DC}/R du courant. Le fait de contrôler les deux machines homopolaires en courant nul réduit fortement l'amplitude des courants homopolaires. Par conséquent, les courants de la machines secondaire, qui est la seule contrôlée en tension nulle, sont beaucoup plus élevés parce qu'ils doivent seuls compenser le défaut. Ainsi, il est possible de conclure que la forte amplitude de courant et d'ondulation du couple ne vient pas seulement des machines homopolaires.

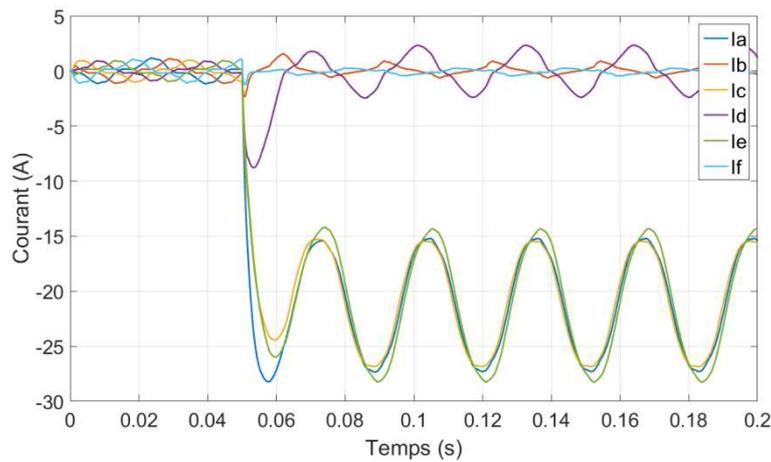


Figure 91 : Courants de phase obtenus en SIMULATION pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 100 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

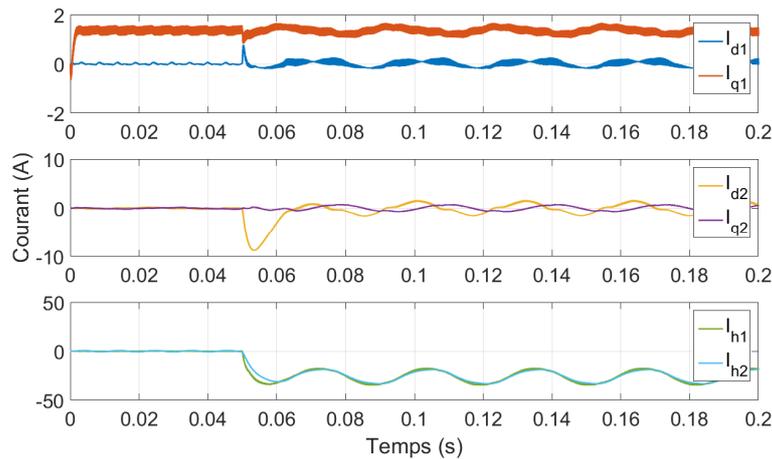


Figure 92 : Courants des machines fictives obtenus en SIMULATION pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 100 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

La stratégie « 100 » n'arrive pas à éliminer la composante V_{DC}/R non plus (Figure 91). Les courants de la machine secondaire ne sont pas nuls (Figure 92), mais sont néanmoins beaucoup plus faibles que ceux obtenus dans le chapitre 2 (Figure 58), quand la stratégie de contrôle était « 000 ».

La comparaison entre les courants de phase de la Figure 89 et de la Figure 91 montre l'impact des courants homopolaires sur l'allure des courbes de courant en mode dégradé. Pour la stratégie « 011 », le déséquilibre des courants en mode dégradé est principalement dû aux courants de la machine secondaire, impactant ainsi toutes les phases des machines. Alors qu'en « 100 », similairement à la stratégie « 000 », les courants homopolaires ont à peu près la même amplitude. Par conséquent leur effet s'annule sur trois des six phases des machines. La Figure 91 montre nettement que les phases B, D et F, sont beaucoup moins impactées par le défaut que les autres phases.

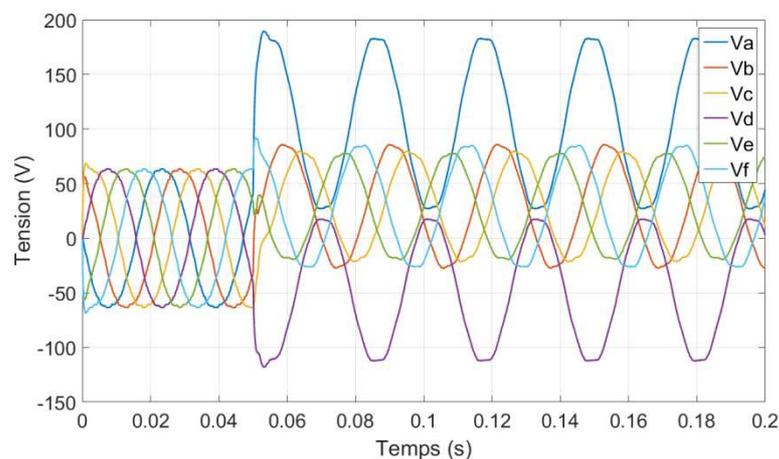


Figure 93 : Tensions de référence obtenues en SIMULATION pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 011 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

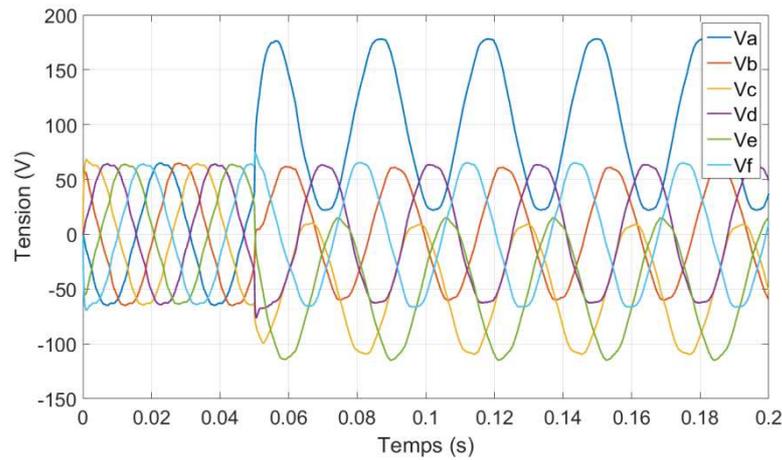


Figure 94 : Tensions de référence obtenues en SIMULATION pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 100 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

En analysant les tensions de référence sur la Figure 93 et la Figure 94, les phases dont les références de tension sont les plus élevées ne sont pas les mêmes pour les deux stratégies. Ceci est également dû au fait que quelques références de tension des machines fictives sont nulles.

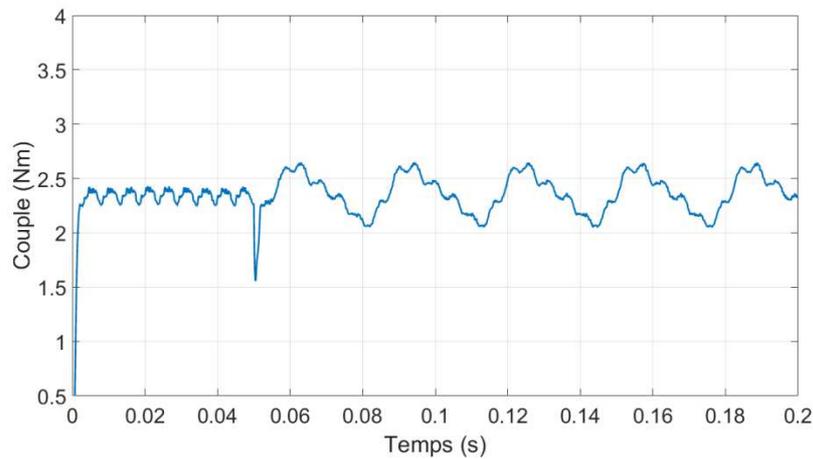


Figure 95 : Couple obtenu en SIMULATION pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 011 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

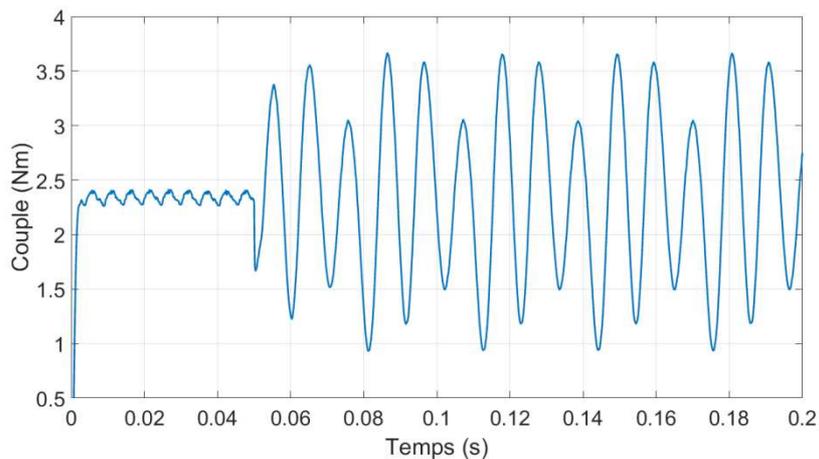


Figure 96 : Couple obtenu en SIMULATION pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 100 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

Pour les deux stratégies (Figure 95 et Figure 96) le couple pulsatoire est visible en mode dégradé. Comme mentionné dans la section 2.2.3, deux machines fictives des machines à 6 phases symétrique standards peuvent générer du couple : la machine principale et la machine homopolaire 2. Cela explique partiellement la raison pour laquelle la stratégie « 011 », où le courant I_{h2} est contrôlé pour être nul, présente la pulsation du couple la plus faible.

3.1.1.1. Défaut de phase ouverte

Les résultats dans cette section sont issus d'essais expérimentaux.

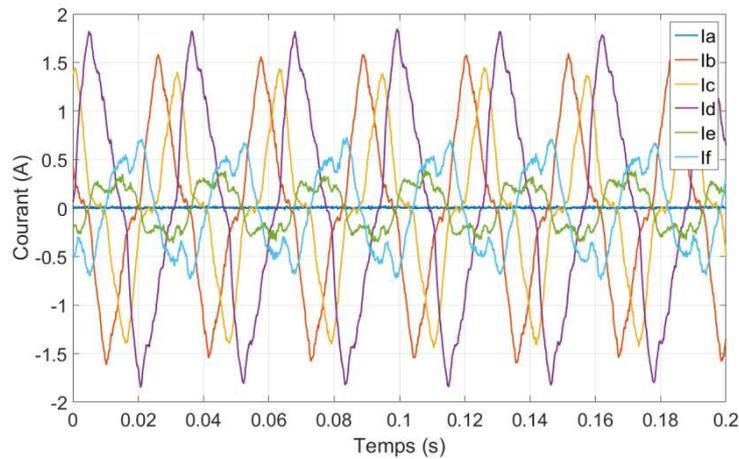


Figure 97 : Courants de phase mesurés EXPERIMENTALEMENT pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 011 » lors d'une ouverture de la phase A.

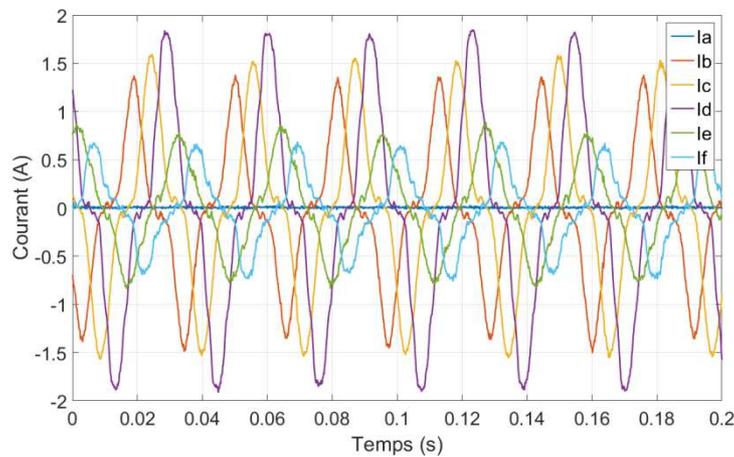


Figure 98 : Courants de phase mesurés EXPERIMENTALEMENT pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 100 » lors d'une ouverture de la phase A.

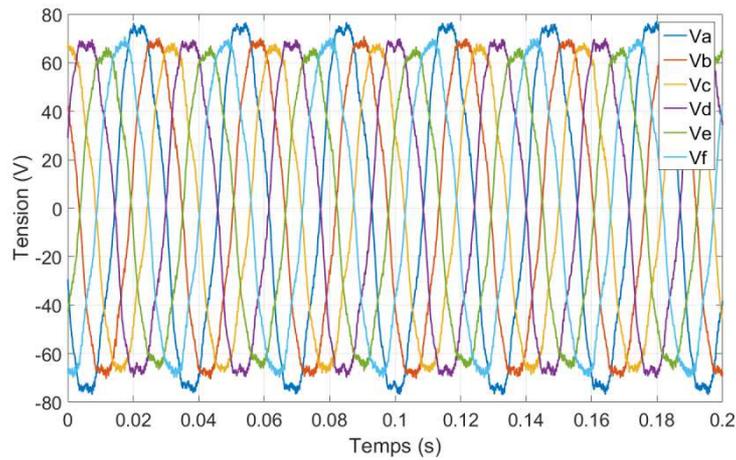


Figure 99 : Tensions de référence obtenues EXPERIMENTALEMENT pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 011 » lors d'une ouverture de la phase A.

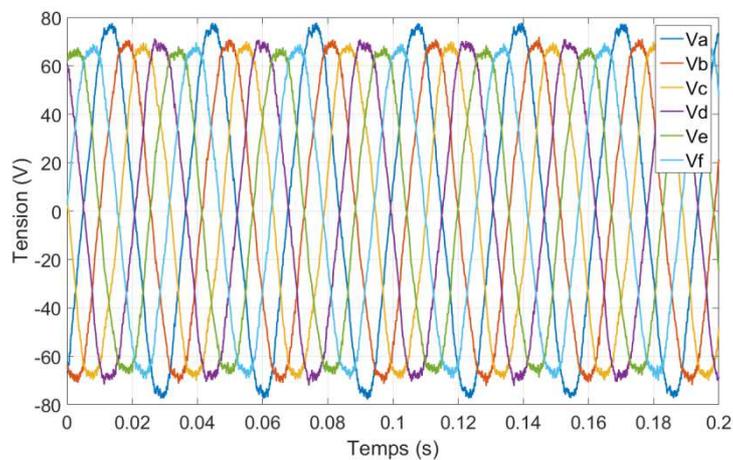


Figure 100 : Tension de référence pour la topologie Pont-H avec la stratégie « 100 » lors d'une ouverture de la phase A.

En analysant les courants de phase (Figure 97 et Figure 98) et les tensions de référence (Figure 99 et Figure 100), l'impact de la stratégie de contrôle est faible. En effet, dans le Chapitre 2, les courants des machines fictives secondaire et homopolaires ne sont pas très élevés lors d'un défaut d'ouverture de phase, contrairement au défaut de court-circuit.

3.1.1.2. Comparaison globale

Ci-dessous sont présentées les données obtenues pour tous les stratégies de contrôle. Tous les tableaux fournissent des valeurs numériques pour chaque stratégie pour différents modes de fonctionnement, normal ou dégradé. De même qu'au chapitre 2, les valeurs présentées sont en « per unit » (PU), dont les valeurs de base sont celles de la topologie Pont-H en mode normal. La seule exception est l'ondulation de couple qui n'a déjà pas d'unité.

Aucun tableau ne présente des valeurs pour la stratégie de contrôle « 111 ». Ceci est dû au fait que, lorsque cette stratégie était implémentée expérimentalement, le système ne fonctionnait pas en mode dégradé lors d'ouverture de phase. Ceci est due au manque de degré de liberté pour faire tourner la machine avec une phase ouverte en contrôlant toutes les machines non-principales en « courant nul ».

TABLEAU XVII: Courant crête de la topologie Pont-H pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Courant crête (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
000	1,00	32,85 (simu.)	1,54
001	0,85	29,15 (simu.)	1,46
010	1,00	26,92 (simu.)	1,46
011	0,92	19,15 (simu.)	1,38
100	1,00	21,77 (simu.)	1,46
101	0,85	17,46 (simu.)	1,38
110	1,00	14,77 (simu.)	1,38

Le TABLEAU XVII confirme le résultat attendu pour ces différentes commandes. En contrôlant en « courant nul » les machines fictives non-principales, le courant en mode dégradé est plus faible. Cette réduction est plus conséquente lors d'un défaut de court-circuit, parce que, dans ce cas, les courants de ces machines fictives qui ne génèrent pas de couple peuvent être trop élevés. Mais il est aussi possible de voir une faible réduction du courant crête lors d'une ouverture de phase et même en mode normal.

Le TABLEAU XVII montre également que contrôler une machine homopolaire ou l'autre en « courant nul », comme les stratégies « 001 » et « 010 », est indifférent. En effet, il est possible de voir sur la Figure 45 que les courants des deux machines homopolaires sont presque les mêmes lors d'un défaut de court-circuit pour la stratégie « 000 ».

TABLEAU XVIII: Tension de référence crête de la topologie Pont-H pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Tension crête (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
000	1,00	1,65 (simu.)	1,01
001	1,00	2,03 (simu.)	1,00
010	1,00	1,62 (simu.)	1,01
011	1,00	1,65 (simu.)	1,00
100	1,00	1,69 (simu.)	1,01
101	1,00	1,53 (simu.)	1,00
110	1,00	1,44 (simu.)	1,01

Concernant la tension crête, le TABLEAU XVIII montre que toutes les stratégies où au moins une machine fictive est contrôlée en « courant nul », la tension de référence est similaire ou plus élevée que celle pour la stratégie « 000 », où toutes les machines non-principales sont contrôlés en « tension nulle ». Cependant, cela ne veut pas dire que plus de machines sont contrôlées en « courant nul » plus la tension crête est importante. Cela peut être vérifié en comparant les stratégies de commande « 010 » et « 011 ». Intuitivement, les tensions de référence de la stratégie de commande « 011 » seraient plus élevés par le fait que deux machines sont contrôlées en courant nul au lieu d'une seule. Cependant, il est possible dans certains cas que les tensions de référence générées par la boucle de contrôle de différentes machines fictives se compensent partiellement.

TABLEAU XIX : Puissance de dimensionnement de la topologie Pont-H pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Puissance de dimensionnement (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
000	1,00	54,10 (simu.)	1,61
001	0,77	59,17 (simu.)	1,50
010	0,92	43,55 (simu.)	1,18
011	0,77	31,55 (simu.)	1,42
100	0,92	36,82 (simu.)	1,15
101	0,69	26,71 (simu.)	1,24
110	0,92	21,29 (simu.)	1,24

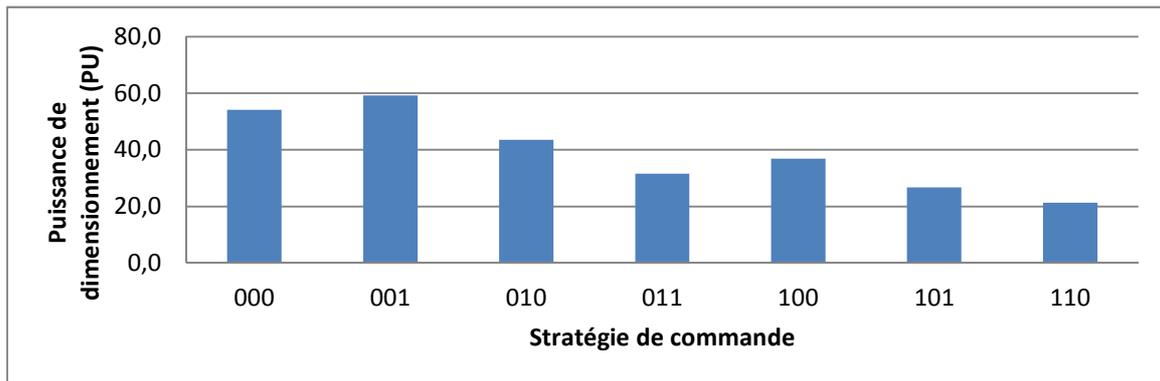


Figure 101 : Puissance de dimensionnement de la topologie Pont-H pour différentes stratégies de contrôle lors d'un court-circuit.

En obtenant les tensions de référence crête et les valeurs de courant crête, la puissance de dimensionnement pour chaque stratégie de contrôles est présentée sur le TABLEAU XIX et sur la Figure 101. Le graphique ne présente que le dimensionnement le plus important parmi les trois modes de fonctionnement : mode normal, court-circuit et ouverture de phase. Similairement à l'analyse du chapitre 2, le dimensionnement le plus important est celui lors d'un court-circuit à cause des amplitudes de courant trop élevés dans ce mode de fonctionnement.

Finalement, la Figure 101 montre que la puissance de dimensionnement est plus faible lorsque deux machines fictives sont contrôlées en « courant nul » par rapport aux stratégies où une seule machine fictive est contrôlée en « courant nul ». En comparant les stratégies « 011 », « 101 » et « 110 » à la stratégie « 000 », la réduction de courant est plus importante que l'augmentation des références de tension, générant d'importantes réductions au niveau de la puissance de dimensionnement.

TABLEAU XX : Pertes Joule de la topologie Pont-H pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Pertes Joule (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
000	1,00	964,89 (simu.)	1,32
001	0,96	942,18 (simu.)	1,28
010	1,00	862,23 (simu.)	1,34
011	0,94	606,78 (simu.)	1,43
100	0,99	712,00 (simu.)	1,41
101	0,94	432,60 (simu.)	1,52
110	0,98	405,44 (simu.)	1,49

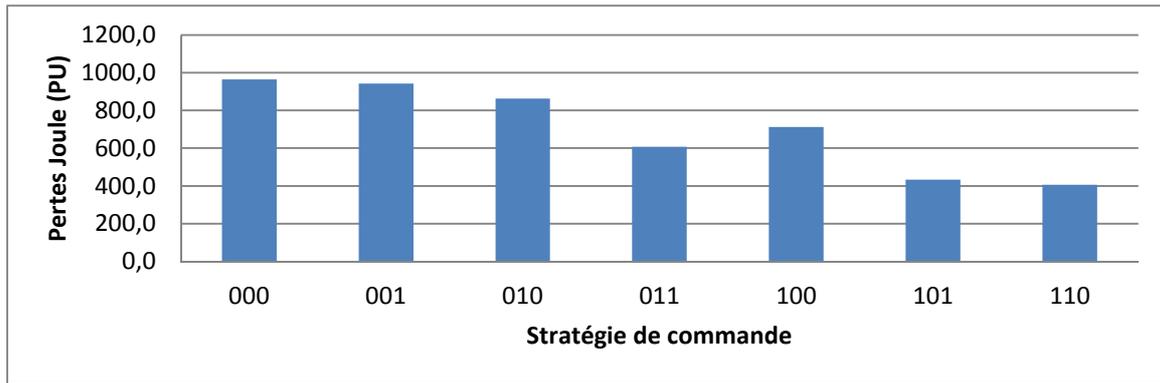


Figure 102 : Pertes Joule de la topologie Pont-H pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement lors d'un court-circuit.

Le TABLEAU XX et la Figure 102 montrent que le fait de contrôler plus de machines fictives en mode dégradé réduit de manière significative les pertes Joule. En effet, annuler les courants des machines homopolaires ou secondaire impacte directement l'amplitude des courants de phase et, en conséquence, les pertes Joule.

Il est important de souligner le fait que la valeur de pertes Joule obtenues est liée au nombre de courants qui sont contrôlés pour être nuls, en se rappelant qu'une commande à courant nul sur la machine secondaire annule deux courants dans le repère dq. Ainsi, les stratégies « 001 » et « 010 » qui n'ont qu'un courant contrôlé pour être nul ont une performance similaire. Le même résultat se voit pour les stratégies « 011 » et « 100 » et pour les stratégies « 101 » et « 110 ».

TABLEAU XXI : Ondulation de couple de la topologie Pont-H pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Ondulation de couple		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
000	0,06	0,84	0,08
001	0,07	0,24	0,09
010	0,07	1,04	0,08
011	0,07	0,25	0,09
100	0,06	1,15	0,08
101	0,06	0,31	0,09
110	0,06	1,20	0,08

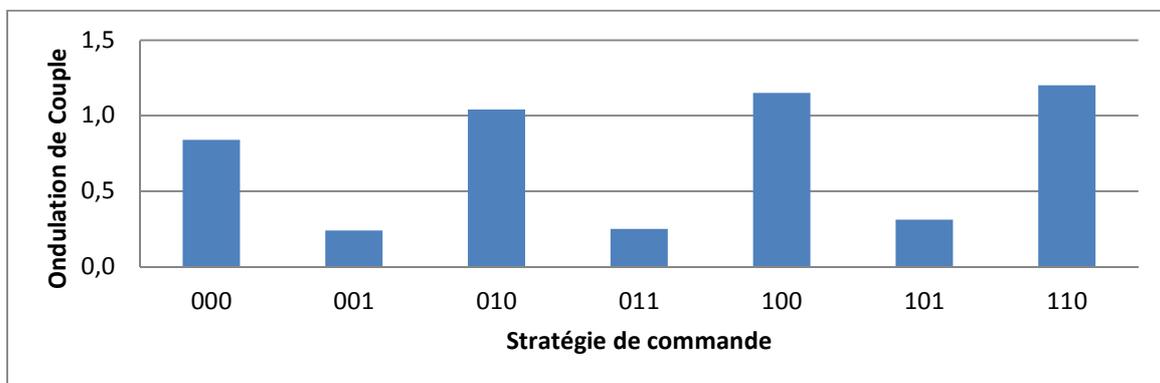


Figure 103 : Ondulation de couple de la topologie Pont-H pour différentes stratégies de contrôle lors d'un court-circuit.

En comparant l'oscillation du couple parmi les différentes stratégies de contrôle, le TABLEAU XXI et la Figure 103 sont obtenus. Le graphique ne montre que les valeurs d'ondulation de couple les plus élevées parmi les trois modes de fonctionnement. Les ondulations lors d'un défaut de court-circuit sont les plus élevées pour toutes les stratégies de contrôle analysées.

Les résultats obtenus sont des résultats logiquement attendus. Premièrement, lorsque « I_{h2} » est contrôlé pour être nul (« 001 », « 011 » et « 101 »), l'ondulation du couple est assez faible. En effet, pour ces trois stratégies, les courants des deux machines fictives d'une machine à 6 phases symétrique standard pouvant générer du couple sont contrôlés.

Concernant les stratégies où la tension « V_{h2} » est nulle, l'ondulation du couple des stratégies où il y a plus de machines fictives contrôlées en « courant nul » est plus élevée. Demander que plus de machines aient des courants nuls est une façon d'augmenter les contraintes imposées au système, consommant ainsi les degrés de liberté du système. Plus il y a de contraintes imposées par la commande, et plus il est difficile de respecter chaque contrainte individuellement. Par conséquent, il a été observé que le contrôle de la valeur du composant I_q est moins efficace et, en conséquence, l'ondulation du composant I_q et du couple sont plus élevés.

Pour choisir la stratégie la plus intéressante à appliquer à la topologie, il faut décider selon le meilleur compromis entre ces deux aspects. Pour la plupart des topologies une réduction de la puissance de dimensionnement de l'onduleur signifie une augmentation de l'ondulation du couple. Parmi les stratégies présentées, les plus intéressantes sont la « 011 » et la « 101 ». Les comparant à la stratégie « 000 », ces deux stratégies réduisent la puissance de dimensionnement, les pertes Joule et l'ondulation de couple. En comparant ces deux topologies, la stratégie « 101 » a une puissance de dimensionnement 15% plus faible et des pertes Joule 39% plus faibles, malgré des pulsations de couple 29% plus élevées.

3.1.2. Stratégies de contrôle pour les machines fictives non-principales de la topologie HIMM

Les résultats de cette section présentent le comportement de la topologie HIMM pour deux stratégies de commande « 01 », où « V_{h1} » et « I_{h2} » sont contrôlés pour être nuls et « 11 », où toutes les machines homopolaires sont contrôlées en « $I=0$ ».

Différemment de la topologie Pont-H avec la stratégie « 111 », l'essai de la topologie HIMM avec toutes les machines fictives non-principales en « courant nul » (« 11 ») a été réalisé expérimentalement, lors d'une ouverture de phase. Cette différence peut être expliquée en analysant le fonctionnement de deux topologies en mode dégradé pour les stratégies « 000 » et « 00 », présentées dans le chapitre 2. Les valeurs des courants de ces machines fictives non-principales sont plus faibles pour la topologie HIMM. Par conséquent, il est moins contraignant pour la topologie HIMM de contrôler ces machines fictives en « courant nul ».

3.1.2.1. Défaut de court-circuit

Les résultats présentés ci-dessous sont issus de simulations car les valeurs obtenues sont trop élevées pour le dimensionnement du banc d'essai.

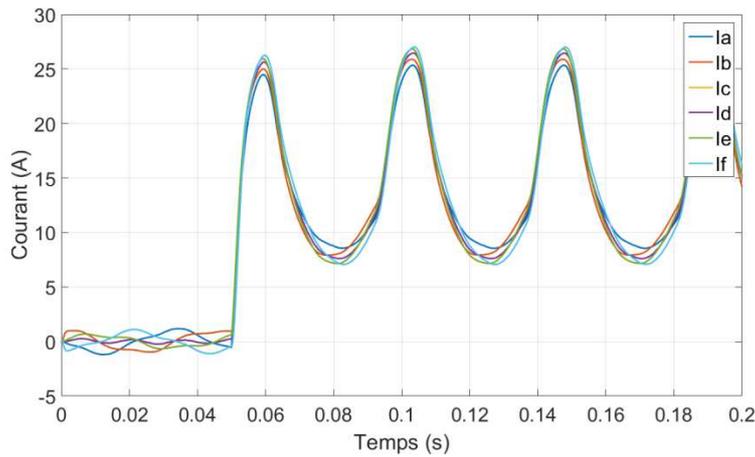


Figure 104 : Courants de phase obtenus en SIMULATION pour la topologie HIMM avec la stratégie « 01 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

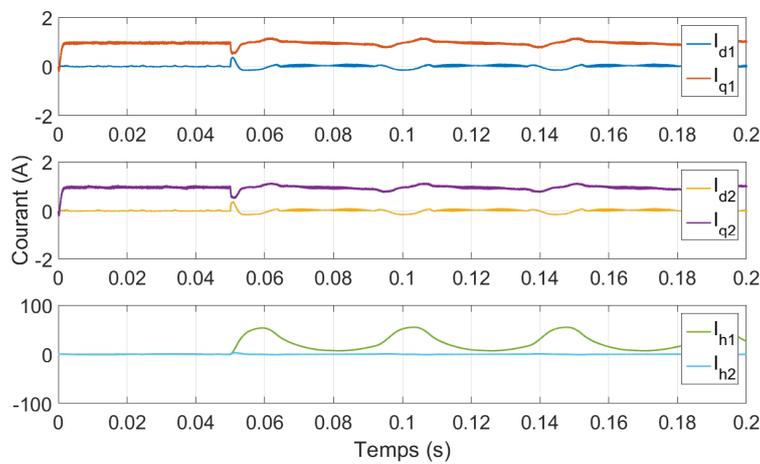


Figure 105 : Courants des machines fictives obtenus en SIMULATION pour la topologie HIMM avec la stratégie « 01 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

Lorsque la stratégie « 01 » est implémentée, la composante V_{DC}/R sur les courants de phase n'est pas nulle (Figure 104). Ce comportement est similaire à ceux présentés dans la section 3.1.1.1 pour la topologie Pont-H.

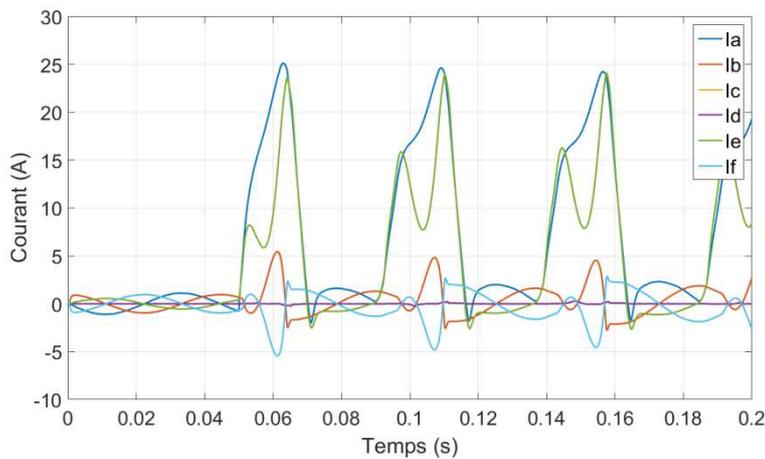


Figure 106 : Courants de phase obtenus en SIMULATION pour la topologie HIMM avec la stratégie « 11 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

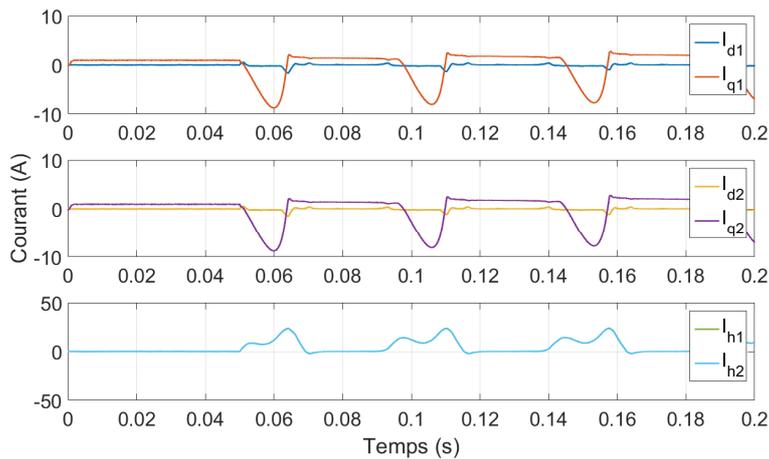


Figure 107 : Courants des machines fictives obtenus en SIMULATION pour la topologie HIMM avec la stratégie « 11 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

Pour la stratégie « 11 », celle où toutes les machines fictives non-principales sont contrôlées en « courant nul », les courants présentent un comportement différent sur deux durées (Figure 105 et Figure 106). Pendant une partie de la période électrique, toutes les consignes de courants sont à peu près respectées en dq, résultant des courants en mode dégradé similaires à ceux en mode normal. Cependant, pendant le reste de la période électrique, les correcteurs sont saturés et les consignes ne sont plus respectées. Par conséquent, d'importantes amplitudes de courant apparaissent. Puisque le contrôle des courants des machines principales ne fonctionne plus à ce moment à cause du manque de degré de liberté pour le contrôle en mode dégradé, il est difficile de prévoir l'amplitude des courants de phase.

Concernant les courants des machines homopolaires, ceux-ci sont tous les deux contrôlés pour être nuls. Même quand les correcteurs n'arrivent pas à contrôler ces courants, ils ont la même valeur. Cela est dû au fait que la machine homolaire 1 d'une machine est couplée à la machine homolaire 2 de l'autre. Ainsi, les deux courants homopolaires traversent des machines dont les paramètres sont les mêmes. Par conséquent, le correcteur est également le même pour les deux courants homopolaires, expliquant leur comportement très similaire.

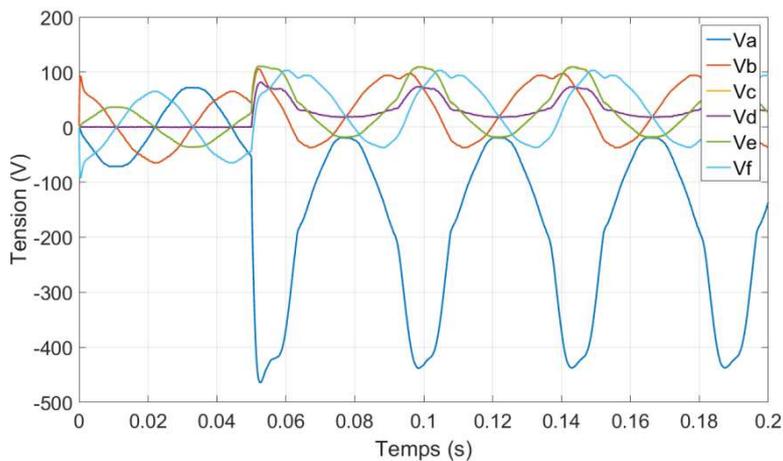


Figure 108 : Tensions de référence obtenues en SIMULATION pour la topologie HIMM avec la stratégie « 01 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

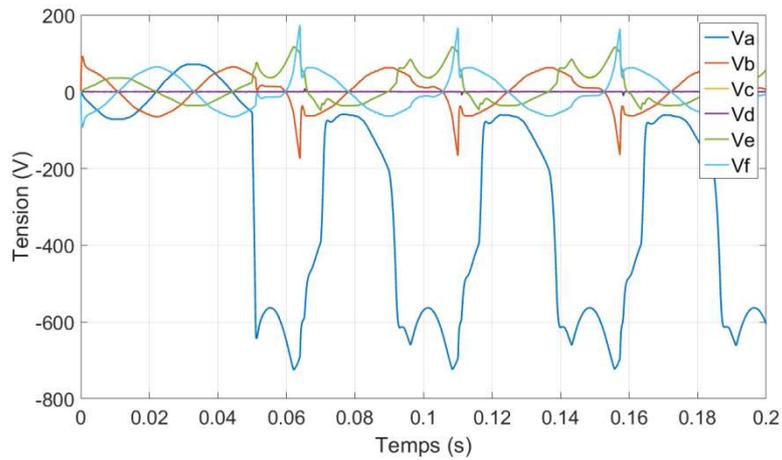


Figure 109 : Tensions de référence obtenues en SIMULATION pour la topologie HIMM avec la stratégie « 11 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

En analysant l'allure des consignes de tension (Figure 108 et Figure 109), il est possible de voir que les correcteurs sont saturés lorsque la stratégie « 11 » est implémentée.

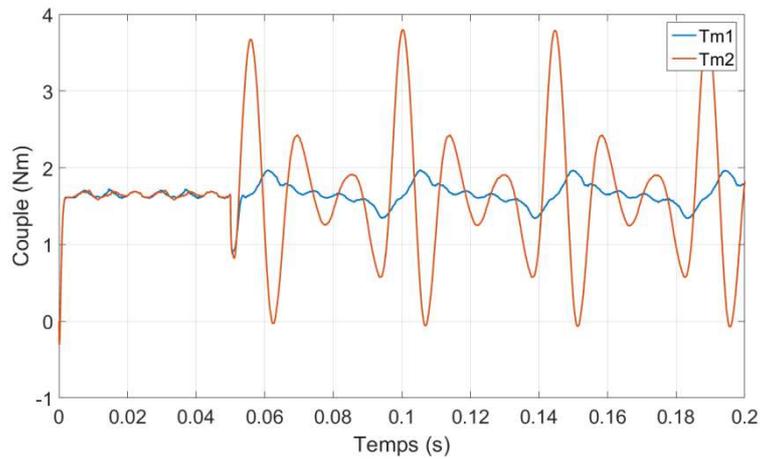


Figure 110 : Couple obtenu en SIMULATION pour la topologie HIMM avec la stratégie « 01 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

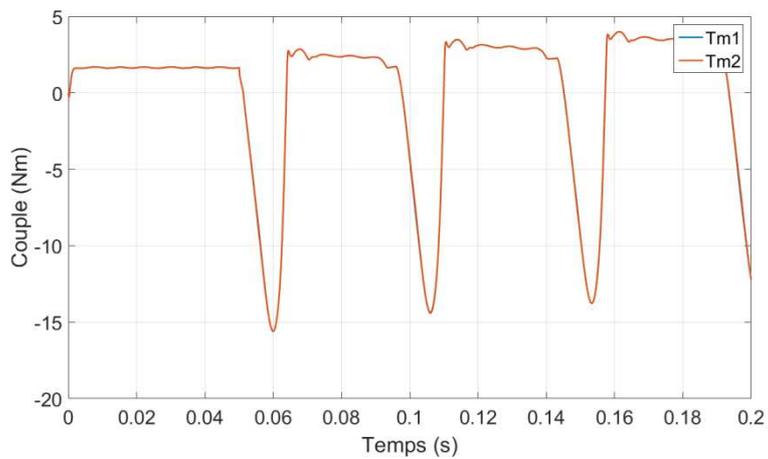


Figure 111 : Couple obtenu en SIMULATION pour la topologie HIMM avec la stratégie « 11 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

Les graphiques de la Figure 110 et de la Figure 111 présentent une différence notable entre les deux stratégies. Pour la stratégie « 01 », les correcteurs ne sont pas saturés et le couple pulsatoire est semblable à celui trouvé lors du chapitre 2. Cependant, le couple pulsatoire est différent entre les deux machines. En raison du couplage, un même courant homopolaire interagit avec différents harmoniques de courant pour chaque machine. Puisque un courant homopolaire n'est pas nul, il ne génère du couple pulsatoire que sur la machine dans laquelle il interagit avec des harmoniques impairs de la FEM. La stratégie « 11 » présente des pulsations unilatérales due à la saturation des correcteurs de courant. Par conséquent l'amplitude de la pulsation pour la stratégie « 11 » est très élevée.

3.1.2.2. Défaut de phase ouverte

Les résultats présentés dans cette section sont issus d'essais expérimentaux.

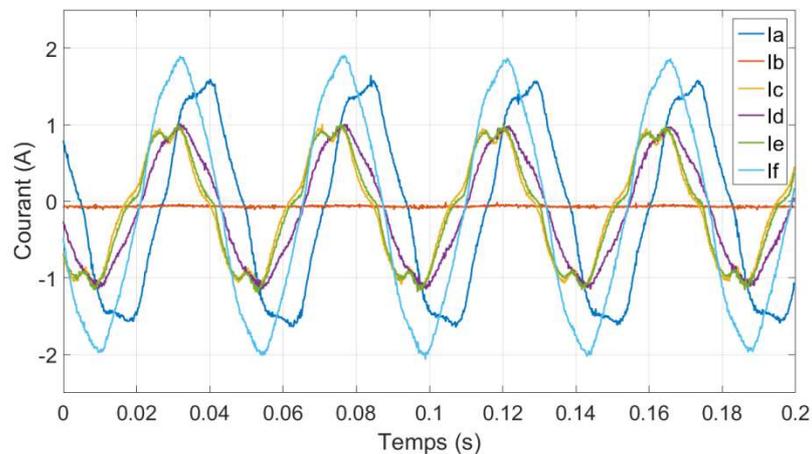


Figure 112 : Courants de phase mesurés EXPERIMENTALEMENT pour la topologie HIMM avec la stratégie « 01 » lors d'une ouverture de la phase B.

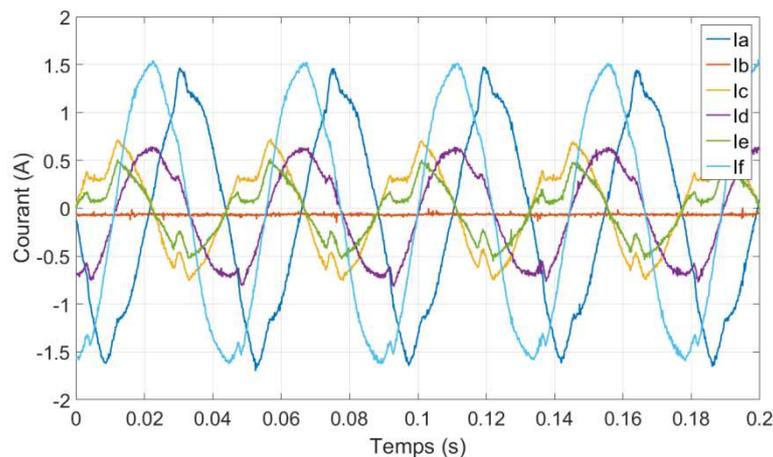


Figure 113 : Courants de phase mesurés EXPERIMENTALEMENT pour la topologie HIMM avec la stratégie « 11 » lors d'une ouverture de la phase B.

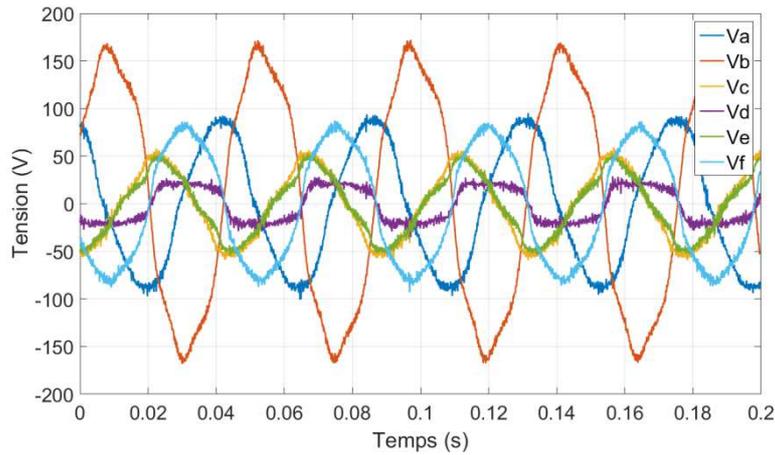


Figure 114 : Tensions de référence obtenues EXPERIMENTALEMENT pour la topologie HIMM avec la stratégie « 01 » lors d’une ouverture de la phase B.

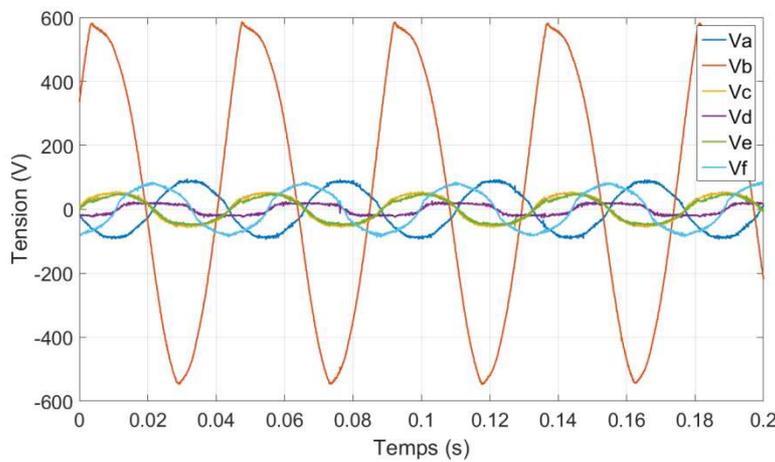


Figure 115 : Tensions de référence obtenues EXPERIMENTALEMENT pour la topologie HIMM avec la stratégie « 11 » lors d’une ouverture de la phase B.

Similairement à la topologie Pont-H, l’impact des stratégies de contrôle est beaucoup plus faible sur le courant de phase et les tensions de consigne lors d’un fonctionnement en mode dégradé. La seule différence plus visible concerne l’amplitude de la consigne de tension de la phase en défaut. Néanmoins, puisque la tension de la phase ouverte est incontrôlable, cette différence n’impacte pas le fonctionnement ou la performance du système.

3.1.2.3. Comparaison

Les résultats présentés ici sont en PU, dont les valeurs de base sont celles se référant à la topologie Pont-H en mode normal pour une stratégie « 000 ».

TABLEAU XXII : Courant crête de la topologie HIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Courant crête (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
00	1,23	18,00 (simu.)	1,54
01	0,92	17,77 (simu.)	1,54
10	1,00	17,77 (simu.)	1,54
11	0,85	15,54 (simu.)	1,23

Le TABLEAU XXII montre que l'impact de la stratégie de contrôle sur la valeur crête du courant n'est pas très important. La réduction maximale est de 14% pour la stratégie de contrôle « 11 » par rapport à la stratégie « 00 », tout en notant que ce pourcentage correspond à 2,5 PU de différence. La stratégie de commande ne peut être appliquée qu'aux machines homopolaires, parce que les deux machines diphasées génèrent chacune le couple d'une machine réelle. Lorsqu'une machine homopolaire est contrôlée en « courant nul », le courant de celle qui est contrôlée en « tension nulle » est plus élevé. Ceci, explique aussi la faible différence des résultats obtenus entre les stratégies « 01 » et « 10 ».

TABLEAU XXIII : Tension de référence crête de la topologie HIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Tension crête (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
00	1,31	1,69 (simu.)	1,32
01	1,34	1,69 (simu.)	1,32
10	1,31	1,69 (simu.)	1,32
11	1,32	2,50 (simu.)	1,29

Le TABLEAU XXIII montre que l'impact des topologies « 01 » et « 10 » est dérisoire sur tous les modes de fonctionnement. Concernant la stratégie «11 » lors d'un court-circuit, la valeur plus élevée est due à la saturation des correcteurs.

TABLEAU XXIV : Puissance de dimensionnement de la topologie HIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Puissance de dimensionnement (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
00	0,81	15,19 (simu.)	1,02
01	0,62	14,99 (simu.)	1,02
10	0,65	14,99 (simu.)	1,02
11	0,56	19,42 (simu.)	0,80

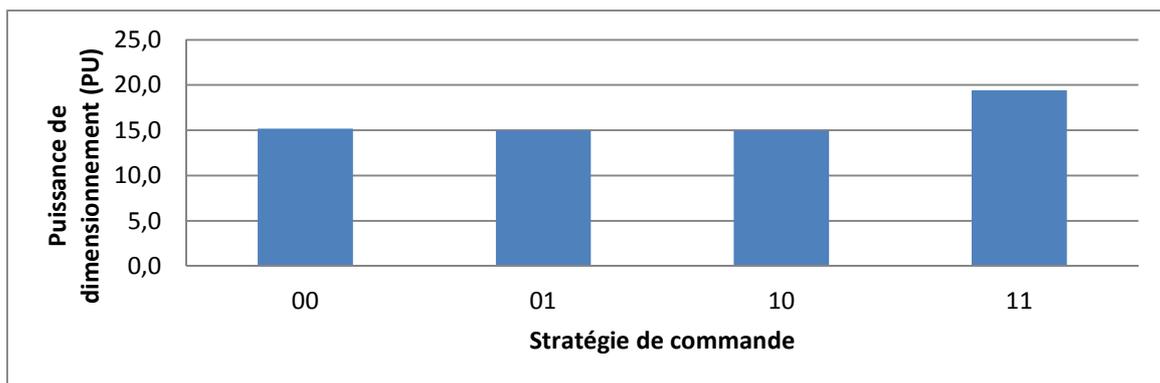


Figure 116 : Puissance de dimensionnement de la topologie HIMM pour différentes stratégies de contrôle lors d'un court-circuit.

Le graphique de la Figure 116 présente la puissance de dimensionnement la plus élevée parmi les trois modes de fonctionnement pour chaque stratégie de contrôle (TABLEAU XXIV). Finalement, pour la topologie HIMM, l'impact de contrôler les machines homopolaires en courant nul est très faible, moins de 2% de réduction de la puissance de dimensionnement pour les stratégies « 01 » et « 10 » par rapport à la topologie « 00 ». Concernant la stratégie « 11 », le fait que les correcteurs soient

saturés requiert une puissance de dimensionnement de l'onduleur plus élevée qu'avec les autres stratégies de contrôle.

TABLEAU XXV : Pertes Joule de la topologie HIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Pertes Joule (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
00	1,91	716,48 (simu.)	3,21
01	1,72	834,88 (simu.)	4,30
10	1,74	834,88 (simu.)	4,12
11	1,63	182,01 (simu.)	2,55

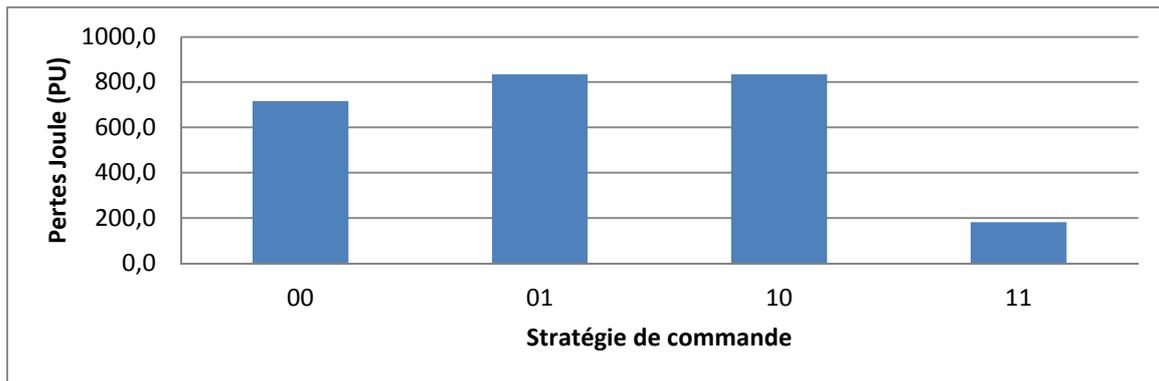


Figure 117 : Pertes Joule de la topologie HIMM pour différentes stratégies de contrôle lors d'un court-circuit.

Le TABLEAU XXV et le graphique de la Figure 117 montrent clairement l'impact de la distribution des courants sur les pertes Joule. Contrairement à la topologie Pont-H, les pertes Joule pour les stratégies « 01 » et « 10 », où une machine fictive est contrôlée en courant nul, sont plus élevées que celles pour la stratégie « 00 ». Pour la stratégie « 00 » les courants I_{h1} et I_{h2} sont très similaires. Mathématiquement, l'impact d'un courant homopolaire annule celui de l'autre sur 3 des 6 courants de phases (Figure 66). Cet effet est visible en analysant les lignes de la matrice de Concordia relatives aux machines homopolaires. Quand une machine homopolaire est contrôlée en « courant nul », le courant homopolaire de l'autre est davantage élevé et impacte toutes les 6 phases des deux machines, augmentant ainsi les pertes Joule pour les stratégies de contrôle « 01 » et « 10 ».

La stratégie de contrôle « 11 » est celle dont les pertes sont les plus faibles. La Figure 106 montre que pendant une partie de la période électrique les consignes de courant sont respectées et pendant l'autre partie de la période électrique les correcteurs sont saturés, résultats des importantes valeurs crêtes de courant. Le fait que pendant une partie de la période électrique les courants soient assez faibles explique pourquoi la stratégie « 11 » est celle dont les pertes Joule sont les plus faibles parmi les quatre stratégies analysées, malgré le fait que sa valeur crête de courant soit la plus élevée.

TABLEAU XXVI : Ondulation de couple de la topologie HIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Ondulation de couple		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
00	0,06	1,32	0,06
01	0,06	2,36	0,12
10	0,06	2,36	0,12
11	0,06	10,79	0,30

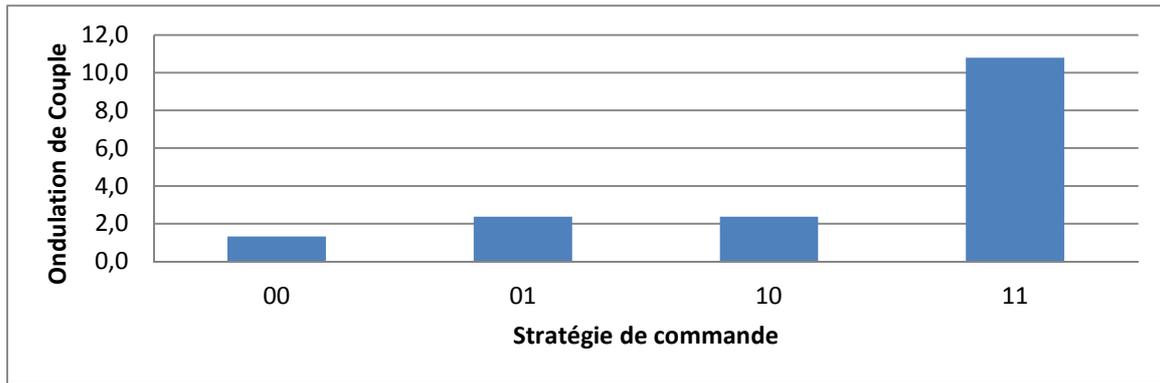


Figure 118 : Ondulation de couple de la topologie HIMM pour différentes stratégies de contrôle lors d'un court-circuit.

La Figure 118 montre que l'ondulation de couple est plus élevée lorsque les machines fictives sont contrôlées en « courant nul ». Similairement à la topologie Pont-H, le contrôle en courant nul signifie une contrainte de plus pour le système, dégradant la performance du correcteur des courants des machines principales, générant ainsi des oscillations de couple. La stratégie « 11 » présente un couple pulsatoire très important, plus de 8 fois celui de « 00 », à cause de la saturation des correcteurs.

Un point important à souligner lors de cette analyse est le fait que pour la stratégie « 01 » la machine dont le couple pulsatoire est le plus élevé est la machine M2, alors que pour la stratégie « 10 », le couple pulsatoire de M1 est plus important. Ceci est dû au couplage. Le courant I_{h1} interagit avec le 6^{ème} harmonique de la machine M1 et avec le 3^{ème} de la machine M2, pouvant donc générer du couple pulsatoire seulement sur M2, alors que I_{h2} ne peut générer du couple pulsatoire que sur M1.

Il est donc évident qu'en prenant en compte les trois critères de comparaison, le contrôle en « courant nul » des machines homopolaires ne présente pas d'intérêt pour la topologie HIMM.

3.1.3. Stratégies de contrôle pour les machines fictives non-principales de la topologie RIMM

La topologie RIMM n'a que deux stratégies de contrôle des machines fictives possibles, dont une, la stratégie de contrôle « 0 », où « V_{h2} » est nul, a déjà été présentée dans le chapitre 2. Ainsi, les résultats présentés dans cette section ne concernent que la stratégie de contrôle « 1 », où « I_{h2} » est contrôlé pour être nul. Tous les résultats de cette section sont issus d'essais expérimentaux.

3.1.3.1. Défaut de court-circuit

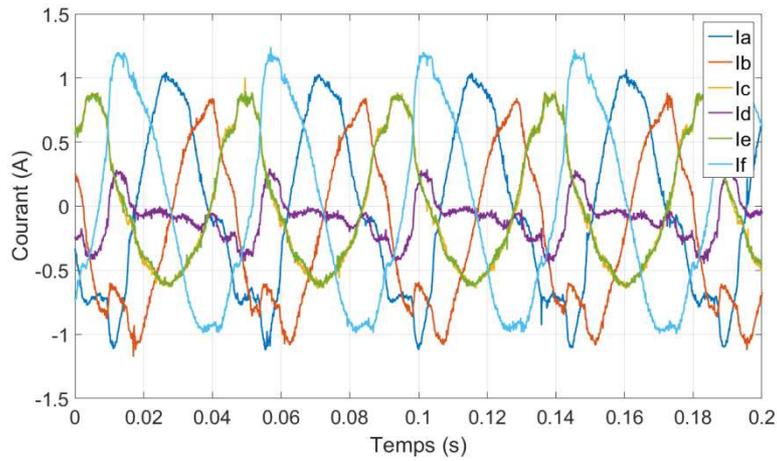


Figure 119 : Courants de phase mesurés EXPERIMENTALEMENT pour la topologie RIMM avec la stratégie « 1 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

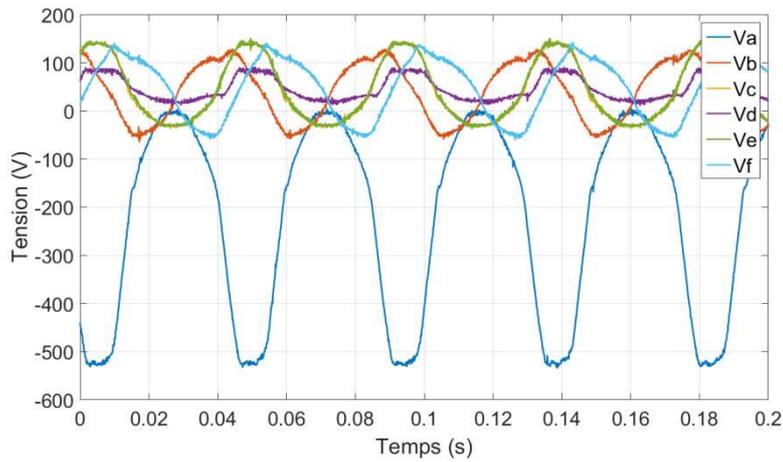


Figure 120 : Tensions de référence obtenues EXPERIMENTALEMENT pour la topologie RIMM avec la stratégie « 1 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

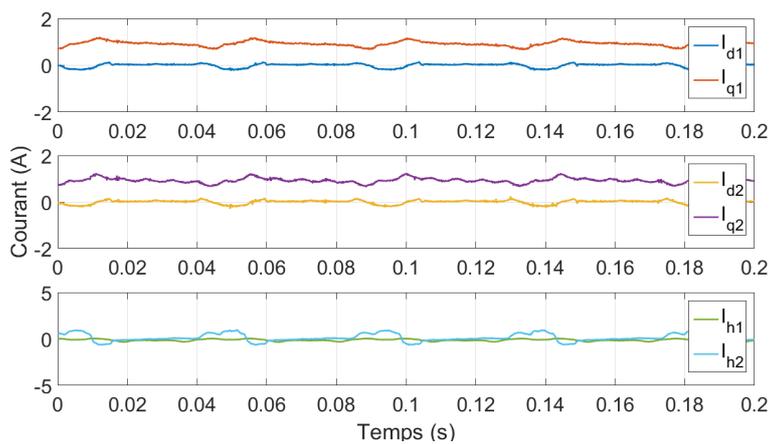


Figure 121 : Courants des machines fictives obtenus EXPERIMENTALEMENT pour la topologie RIMM avec la stratégie « 1 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

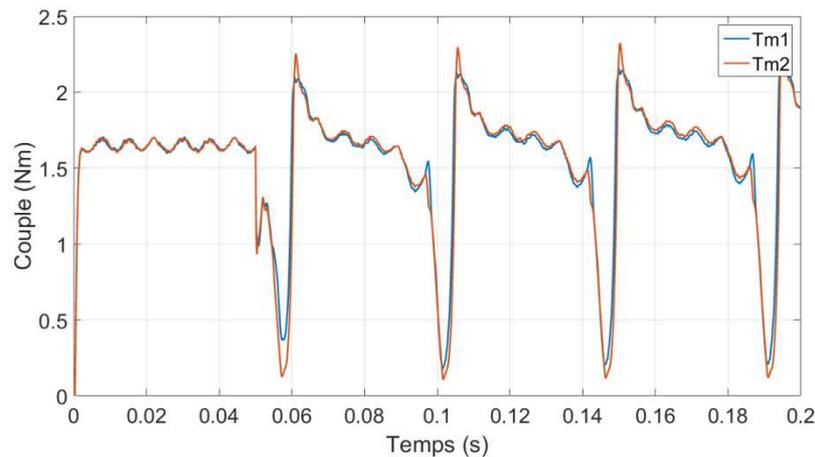


Figure 122 : Couples obtenus en SIMULATION pour la topologie RIMM avec la stratégie « 1 » lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

Comme pour la topologie HIMM avec la stratégie de contrôle « 11 », le fait de contrôler toutes les machines fictives qui ne génèrent pas de couple en « courant nul » annule la composante constante sur les courants de phase (Figure 119), mais sature les correcteurs, engendrant un comportement sur deux durées. Une durée où les consignes de courant sont à peu-près respectées et la pulsation du couple est faible et une autre durée où les correcteurs sont saturés et une pulsation unilatérale de couple importante apparaît (voir Figure 121 et Figure 122).

Une différence notable peut être relevée entre les résultats de la stratégie « 1 » et ceux de la topologie HIMM avec la stratégie « 11 ». Lorsque les correcteurs sont saturés, la valeur crête du courant de phase n'est pas trop élevée. Bien qu'il soit compliqué d'expliquer cet effet analytiquement en raison des saturations des correcteurs, ceci est une conséquence de la faible intensité du courant I_{h2} en mode dégradé pour la stratégie « 0 ».

3.1.3.2. Défaut de phase ouverte

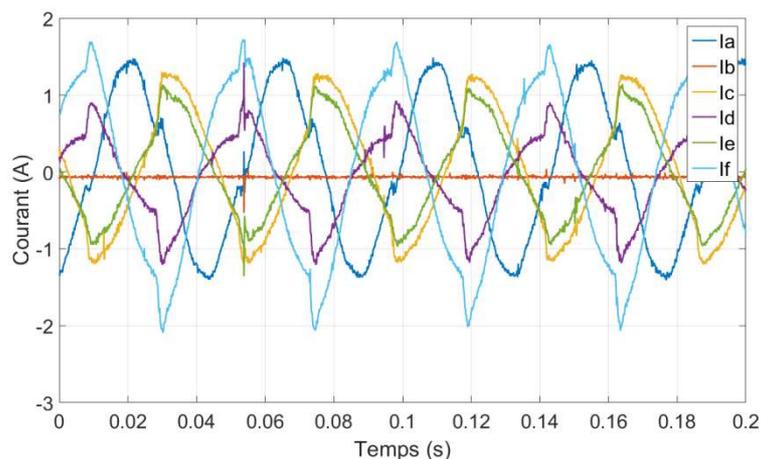


Figure 123 : Courants de phase mesurés EXPERIMENTALEMENT pour la topologie RIMM avec la stratégie « 1 » lors d'une ouverture de la phase B.

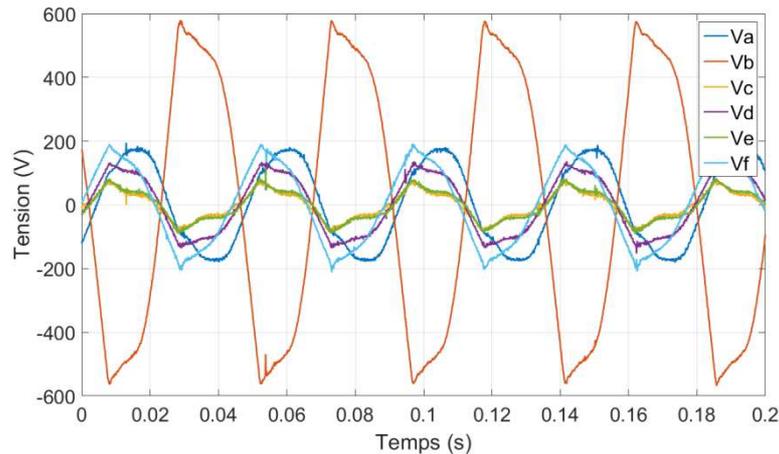


Figure 124 : Tensions de référence obtenues EXPERIMENTALEMENT pour la topologie RIMM avec la stratégie « 1 » lors d'une ouverture de la phase B.

Lors d'une ouverture de phase, les correcteurs sont saturés, mais la machine arrive à générer les vitesses de consigne. En comparant avec les résultats obtenus pour la stratégie « 0 » présentés dans le chapitre 2, les différences sont assez faibles comme déjà avéré pour les deux topologies précédentes.

3.1.3.3. Comparaison

Les résultats présentés ici sont en PU, dont les valeurs de base sont celles qui se réfèrent à la topologie Pont-H en mode normal lors pour une stratégie « 000 ».

TABLEAU XXVII : Courant crête de la topologie RIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Courant crête (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
0	1,00	9,00	1,54
1	0,85	0,92	1,62

L'application du contrôle en courant nul réduit fortement la valeur crête du courant en mode dégradé (TABLEAU XXVII). Les courants obtenus sont caractéristiques d'une saturation des correcteurs, mais leur valeur est beaucoup plus faible, contrairement à ceux de la topologie HIMM pour la stratégie « 11 ». Ceci s'explique par le fait que le courant I_{h1} et la tension de référence V_{h1} sont nuls grâce à la structure avec deux sources indépendantes. Par conséquent, le fonctionnement où tous les courants sont contrôlés, même en mode dégradé, est moins contraignant pour la topologie RIMM.

TABLEAU XXVIII : Tension de référence crête de la topologie RIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Tension crête (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
0	1,35	1,99	1,44
1	1,32	2,09	2,88

La tension crête dépend peu de la stratégie de contrôle de la machine homopolaire 2 en mode de fonctionnement normal. Cependant en analysant la stratégie « 1 » par rapport à la « 0 », le TABLEAU

XXVIII présente une augmentation de la tension crête pour le défaut de court-circuit et celui de phase ouverte. Dans les deux cas, l'augmentation est due au fait que la tension de référence de la machine homopolaire 2 n'est pas nulle. Mais le fait que la stratégie « 1 » réduise fortement les courants lors d'un court-circuit induit une augmentation de la valeur crête de tension de référence.

TABLEAU XXIX : Puissance de dimensionnement crête de la topologie RIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Puissance de dimensionnement (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
0	0,68	8,93	1,11
1	0,56	0,96	2,33

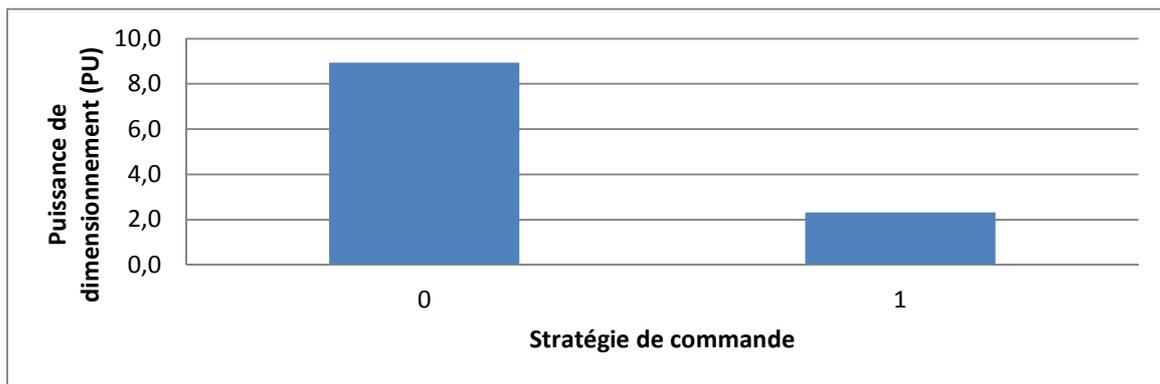


Figure 125 : Puissance de dimensionnement de la topologie RIMM pour différentes stratégies de contrôle, lors d'un court-circuit pour la stratégie « 0 » et lors d'une ouverture de phase pour la stratégie « 1 ».

Finalement la puissance de dimensionnement est largement réduite lorsque la machine homopolaire 2 est contrôlée en « courant nul » (TABLEAU XXIX). Le graphique de la Figure 125 ne présente que la puissance qui est utilisée pour le dimensionnement de l'onduleur. Pour la stratégie de contrôle « 1 », cette stratégie est celle du défaut de phase ouverte.

TABLEAU XXX : Pertes Joule de la topologie RIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Pertes Joule (PU)		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
0	1,76	208,03	4,13
1	1,69	1,85	3,26

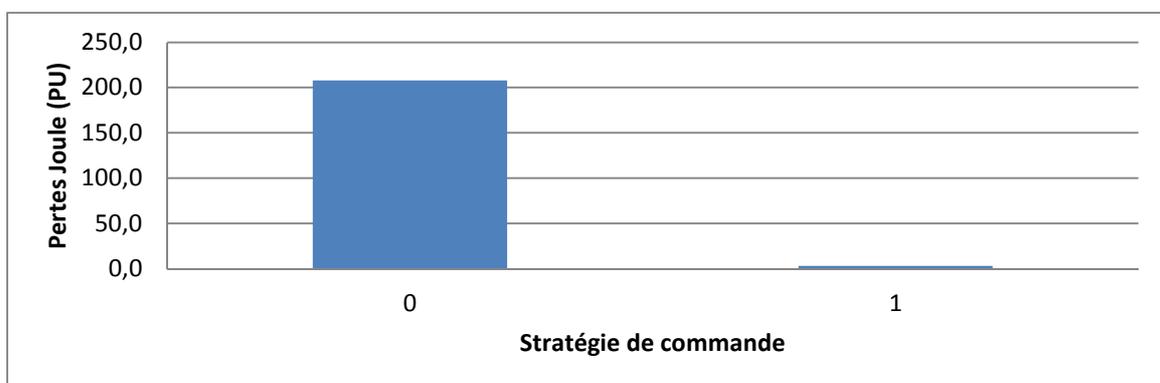


Figure 126 : Pertes Joule maximales de la topologie RIMM pour différentes stratégies de contrôle, lors d'un court-circuit pour la stratégie « 0 » et lors d'une ouverture de phase pour la stratégie « 1 ».

L'impact de la stratégie « 1 » est très favorable aussi sur les pertes Joule pour les mêmes raisons que celles due valeur crête de courant (TABLEAU XXX et Figure 127). Poursuivant l'analyse sur la puissance de dimensionnement, pour la stratégie de contrôle « 1 », les pertes Joule lors d'une ouverture de phase sont plus élevées que lors d'un court-circuit.

TABLEAU XXXI : Ondulation de couple de la topologie RIMM pour différentes stratégies de contrôle et modes de fonctionnement.

Stratégie	Ondulation de couple		
	Mode Normal	Court-Circuit	Phase Ouverte
0	0,06	0,91	0,12
1	0,06	1,33	1,15

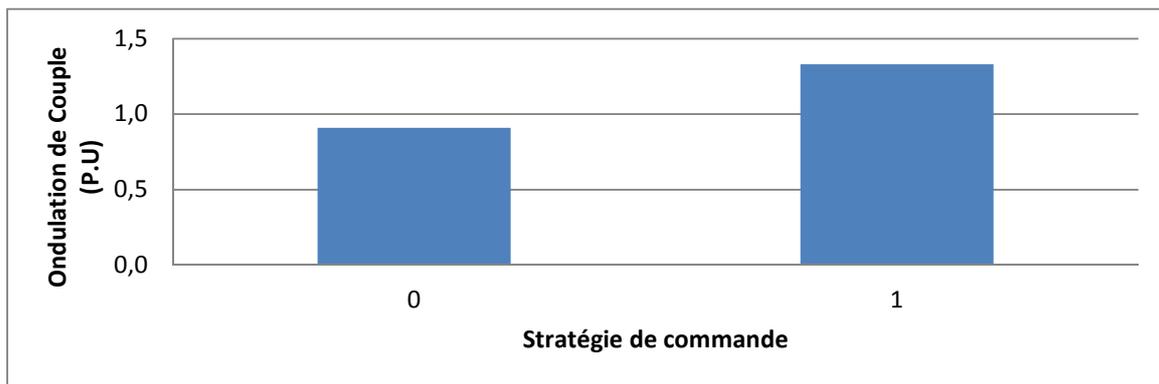


Figure 127 : Ondulation de couple de la topologie RIMM pour différentes stratégies de contrôle, lors d'un court-circuit.

Le seul point où la stratégie « 1 » se présente comme moins intéressante que la stratégie « 0 » est celui concernant l'ondulation du couple. L'ondulation du couple de la stratégie « 1 » est 44% plus élevée que celui de la stratégie « 0 ».

Finalement, malgré la saturation des correcteurs, parce qu'il ne reste pas de degrés de liberté pour la faute, la stratégie « 1 » est très intéressante puisqu'elle réduit le dimensionnement de l'onduleur et les pertes Joule au prix d'un couple pulsatoire plus élevé.

3.1.4. Comparaison générale des trois topologies avec différentes combinaisons de contrôle pour des machines non-principales

Pour une comparaison finale, il a été choisi de comparer les stratégies qui ont été les plus intéressantes pour chaque topologie selon l'analyse faite précédemment. Ainsi les stratégies qui font partie de la comparaison globale sont :

- Pont-H « 011 » ;
- Pont-H « 101 » ;
- HIMM « 00 » ;
- RIMM « 0 » ;
- RIMM « 1 » ;

TABLEAU XXXII : Valeurs obtenues EXPERIMENTALEMENT et en SIMULATION pour les trois topologies en mode dégradé pour différentes stratégies de contrôle.

Topologie	Stratégie de Contrôle	P_{dim} (PU)	P_j (PU)	C_{ond}
Pont-H	000	31,55	606,78	0,25
Pont-H	101	26,71	432,60	0,31
HIMM	00	15,19	716,48	1,30
RIMM	0	8,93	208,03	0,91
RIMM	1	2,33	3,26	1,33

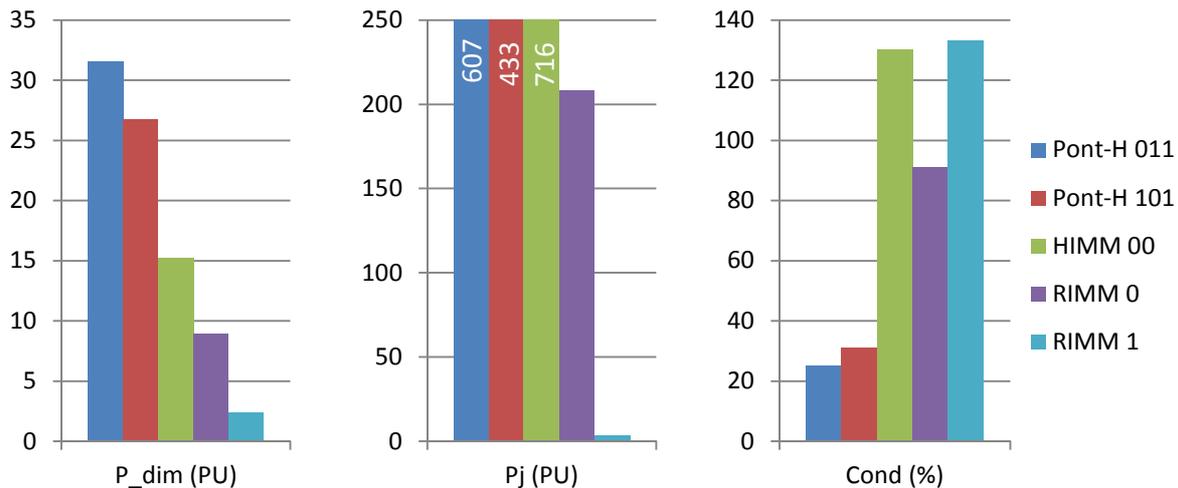


Figure 128 : Comparaison générale entre les trois topologies sur les trois critères de comparaison.

Concernant la puissance de dimensionnement, aucune modification majeure ne s'est produite avec les nouvelles stratégies de contrôles. Malgré l'importante réduction de la puissance de dimensionnement de la topologie Pont-H avec quelques machines fictives contrôlées en « courant nul », cette puissance est encore plus élevée que celle des topologies HIMM et RIMM.

En analysant les pertes Joule, il est possible de voir que la topologie HIMM est désormais la topologie qui dissipe le plus d'énergie en mode dégradé. La topologie RIMM est encore celle qui dissipe le moins d'énergie indépendamment de la stratégie implémentée. Mais, lorsque la stratégie « 1 » est implémentée, les pertes en mode dégradé sont significativement plus faibles.

Un des plus grands avantages d'implémenter un contrôle de « courant nul » sur les machines fictives non-principales a été la réduction du couple pulsatoire de la topologie Pont-H. Cette topologie présentait déjà dans le Chapitre 2 le couple pulsatoire le plus faible parmi les trois topologies et la différence a été fortement creusée. Contrairement à la topologie Pont-H, pour les topologies HIMM et RIMM, le contrôle en « courant nul » des machines fictives non-principales a un impact soit négatif soit nul sur l'ondulation de couple.

Il est possible de voir que certains aspects sont communs aux trois topologies. Concernant la puissance de dimensionnement, le fait de contrôler certaines machines en « $I=0$ » au lieu de « $V=0$ » résulte des valeurs crêtes de courant plus faible, mais une tension de référence plus élevée. Puisque la puissance de dimensionnement dépend d'un produit de ces deux variables, l'impact final sur la puissance de dimensionnement n'est pas si évident.