

Comparaison des trois topologies choisies en modes dégradés

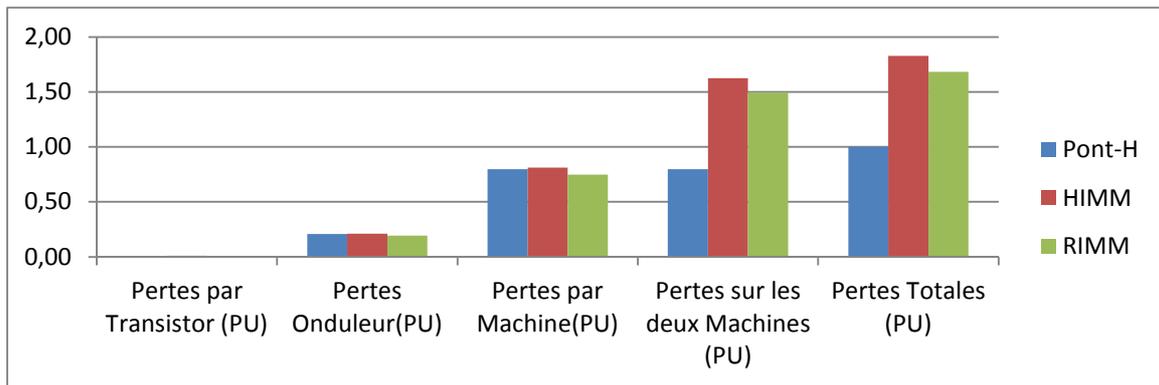


Figure 56 : Comparaison des trois topologies en pertes Joule.

La mise en série de deux machines implique que le courant nécessaire pour entraîner une machine traverse les deux machines, générant ainsi plus de pertes. Ceci peut être confirmé par comparaison des pertes sur les deux machines et des pertes par machine. En conclusion, les pertes sur les deux machines des topologies en série sont plus élevées, mais seulement parce que les deux machines dissipent de l'énergie en même temps. En comparant les pertes au niveau de l'onduleur, du transistor et de la machine, la différence entre les trois topologies est négligeable.

La comparaison en mode dégradé a les objectifs suivants :

- dimensionner l'onduleur ;
- obtenir les pertes Joule pour chaque machine ;
- évaluer l'amplitude du couple pulsatoire ;

Comme mentionné précédemment, les onduleurs doivent être dimensionnés pour un fonctionnement en mode dégradé, ce qui signifie que le système est surdimensionné pour un fonctionnement en mode normal. Dans l'application étudiée, il est souhaité que le système délivre en mode dégradé la même puissance qu'en mode normal. La réduction de puissance en mode dégradé pourrait compromettre la mission spatiale. Dans un premier temps, l'analyse est réalisée pour un cas où la commande fonctionne exactement de la même façon, soit en mode normal, soit en mode dégradé.

Une estimation des pertes Joule en mode dégradé est également réalisée en mode dégradé. Cependant, ce critère est moins contraignant pour le système que la puissance de dimensionnement de l'onduleur. Les pertes Joule peuvent nuire au système si elles n'arrivent pas à être évacuées au cours de la mission. Dans ce cas, même si le système n'est pas dimensionné pour une telle dissipation d'énergie, l'indisponibilité du système dépend de sa constante de temps thermique. Si celle-ci est assez longue, il est possible que le système puisse fonctionner jusqu'à la fin de la mission, puis perdu. Ceci est commun dans le domaine aérospatial dont plusieurs éléments ne fonctionnent que lors d'une mission. En prenant en compte la dissipation d'énergie du système en mode dégradé lors du dimensionnement du système, il est tolérant aux défaillances même si la panne survient au début de la mission.

L'ondulation du couple fournit un indice de la performance du système en mode dégradé. Cette ondulation est due au déséquilibre des courants de la machine. Cependant, il n'est pas évident de définir un seuil limite du couple pulsatoire, parce que l'impact sur le système dépend aussi de son inertie.

L'analyse en mode dégradé est effectuée dans un premier temps en simulation et prend en compte les points de fonctionnement les plus critiques pour chaque topologie, ainsi que les modes de défaut considérés comme étant les plus courants et critiques pour le dimensionnement de l'onduleur.

Tous les essais en mode dégradé ont été réalisés à vitesse constante et les calculs du dimensionnement de l'onduleur, des pertes Joule et du couple pulsatoire ont été réalisés en régime permanent. Les possibles dépassements en régime transitoire sont donc négligés.

2.4.1. Modes de défauts

Un entraînement électrique est candidat à différents types de défaillances au niveau de la machine, de l'onduleur et de la commande. Afin de pouvoir lister toutes les fautes possibles, il est nécessaire de répertorier dans un premier temps les éléments qui composent le système et leur fonctions (TABLEAU XI).

TABLEAU XI : Liste de composants du système TVC et leur fonction.

Composant	Description de la fonction
EMA	Créer un mouvement de translation
MSAP	Générer une force motrice
Transistors	Alimenter la machine en AC
Bus DC	Alimenter l'onduleur
Capteur de position	Mesurer la position du rotor de la machine
Capteur de courant	Mesurer les courants
Calculateur	Réguler l'inclinaison de la tuyère
	Réguler les courants des machines
	Calculer les rapports cycliques et envoyer à l'onduleur

Le taux de défaillance du composant peut être obtenu de différentes façons :

- Par calcul (ex : guide FIDES pour des éléments électroniques) ;
- Dans livres ou articles ;
- Retour d'expérience de l'entreprise ;

Le taux de défaillance du composant comprend tous les défauts qu'un seul composant peut subir. Le facteur de contribution correspond à la contribution du taux de défaillance de chaque défaut au taux de défaillance du composant. Ce facteur de contribution est obtenu par les mêmes moyens que ceux listés pour le taux de défaillance du composant. Le taux de défaillance et le facteur de contribution dépendent tous les deux des plusieurs données spécifiques concernant le profil d'utilisation et sa fabrication.

TABLEAU XII : Taux de défaillance par défaut ([14], [37] et [57]).

No. du défaut	Composant	Fonction	Mode de défaut	Causes du défaut	TAUX DE DEFAILLANCE			EFFETS DU DEFAUT		
					Taux de défaillance du composant (λ)	Facteur de contribution (%)	Taux de défaillance de la mission	Effets locaux	Effets sur le système	Gravité du défaut
FL1	Moteur Electrique	Générer force électromotrice	Perte du roulement de la machine	Usage mécanique	3,16E-06	95%	3,00E-06	Blocage de la machine	Perte du système	MAJEUR
FL2			Ouverture d'une phase	Perte de la connexion ou ouverture de la protection	3,16E-06	5%	1,58E-07	Une phase non alimenté et déséquilibre des autres	PAS d'effet majeur	-
FL3	Transistors	Alimenter la machine en tension alternative.	Ouverture du transistor	Perte du driver, surcharge	8,55E-05	55%	4,70E-05	Déséquilibre des tensions générées	PAS d'effet majeur	-
FL4			Transistor court-circuité	Emballement thermique, faute du driver	8,55E-05	45%	3,85E-05	Déséquilibre des tensions générés et augmentation du courant de la phase dégradé	PAS d'effet majeur	-
FL5	Capteur de Position	Mesurer la position de la roue	Perte du capteur	Surtension, vibration	4,90E-06	100%	4,90E-06	Le calculateur ne peut pas utiliser cette donnée	Perte du système	MAJEUR
FL6	Capteur de Courant	Mesurer le courant	Perte du capteur	Surtension, vibration	1,00E-09	100%	1,00E-09	Déséquilibre des tensions générés et augmentation du courant de la phase dégradé	PAS d'effet majeur	-
FL7	Calculateur	Réguler la position de la roue	Perte du calculateur	Perte des composants, vibration	1,30E-05	100%	1,30E-05	Pas d'alimentation du système	Perte du système	MAJEUR
		Réguler les courants des machines.								
		Calculer les rapports cycliques								
FL8	Bus DC + Câblage	Alimenter l'onduleur	Perte de la source	Court-circuit de la source, vieillissement	1,20E-05	100%	1,20E-05	Moins de tension disponible (RIMM), Pas de tension disponible (Pont-H et HIMM)	PAS d'effet majeur (RIMM) Perte du système (Pont-H et HIMM)	-

Le TABLEAU XII présente les principaux défauts pour chaque composant de l'entraînement du système TVC. Pour chaque défaut, des données comme le taux de défaillance, causes et conséquences sont présentées. Toutes les données sont inhérentes à un composant et ne prennent pas en compte leur nombre dans le système. Ainsi, afin d'avoir la participation finale de chaque défaut dans le système en entier, il faut dessiner l'arbre de défaillance de chaque topologie ; celles-ci sont présentés dans l'annexe 5.4. Le TABLEAU XII permet de définir les défaillances les plus importantes pour l'analyse réalisée dans cette étude. Les données numériques ont été obtenues sur [14], [37] et [57].

Les défauts les plus courants qui impactent le plus le dimensionnement de l'onduleur sont ceux qui génèrent un déséquilibre des courants ou des tensions d'alimentation. Cette situation peut être atteinte par différents défauts en différents composants du système TVC. Parmi les défauts les plus courants dans un système onduleur-machine, trois ont été répertoriés, parmi lesquels seulement deux sont analysés en détail :

- Court-circuit d'un transistor ;
- Ouverture d'une phase ;

Le troisième défaut qui peut également impacter le dimensionnement de l'onduleur est l'ouverture d'un transistor. Cependant, le comportement du système lors de ce type de défaut est similaire à celui d'une ouverture de phase et a donc moins de conséquence non désirée. Lors d'une ouverture de phase, le courant de phase défaillante est nul. Lors d'une ouverture de transistor, le courant n'est nul que pendant une demi-période électrique, celle où le transistor défaillant était censé conduire du courant. Finalement, l'augmentation de l'amplitude de courant et de tension serait théoriquement toujours plus faible que pour une ouverture de phase.

A. Court-circuit du transistor

Le court-circuit se caractérise par le blocage d'un transistor à l'état fermé. Afin de protéger la source de tension, l'autre transistor du même bras est bloqué à l'état ouvert comme le montre la Figure 57. Concernant cette protection de la source, certains entraînements qui commandent des bras d'onduleur ont l'intelligence pour le faire automatiquement. Dans cette étude, la protection de la source est considérée comme étant déjà acquise.

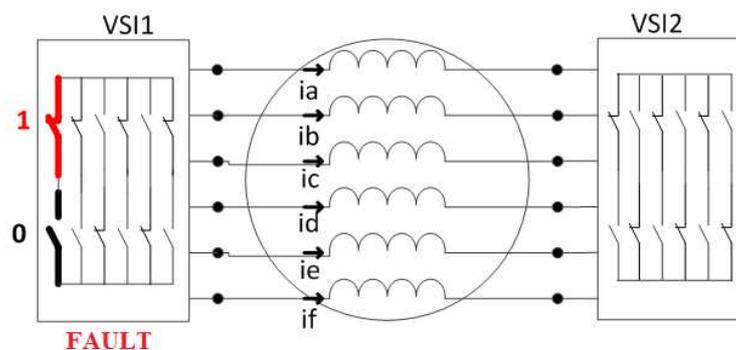


Figure 57 : Schéma d'un court-circuit pour une machine alimentée en Pont-H.

Le court-circuit est simulé par le blocage d'un bras d'onduleur à une position précise, malgré le signal envoyé par la commande. En expérimentation, ce défaut est également créé en imposant une

position fixe à un bras d'onduleur malgré la commande, c'est-à-dire avec un transistor toujours fermé et le second transistor du même bras toujours ouvert.

B. Ouverture d'une phase

L'ouverture d'une phase consiste en la non-alimentation d'une phase de la machine. Les causes de cette ouverture de phase peuvent être au niveau de l'onduleur ou de la machine.

En simulation, l'ouverture de phase est simulée par l'ouverture d'un transistor connecté en série avec les phases des machines. Lorsque ce transistor est à l'état fermé sa résistance est négligeable. Une fois ouvert, sa résistance devient très élevée par rapport à la résistance des machines. Expérimentalement, ce défaut est réalisé en ouvrant manuellement le circuit d'une des phases.

2.4.2. Comportement de la topologie Pont-H en mode dégradé

A. Défaut de court-circuit pour la topologie Pont-H

La Figure 58, la Figure 59 et la Figure 60 montrent les courants et les tensions de référence de la topologie Pont-H lors d'un défaut de court-circuit obtenus en simulation.

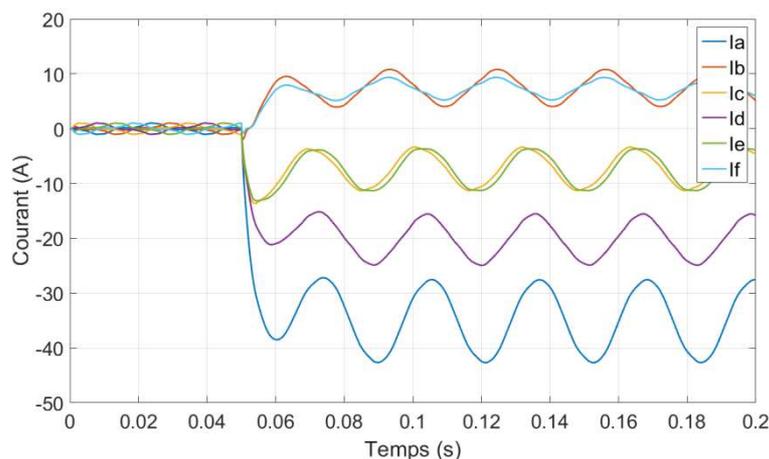


Figure 58 : Courants de la topologie Pont-H en court-circuit obtenus en SIMULATION.

L'amplitude du courant pour la topologie en Pont-H lors d'un court-circuit est trop élevée pour reproduire l'essai expérimentalement. La Figure 58 montre que l'amplitude de courant atteint 43A, soit 33,9 PU, alors que le courant de la machine ne peut pas dépasser 10,0A (7,7PU). Cette valeur élevée est atteinte à cause des courants homopolaires.

Lors d'un défaut de court-circuit, les transistors du bras en défaut ne commutent plus. Par conséquent, la phase défaillante subit une tension presque constante, très proche de la tension du bus DC. Le courant de la phase en défaut possède une composante continue assez proche de la valeur de la tension du bus divisée par les résistances du système (résistance des bobines et des transistors). Puisque ces résistances sont normalement faibles afin de réduire les pertes par effet Joule du système, la composante constante est donc assez élevée. Cet effet peut être perçu en examinant les courants des machines fictives en mode dégradé (Figure 59).

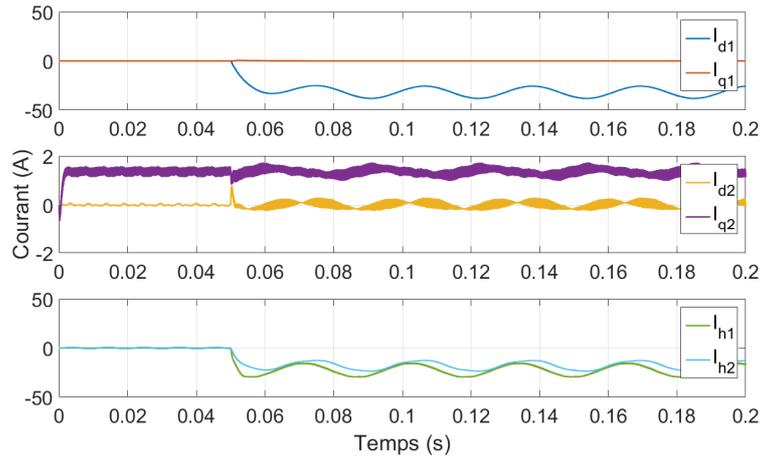


Figure 59 : Courants des machines fictives de la topologie Pont-H en court-circuit obtenus en SIMULATION.

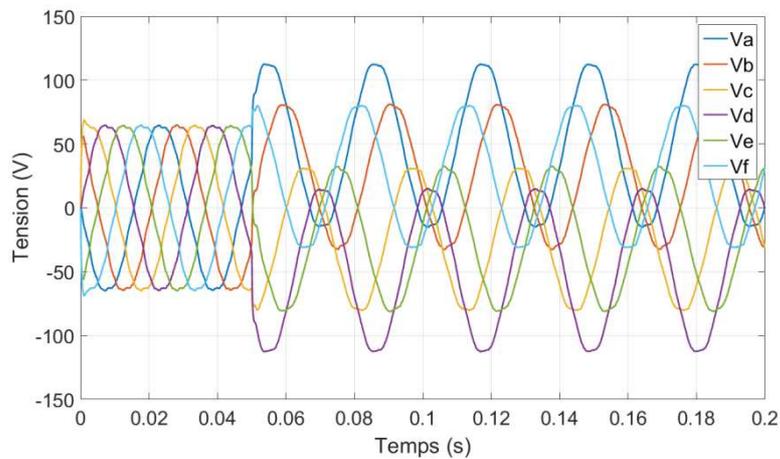


Figure 60 : Références de tension de la topologie Pont-H en court-circuit obtenues en SIMULATION.

En analysant les tensions de référence du système, la Figure 60 montre que les références de tension deviennent très déséquilibrées à cause du court-circuit. La référence de la phase D, par exemple, atteint la valeur de la tension du bus.

B. Défaut d'ouverture de phase pour la topologie Pont-H

Un autre type de défaut étudié est celui de l'ouverture d'une phase. Puisque la valeur crête des courants obtenue en simulation (Figure 61) est plus faible, il a été possible de reproduire l'essai expérimentalement (Figure 62).

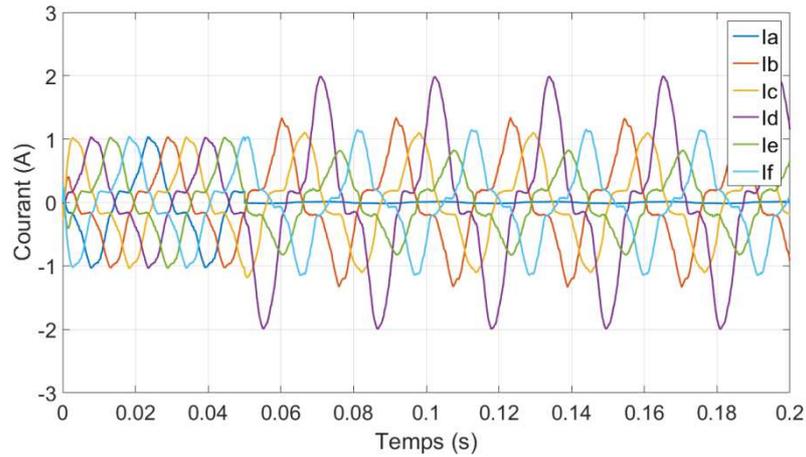


Figure 61 : Courants de la topologie Pont-H lors d'une ouverture de phase obtenus en SIMULATION.

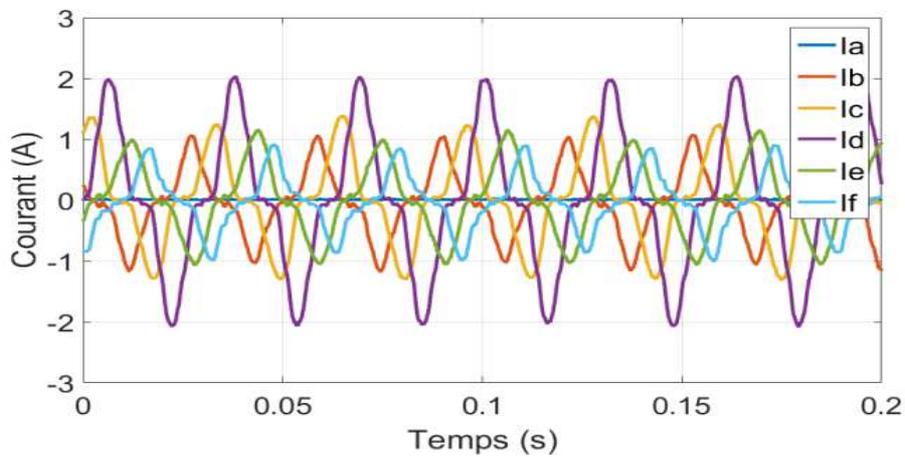


Figure 62 : Courants mesurés expérimentalement de la topologie Pont-H lors d'une ouverture de phase.

L'ouverture de phase est visible par le courant de la phase en défaut qui devient nul (la phase A dans le cas présenté). La phase dont le courant est le plus élevé est donc la phase D, celle qui est électriquement déphasée de π . Puisqu'en mode normal la machine est à 6 phases symétrique, le couple généré par les phases A et D est en phase. Ainsi, suite à la perte d'une des phases, l'autre doit générer le couple pour les deux. Par conséquent, la valeur crête à crête du courant de la phase D est à peu près deux fois celle obtenue en mode normal.

En comparant les résultats expérimentaux à ceux en simulation il est possible de voir un comportement très similaire avec une erreur de moins de 8% concernant la valeur maximale.

C. Couple en mode dégradé pour la topologie Pont-H

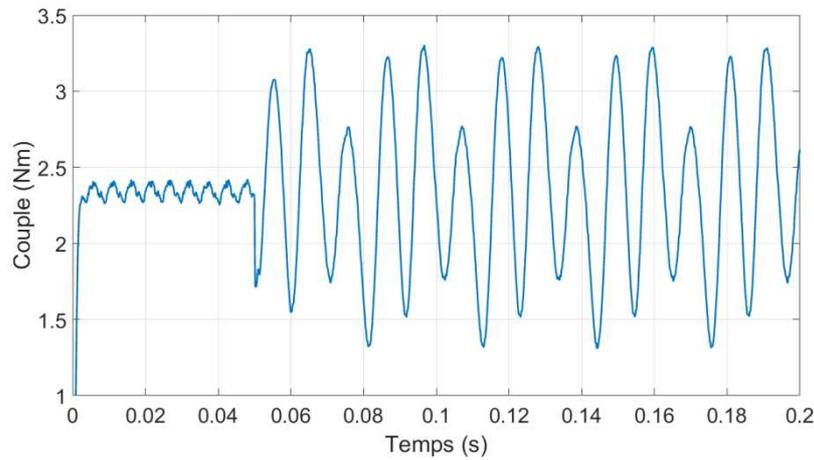


Figure 63 : Couple généré en SIMULATION lors d'un court-circuit pour la topologie Pont-H.

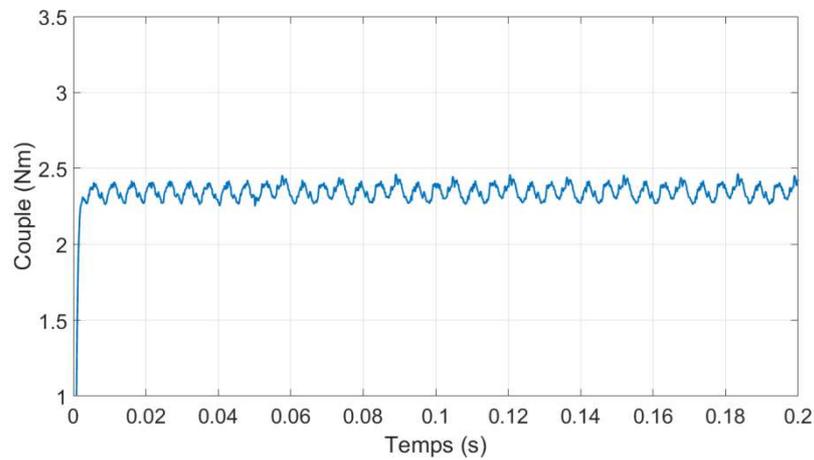


Figure 64 : Couple généré en SIMULATION lors d'une ouverture de phase pour la topologie Pont-H.

L'ondulation de couple pour un court-circuit (Figure 63) est beaucoup plus élevée que pour une ouverture de phase (Figure 64). Le couple pulsatoire lors d'un défaut de court-circuit est dû à deux facteurs principaux : d'un côté, l'ondulation du composant de courant I_q de la machine principale, à cause de saturation des correcteurs, et de l'autre, la valeur assez élevée du courant I_{h2} (Figure 59). Lors d'un défaut de court-circuit, le courant I_{h1} est plus élevé qu'en mode normal, mais, du fait que les harmoniques des FEM soient assez faibles, l'impact du défaut sur le couple généré passe presque inaperçu.

2.4.3. Comportement de la topologie HIMM en mode dégradé

A. Définition de la localisation du défaut la plus contraignante pour le dimensionnement de l'onduleur de la topologie HIMM

Contrairement à la topologie Pont-H, lors d'un fonctionnement en PF2¹⁰, les courants de la topologie HIMM ne sont pas équilibrés, même en mode normal, c'est-à-dire que l'amplitude du courant varie conséquemment d'une phase à l'autre (Figure 51). Cela est dû au fait que les courants contribuent à la création du couple de chacune des machines couplées en série, comme le soulignent l'(Eq. 15). Il faut donc analyser l'impact de la phase en défaut sur le dimensionnement de l'onduleur pour le point de fonctionnement défini dans le chapitre précédent.

Un défaut peut parvenir sur n'importe laquelle des 6 phases du système. Ainsi cette pré-analyse consiste à comparer la puissance de dimensionnement pour un défaut survenant sur chacune des phases. En raison de la symétrie de la machine et du point de fonctionnement défini pour le dimensionnement de l'onduleur, l'analyse peut être réalisée entre 4 phases (au lieu de 6). En effet, les phases B et F ont toutes les deux la même amplitude de courant en mode normal et sont toutes les deux déphasées de $\pm 2\pi/6$ par rapport à la phase A, c'est-à-dire celle dont le courant crête est le plus élevé avant le défaut. Par conséquent, il est attendu d'avoir des résultats similaires lors d'un défaut sur la phase B ou sur la phase F. Pour les mêmes raisons, le comportement du système ne diffère pas entre un défaut sur la phase C ou sur la phase D.

Le TABLEAU XIII et la Figure 65 présentent donc les valeurs obtenues pour les deux défauts sur les phases A, B, C et D en simulation.

TABLEAU XIII : Valeurs crête de courant et tension obtenus en SIMULATION pour chaque localisation du défaut.

	Court-Circuit			Phase Ouverte		
	I_{MAX} (PU)	V_{MAX} (PU)	P_{dim} (PU)	I_{MAX} (PU)	V_{MAX} (PU)	P_{dim} (PU)
Phase A	21,15	3,21	33,91	1,05	1,18	0,62
Phase B	20,08	2,94	29,52	1,33	1,07	0,71
Phase C	18,31	2,28	20,87	1,29	1,07	0,69
Phase D	15,54	1,50	11,65	1,25	1,07	0,67

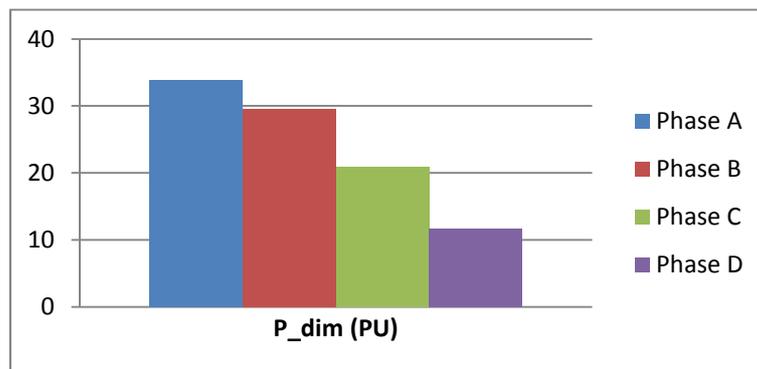


Figure 65 : Graphique Courant et Tension crête obtenus en SIMULATION pour chaque localisation du défaut.

¹⁰ Le point de fonctionnement défini comme étant le plus critique pour le dimensionnement de l'onduleur pour les topologies HIMM et RIMM.

Il est évident que la puissance de dimensionnement du système est celle du défaut de court-circuit car les valeurs de courant et de tension de référence sont beaucoup plus élevées. Cependant, en analysant indépendamment chaque défaut, on constate que :

- un défaut sur la phase A est le plus contraignant pour un défaut de court-circuit ;
- un défaut sur la phase B (ou F) est le plus contraignant pour une ouverture de phase ;

Pour un court-circuit, les courants les plus élevés sont obtenus lorsque la phase qui a le courant le plus élevé en mode normal (la phase A dans ce cas (Figure 51)), est en défaut. Ceci est dû au fait que, similairement à la topologie Pont-H, une composante constante très importante s'ajoute à la phase en défaut.

Par contre, cela n'est pas le cas pour un défaut en phase ouverte. Dans ce cas, l'ouverture de la phase annule le courant de la phase défaillante. Afin de répondre à la consigne de I_d et I_q des machines principales et secondaires, des courants homopolaires alors se développent. Dans ce cas, il est possible de calculer analytiquement les valeurs de I_{h1} et I_{h2} , (Eq. 27) à (Eq. 31). Par exemple, si la phase B est ouverte, la valeur de référence de son courant (I_{Bref}) est obtenue normalement. Puisque le courant doit être nul à cause de la faute, les valeurs des courants homopolaires sont les suivantes :

$$I_b = 0 = I_{bref} + \frac{1}{\sqrt{6}}I_{h1} - \frac{1}{\sqrt{6}}I_{h2} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$I_{h1} - I_{h2} = -\sqrt{6}I_{bref} \quad (\text{Eq. 28})$$

Les courants homopolaires n'étant pas contrôlés, ils sont naturellement de même amplitude, dont la valeur est calculée comme suit :

$$I_{h1} = -I_{h2} = -\frac{\sqrt{6}}{2}I_{bref} \quad (\text{Eq. 29})$$

Cependant, puisque les valeurs des courants homopolaires sont symétriques entre eux, l'impact du défaut est nul sur les phases A, C et E (Eq. 30). Par conséquent les phases D et F sont les seules à compenser le défaut. L'équivalent se passe lorsque les phases A, C ou E sont ouvertes, aucun impact n'est aperçu sur les phases B, D et F (Eq. 31).

$$I_a = I_{aref} + \frac{1}{\sqrt{6}}I_{h1} + \frac{1}{\sqrt{6}}I_{h2} = I_{aref} \quad (\text{Eq. 30})$$

$$I_f = I_{fref} + \frac{1}{\sqrt{6}}I_{h1} - \frac{1}{\sqrt{6}}I_{h2} = I_{fref} - I_{fref} \quad (\text{Eq. 31})$$

En conclusion, le courant crête le plus élevé est celui de la phase F lors d'une ouverture de la phase B.

Pour la suite, le cas où un court-circuit survient sur un transistor de la phase A et celui où la phase B est ouverte sont analysés plus en détail.

B. Défaut de court-circuit pour la topologie HIMM

Les graphiques de la Figure 66 à la Figure 68 présentent les résultats obtenus en simulation pour un défaut de court-circuit, c'est-à-dire, un transistor bloqué à l'état fermé, pour la topologie HIMM.

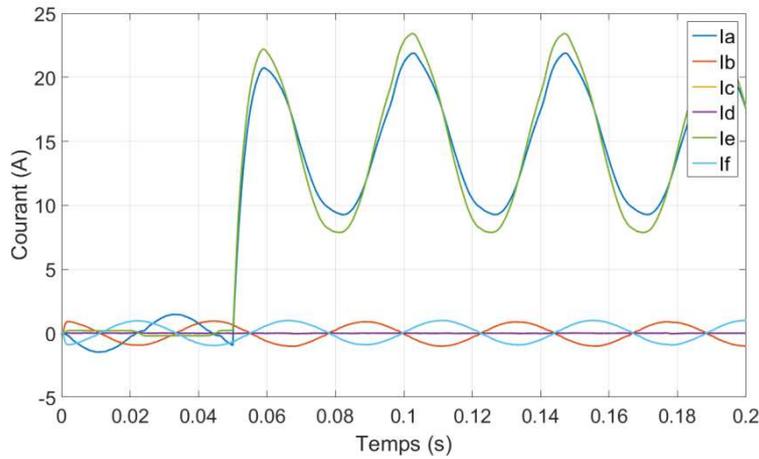


Figure 66 : Courants de phase obtenus en SIMULATION la topologie HIMM lors d'un court-circuit (phase A).

En analysant la Figure 66, une conclusion similaire à la topologie Pont-H est obtenue. En effet, ces deux topologies présentent le même problème lors d'un court-circuit, les courants homopolaires atteignant des valeurs très élevées (Figure 67). En conséquence, l'amplitude du courant de certaines phases est trop élevée et avec une composante continue très importante. En raison de ces valeurs de courant importantes dans certaines phases, il n'a pas été possible de reproduire les valeurs expérimentalement.

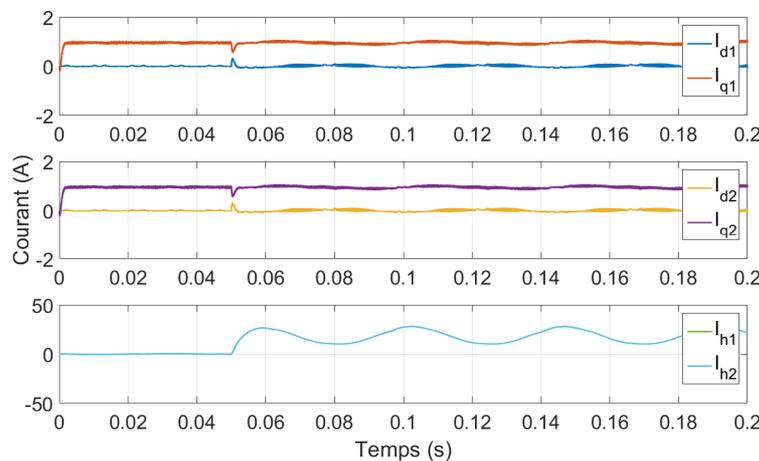


Figure 67 : Courants des machines fictives obtenus en SIMULATION de la topologie HIMM en court-circuit (phase A).

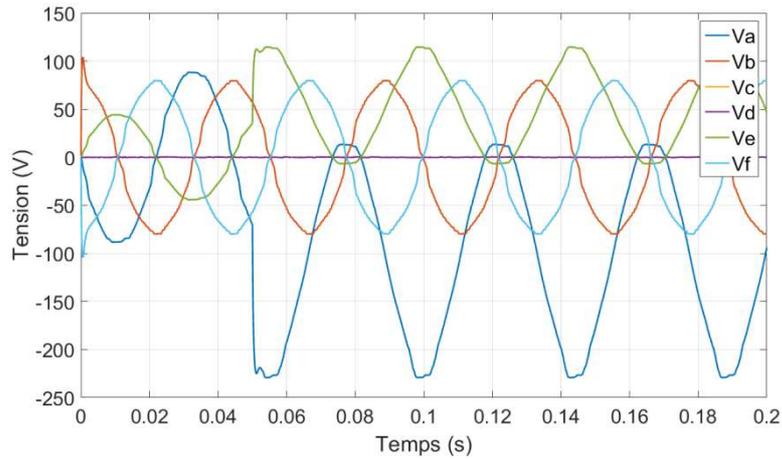


Figure 68 : Tensions de référence obtenues en SIMULATION de la topologie HIMM en court-circuit (phase A).

Concernant les tensions de référence, la seule tension qui dépasse la valeur du bus DC (200V) est celle de la phase en défaut. Par conséquent, le bras de la phase en défaut est saturé car il ne peut plus générer la tension demandée par la commande. Cependant, à cause du défaut, un des deux bras qui alimente la phase défaillante est incontrôlable et ne peut pas, dans tous les cas, alimenter la phase à la tension de référence. Pour cela, la valeur utilisée pour le dimensionnement de l'onduleur est la plus élevée observée parmi les bras sains.

C. Défaut d'ouverture de phase pour la topologie HIMM

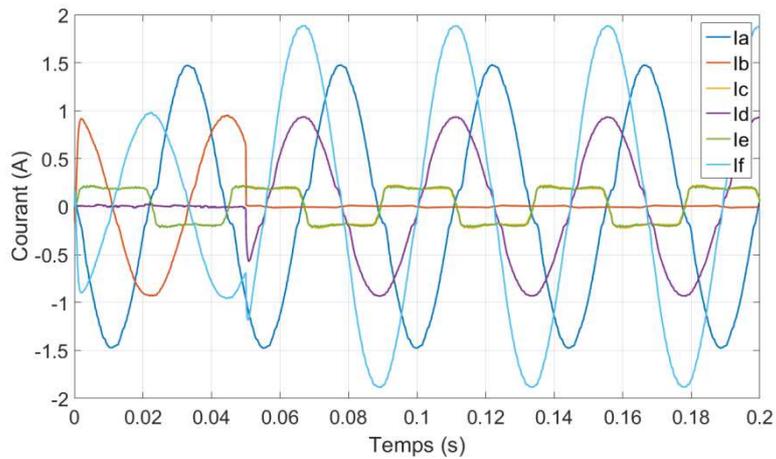


Figure 69 : Courants de phase obtenus en SIMULATION de la topologie HIMM lors de l'ouverture de la phase B.

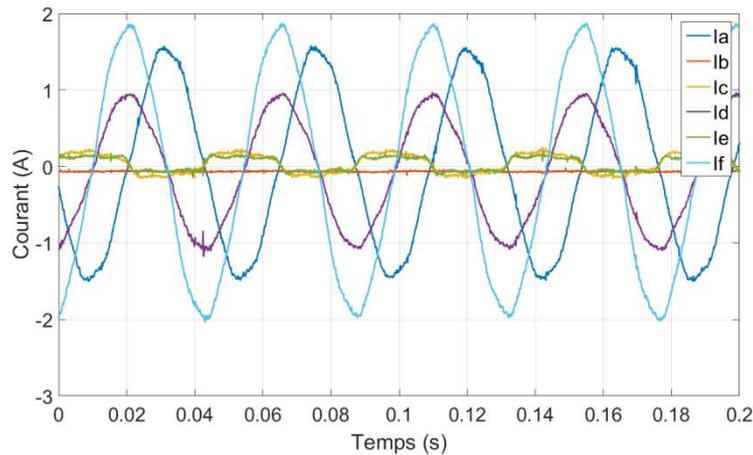


Figure 70 : Courants mesurés EXPERIMENTALEMENT de la topologie HIMM lors de l'ouverture de la phase B.

Concernant le défaut de phase ouverte, il est possible d'obtenir des résultats expérimentaux et les comparer avec ceux obtenus en simulation. Pour ce défaut, la phase B a été ouverte et la phase F est celle qui atteint les valeurs les plus élevées comme déjà présenté précédemment. Cette augmentation est principalement due aux courants homopolaires. Sur la Figure 71, il est possible de voir que l'impact du défaut sur les composants de courant des machines principale et secondaire est négligeable. Il est également important de souligner que, dans une situation de non-saturation des correcteurs, les courants homopolaires et, par conséquent, les courants des phases dépendent, en mode dégradé, de la commande, comme ceci a été montré analytiquement sur l'(Eq. 27) à l'(Eq. 31).

En comparant les résultats expérimentaux et les résultats de la simulation, des résultats similaires sont obtenus. La différence la plus évidente est liée aux phases C et E, mais cela n'impacte pas les valeurs crêtes des phases dont le courant est le plus élevé.

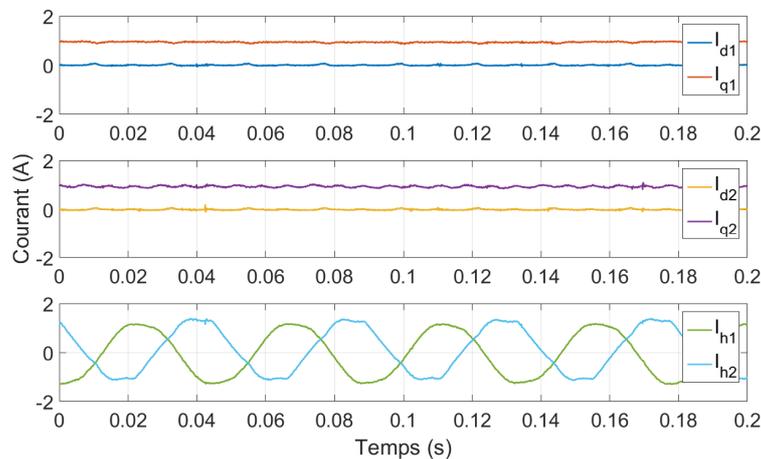


Figure 71 : Courants des machines fictives obtenus EXPERIMENTALEMENT de la topologie HIMM lors de l'ouverture de la phase B.

D. Couple en mode dégradé pour la topologie HIMM

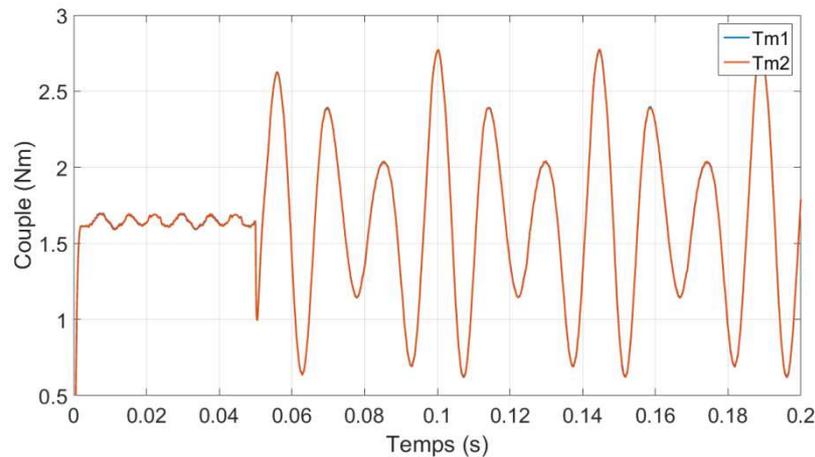


Figure 72 : Couple généré obtenu en SIMULATION lors d'un court-circuit de transistor de la phase A pour la topologie HIMM.

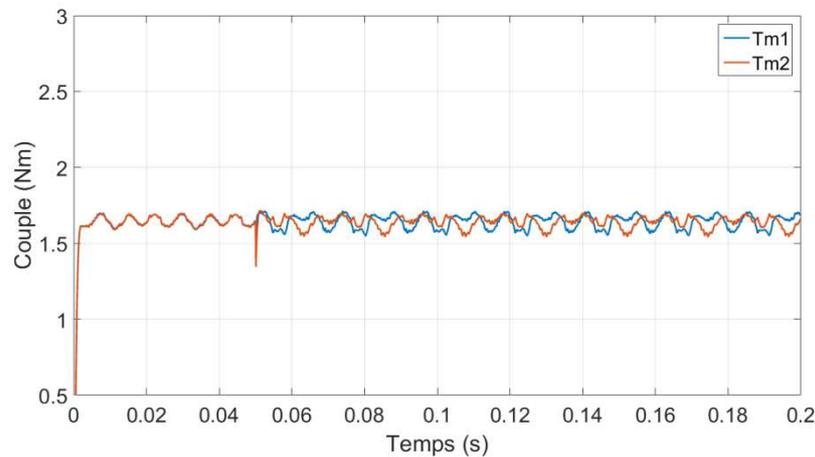


Figure 73 : Couple généré obtenu en SIMULATION lors d'une ouverture de la phase B pour la topologie HIMM.

Comparant l'ondulation de couple, le défaut de court-circuit (Figure 72) est beaucoup plus gênant pour le système qu'une ouverture de phase (Figure 73). Comme montré sur la Figure 71, les composants de courant I_{dq} de la machine principale sont presque inchangés lors d'une ouverture de phase. Les courants homopolaires sont ceux qui augmentent le plus. Parmi les deux courants homopolaires, l'un ne génère pas de couple, alors que l'autre en génère très peu en raison de la FEM presque sinusoïdale. En revanche, lors d'un court-circuit, les composantes I_q des machines principale et secondaire oscillent et le courant I_{h2} dépasse les 20A (15,4PU). En conséquence, la valeur crête à crête du couple pulsatoire dépasse les 100% lors d'un court-circuit.

2.4.4. Comportement de la topologie RIMM en mode dégradé

A. Définition de la localisation de défaut la plus contraignante pour le dimensionnement de l'onduleur de la topologie RIMM

En mode dégradé, il n'est pas possible de dire que les topologies HIMM et RIMM se comportent de façon très similaire, en raison du courant I_{h1} qui est nul pour la topologie RIMM et très élevé pour la topologie HIMM lors d'un court-circuit. Ainsi, il faut refaire l'analyse pour savoir quelle localisation du

défaut est la plus contraignante pour le dimensionnement de l'onduleur. La procédure de l'analyse est la même que celle présentée lors de la section précédente. Les résultats obtenus sont présentés dans le TABLEAU XIV et en Figure 74.

TABLEAU XIV : Courant et tension crête pour chaque localisation du défaut.

	Court-Circuit			Phase Ouverte		
	I_{MAX} (PU)	V_{MAX} (PU)	P_{dim} (PU)	I_{MAX} (PU)	V_{MAX} (PU)	P_{dim} (PU)
Phase A	7,54	3,46	13,03	0,85	1,63	0,69
Phase B	6,77	3,06	10,35	1,00	1,41	0,71
Phase C	5,77	2,34	6,74	1,00	1,40	0,70
Phase D	4,38	1,69	3,71	0,92	1,40	0,64

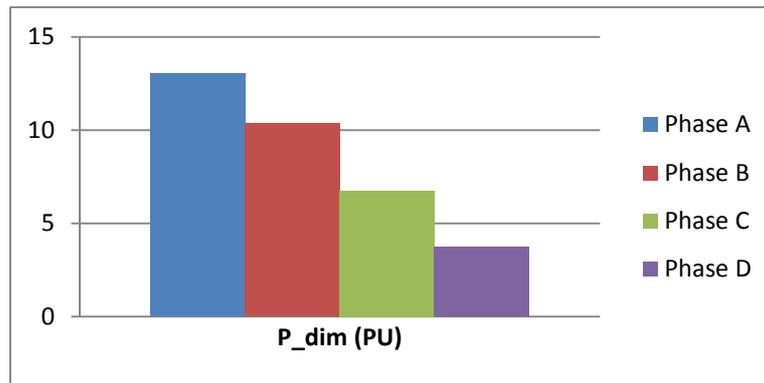


Figure 74 : Graphique de puissance dimensionnant pour la topologie RIMM.

Similairement à la topologie HIMM (Section 2.4.3), pour un défaut de court-circuit, la phase en défaut la plus contraignante est la phase A parce que celle-ci est la phase dont le courant est le plus élevé en mode normal. Pour un défaut de phase ouverte, un défaut sur la phase B ou C est légèrement plus contraignant pour le dimensionnement de l'onduleur, car, dans ce cas, les phases voisines voient le courant amplifié.

Concernant l'ouverture de phase, il est toujours possible d'obtenir ces valeurs analytiquement. La différence est que le courant I_{h1} est toujours nul en raison de la structure RIMM. Ainsi les (Eq. 32), (Eq. 33) et (Eq. 34) sont obtenues :

$$I_{h2} = \sqrt{6}I_{b_{ref}} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$I_a = I_{a_{ref}} + \frac{1}{\sqrt{6}}I_{h2} = I_{a_{ref}} + I_{b_{ref}} \quad (\text{Eq. 33})$$

$$I_f = I_{f_{ref}} - \frac{1}{\sqrt{6}}I_{h2} = I_{f_{ref}} - I_{b_{ref}} \quad (\text{Eq. 34})$$

Finalement, tous les courants sont impactés par le défaut. Mais cela ne change pas le fait qu'une ouverture de la phase B continue à générer les courants les plus élevés, en comparant avec une ouverture sur les autres phases, bien qu'une ouverture sur la phase C génère la même amplitude de courant en mode dégradé.

Pour l'analyse détaillée, des résultats expérimentaux sont examinés par la suite :

- un défaut de court-circuit sur un transistor de la phase A ;
- ouverture de la phase B ;

B. Défaut de court-circuit pour la topologie RIMM

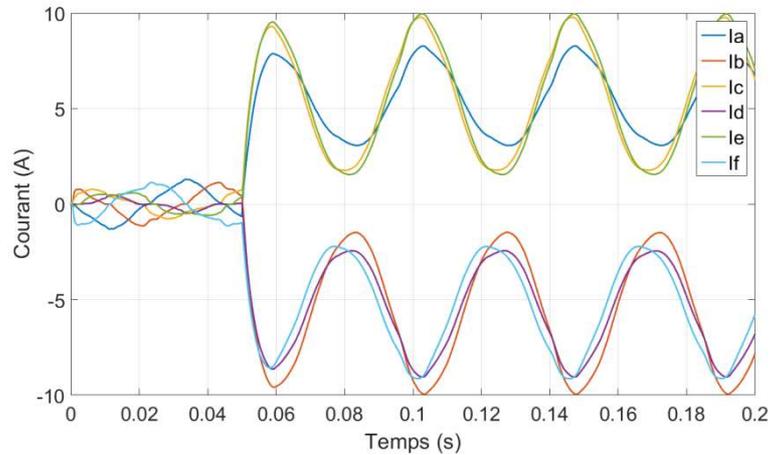


Figure 75 : Courants de la topologie RIMM lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A obtenus en SIMULATION.

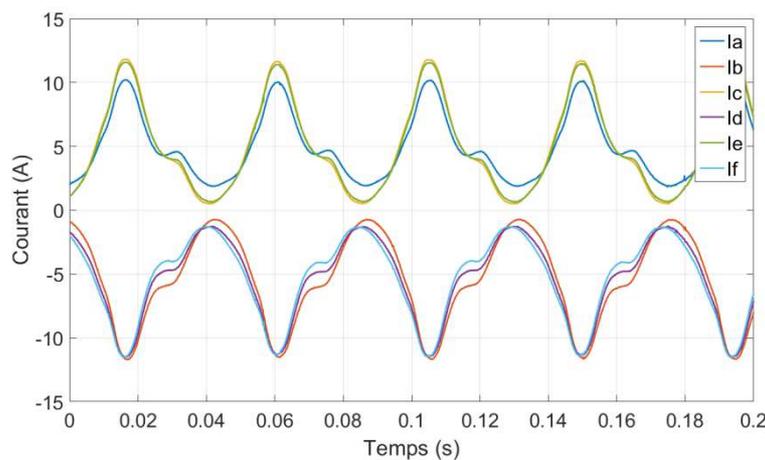


Figure 76 : Courants mesurés EXPERIMENTALEMENT de la topologie RIMM lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A.

Lors d'un défaut de court-circuit, les courants de topologie RIMM, à la différence de ce qui a été observé dans les deux topologies précédentes, ne sont pas trop élevés (11A ou 8,5PU) selon le courant maximal que la machine peut supporter (10A ou 7,7PU) (Figure 75), permettant ainsi la reproduction expérimentale des résultats (Figure 76). L'amplitude de ces courants est assez élevée et une composante continue est également relevée sur le courant de toutes les phases. Similairement aux autres topologies analysées ici, cet effet est dû au courant homopolaire. Le courant I_{h1} est nul, mais le courant I_{h2} peut toujours atteindre des valeurs assez élevées (Figure 77). Cependant, l'impact de I_{h2} seul est notamment plus faible sur le dimensionnement de l'onduleur.

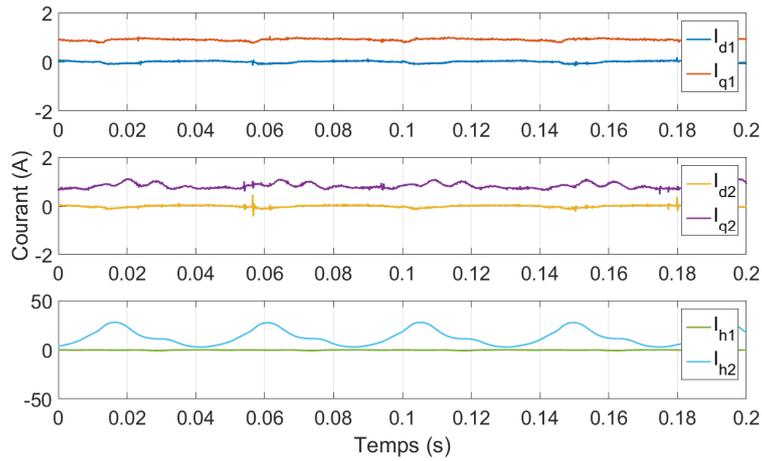


Figure 77 : Courants des machines fictives de la topologie RIMM lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A obtenus EXPERIMENTALEMENT.

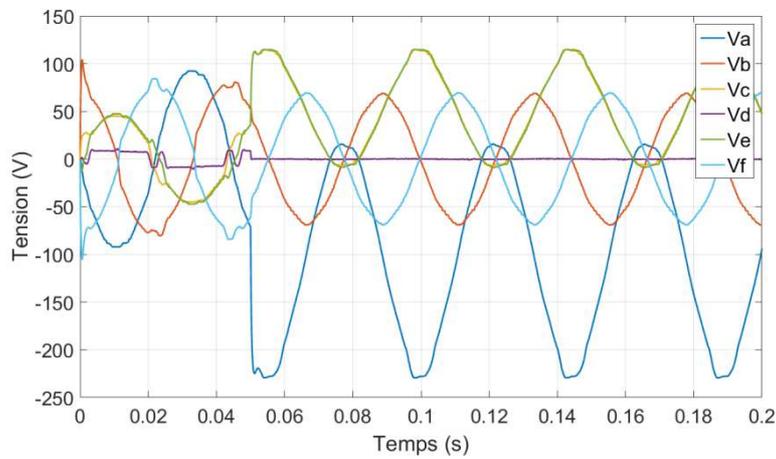


Figure 78 : Références de tension de la topologie RIMM lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A obtenues en SIMULATION.

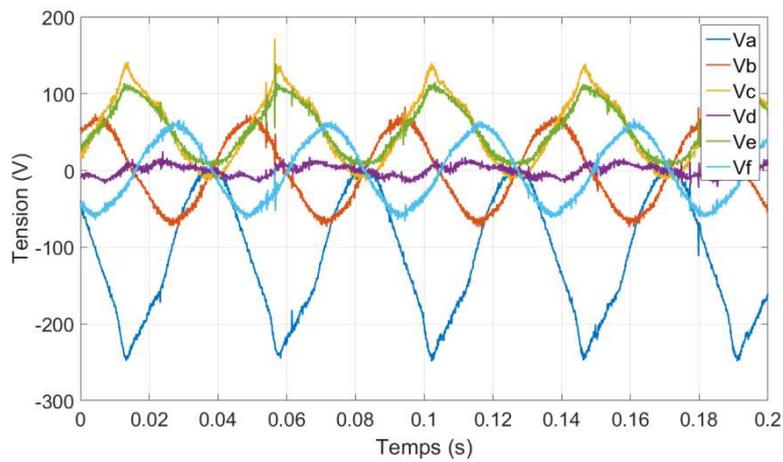


Figure 79 : Références de tension de la topologie RIMM lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A obtenues EXPERIMENTALEMENT.

Malgré la réduction de l'amplitude de courant, cela n'engendre pas une nette réduction des références de tension (Figure 78 et Figure 79), ni n'empêche une saturation de tension sur la phase défaillante.

En comparant les résultats obtenus en expérimentation et en simulation, des valeurs très similaires sont obtenues. Il est possible de voir une différence lorsque le système est saturé, la tension de référence dépassant celle du bus DC, mais ce comportement est non linéaire, ce qui augmente l'erreur entre le modèle et le système réel.

C. Défaut d'ouverture de phase pour la topologie RIMM

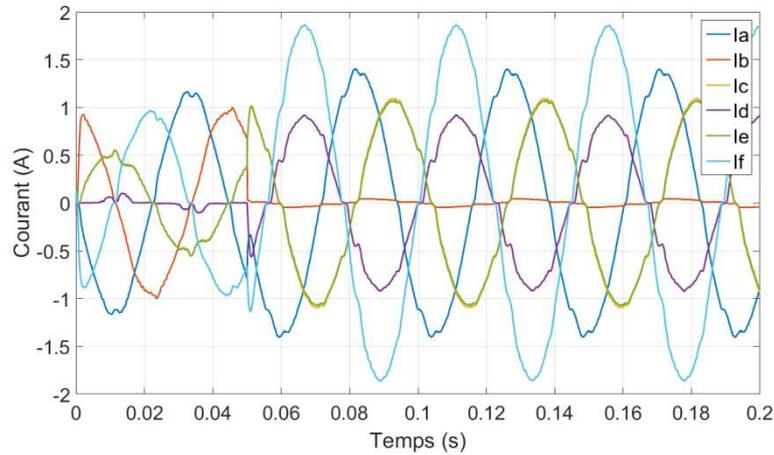


Figure 80 : Courants de phase obtenus en SIMULATION de la topologie RIMM lors de l'ouverture de la phase B.

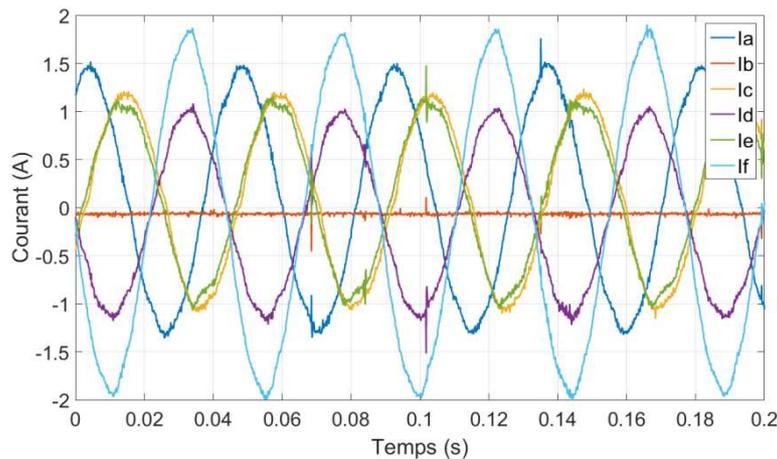


Figure 81 : Courants mesurés EXPERIMENTALEMENT de la topologie RIMM lors de l'ouverture de la phase B.

Lors d'une ouverture de phase, le comportement de la topologie RIMM est très similaire à celui de la topologie HIMM. En effet le courant de la phase F dépasse celui de la phase A. Il devient alors celui utilisé lors du dimensionnement de l'onduleur. Puisque le défaut d'ouverture de phase est normalement moins contraignant que celui d'un court-circuit, le seul composant de courant qui est vraiment impacté par le défaut est le I_{h2} (Figure 82). Comme pour la topologie HIMM, les courants de phase de la topologie RIMM lors d'une ouverture de phase dépendent seulement des consignes de courants, comme ceci a été montré analytiquement par les (Eq. 32), (Eq. 33) et (Eq. 34).

Le résultat expérimental et le résultat en simulation sont tous les deux très similaires, bien qu'en simulation l'amplitude du courant soit légèrement plus faible.

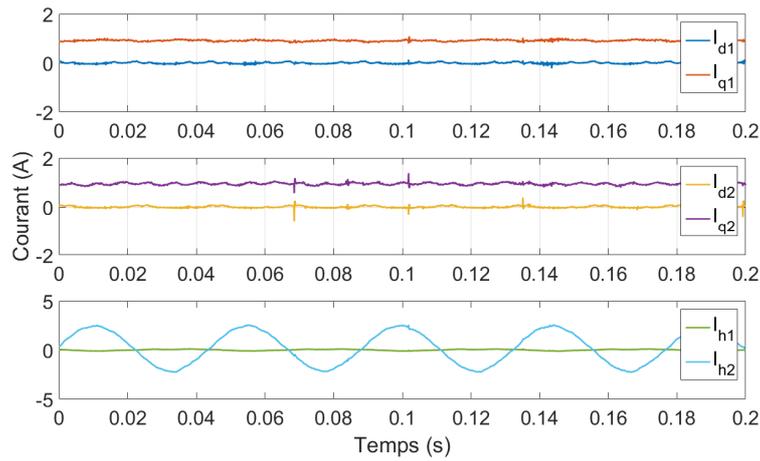


Figure 82 : Courants des machines fictives de la topologie RIMM obtenus EXPERIMENTALEMENT lors d'une ouverture de la phase B.

D. Couple en mode dégradé pour la topologie RIMM

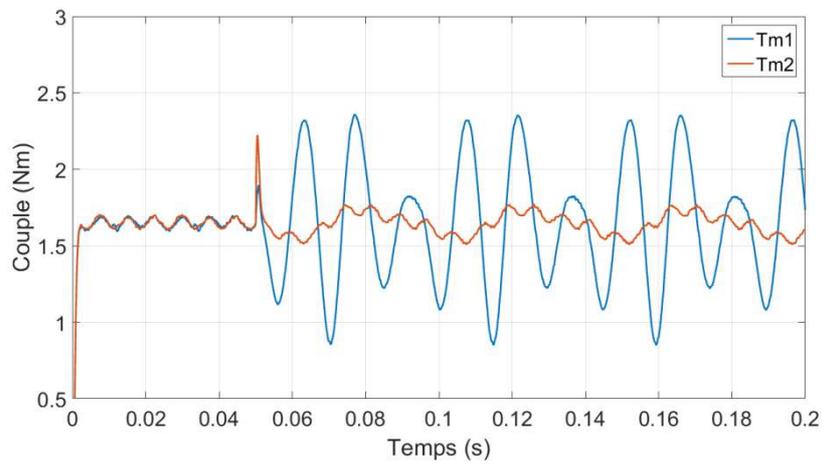


Figure 83 : Couple obtenu EXPERIMENTALEMENT lors d'un court-circuit d'un transistor de la phase A pour la topologie RIMM.

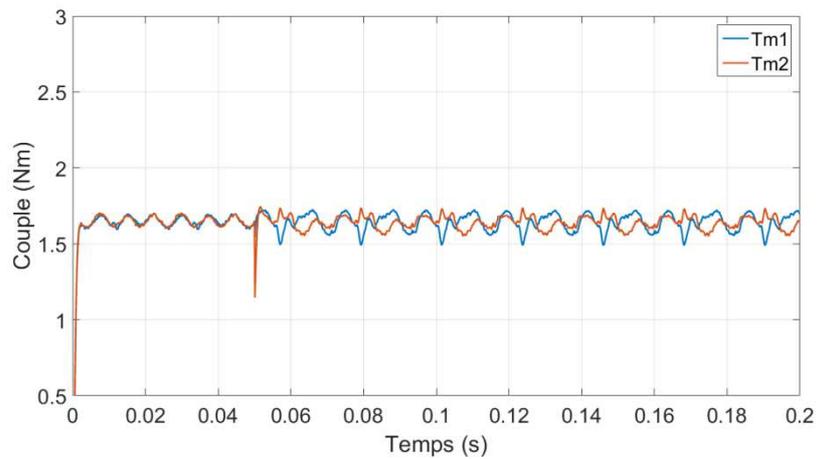


Figure 84 : Couple obtenu EXPERIMENTALEMENT lors d'une ouverture de la phase B pour la topologie RIMM.

Concernant l'ondulation de couple, le résultat ne se différencie pas de celui obtenu avec les autres topologies. Lors d'une ouverture de phase, l'ondulation de couple est similaire à celle obtenue en mode normal et, lors d'un court-circuit, cette dernière est assez élevée (77%).

2.5. Comparaison globale des trois topologies choisies

La comparaison globale des trois topologies prend en compte trois aspects considérés comme les plus pertinents et qui ont déjà été présentés dans les sections 2.2 et 2.3:

- la pulsation de couple ;
- les pertes par effet Joule ;
- la puissance de dimensionnement de l'onduleur ;

Le TABLEAU XV présente les valeurs obtenues expérimentalement ou en simulation (pour le défaut de court-circuit des topologies pont-H et HIMM du aux limitations du banc d'essai), de tension, de courant et de l'ondulation de couple pour tous les cas ici étudiés. A partir de ces valeurs, il a été possible de calculer la puissance de dimensionnement de l'onduleur par l'(Eq. 24).

La valeur crête choisie pour le courant est celle qui atteint la valeur la plus importante parmi celles de toutes les phases, bien qu'en mode dégradé les courants deviennent déséquilibrés et que la valeur crête soit très différente entre les phases. Le dimensionnement de tous les transistors est le même, donc les valeurs les plus importantes de tension de référence et de courant sont utilisées pour le calcul de la puissance de dimensionnement de l'onduleur.

La tension crête utilisée pour le dimensionnement est la plus élevée parmi toutes les phases saines. En phase ouverte, il est impossible de contrôler les bras d'onduleur de la phase défaillante. En court-circuit, un autre bras du pont-H alimentant la phase est toujours contrôlable, mais un court-circuit ajoute une composante de courant continu tellement élevée que la phase en défaut devient très difficilement contrôlable avec des valeurs de tension de consigne qui dépassent souvent la valeur de la source de tension.

TABLEAU XV : Valeurs obtenues EXPERIMENTALEMENT et en SIMULATION pour les trois topologies en modes normal et dégradés.

	I_{MAX} (PU)	V_{MAX} (PU)	P_{dim} (PU)	P_j (PU)	C_{ond}
Mode Normal					
Pont-H	1,00	1,00	1,00	1,00	0,09
HIMM	1,23	1,27	0,78	1,82	0,06
RIMM	1,00	1,35	0,68	1,68	0,06
Court-circuit					
Pont-H	32,85 (simu.)	1,65 (simu.)	54,10 (simu.)	964,89 (simu.)	0,84
HIMM	18,00 (simu.)	1,69 (simu.)	15,19 (simu.)	716,48 (simu.)	1,30
RIMM	9,00	1,99	8,93	197,8	0,91
Phase Ouverte					
Pont-H	1,54	0,99	1,52	1,14	0,11
HIMM	1,54	1,29	0,99	3,06	0,11
RIMM	1,54	1,44	1,11	3,93	0,12

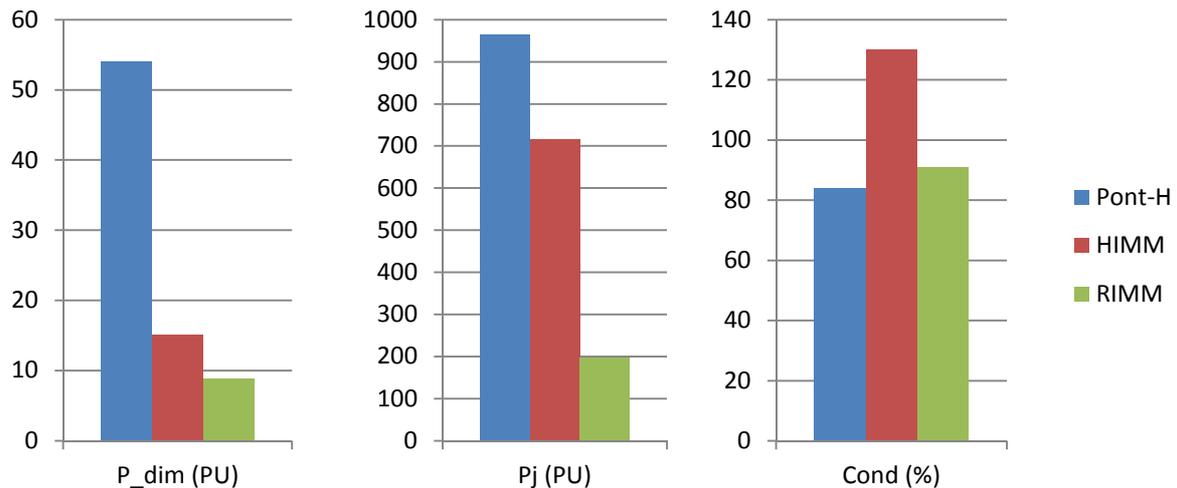


Figure 85 : Graphique comparant les 3 topologies en mode dégradé en termes de puissance de dimensionnement.

Les machines devant être tolérantes aux deux défaillances analysées, les valeurs retenues pour la comparaison finale sont celles de puissance de dimensionnement maximale, de pertes par effet Joule et d'ondulation de couple les plus élevées parmi les deux modes dégradés.

En comparant les deux modes en défaut et le mode de fonctionnement normal, il est évident que le défaut de court-circuit de transistor est le plus contraignant sur les trois critères de comparaison. Pour les trois topologies analysées, le courant crête très élevé engendre une augmentation importante du dimensionnement de l'onduleur, des pertes par effet Joule et du couple pulsatoire.

Comme cela a déjà mentionné précédemment, des courants homopolaires d'amplitude importante sont une conséquence de l'alimentation presque continue sur la phase en défaut. En effet la composante continue de la phase en défaut respecte à peu près un rapport V/R , où la tension « V » est celle de la source de tension et la résistance « R » est celle des bobines de la phase en défaut à laquelle s'ajoute celle des transistors. Ces résistances étant faibles, afin de réduire les pertes Joule du système en mode normal, cette composante continue est très élevée.

Les topologies HIMM et RIMM ont des résistances totales plus élevées que la topologie Pont-H grâce à la mise en série. Par conséquent, la valeur crête des courants de la topologie Pont-H est plus de deux fois supérieure à celle de la topologie HIMM par exemple. En comparant les deux topologies en série, la topologie RIMM a l'avantage de proposer une structure qui empêche la circulation du courant I_{h1} . Cette alimentation presque continue sur une phase, due au court-circuit, résulte en une tension V_{h1} et V_{h2} de l'ordre du bus DC. Cependant, pour la topologie RIMM, la tension V_{h1} ne génère pas de courant.

Le courant important demande une tension d'alimentation plus importante, ce qui entraîne des pertes Joule et sature plus rapidement les correcteurs, générant du couple pulsatoire. Finalement, puisque l'amplitude des courants de la topologie RIMM est la plus faible, cette topologie est celle dont la performance en mode dégradé est la meilleure parmi les trois topologies. Dans la même logique, la topologie standard Pont-H est donc la topologie la moins intéressante pour une application tolérante aux défaillances. En effet, les pertes Joule totales de la topologie Pont-H sont les plus élevées parmi les trois topologies, alors qu'en mode normal celles-ci constituent son plus grand avantage.

Lors d'un défaut de phase ouverte, les valeurs obtenues sur tous les critères sont un peu plus élevées que celles obtenues en mode normal. La puissance de dimensionnement de la topologie Pont-H est la plus élevée parmi les trois topologies à cause du nombre élevé de transistors. De plus, cette puissance de dimensionnement est encore plus élevée que celle des topologies en série en comparant au mode normal. En revanche, les pertes Joule de la topologie Pont-H sont encore plus faibles que celles des deux topologies en série en comparant au mode normal.

En effet, la puissance de dimensionnement ne prend en compte que la phase dont le courant et la tension sont les plus élevées alors que les pertes sont calculées en prenant en compte toutes les phases. Dans ce cas, la distribution de courant entre les phases impacte très fortement ces deux critères. Dans le cas de la topologie Pont-H, pratiquement une seule phase est impactée par le défaut, ce qui augmente beaucoup plus la puissance de dimensionnement que les pertes Joule.

En comparant les deux topologies en série lors d'une ouverture de phase, la puissance de dimensionnement de la topologie RIMM est 9% plus élevée que celle de la topologie HIMM, alors qu'en mode normal c'est le contraire. Puisque les courants des machines principales et secondaires ne sont presque pas impactés par le défaut d'ouverture de phase, la différence entre les deux machines est au niveau des courants homopolaires. Par conséquent, les tensions de référence ne sont pas non plus impactées.

La principale différence entre les deux topologies est le fait que la structure HIMM peut compenser le déséquilibre des courants par les deux courants homopolaires, alors que la topologie RIMM ne peut le faire qu'avec le courant I_{h2} . Il a été montré analytiquement dans les sections 2.3.1 et 2.4.1 que le fait d'avoir les deux courants homopolaires compensant la phase ouverte n'impactait que deux phases parmi les 5 phases saines, alors que, quand un seul courant homopolaire est détecté, ce dernier peut compenser le défaut des 5 phases, ce qui implique une première contrainte de la structure RIMM par rapport à la topologie HIMM en mode dégradé.

Bien que la topologie RIMM soit la topologie dont la puissance de dimensionnement en mode dégradé est la plus faible, cette puissance est égale à 14,2 fois celle de la même topologie en mode normal. Puisque les courants homopolaires sont les plus contraignants pour le dimensionnement du système et également pour l'ondulation du couple, il est souhaitable de les réduire au maximum, car ils représentent un surdimensionnement très important. Pour atteindre cet objectif, deux approches sont possibles :

- Revoir les paramètres des éléments du système ;
- Implémenter une stratégie de contrôle ;

Les éléments composant le système sont principalement la batterie, les MSAP et les transistors. Afin de réduire le dimensionnement de l'onduleur, il est possible soit de réduire la tension du bus DC, soit d'augmenter la résistance des machines et des transistors.

La réduction de la tension du bus DC peut amener le système à la saturation de l'onduleur et à un comportement imprévisible, générant des valeurs crêtes de courant et d'oscillations de couple encore plus importantes. Par ailleurs, une augmentation des résistances génère, en mode normal, une augmentation des pertes Joule du système. Cependant, en mode dégradé, cette augmentation de pertes Joule est beaucoup plus faible, parce que les pertes sont proportionnelles à la résistance,

mais également aux courants au carré. Finalement, une analyse plus approfondie d'optimisation est nécessaire afin de trouver le meilleur compromis entre courant crête, résistance et pertes.

Une augmentation des inductances propres de la machine et une réduction des inductances mutuelles engendreraient respectivement une augmentation de la puissance réactive et des contraintes supplémentaires de fabrication de la machine. Cependant, ces modifications réduiraient l'oscillation des courants dq et homopolaires en mode dégradé. Par conséquent, l'oscillation de couple et le dimensionnement de l'onduleur seraient un peu plus faibles.

Contrairement au défaut de court-circuit, le dimensionnement de la machine et des autres éléments composant le système agit peu sur la performance en mode dégradé. Les équations (Eq. 27) à (Eq. 34) montrent comment les courants se comportent lors d'une ouverture de phase. En effet, si les correcteurs ne sont pas saturés, une distribution des courants se fera. Cependant, cela ne dépend que des courants de référence.

L'implémentation d'une stratégie de contrôle pour réduire le courant homopolaire sera, quant à elle, analysée dans le prochain chapitre.

2.6. Résumé - Conclusion

Ce chapitre a présenté les trois topologies qui ont été choisies pour cette étude. Puisque deux des topologies (la HIMM et la RIMM) sont des topologies plus innovantes avec des machines électriquement connectées en série, leur modélisation, leur contrôle et leur fonctionnement en mode normal ont été présentés en détail.

Ensuite une comparaison entre ces trois topologies a été réalisée afin de définir, selon certains aspects considérés comme étant les plus importants, quelle topologie répond le mieux aux besoins d'une application comme la TVC. Afin de définir les pertes de chaque machine, une analyse en mode normal a été réalisée.

Pour le dimensionnement de l'onduleur, une analyse en mode dégradé a été faite. Pour cela il a fallu définir le point de fonctionnement le plus contraignant pour chaque topologie, ainsi que les défauts les plus significatifs. Toutes ces étapes ayant été franchies, des simulations et des essais expérimentaux ont été réalisés pour une stratégie de commande standard.

Malgré le fait que les topologies soient théoriquement tolérantes aux défaillances, comme ceci a été montré en simulation, les courants de la topologie Pont-H et de la topologie HIMM atteignent des valeurs trop élevées pour reproduire ces essais expérimentalement. En effet le courant de certaines phases possède une composante continue trop grande. Il a été important de valider les modèles utilisés dans les simulations par des expérimentations. La topologie RIMM présentait la même composante continue, mais d'amplitude assez faible, ce qui a permis la réalisation des essais expérimentaux. Lorsqu'il a été possible d'obtenir des résultats expérimentaux, la comparaison de ces données expérimentales aux résultats obtenus en simulation a été satisfaisante, validant ainsi le modèle de la simulation.

Parmi les deux défauts analysés, le défaut de court-circuit d'un transistor a été celui considéré comme étant le plus contraignant pour le dimensionnement de l'onduleur. Pour les trois topologies,

les courants homopolaires atteignaient des valeurs très importantes, augmentant ainsi le dimensionnement des transistors et générant une ondulation de couple non négligeable.

En conclusion, sur tous les critères analysés, la topologie pour laquelle les courants homopolaires étaient les plus faibles présentait la meilleure performance. La topologie RIMM, dont le courant I_{h1} est nul grâce à la structure avec deux sources isolées, présente donc la meilleure performance pour les trois critères analysés. La topologie standard Pont-H est finalement la moins intéressante en prenant en compte les hypothèses et les conditions de fonctionnement utilisées à ce moment. En comparant les topologies Pont-H et HIMM, il est notable que les courants homopolaires de la topologie HIMM sont plus faibles en raison de la mise en série des machines, car une résistance plus importante tend à réduire les courants homopolaires.

Afin d'améliorer la performance de toutes les topologies en mode dégradé, des solutions plus complexes au niveau de la stratégie de contrôle sont présentées dans le prochain chapitre. Ces dernières sont implémentées et comparées afin de réduire en priorité l'amplitude du courant homopolaire.