

**Analyse des contraintes  
technologiques de  
l'exploitation d'énergie marine  
et des solutions  
électromécaniques**

---

## **I- Introduction**

Les mouvements d'eau relatifs aux marées provoquent des courants importants dans des sites localisés en certains endroits de l'océan (en général dans des détroits ou près des pointes). Ces marées sont essentiellement liées aux positions relatives des astres et sont donc au premier ordre, prévisibles [10, 11], contrairement aux autres sources de conversion d'énergies renouvelables, qui sont sensibles aux aléas météorologiques. C'est la raison pour laquelle cette forme d'énergie suscite depuis quelques années un intérêt particulier des industriels.

L'énergie hydrolienne qui découle de la transformation de l'énergie cinétique de ces courants marins, en énergie électrique, par l'intermédiaire des hydroliennes, est à l'heure actuelle, l'une des perspectives pour la production d'électricité renouvelable marine. Elle devrait trouver une place significative dans le bouquet des énergies renouvelables au cours des années à venir.

Au cours de ce chapitre tout d'abord, une analyse du contexte applicatif des énergies marines renouvelables (EMR) en général et de celui de l'énergie hydrolienne en particulier nous permet de dégager un contexte technologique à notre étude. Nous présentons ainsi une analyse des contraintes de mise en œuvre et d'accès aux systèmes hydroliens qui sont localisés sous la mer, dans des zones difficiles et une étude des défauts les plus courants rencontrés sur les chaînes de conversion des éoliennes, qui sont les systèmes les plus proches des hydroliennes. Ceci nous conduit à envisager des systèmes électromécaniques qui, de par leurs structures, sont particulièrement fiables et sont capables de continuer à fonctionner après l'apparition d'un défaut électrique. C'est pourquoi nous focaliserons notre étude sur le cas de chaînes de conversion basées sur des génératrices polyphasées ou multi-étoile à aimants permanents et à bobinages concentrés associées à des turbines à pas fixe. Nous nous intéresserons à la conception de ces systèmes et à leur commande en modes sain et dégradés.

Lors d'une deuxième partie de ce premier chapitre, nous analyserons donc les possibilités de fonctionnement en mode dégradés de ce type de chaînes électromécaniques en fonction de la structure de l'ensemble convertisseur/machine électrique et des stratégies de commande qui leur sont associés. Ceci nous permettra de dégager une perspective d'étude sur les stratégies de commande en mode dégradés à vitesse variable de ce type de système qui sera développé au chapitre suivant

## **II-Généralité sur l'exploitation des énergies marines et sur l'énergie hydrolienne**

### **II-1-Potentiel énergétique des énergies marines**

Etant donné que la demande en énergie va augmenter au cours des prochaines années du fait de la croissance démographique que va connaître le monde (la population mondiale sera d'environ à 9.5 milliards d'habitants en 2050), la demande d'énergie primaire augmentera dans le même sens. La demande en énergie électrique devrait croître encore plus rapidement du fait de l'augmentation de nouvelles technologies (voitures électriques par exemple). Ainsi la production mondiale devrait être portée en 2050 aux alentours de 55000 TWh, soit 170 % de celle de 2010 [10]. Afin de satisfaire ces besoins en électricité, diversifier les sources d'énergies et s'intéresser à de nouvelles formes d'énergie est nécessaire.

De ce fait, trois priorités ont été identifiées après le conseil mondial de l'énergie (Montréal 2010 [10]) :

- Assurer la sécurité de l'approvisionnement en énergie électrique.
- Contrôler l'impact de l'augmentation de la production d'électricité sur le climat et l'environnement.
- Contrôler une éventuelle augmentation du prix de l'électricité de façon à ne pas accentuer les inégalités entre les populations.

Ces priorités étant sous la responsabilité des opérateurs d'envergure internationale, ceux-ci auront un défi majeur à relever dans la mesure où les prévisions en termes de demande de production en énergie électrique envisagée d'ici 2030 (Table 1) basée sur la croissance démographique, indiquent une hausse considérable de cette demande.

Table 1: Mise en perspective du "mix" électricité en 2030 (source : compilation de différentes études internationales) tiré de [10]

Production Electricité	2010		2030	
	TWh	%	TWh	%
Charbon	7368		11743	
Gaz	5933		8581	
Fuel	811		967	
Nucléaire	2898		5197	
<b>Production conventionnelle</b>	<b>17011</b>	<b>80,7%</b>	<b>26489</b>	<b>75,6%</b>
Biomasse	447		1747	
Hydraulique	3197		4255	
Eolien	380		2250	
Solaire	34		300	
<b>Production renouvelable</b>	<b>4058</b>	<b>19,3</b>	<b>8551</b>	<b>24,4%</b>
<b>Production monde</b>	<b>21069</b>	<b>100,0%</b>	<b>35040</b>	<b>100,0%</b>

Face à cette problématique, et aux contraintes liées à l'environnement, les industriels et les grands investisseurs multinationaux ont comme unique alternative, l'exploitation de sources d'énergies propres. Du fait du potentiel très important des énergies marines, de nombreuses études au cours de ces dernières années ont été faites sur ces sources d'énergie [12, 13] qui pourraient contribuer de manière significative à la diversification de la production électrique dans de nombreux endroits de la planète.

## II-2-Enjeu industriel des énergies marines

La complexité en termes de coût et d'accessibilité des énergies marines fait que leur exploitation concerne principalement les grands acteurs industriels. Néanmoins, la réalisabilité des systèmes doit répondre à des critères liés au coût d'investissement, à la rentabilité ainsi qu'aux éventuels risques industriels pouvant être rencontrés. C'est la raison pour laquelle les bailleurs de fond et les établissements prêteurs exigent un montage financier qui prend en compte tous ces facteurs, avant d'accorder un financement du projet à hauteur de 75 à 80 % des dépenses d'investissement (CAPEX : *capital expenditure*), les 20

à 25 % restantes sont apportés par les associés [10]. Dans ce contexte, les PME et PMI seront chargés de délivrer des fournitures et prestations en tant que sous-traitant [10].

Les coûts de construction des installations de production d'électricité en mer, que ça soit des fermes d'aérogénérateurs, d'hydroliennes, d'houllogénérateurs ou d'autres systèmes s'élèvent généralement à plusieurs millions d'euros. Ainsi, le montage industriel doit être le plus robuste possible de par sa structure, afin d'intégrer les risques liés à l'environnement et aux nouvelles technologies.

### II-3-Contraintes d'exploitation des énergies marines

Parmi les énergies marines, l'énergie hydrolienne, connaît des difficultés d'exploitation malgré de son fort potentiel. En effet il existe un certain nombre de contraintes qui font que son exploitation reste difficile et inaccessible à tous. Parmi celles-ci [10, 14, 15]:

- La contrainte liée à la tenue mécanique des installations en milieu fluide.
- Les contraintes liées à la prévision des aléas météorologiques extrêmes : les mouvements de l'eau sur la turbine sont en effet influencés de manière significative par l'état de la mer sur des sites qui sont pour la plupart de faible profondeur. Il faut alors que les installations soient conçues de façon à pouvoir résister à des états de mer extrêmes pour que l'énergie puisse être exploitée à long terme.
- Les contraintes liées à l'accessibilité : La maintenance ou l'installation des hydroliennes nécessite la présence de personnels et de moyens techniques et l'accès en toute sécurité au site est souvent rendu impossible par la valeur des courants de marées ou les conditions météorologiques.

### II-4-Comparaison entre l'hydrolienne et l'éolienne

Le principe d'une hydrolienne repose sur le fait de transformer l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux en énergie électrique [10, 16]. Ce qui rejoint le principe d'une éolienne à l'exception de la nature de source d'énergie primaire qui est le vent pour cette dernière.

Il est à noter que l'énergie hydrolienne est sensiblement moins diffuse que l'énergie éolienne car si l'on compare la taille d'une turbine éolienne avec celle d'une turbine hydrolienne de même puissance, on constate que du fait de la forte densité de l'eau par rapport à l'air, le diamètre de la turbine hydrolienne est beaucoup plus petit que celle de la turbine d'une éolienne, comme illustré à la Figure 1 tirée de [11] . Cette comparaison est effectuée en inversant l'équation (1.1) qui permet de calculer la puissance extraite par une turbine (éolienne ou hydrolienne).

$$P = \frac{1}{2} * \rho * C_p * A * V^3 \quad (1.1)$$

Avec :

$\rho$  : la densité du fluide

$C_p$  : le coefficient de puissance

$A = \pi R^2$  : la section de la turbine (avec R le rayon des pales de la turbine)

$V$  : la vitesse du fluide (ou du vent)

Les valeurs choisies pour cette comparaison ( $V$  et  $C_p$ ) sont des valeurs classiques associées à des turbines à axe horizontal pour  $C_p$  et à des sites d'exploitation hydroliens et éoliens typiques pour  $V$ .



Figure 1: Comparaison d'une turbine hydrolienne à une turbine éolienne pour une puissance de 1 MW tirée de [11]

## II-5-Choix technologique et stratégie de production pour des hydroliennes robustes

La mise en place d'une installation hydrolienne nécessite une étude préalable du site pour en évaluer ses potentialités et son aptitude à rentabiliser l'investissement envisagé [10, 16].

En outre, dans la mesure où il est requis de minimiser les systèmes mécaniques, dans une optique de tolérance aux défauts, l'utilisation d'une MSAP (Machine Synchrone à Aimants Permanents) avec un convertisseur à IGBT associée en entraînement direct à une turbine à pas fixe semble s'avérer un choix intéressant en termes de compromis coût/robustesse. Cependant le fait de ne pas avoir de contrôle de pas impose que l'ensemble de la stratégie de contrôle de la turbine soit assurée par le pilotage du convertisseur et de la génératrice. Il est alors possible d'extraire, pour les faibles valeurs de courant marin, le maximum de la puissance extractible en pilotant la turbine en vitesse variable la turbine au point de puissance optimale (MPPT). Pour les fortes valeurs de courant (au-delà de la valeur nominale) on peut appliquer une stratégie de limitation de puissance en pilotant la turbine en survitesse par rapport au point optimal de manière à se limiter à la puissance nominale. Nous supposons pour la suite de l'étude que cette solution technologique associée à cette stratégie, qui est détaillée dans [17-19] et qui sera rappelée plus en détail au cours du chapitre IV, est utilisée. Cette solution impose alors, afin d'appliquer une stratégie d'extraction optimale avec limitation de puissance de pouvoir suivre une caractéristique couple vitesse particulière au niveau de l'ensemble convertisseur/machine. Cette caractéristique comprend un mode de survitesse de type défluxage sur une large plage de fonctionnement. Cette caractéristique constitue alors un des principaux éléments du cahier des charges associé au dimensionnement de l'ensemble convertisseur/génératrice.

Dans ce cas, il est également important d'anticiper un éventuel fonctionnement en mode dégradé. Pour cela il est nécessaire de baser sur des études faites sur la fréquence et la nature des défauts.

## II-6-Etude sur les natures et les fréquences des défauts dans les systèmes d'exploitation des énergies marines

Les études statistiques sur les natures et les fréquences des défauts dans les systèmes d'extraction des énergies marines ont une importance capitale dans la mesure où elles donnent des informations sur la fiabilité des systèmes. Ces études ont surtout été faites sur les systèmes éoliens offshore dans certains pays d'Europe. Les études faites dans [2] sur des parcs éoliens en Suède de 1997 à 2005, quantifient les natures et fréquences des défauts mécaniques. Elles révèlent que le multiplicateur de vitesse est une des parties de la chaîne de conversion qui cause le plus de panne. C'est la raison pour laquelle nous avons considéré un système à entraînement direct dépourvu de multiplicateur (exemples du chapitre IV) ou avec un multiplicateur de faible rapport et donc a priori plus fiable et nécessite moins de maintenance.

Outre ces défauts liés aux parties mécaniques, le défaut peut provenir de l'échauffement des composantes principales de la chaîne de conversion, comme le montre [20]. Dans cet article, une étude statistique est faite sur la probabilité d'apparition des défauts liés à l'échauffement au niveau du multiplicateur de vitesse, de la machine et du convertisseur. Ensuite, une analyse est faite sur le niveau de criticité des défauts, permettant d'identifier les parties qui requièrent une attention particulière si on veut assurer une continuité de service. Dans la mesure où il est considéré que le système est à entraînement direct, des mesures préventives doivent être portées sur la génératrice et le convertisseur.

Un défaut pourrait également provenir du système électrique, à savoir les composantes électriques de la machine et du convertisseur statique. Du côté de la machine, le défaut peut être lié à un court-circuit interne des enroulements statoriques, à une démagnétisation, ou à d'autres défauts. Du côté du convertisseur, il est soit lié à la structure de puissance qui se matérialise par une absence de commutation des composants de puissance (défaut d'ouverture ou défaut de fermeture d'un interrupteur), soit lié à une panne électrique de l'élément de la structure de commande (commande temps réel).

Un autre type de défaut est lié aux capteurs. Ce type de défaut peut conduire à une mesure erronée perturbant ainsi la commande de la chaîne électromécanique [21].

Des analyses ont été faites sur les taux de défaillances qui prennent en compte les types de pannes précités (en dehors de celles liées à la machine). Les références [22] et [23] se basent sur des études statistiques sur les composants électriques fait dans [24] et [25] pour étudier la tolérance aux défauts d'ensembles convertisseurs-machines. Ces études ont permis de dresser les Table 2 et Table 3 qui analysent les taux de défaillance des composants de la chaîne de conversion.

Table 2 : Analyse des taux de défaillance dans les systèmes à entraînements variables [22]

Composants	Taux de défaillance (%)
Interrupteurs de puissance	38
Circuit de commande	53
Circuits auxiliaires	9

Table 3: Analyse des taux de défaillance dans les alimentations à découpage, tiré de [22]

Composants	Taux de défaillance (%)
Condensateurs	60
Transistors de puissance	31
Diodes	3
Autres	6

La référence [26] évalue la fiabilité de systèmes électriques associées à des composants d'électronique de puissance. Dans [27], il est présenté les méthodes de diagnostics et de protection des IGBT d'un convertisseur triphasé face à des défauts de type court-circuit ou circuit ouvert. Dans [28] une étude a été faite, basée sur un questionnaire chez des industries dans différents secteurs (automobile, conversion d'énergie, ...), sur les attentes sur la fiabilité des composants d'électronique de puissance.

Les défauts dans les chaînes de conversion dans les systèmes à énergie renouvelable peuvent être diverses et variés comme précédemment développé. Dans ce mémoire, nous ne nous intéressons qu'aux défauts liés au système électrique. L'analyse de ces taux de défaillance a permis d'envisager des structures d'ensembles convertisseurs machines tolérants aux défauts, détaillées dans [21].

### **III-Etude des ensembles convertisseurs-MSAP tolérants aux défauts électriques**

Les défauts les plus courants que l'on retrouve dans la littérature, tel que décrit dans [23, 29-33] , peuvent être listés comme suit :

- Défaut d'ouverture d'un IGBT, qui reste fermé en continu et risque de créer un court-circuit entre phases
- Défaut de fermeture d'un IGBT, qui reste ouvert en continu et risque de créer un circuit ouvert au niveau de la machine
- Court-circuit interne des enroulements de la machine (court-circuit d'une ou plusieurs spires d'une phase, court-circuit d'une phase, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et carcasse, etc.)
- Déconnection d'une phase de l'alimentation

Afin de pouvoir anticiper sur une éventuelle apparition de l'un de ces défauts, surtout ceux liés au convertisseur, il faut envisager une structure d'ensemble convertisseur-machine qui puisse fonctionner malgré l'apparition de défaut. Pour cela, il faut une reconfiguration du système qui peut être soit :

- Matérielle, ce qui veut dire qu'il faut une structure redondante de convertisseur qui puisse envisager un remplacement de l'élément défectueux

- Logicielle, qui consiste à identifier le défaut et à reconfigurer la structure de commande de telle sorte que le défaut soit le moins perturbateur possible

La première option a permis de faire une étude sur les ensembles convertisseurs-machines envisageables pour assurer la redondance. La deuxième option permet de justifier encore le choix de structures polyphasées afin d'avoir plus de degrés de libertés pour la reconfiguration en cas de défaut. Néanmoins, malgré le fait que cette possibilité de reconfiguration offre des solutions de redondance, elle complexifie le système en augmentant les composants d'électronique de puissance, et donc augmente la probabilité d'apparition de défaut.

### III-1-Architectures de convertisseurs tolérants aux défauts

Parmi les architectures de convertisseurs tolérants, on s'intéresse à ceux qui permettent un remplacement de l'élément de puissance défectueux, par duplication des éléments du convertisseur. Mais aussi, dans la mesure où la gestion d'une phase ouverte est moins délicate que celle d'un court-circuit, on s'intéresse aux architectures de convertisseurs qui visent à isoler une phase en défaut étudiés dans [21] et [34]. Par exemple, une des stratégies, dont le schéma de principe est explicité par la Figure 2, est détaillée dans [35].

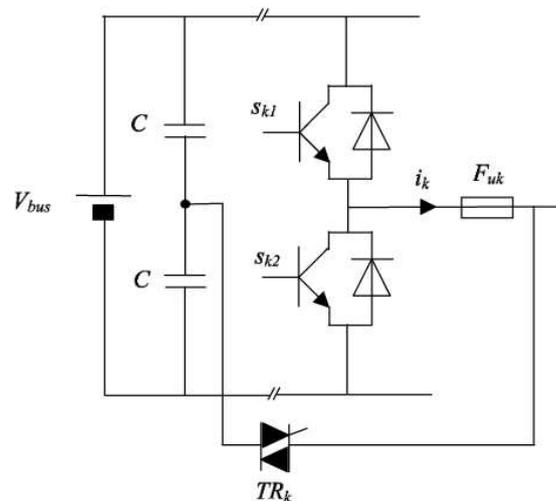


Figure 2: Exemple d'équipement permettant la déconnection d'une phase en défaut tirée de [34]

Le principe est que lorsqu'un défaut d'ouverture apparaît sur l'un des interrupteurs du bras numéro  $k$ , que le triac soit commandé en fermeture, entraînant le court-circuit d'un des condensateurs du bus continu et donc la fusion du fusible [21, 34].

Un autre exemple de stratégie d'isolation d'une phase en défaut est explicité dans [36]. Cette stratégie d'isolation illustrée par la Figure 3, consiste à déclencher simultanément les deux thyristors, faisant ainsi fondre les deux fusibles.

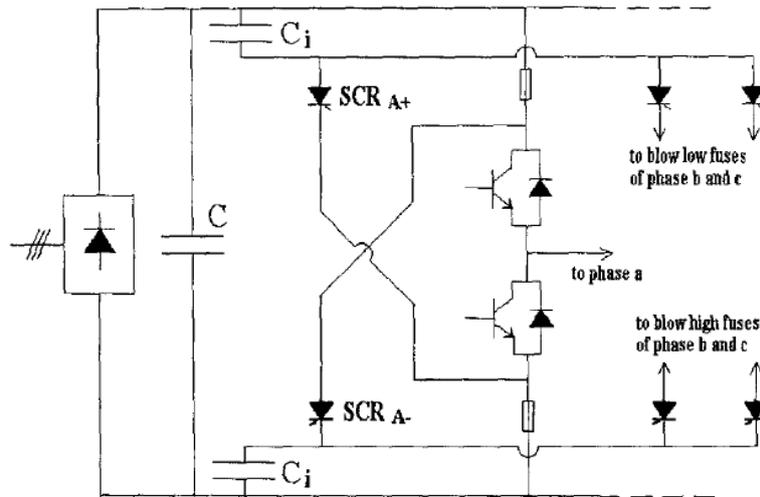


Figure 3:Exemple d'équipement permettant la déconnection d'une phase en défaut tirée de [36]

D'autres architectures ont également été proposées dans [31], qui se basent sur le principe selon lequel, les interrupteurs utilisés ont une bonne tenue en court-circuit. Le principe en est que lorsqu'un court-circuit apparaît sur un des interrupteurs, que l'interrupteur complémentaire soit commandé en fermeture, de manière à créer un court-circuit permettant ainsi la fusion des fusibles. Mais, pour cette solution, il faudrait que le temps de réponse du fusible soit de telle sorte qu'il réagisse avant que le court-circuit ne dégrade les composants.

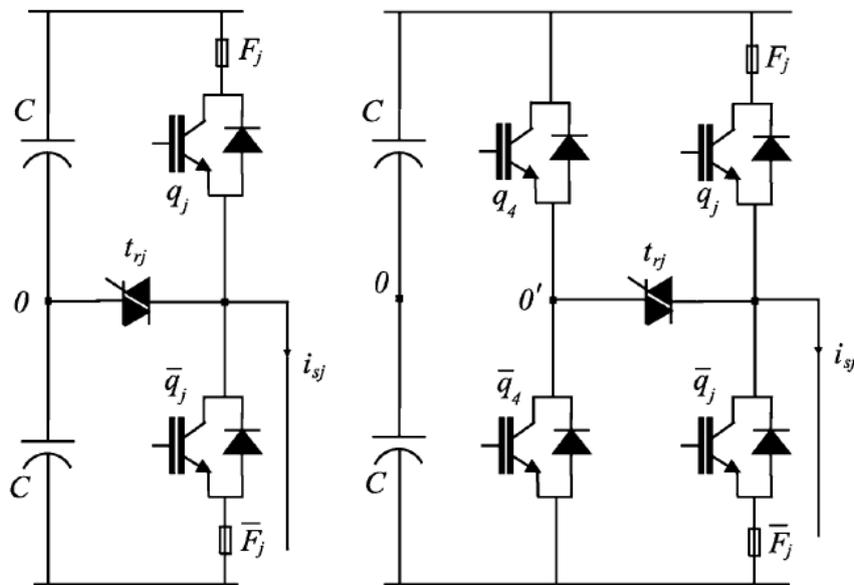


Figure 4:Exemple d'équipement permettant la déconnection d'une phase en défaut tirée de [31]

Ces stratégies qui visent à isoler les phases en défaut sont applicables sur des structures à phases régulièrement réparties (structures à 5 phases par exemple) où les stratégies de commande en modes dégradés sont basées sur l'isolement de la phase en défaut. Le contrôle des courants dans les phases saines, est alors susceptible de compenser partiellement cette perte de phase en termes de performance.

## **III-2-Etude des MSAP tolérants aux défauts**

La machine synchrone à aimants permanents utilisées dans la chaîne de conversion doit être conçue de telle sorte qu'un fonctionnement en mode dégradé puisse être envisagé. Dans un premier temps, le choix est porté sur les machines polyphasées et multi-étoiles dans un souci d'assurer la redondance en cas de défaut sur une phase, permettant ainsi un fonctionnement avec les phases restantes. Les avantages des machines polyphasées sur les machines triphasées classiques reposent non seulement sur la possibilité de fonctionner en modes dégradés, mais aussi, sur le fractionnement de la puissance par composant qui peut être un point fondamental pour les applications de grande puissance à faible vitesse comme les systèmes hydroliens.

Certains auteurs proposent des structures de MSAP, tolérantes aux défauts de type « phase ouverte ». C'est le cas de l'étude faite dans [37] sur une MSAP polyphasée pour des applications liées aux véhicules hybrides. Une autre étude est proposée dans [38] sur la tolérance aux défauts liés aux ouvertures de phases, d'une MSAP de propulsion. Dans [39] une étude est faite sur le comportement de machines polyphasées vis-à-vis des défauts. Cette étude a permis de faire une conclusion sur l'aptitude à fonctionner en défaut, de machines à 7 phases.

Nous avons fait le choix d'étudier des structures à bobinage concentré, ce qui se justifie par des avantages liés à la taille des têtes de bobines, à la capacité de fonctionnement en vitesse variable et au couple volumique [40].

Hormis les contraintes liées à la structure de la machine, la capacité de fonctionnement en modes dégradés est également liée à la stratégie de commande adoptée. En effet, cette stratégie de commande a pour objectif de piloter les courants des phases restantes de la machine en cas de défaut, de manière à minimiser voire annuler les effets négatifs du défaut sur le fonctionnement de la machine.

## **IV-Analyse des stratégies de commande en modes dégradés des MSAP**

### **IV-1-Stratégies de commandes en modes dégradés de MSAP triphasées**

De nombreuses stratégies de commandes en modes dégradés de MSAP triphasées sont proposées dans la littérature. Une des solutions est de dupliquer le convertisseur et de fractionner la machine en plusieurs étoiles triphasées [41-43]. Cependant cette solution implique d'avoir un grand nombre de composants d'électronique de puissance.

Une autre solution est proposée dans [44] qui consiste soit à prévoir sur le convertisseur, un bras supplémentaire connecté au neutre soit à avoir un convertisseur reconfigurable en cas de défaut de telle sorte que le courant de neutre puisse avoir une valeur non nulle (Figure 5 et Figure 6). Cette technique permet d'avoir un degré de liberté supplémentaire afin de pouvoir minimiser les ondulations de couple en cas de défaut. Une méthode similaire est

proposée dans [45]. Mais il faut dans ce cas veiller à ce que l'inductance homopolaire soit assez élevée pour éviter l'apparition de courants « parasites » dus à la modulation. Cependant, il est à noter que la structure présentée à la Figure 6 nécessite que les tensions des deux condensateurs soient équilibrées.

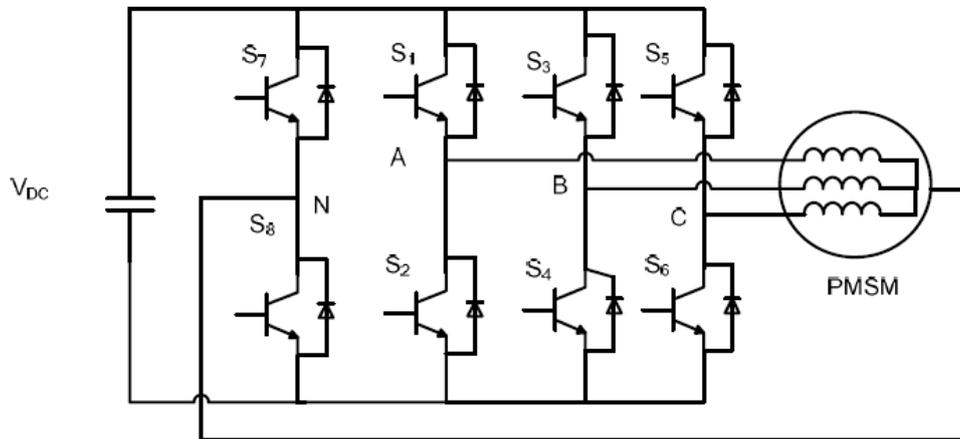


Figure 5: Association d'un convertisseur à 4 "bras" et MSAP triphasée tirée de [44].

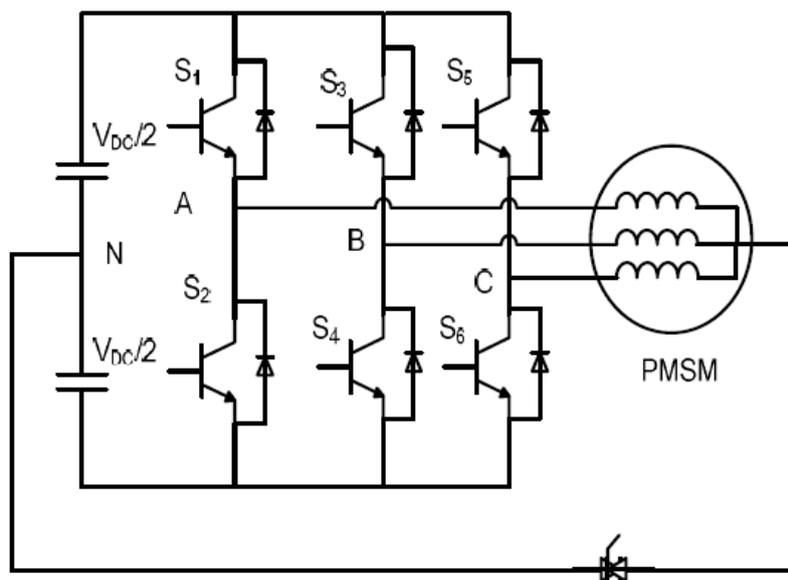


Figure 6: Association d'un convertisseur à 3 "bras" et accès du neutre au bus dc et MSAP triphasée tirée de [44].

La référence [46] fait une étude des stratégies de commande en mode dégradé, en vitesse variable d'une MSAP triphasée associée à un convertisseur en ponts en « H » indépendants, tel que le montre la Figure 7. A partir du moment où le circuit homopolaire entre en jeu dans le fonctionnement général de la machine, les stratégies de commande conventionnelles ne sont pas appropriées pour ce genre de système, une nouvelle stratégie est proposée, qui est basée sur une modulation des vecteurs d'espace permettant de prendre en compte les amplitudes et les phases des harmoniques de tension.

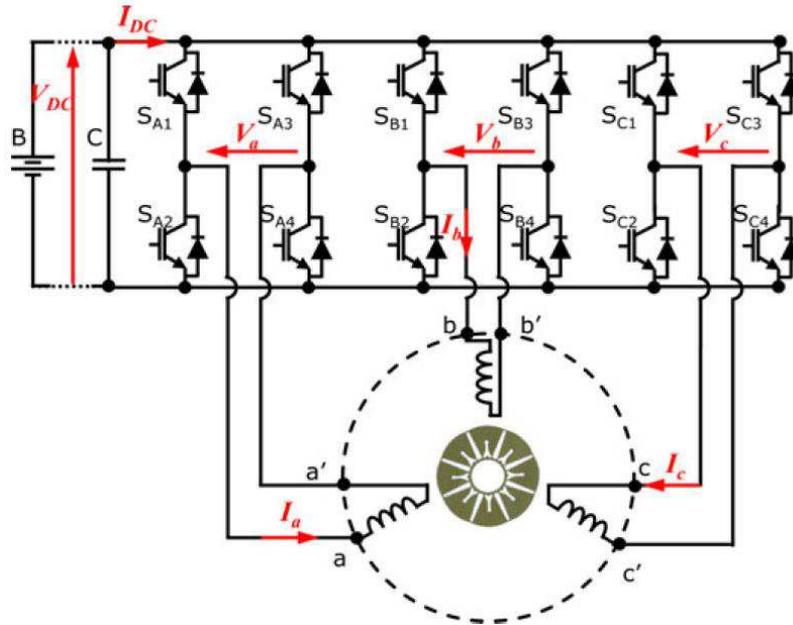


Figure 7: Association d'un convertisseur en ponts en « H » et MSAP triphasée tirée de [46].

Dans [47], il est étudié un système particulier, appliqué à des applications liées aux véhicules hybrides, avec deux convertisseurs électriquement isolés, chacun relié à une extrémité des phases de la machine, comme le montre la Figure 8. Ainsi, par un contrôle individuel des convertisseurs, il est possible de commander simultanément la puissance de la machine et le flux d'énergie entre les deux convertisseurs. Ce type de système serait envisageable pour un fonctionnement en mode dégradé (surtout en cas de court-circuit d'un transistor de l'onduleur) étant donné que chaque phase de la machine est pilotée sans aucune liaison avec les autres phases.

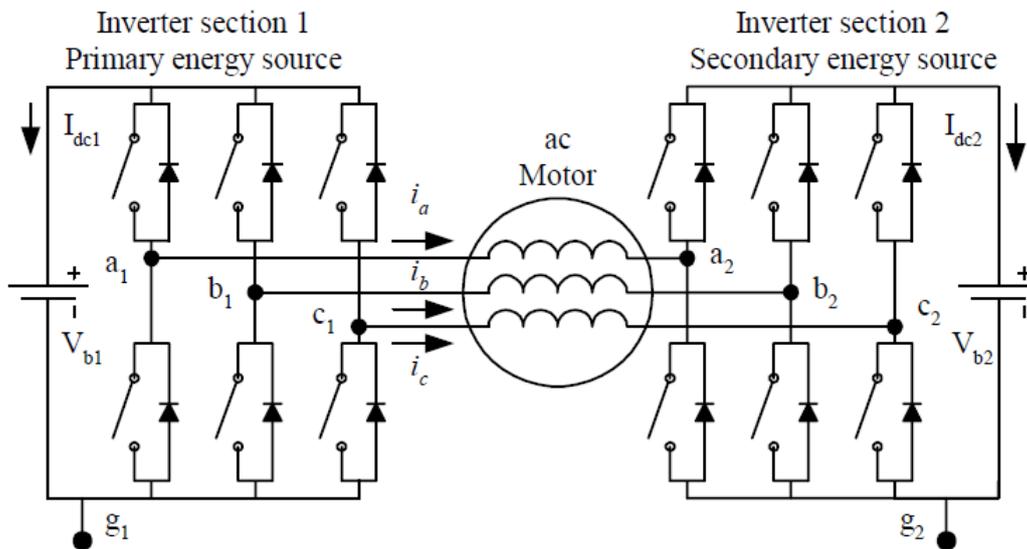


Figure 8: Alimentation d'une machine triphasée avec deux convertisseurs, une à chaque extrémité des phases [47].

## **IV-2-Stratégies de commandes en modes dégradés de MSAP polyphasées**

Comme expliqué précédemment, le choix de structures polyphasées est essentiellement justifié dans le cadre de notre étude par l'idée de vouloir augmenter la tolérance aux défauts. [48-50]. En cas de défaut, l'objectif est de garder un couple constant tout en gardant des performances assez satisfaisantes en termes d'extraction de puissance. Cet aspect est très important dans les systèmes tels que les systèmes hydroliens, les systèmes éoliens, ou encore les véhicules électriques. Dans les systèmes d'extraction d'énergies renouvelables offshores, où dans les systèmes embarqués un système tolérant aux défauts permettrait de fonctionner même en cas de défaut lié au convertisseur (dans le cas d'une hydrolienne de continuer à produire de l'énergie).

Certains travaux proposent d'utiliser des systèmes polyphasés afin d'en augmenter la fiabilité fonctionnelle [51-56]. En particulier, des systèmes à 5 phases et à 7 phases ont été étudiés en modes dégradés. Les auteurs ont démontré qu'il était possible d'obtenir un couple électromagnétique constant en appliquant la bonne stratégie de commande sur les courants de phases, si le défaut est détecté et identifié. Plusieurs stratégies de commandes ont été proposées dont le principe repose sur le calcul de courants optimaux qui visent non seulement à garder le couple électromagnétique constant mais aussi visent à maximiser le rapport couple sur pertes par effet Joule. L'une de ces stratégies de commande est basée sur le multiplicateur de Lagrange [4, 57, 58]. Une approche vectorielle est proposée dans [55, 59]. Dans [57] et [60] une méthode basée sur une représentation géométrique permet d'obtenir des courants optimaux en mode sain et en modes dégradés. Une approche numérique est utilisée dans [52] où des commandes tolérantes aux défauts, pour différentes connexions des enroulements du stator, sont proposées. Ces commandes ont pour principe de calculer des courants optimaux capables de minimiser les pertes cuivre et les pulsations de couple. Dans [61] une forme d'onde optimale de courant vise à annuler les ondulations de couples et à minimiser les pertes cuivres en mode dégradé, d'une MSAP à pôles lisses, avec chacune des phases alimentées par des ponts en « H ». Une stratégie de contrôle dont l'objectif est de maintenir constant le couple électromagnétique, en cas de défaut asymétrique, en utilisant une transformation en grandeurs constantes des harmoniques des courants et FEM qui contribuent au couple, est présentée dans [62].

La stratégie de commande en mode dégradé proposée dans [21] est basé sur un calcul des courants sur la base d'une modification des matrices de transformation. Ensuite, pour assurer le suivi de consigne de ces courants, des régulateurs PI sont utilisés dans la boucle de commande.

Dans certaines des approches citées précédemment, la valeur du courant crête en mode dégradé n'est pas considérée comme une contrainte. Toutefois, cette valeur crête du courant est un paramètre clé pour le dimensionnement et le coût du convertisseur. En conséquence de quoi, les approches proposées sans tenir compte de cette contrainte peuvent induire un surdimensionnement du convertisseur. Par ailleurs, la principale limite des méthodes proposées est que les limites en tension et en courant liées au convertisseur/machine ne sont pas prises en compte. Dans le contexte applicatif de notre étude, la stratégie de contrôle de la turbine impose d'appliquer une stratégie de commande par défluxage pour satisfaire les contraintes en tension de l'ensemble convertisseur-machine. Ce type de

conditions de fonctionnement sont retrouvées dans les applications liées aux véhicules électriques et hybrides (véhicules terrestres et navires) et celles liées aux énergies renouvelables qui sont caractérisées par une large plage de vitesse de fonctionnement.

Dans la référence [55], une stratégie de commande en modes dégradés est appliquée à une MSAP axiale à 7 phases, où les courants dans les bases fictives sont constants. Cette stratégie de commande permettrait un fonctionnement en vitesse variable, de par sa possibilité de permettre une commande par défluxage. Les modes dégradés considérés sont une ou deux phases en défaut. La structure de commande repose sur le principe décrit par la Figure 9.

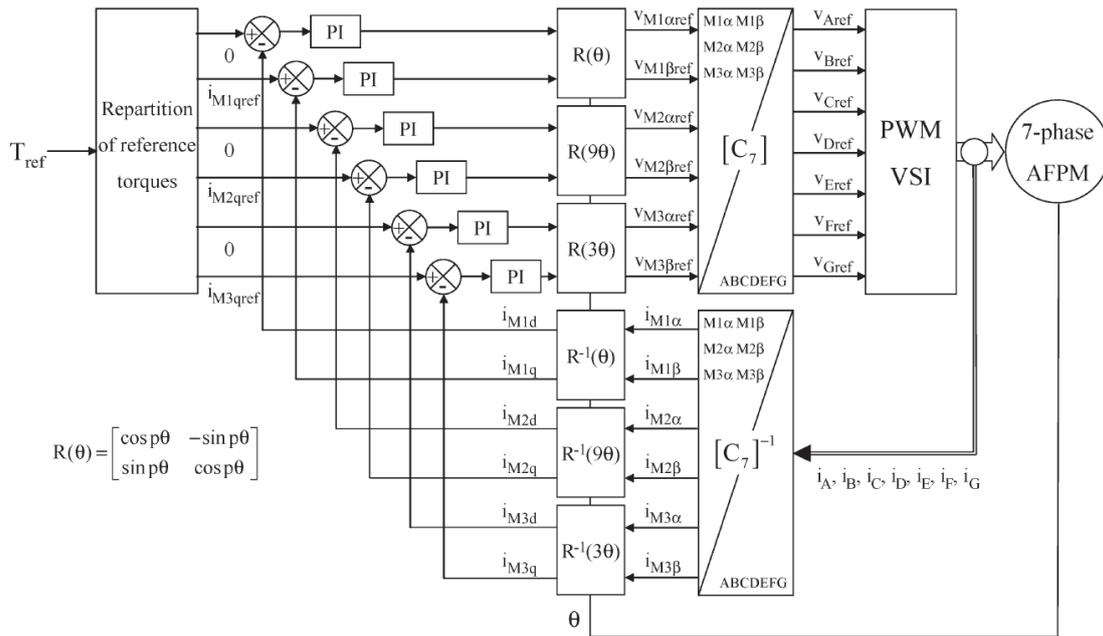


Figure 9: Structure de commande en vitesse variable d'une MSAP à 7 phases

Dans [54, 63], il est étudié une structure de MSAP associée à deux convertisseurs indépendants (une à chaque extrémité des phases), comme le montre la Figure 10. Le but est de faciliter la reconfiguration en cas de défaut sur une phase.

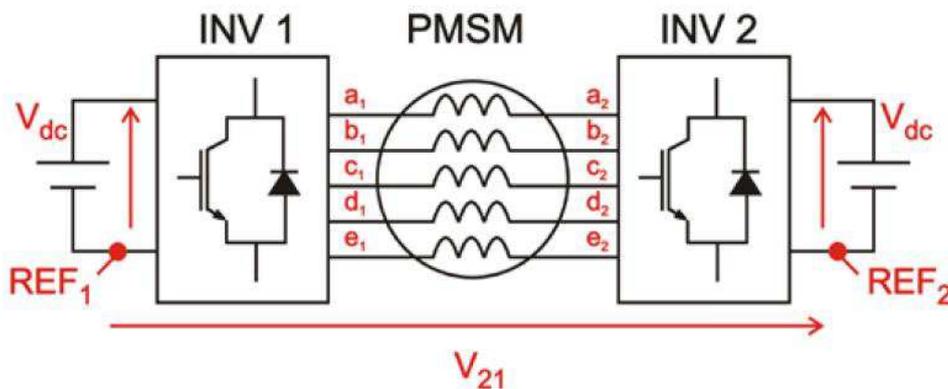


Figure 10:Alimentation d'une machine pentaphasée avec deux convertisseurs, une à chaque extrémité des phases [54]

Cette même structure a été étudié dans [64], qui traite le fonctionnement en vitesse variable en fonction du couplage des enroulements des phases. Ces couplages (étoile, pentagone et pentacle) sont faits grâce au pilotage des deux convertisseurs.

## **V-Conclusion**

Ce chapitre a tout d'abord été consacré à un état de l'art sur les énergies renouvelables marines. Pour cela, le contexte global de l'exploitation de ce type de ressource a été analysé. Nous nous sommes ensuite intéressés aux systèmes hydroliens. L'analyse des contraintes liées à la difficulté d'accès aux machines et à la compacité nous a conduits à concentrer notre étude sur une option technologique basée sur l'association de turbines à pas fixe associées à des Machines synchrones à Aimants Permanents (MSAP polyphasées) à bobinages concentrés pour la génératrice. Dans ce cas nous avons opté pour une stratégie d'extraction de puissance avec une limitation de puissance par survitesse. Cette stratégie conduit à utiliser la génératrice à puissance constante sur une plage de vitesse en mode de survitesse par défluxage ce qui impose de pouvoir suivre une ensemble spécifique de points de fonctionnement dans le plan couple vitesse. Ceci impose des contraintes particulières sur le dimensionnement de l'ensemble convertisseur machine (caractéristique couple vitesse).

Ensuite, dans la mesure où un système tolérant aux défauts est requis, des investigations ont été menées sur l'ensemble convertisseurs-machines capables de par leur structure, de fonctionner en mode dégradé. Nous nous sommes en particulier intéressés aux systèmes polyphasés à phases réparties et aux systèmes triphasés multi-étoile qui nous semblent bien répondre aux exigences du contexte applicatif. Etant donné que la plupart des pannes sont liées au convertisseur et qu'il existe des stratégies qui conduisent, dans ce cas, à l'isolement d'un « bras » de convertisseur, les défauts considérés dans cette étude sont ceux liés à une ouverture de phase.

Si des stratégies de commande pour la gestion de ce type de défaut dans des machines polyphasées ont été étudiées dans la littérature, il n'existe à notre connaissance que peu d'études qui se sont intéressés au fonctionnement en défaut de ces systèmes polyphasés en vitesse variable et en particulier à la prise en compte des limitations des valeurs de courant et de tension liées au dimensionnement du convertisseur lors des fonctionnement aux vitesses rapides. C'est pourquoi le chapitre suivant sera consacré à l'étude des stratégies de commande et des capacités de fonctionnement en vitesse variable de structures de MSAP multi-étoiles et polyphasées à phases réparties (nous nous intéresserons au cas des machines à 5 phases) avec prises en compte des contraintes électriques liées au convertisseur.