

I.1. Introduction :

En raison de la fiabilité et segmentation de puissance, les machines multiphasées sont de plus en plus utilisées dans les applications électriques de forte puissance et les domaines exigeant une excellente continuité de service. Dans le présent chapitre, nous allons présenter des généralités sur la machine à induction polyphasée. Ensuite nous discutons la modélisation de ces machines et leurs commandes. En outre nous mettons l'accent sur le concept de la commande tolérante aux défauts appliqué à ce type de machines toutefois nous concentrons plus spécialement sur la machine pentaphasée.

I.2. Structures des machines multiphasées :

Comme les machines tournantes classiques les machines multiphasées comprennent deux parties :

- Une partie immobile au forme cylindrique creuse appelée stator qui se trouve dans une carcasse formant la partie extérieure de la machine, elle contient des enroulements couplés au réseau électrique ou au convertisseur statique.
- Une partie tournante au forme cylindrique calée sur un arbre est appelée rotor. Elle est formée par des enroulements raccordés sur eux-mêmes [3].

I.2.1. Constitution du stator :

L'enroulement statoriques doit être constitué de façon à permettre d'utiliser au mieux la circonférence du stator d'obtenir un flux maximum pour une dépense minimale de la force magnétique motrice et d'atteindre autant que possible une répartition sinusoïdale du champ magnétique suivant la circonférence du stator. Pour vérifier la première exigence, il est rationnel de répartir chaque côté des bobines de l'enroulement dans plusieurs encoches. Chaque bobine est devisée en section, comme elle comprend plusieurs spires [3].

I.2.2. Constitution du rotor :

Le rotor est le même que celle de la machine asynchrone rotorique, où on peut distinguer :

- **Rotor bobiné** : construit de la même manière que le bobinage statoriques.
- **Rotor a cage d'écureuil** : constitué par des barres en cuivre ou en cuivre d'aluminium[3].

I.3. Intérêt des machines multi-phases :

Les machines à nombre de phases élevés possèdent plusieurs avantages par rapport aux machines à trois phases parmi lesquelles nous pouvons citer :

I.3.1. Segmentation de puissance :

Par l'augmentation du nombre de phases, la puissance est automatiquement augmentée. L'une des solutions pour réduire les courants de phases sans réduire les tensions d'alimentations ; est d'augmenter le nombre de phases statoriques, la puissance totale demandée par la machine est alors réduite dans chaque phase [4].

I.3.2. La fiabilité et le degré de liberté :

Par contre des machines triphasées, avec les machines ayant une structure multiphasée les contraintes liées un régime dégradé peuvent être réduites tant qu'au moins trois phases de l'ensemble convertisseurs machines restent saines, en plus la structure multiphasée offre un nombre de degrés de liberté supérieur à celui de la structure triphasée[3] [4].

I.3.3. Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques :

Généralement la structure triphasée est mal adaptée à cause de l'ondulation importante sur le couple électromagnétique. Néanmoins, pour la structure double étoile avec un décalage électrique de 30° le contenu spectral du couple se réduit[3].

La première composante harmonique se voit à la fréquence $12fs$. Donc l'ondulation du couple électromagnétique est plus faible que celle de la machine triphasée. Ce qui provoque une amélioration des caractéristiques bruit vibration, en plus et pratiquement une machine multiphasée a des pertes rotoriques moindre qu'une triphasés[4].

I.3.4. L'augmentation du couple massive :

Basant sur une proposition d'exploiter l'harmonique d'ordre trois de force magnétomotrice pour augmenter le couple. L'étude a été expérimentalement validée, où on note une augmentation de 40% du couple et 21% de densité de flux par rapport à la machine triphasés équivalente[3]

I.4. Application des machines multiphasée :

Les machines multiphasée sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissance élevées, par exemple les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins...etc [4].

Une autre application concerne l'utilisation des machines multiphasée dans les systèmes de production de l'énergie éolienne.

I.5. Modélisation des machines à induction multiphasée :

La théorie générale des machines électriques fournit des moyens suffisants pour traiter une représentation mathématique d'une machine à induction dont le nombre de phases est supérieure à trois sur le stator et le rotor. Elle peut également modéliser efficacement ces machines avec une répartition sinusoïdale sur les enroulements ou une répartition dite concentrées, où l'on doit tenir compte des harmoniques spatiales plus élevées de la force magnétomotrice.

Dans ce travail nous considérons les machines à induction multiphasée dont le déphasage entre deux successives de stator soit égal $\alpha = \frac{2\pi}{n}$, la répartition de FMM sur les enroulements du stator est sinusoïdale, le nombre de phase peut être pair ou impair et les enroulement sont connectés en étoile. D'une manière générale le modèle de machine sous forme originale (abs) est transformé à l'aide de la matrice de transformation de découplage (Clarke) [7], qui remplace les n variables originales par nouvelles variables. La matrice de transformation de découplage pour un nombre de phase arbitraire n peut être donnée comme suit :

$$c = \sqrt{\frac{2}{n}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos 2\alpha & \cos 3\alpha & \dots & \cos 3\alpha & \cos 2\alpha & \cos \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha & \sin 3\alpha & \dots & -\sin 3\alpha & -\sin 2\alpha & -\sin \alpha \\ 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha & \cos 6\alpha & \dots & \cos 6\alpha & \cos 4\alpha & \cos 2\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha & \sin 6\alpha & \dots & -\sin 6\alpha & -\sin 4\alpha & -\sin 2\alpha \\ 1 & \cos 3\alpha & \cos 6\alpha & \cos 9\alpha & \dots & \cos 9\alpha & \cos 6\alpha & \cos 3\alpha \\ 0 & \sin 3\alpha & \sin 6\alpha & \sin 9\alpha & \dots & -\sin 9\alpha & -\sin 6\alpha & -\sin 3\alpha \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \cos 2\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \cos 3\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \dots & \cos 3\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \cos 2\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \cos\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \sin 2\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \sin 3\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & \dots & -\sin 3\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & -\sin 2\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) & -\sin\left(\frac{n-2}{2}\alpha\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & \dots & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & \dots & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Avec $\alpha = \frac{2\pi}{n}$.

Les deux premières rangées de la matrice de Clark définissent les variables qui conduiront à une production fondamentale de flux et de couple (le couplage stator to rotor apparaît uniquement dans les équations pour les composants $(\alpha - \beta)$ [7]. Les deux dernières lignes définissent les deux composants homopolaires et si le nombre de phase est impair la dernière ligne de la matrice doit être enlevée.

Les autres rangées qui sont défini par $(n-4) / 2$ (ou $(n-3) / 2$ pour n est impair) termes représentent les composantes x-y.

Les équations de composants x-y sont totalement découplées de tous les autres composants même dans le couplage stator-rotor [7]. Ces composants ne contribuent pas à la production de couple lorsqu'on suppose que la distribution du flux est sinusoïdale autour de l'entrefer.

Étant donné que l'enroulement du rotor est court-circuité, il ne peut y avoir de composants x-y ni de séquence nulle, et il faut seulement tenir compte des équations $\alpha - \beta$ de l'enroulement du rotor.

Comme le couplage stator to rotor ne se fait que dans les équations $\alpha - \beta$, la transformation en rotation est appliquée uniquement à ces deux paires d'équations. Sa forme est identique à celle d'une machine triphasée. En supposant que les équations de la machine sont transformées en un cadre de référence arbitraire tournant à la vitesse angulaire ω_s , le modèle d'une machine à induction en phase n avec une distribution d'enroulement sinusoïdale est donné :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_a \psi_{qs} + p\psi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_a \psi_{ds} + p\psi_{qs} \\ v_{x1s} = R_s i_{x1s} + p\psi_{x1s} \\ v_{y1s} = R_s i_{y1s} + p\psi_{y1s} \\ v_{x2s} = R_s i_{x2s} + p\psi_{x2s} \\ v_{y2s} = R_s i_{y2s} + p\psi_{y2s} \\ \dots \\ v_{0+s} = R_s i_{0+s} + p\psi_{0+s} \\ v_{0+s} = R_s i_{0+s} + p\psi_{0+s} \\ v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - (\omega_a - \omega) \psi_{qr} + p\psi_{dr} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} - (\omega_a - \omega) \psi_{dr} + p\psi_{qr} \end{array} \right. \quad (\text{I. 1})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{ds} = (L_{1s} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = (L_{1s} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{x1s} = L_{1s} i_{x1s} \\ \psi_{y1s} = L_{1s} i_{y1s} \\ \psi_{x2s} = L_{2s} i_{x2s} \\ \psi_{y2s} = L_{2s} i_{y2s} \\ \dots \\ \psi_{0+s} = L_{1s} i_{0+s} \\ \psi_{0-s} = L_{1s} i_{0-s} \\ \psi_{dr} = (L_{1r} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = (L_{1r} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs} \end{array} \right. \quad (I. 2)$$

Les indices s, r identifient respectivement les variables du stator et du rotor. R et L représentent respectivement les résistances et les inductances. i , v et ψ représentent les courants, tensions et les flux .L'équation de couple peut être écrit comme :

$$C_{em} = p L_m [i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr}] \quad (I. 3)$$

Les équations de modèle pour les composants d-q dans (1.1) et (1.2) et l'équation de couple (1.3) sont identiques à celles d'une machine à induction triphasée. Cela signifie que, en principe, les mêmes systèmes de contrôle s'appliqueront aux pour les machines triphasées à induction que aux machines à induction multiphasée [7].

Cependant, les composants x-y correspondent à certaines harmoniques de tension et de courant, dont l'ordre dépend du nombre de phases de stator de la machine. Par conséquent, l'onduleur, utilisé pour une machine à induction polyphasée, ne doit pas produire d'harmoniques de tension de faible ordre qui exciteront le courant harmonique du courant statorique dans les circuits x-y.

Ce problème revêt une importance particulière lors de la réalisation du contrôle PWM de l'onduleur.

I.6. Commande des machines à induction multiphasée :

La commande des machines à induction polyphasées a connu un essor considérable dans les dernières années. Parmi les techniques les plus étudiées c'est l'extension des commandes classiques utilisées pour les machines triphasées telle que la commande vectorielle et commande directe du couple (DTC) [8].

I.6.1. La commande vectorielle à flux orienté FOC :

La stratégie de contrôle la plus courante dans les machines polyphasées est la commande du flux orientés (FOC), qui repose sur plusieurs boucles de contrôle de courant interne avec un contrôleur de vitesse externe superposé. En principe, une machine à n phases avec un seul point neutre nécessite $(n - 1)$ des contrôleurs de courant pour réduire le contenu de courant harmonique de faible ordre en raison de l'asymétrie et de l'inactivité de l'onduleur et pour améliorer l'équilibrage du partage actuel entre les enroulements[9].

Une autre approche de commande vectorielle qui intéresse les chercheurs est liée à l'amélioration et le renforcement du couple, en utilisant l'injection d'harmoniques de faible intensité du courant statorique [10].

I.6.2. La commande directe du couple DTC :

La commande directe du couple apparaît plus difficile dans les cas des machines multiphasée par rapport aux machines triphasées en raison de la nature inhérente de cette commande. Son principe de base repose sur le contrôle de deux grandeurs à savoir le couple et le flux statorique à l'aide des contrôleurs à hystérésis ce qui est naturelle dans le cas de la machine à induction triphasée. Cependant, il existe des différences importantes, principalement causées par l'existence de degrés supplémentaires de liberté dans les machines multiphasées (composants x-y) [9].

En supposant que la machine multiphasée est dotée d'une distribution de force magnétomotrice sinusoïdale, le système DTC doit appliquer des tensions sinusoïdales au bobinage du stator de la machine (négligeant l'ondulation PWM), sans composants de fréquence de faible ordre indésirables qui exciteraient les composants x-y [7].

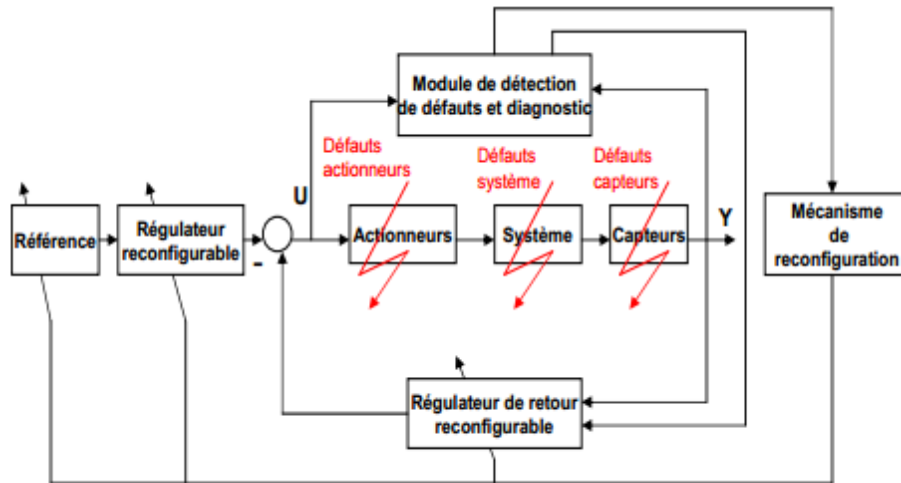
I.6.3. Autres méthodes de commande :

Comme les machines à induction triphasées, plusieurs autres types commandes peuvent être considérés. Parmi ces commandes, on cite la commande prédictive du couple (PTC) qui apparaît un concurrent redoutable a la commande directe du couple (DTC)[9].

I.7. La commande tolérante aux défauts :

La tâche principale qui incombe à la commande tolérante aux défauts est de synthèser des Lois de commande avec une structure permettant de garantir la stabilité et les performances Du système, non seulement lorsque tous les composants de la commande sont opérationnels Mais aussi lorsque des capteurs ou des actionneurs sont défailants [11] [12].

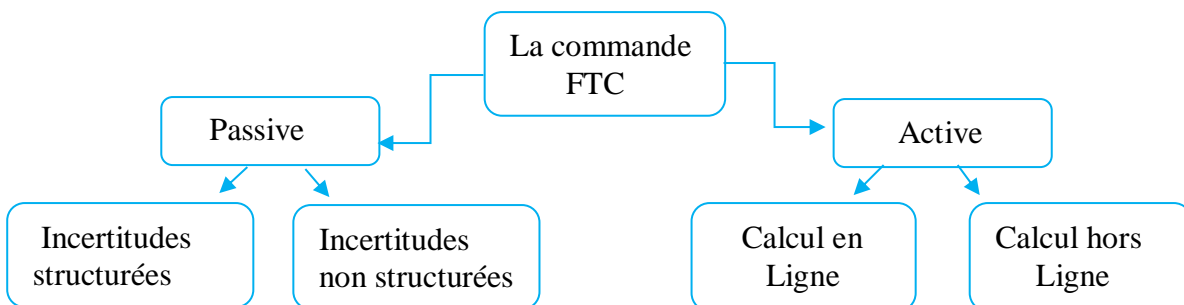
Le principe d'un système tolérant aux défauts est présenté par la figure ci-contre.



FigureI. 1 : principe d'un système de commande tolérante aux défauts.

I.7.1. Les méthodes de la FTC :

Pour la commande tolérante aux fautes Il existe plusieurs approches on va les classés selon deux méthodes principales : les méthodes classiques qui acquis sur deux approche (active et passive), et autre méthodes qui repose sur deux stratégies principales (minimisation des pertes, et maximisation du couple) [13] [14].

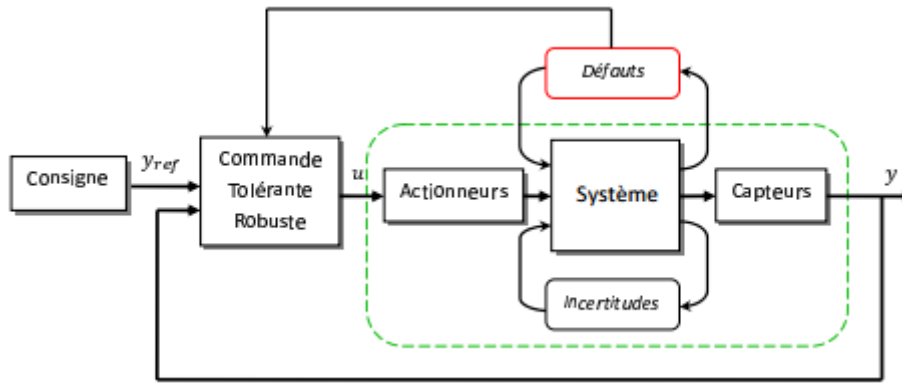


FigureI. 2 Classification des méthodes tolérante aux défauts

I.7.1.1. Approche passive :

Une loi de commande tolérante aux fautes passive est synthèse pour tolérer un nombre prédéfini de défauts supposés connus avant la phase de conception. La méthode PFTC est basées sur les outils de la commande robuste afin d'assure l'insensibilité du système en boucle fermé à certains défauts[11].

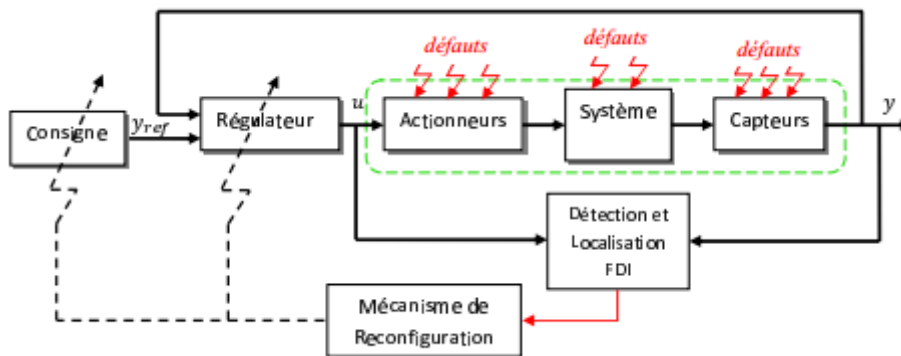
La figure ci-dessous présente le principe de la loi de commande FTC passive.



FigureI. 3 Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive

I.7.1.2. Approche actives :

L'approche active de la commande FTC intègre un mécanisme de diagnostic pour détecter et localiser les défauts pouvant affecter le système. Dès lors qu'un défaut est détecté par le module de diagnostic, la stratégie FTC est activée via un mécanisme de reconfiguration[13]



FigureI. 4 Schéma de principe d'une loi de commande FTC active

I.8. La commande FTC pour les machines multiphasée :

Une des propriétés les plus importante des machines multiphasée c'est leurs capacités de continuer à fonctionner après la détérioration de l'une (ou plus) des phases. La chose qui ne peut pas être réalisé avec les machines triphasées [10].

Si une phase attaquée par le défaut, le degré de liberté disponible qui existe dans les machines multiphasée est effectivement utilisé pour une stratégie d'exploitation post-défauts convenable [9][12].

L'idée fondamentale de toutes les stratégies tolérantes aux pannes est qu'une machine multiphasée peut continuer à fonctionner, tant que plus de (n-3) phases sont attaqués par un défaut.(nombre de phase saine doit être supérieur ou égale à trois)

En générale pour la FTC appliqué aux machine multiphasée est caractérisés par deux critères tout on basant sur l'une des approches précédentes (active et passive), ces deux critères présente différences significatives lorsque les courants de référence sont sinusoïdale et lorsque le courant de l'ordre supérieur les harmoniques sont présentés dans le cas d'entraînements à moteur à induction avec enroulements et harmoniques spatiales négligeables [11].

I.8.1. Critère de perte minimale ML 5

Compte tenu d'un certain Couple de référence T^* , le modèle de machine multiphasée est utilisé pour calculer les courants qui génèrent T^* , minimiser les pertes de cuivre sans restrictions sur grandeur des courants de phase. Cette option est généralement entraîne des courants de phase inefficaces.

I.8.2. Critère de couple maximum MT :

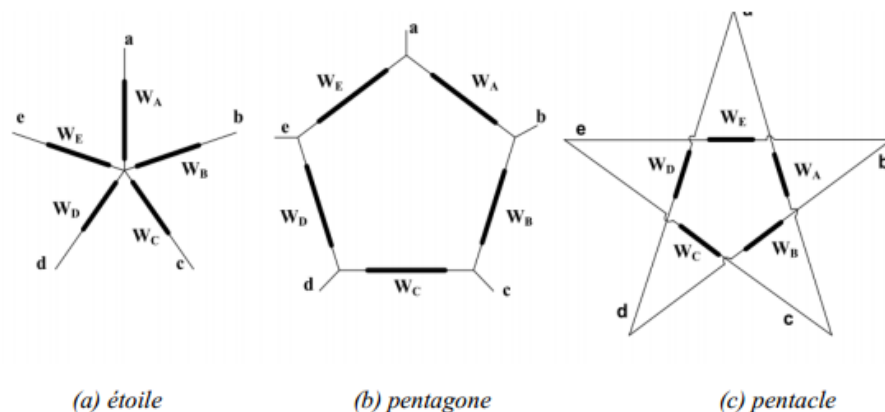
Les références actuelles sont calculées pour fournir T^* , mais les composantes fondamentales des courants de phase sont forcées pour avoir des grandeurs égales [15].

I.8.3. Les machines asynchrones à cinq phases :

Parmi les machines polyphasées les plus souvent utilisées et étudiée on trouve la machine à cinq phases ou qui dite aussi ; machine « pentaphasée ».

La machine pentaphasée est définit comme étant une machine électrique disposant d'un nombre $n=5$ d'enroulements, alimentées par n sources électriques.

La connexion des bobinages de la machine à cinq phases prend trois p possibilités : étoile, pentagone et pentacle, sont présentés par la figure qui Vient par la suite [1].



FigureI. 5 Défèrentes configurations de connexion des enroulements d'une machine à cinq phases

I.8.4. La commande tolérante aux défauts appliqué à la machine à induction cinq phases :

La commande tolérante aux défauts de la machine à induction a cinq phase a connu un essor très important dans les dernières années. Plusieurs approches ont été proposée qui permettent de garantir la continuité de service du processus [1][12][15].

En effet, comme toute autre machine électrique, la machine asynchrone à 5 phases peut parfois présenter différents types de défaillances d'ordre électriques ou mécanique[14][1][2], soit au niveau du convertisseur soit au niveau de la machine elle-même ces défauts peuvent être présentés par la figure qui arrive par la suite :

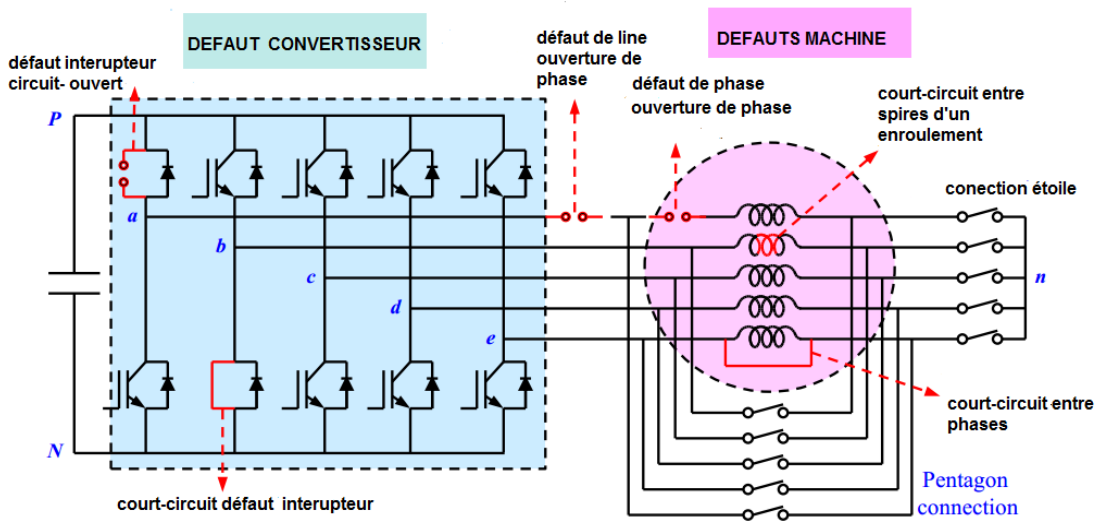


Figure I.6 schéma présentatif des différents types des défauts qui attaque la machine à induction à cinq phases

I.8.4.1. Défaut au niveau du convertisseur :

Pour cette zone les défauts les plus récurrents localisés au niveau des interrupteurs sont :

- l'ouverture du commutateur, alors l'obtention d'un circuit ouvert.
- Court-circuit de commutateur

I.8.4.2. Défaut au niveau de la machine elle-même

Pour une MAS à cinq phases, et ans un phénomène qui ne diffère pas de la machine asynchrone triphasée les défauts de la machine à induction à cinq phases apparaissent plus souvent au niveau de la partie immobile de la machine[12].

Les défauts les plus récurrents localisés au niveau de la machine sont

- court-circuit entre spires
- court-circuit entre phases
- ouverture de l'une ou plus de phases

Nous pouvons donner une idée brève sur chacun d'eux séparément :

I.8.4.3. Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné.

Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Les courts circuits entre spires de la même phase apparaissent, soit au niveau des têtes de bobines, soit dans les encoches[14].

I.8.4.4. Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage ; cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système [2],[6],[14].

La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

I.8.4.5. Ouverture de l'une des phases statoriques :

Ce sont les défauts les plus fréquents qui apparaissent au niveau du stator la détection de ce type des défauts se fait par l'analyse des courants statoriques [7],[12]

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur les machines multiphasée, tout en donnant un ensemble des avantages et des applications. Ensuite nous avons discuté le concept de modélisation de ce type de machine. L'idée est de présenter un model simple et adaptatif a la commande. En outre, le concept de la commande tolérante aux défauts pour la machine pentaphasée a été abordé toute en citant les différents défauts qui peuvent altérer ce type de machine.