

## Sujet de thèse

# Tolérance aux Défauts d'une Chaîne de Conversion Électromécanique Basée sur une Machine Synchrone Polyphasée

### Contacts :

Thierry LUBIN : [thierry.lubin@univ-lorraine.fr](mailto:thierry.lubin@univ-lorraine.fr) , ☎ : 07 82 77 43 59

Ehsan JAMSHIDPOUR : [ehsan.jamshidpour@univ-lorraine.fr](mailto:ehsan.jamshidpour@univ-lorraine.fr) , ☎ : 03 72 74 43 60

## 1 Contexte

L'utilisation de machines synchrones à aimants permanents polyphasées tolérantes aux défauts associées à des convertisseurs d'électronique de puissance spécifiques (multi-bras, structure en H, structure matricielle...) permet d'améliorer la fiabilité de fonctionnement des chaînes de conversion électromécanique. Les domaines d'applications concernent certains secteurs industriels où le besoin en continuité de service est capital. On pense en particulier aux applications militaires, à l'aérospatial, aux systèmes de propulsion navale ou aéronautique. Le contexte automobile offre également un domaine applicatif dans lequel les machines polyphasées à aimants permanents commencent à s'imposer. Pour les systèmes d'entraînements ou de production d'énergie de grandes puissances, cela permet également d'assurer une segmentation de la puissance et de réduire les contraintes sur les composants.

La multiplication des phases augmente le nombre de degrés de liberté pour la définition des lois de commande et de reconfigurations suite à des défauts de fonctionnement (pertes d'une ou de plusieurs phases, perte d'un interrupteur de puissance, court-circuit, défauts de capteurs...). De nombreuses études sont menées actuellement dans les laboratoires de recherche sur ce sujet mais aucun consensus ne semble avoir été trouvé sur le nombre optimal de phases à considérer (compromis à faire entre la fiabilité fonctionnelle et la fiabilité structurelle) et la définition de lois de commande spécifiques. Le laboratoire GREEN travaille depuis de nombreuses années sur ce sujet qui reste d'actualité [1], [2].

## 2 Etat de l'art

Dans les systèmes d'entraînement mettant en œuvre des machines à aimants multiphasées, des défauts d'ouverture de phase peuvent survenir en raison de la défaillance d'un enroulement de la machine et/ou d'un interrupteur de puissance [3]. Un fonctionnement acceptable dans des conditions d'ouverture de phase est possible à condition qu'il y ait au moins deux courants indépendants pour la production de couple, complétées par une stratégie de contrôle efficace. Pour assurer une performance optimale et la fiabilité des MSAP multiphasées et de leurs entraînements, un diagnostic de défaut précis et une reconfiguration du contrôle du courant post-défaillance deviennent impératifs. Ces mesures visent à maintenir un fonctionnement fluide, atténuant les pulsations de couple et répondant à certaines contraintes, en particulier sur les pertes Joule [3, 4]. D'une manière générale, la reconfiguration du courant post-défaillance vise à préserver les forces magnétomotrices (MMFs) pour se rapprocher au mieux du mode de fonctionnement sain. Bien que certaines approches proposent des courants constants dans les référentiels d-q sans modifier la matrice de transformation de Clarke et l'utilisation de contrôleurs classiques de type PI, cela peut entraîner des ondulations de couple importantes [5]. Des études recommandent de réduire les ondulations de couple avec des références de courant variables utilisant des correcteurs plus

spécifiques [6]. Cependant, la détermination des nouvelles références pour les courants des phases saines peut entraîner une augmentation des pertes dans les enroulements, provoquant potentiellement un sur-échauffement de la machine.

Les récents progrès dans les stratégies tolérantes aux défauts portent sur le contrôle de courant prédictif tolérant aux défauts (FT-PCC) conçue pour les entraînements des MSAP multiphasées, nécessitant une reconfiguration minimale en ajustant les références de courant pendant le fonctionnement tout en préservant la structure de l'algorithme de contrôle [7]. Cependant, certaines structures de contrôle proposées, telles que celles présentées dans [8] pour une machine pentaphasée, montrent que les pertes dans le cuivre sont alors inégalement réparties entre les bobinages provoquant une augmentation importante des pertes totales. Le travail présenté dans [9] explore le contrôle prédictif de courant (MPCC) et le contrôle prédictif de couple (MPTC) tolérants aux pannes pour un entraînement à cinq phases avec des défauts de type circuit ouvert. De plus, [9] introduit une technique de diagnostic de défaut en ligne capable de détecter rapidement les ouvertures de phase pour les machines hexaphasées, méthode particulièrement pertinente pour les entraînements à contrôle de courant prédictif (PCC).

La figure 1 présente la structure de base d'une commande tolérante aux défauts pour une machine polyphasée utilisant un onduleur multi-bras. Des structures d'alimentation avec des ponts en H sur chaque phase est également possible permettant un contrôle indépendant de chaque courant et ouvrant davantage de perspective quant aux stratégies de commande après défauts.

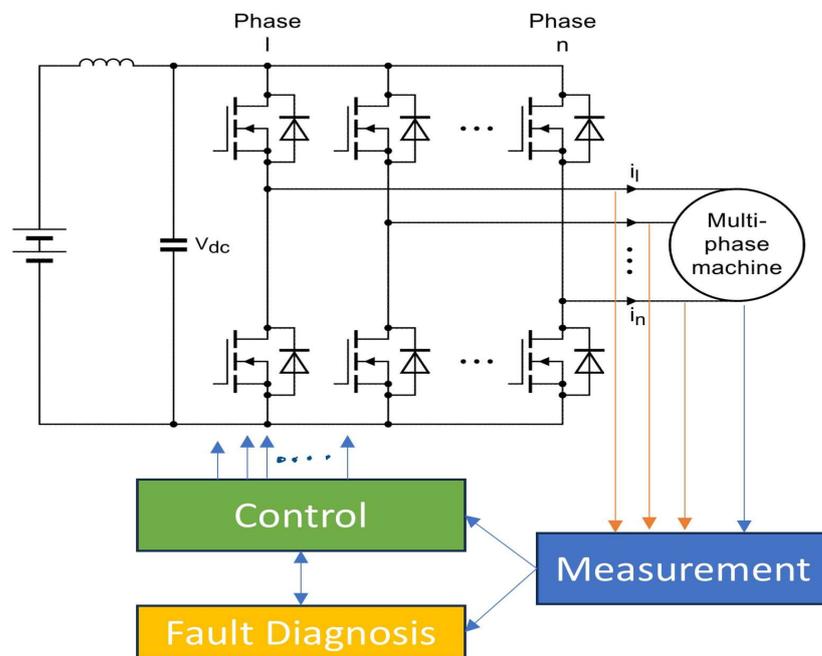


Figure 1: Structure d'un entraînement polyphasé avec un onduleur multi-bras

### 3 Objectifs de la thèse

Le laboratoire GREEN présente une expertise reconnue dans la conception de machines à aimants permanents tolérantes aux défauts et dispose de plusieurs prototypes de machines multiphasées ayant été réalisées lors de travaux de thèses précédentes. L'objectif ici est de proposer des stratégies de commande innovantes pour faire face à des défauts de fonctionnement des machines multiphasées.

Le travail de thèse pourra se décomposer de la façon suivante :

- Etude bibliographique sur les chaînes de conversion électromécaniques polyphasées tolérantes aux défauts de fonctionnement (structure de machines, topologies des convertisseurs statiques...) et les lois de commande ayant été développées dans ce cadre. Cette étude permettra d'isoler quelques topologies particulières qui seront ensuite modélisées et analysées en détail.

- Des méthodes de détection de défauts devront être définies (défauts machine ou convertisseur)
- Des stratégies de reconfiguration innovantes devront être développées en réponse à un cahier des charges à respecter pour assurer un fonctionnement acceptable du système d'entraînement.
- Les stratégies de commande développées pendant la phase de simulation seront implémentées sur dSPACE en lien avec des machines polyphasées ou multi-étoiles triphasée disponibles au laboratoire pour valider les études théoriques.

## References

- [1] I. Assoun, "Commande sans capteur mécanique, tolérante aux défauts d'une MSAP pentaphasée pour applications spatiales" *Thèse de doctorat*, laboratoire GREEN, 2022.
- [2] M. Azzi, "Entraînements électriques polyphasés à haute fréquence pour une meilleure disponibilité des chaînes de traction" *Thèse de doctorat*, laboratoire GREEN, 2022-2025.
- [3] G. Feng, Y. Lu, C. Lai, B. Ding, and N. C. Kar, "Fault tolerant maximum torque per ampere (FT-MTPA) control for dual three-phase interior PMSMs under open-phase fault," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12030–12041, 2022.
- [4] L. Fang, Z. Liu, D. Jiang, and R. Qu, "A data-driven fault diagnosis method with dimension reduction capability for inverter open-circuit fault of multiphase drive systems," in *2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*. IEEE, 2022, pp. 587–592.
- [5] D. T. Vu, N. K. Nguyen, E. Semail, and T. H. Do, "Fault-tolerant control for non-sinusoidal seven-phase PMSMs with similar copper losses," in *2022 IEEE Ninth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*. IEEE, 2022, pp. 444–449.
- [6] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, and A. M. S. Mendes, "Fault-tolerant predictive current control of six-phase PMSMs with minimal reconfiguration requirements," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 2084–2093, 2023.
- [7] D. T. Vu, N. K. Nguyen, and E. Semail, "Fault-tolerant control for nonsinusoidal multiphase drives with minimum torque ripple," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 6, pp. 6290–6304, 2021.
- [8] W. Huang, W. Hua, and Q. Fan, "Performance analysis and comparison of two fault-tolerant model predictive control methods for five-phase PMSM drives," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 311–320, 2021.
- [9] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, and A. M. S. Mendes, "Online diagnostic method for the detection of high-resistance connections and open-phase faults in six-phase PMSM drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 1, pp. 345–355, 2022.

## Thesis Topic

# Fault Tolerance of an Electromechanical Energy Conversion Chain Based on a Polyphase Synchronous Machine

### Contacts :

Thierry LUBIN : [thierry.lubin@univ-lorraine.fr](mailto:thierry.lubin@univ-lorraine.fr), ☎ : 07 82 77 43 59

Ehsan JAMSHIDPOUR : [ehsan.jamshidpour@univ-lorraine.fr](mailto:ehsan.jamshidpour@univ-lorraine.fr), ☎ : 03 72 74 43 60

## 1 Context

The use of fault-tolerant polyphase permanent magnet synchronous machines associated with specific power electronics converters (multi-legs, H-Bridge, matrix converters, etc.) improves the operational reliability of electromechanical conversion chains. The fields of application concern certain industrial sectors where the need for continuity of service is paramount. These include military, aerospace, naval, and transportation systems. The automotive context also offers an application field in which polyphase permanent magnet machines are beginning to establish themselves. For high-power drive or power generation systems, this also ensures power segmentation and reduces stress on components.

The multiplication of phases increases the number of degrees of freedom for the definition of control laws and reconfigurations following malfunctions (loss of one or more phases, loss of a power switch, short circuit, sensor faults, etc.). Many studies are currently being carried out in research laboratories on this subject, but no consensus seems to have been reached on the optimal number of phases to be considered (trade-off to be made between functional and structural reliability) and the definition of specific control laws. The GREEN laboratory has been working for many years on this topic, which remains topical [1], [2].

## 2 State-of-the-art

In drive systems using multiphase PMSMs, phase opening faults can occur due to the failure of a machine winding and/or power switch [3]. Acceptable operation under phase opening conditions is possible provided that there are at least two independent currents for torque generation, supplemented by an effective control strategy. To ensure optimal performance and reliability of multiphase PMSMs and their drives, accurate fault diagnosis and reconfiguration of post-failure current control become imperative. These measures aim to maintain smooth operation, attenuating torque pulsations and meeting certain constraints, in particular on copper losses [3, 4]. Generally speaking, the purpose of post-failure current reconfiguration is to preserve magnetomotive forces (MMFs) to get as close as possible to healthy operation. Although some approaches propose constant currents in d-q axis without modifying the Clarke transformation matrix and the use of classical PI-type controllers, this can result in large torque ripples [5]. Studies recommend reducing torque ripples with variable current references using more specific controllers [6]. However, the determination of new references for healthy phase currents can lead to an increase in losses in the windings, potentially causing overheating of the machine.

Recent advances in fault-tolerant strategies focus on fault-tolerant predictive current control (FT-PCC) designed for multiphase PMSM drives, requiring minimal reconfiguration by adjusting current references during operation while preserving the structure of the control algorithm [7]. However, some proposed control structures, such as those presented in [8] for a five-phase machine, show that the losses in the copper are then unevenly distributed between the windings, causing a significant increase in the total losses. The work presented in [9] explores fault-tolerant predictive current control (MPCC) and predictive torque control (MPTC) for a five-phase drive with open-circuit type faults. In addition, [9] introduces an online fault diagnosis technique capable of rapidly detecting phase aperture for six-phase machines, a method that is particularly relevant for predictive current control (PCC) drives.

Figure 1 shows the basic structure of a fault-tolerant control for a polyphase machine using a multi-leg inverter. Power structures with H-bridges on each phase are also possible, allowing independent control of each current and opening up more perspective for control strategies after faults.

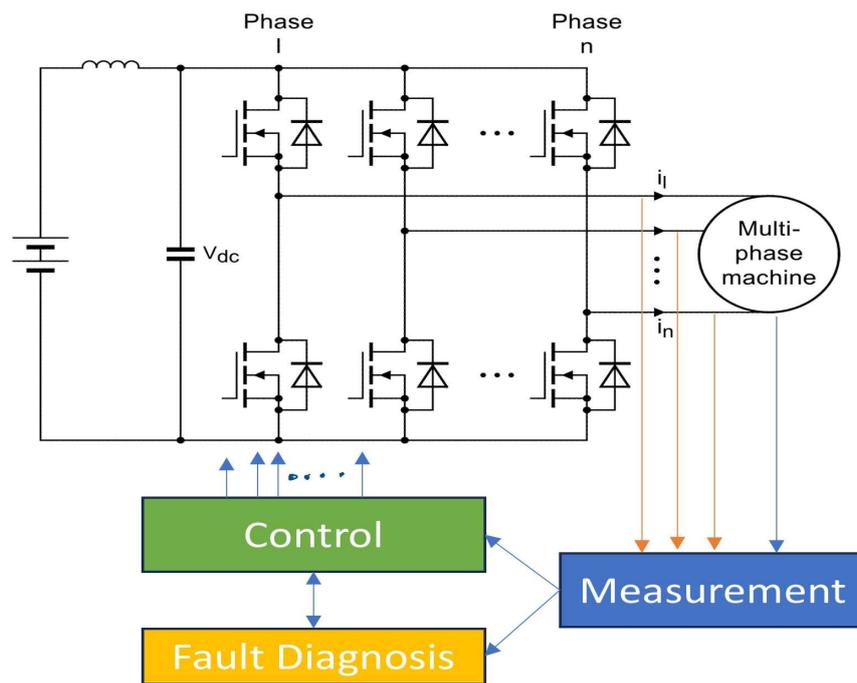


Figure 1: Structure of a multiphase drive with a multi-arm inverter

### 3 Objectives of the thesis research

The GREEN laboratory has recognized expertise in the design of fault-tolerant permanent magnet machines and has several prototypes of multiphase machines that have been made during previous thesis work. The objective here is to propose innovative control strategies to deal with malfunctions of multiphase machines.

The thesis work can be broken down as follows:

- In-depth bibliographic study on fault-tolerant polyphase electromechanical conversion chains (machine structure, Power electronics converter topologies, etc.) and the control methods having been developed in this context. This study will make it possible to isolate some particular topologies which will then be modeled and analyzed in detail.
- Fault detection methods will need to be defined (machine faults or converters)
- Innovative reconfiguration strategies will have to be developed in response to specifications to be met to ensure acceptable operation of the drive system.
- The control strategies developed during the simulation phase will be implemented on dSPACE in connection with three-phase, polyphase, or multi-star machines available in the laboratory to validate the theoretical studies.

## References

- [1] I. Assoun, "Commande sans capteur mécanique, tolérante aux défauts d'une MSAP pentaphasée pour applications spatiales" *Thèse de doctorat*, laboratoire GREEN, 2022.
- [2] M. Azzi, "Entraînements électriques polyphasés à haute fréquence pour une meilleure disponibilité des chaînes de traction" *Thèse de doctorat*, laboratoire GREEN, 2022-2025.
- [3] G. Feng, Y. Lu, C. Lai, B. Ding, and N. C. Kar, "Fault tolerant maximum torque per ampere (FT-MTPA) control for dual three-phase interior PMSMs under open-phase fault," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12030–12041, 2022.
- [4] L. Fang, Z. Liu, D. Jiang, and R. Qu, "A data-driven fault diagnosis method with dimension reduction capability for inverter open-circuit fault of multiphase drive systems," in *2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*. IEEE, 2022, pp. 587–592.
- [5] D. T. Vu, N. K. Nguyen, E. Semail, and T. H. Do, "Fault-tolerant control for non-sinusoidal seven-phase PMSMs with similar copper losses," in *2022 IEEE Ninth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*. IEEE, 2022, pp. 444–449.
- [6] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, and A. M. S. Mendes, "Fault-tolerant predictive current control of six-phase PMSMs with minimal reconfiguration requirements," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 2084–2093, 2023.
- [7] D. T. Vu, N. K. Nguyen, and E. Semail, "Fault-tolerant control for nonsinusoidal multiphase drives with minimum torque ripple," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 6, pp. 6290–6304, 2021.
- [8] W. Huang, W. Hua, and Q. Fan, "Performance analysis and comparison of two fault-tolerant model predictive control methods for five-phase PMSM drives," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 311–320, 2021.
- [9] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, and A. M. S. Mendes, "Online diagnostic method for the detection of high-resistance connections and open-phase faults in six-phase PMSM drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 1, pp. 345–355, 2022.