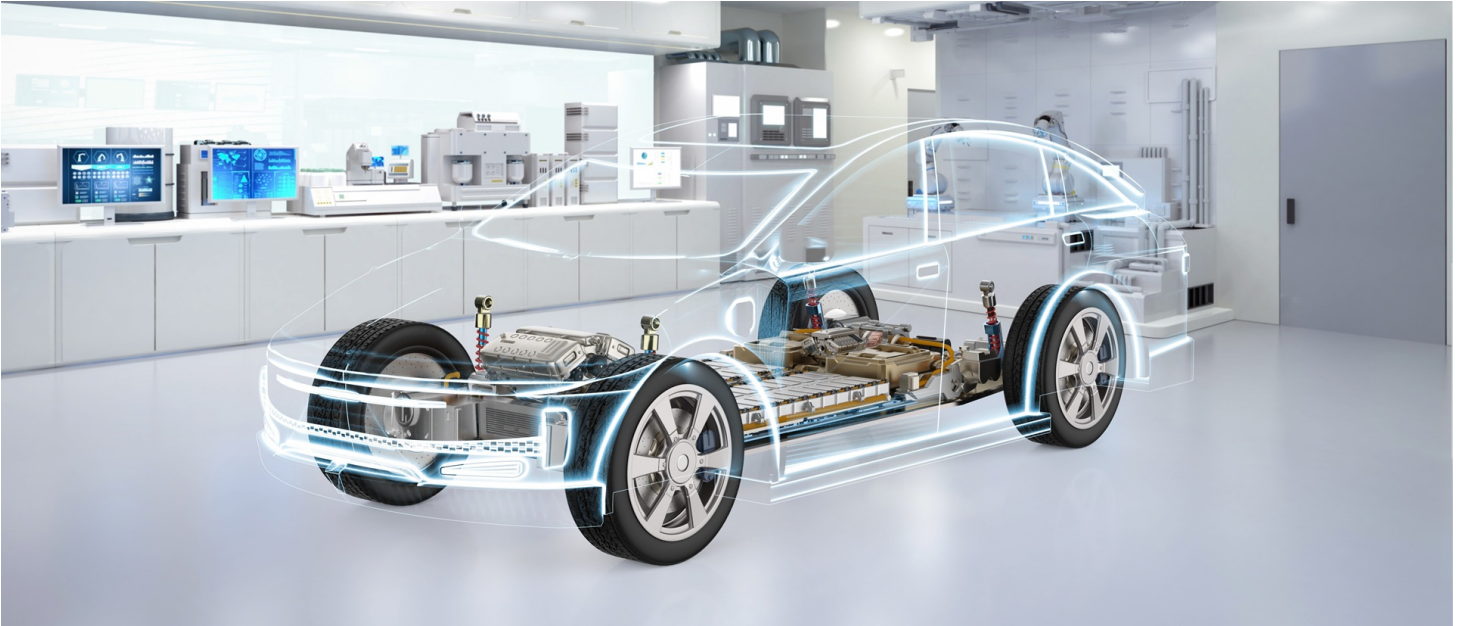




Rédigé le 10 mars 2026



4 minutes de lecture



Actualités

Recherche fondamentale

Sciences de l'ingénieur

Génie électrique et électronique

Systèmes d'automatisation et de contrôle

Thèse de Hadj Ahmed Belghazali : « *Commande sans capteur mécanique à basse vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents et très basse tension* », Université de Cergy-Pontoise, 2025

La mobilité électrique est une solution clé pour diminuer les émissions de CO₂ et combattre le réchauffement climatique. Dans ce contexte, des travaux de thèse à IFPEN ont porté sur le développement d'une commande sans capteur mécanique de position pour les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) fonctionnant à très basse tension (48 Vdc) et destinés à des véhicules électriques durables, tels que les voitures sans permis, les scooters et les vélos électriques. Cette commande, basée sur l'acquisition de signaux électriques et l'injection de signaux haute fréquence (HF), permet de supprimer le capteur mécanique de position, réduisant ainsi les coûts de fabrication tout en assurant une estimation précise, notamment à basse vitesse et à l'arrêt. Une méthode d'optimisation de l'amplitude de l'injection HF, basée sur une base de données expérimentale enrichie numériquement, a été

développée afin de limiter les perturbations induites sur le système, telles que les oscillations de couple et la consommation énergétique, tout en garantissant une estimation fiable. Validée expérimentalement, cette approche, facilement adaptable à d'autres types de machines électriques, offre une solution industrialisable pour des applications variées.

Un besoin de mobilité durable et accessible à tous

La transition énergétique mondiale met en avant la mobilité électrique comme une solution clé pour diminuer les émissions de CO₂ et combattre le réchauffement climatique. Dans cette optique, IFPEN propose de **rendre les machines électriques plus accessibles** afin de pouvoir les déployer pour la mobilité douce et les voitures sans permis.

Les machines synchrones, souvent utilisées dans l'électrification des transports, se distinguent par **leurs volumes compacts et leurs performances élevées**. Cependant, leur pilotage requiert une connaissance précise de la vitesse et de la position du rotor, généralement obtenue à l'aide de **capteurs mécaniques de position**. Bien que performants, ces capteurs présentent plusieurs limites : ils augmentent le coût et l'encombrement du système, compliquent leur intégration, notamment en bout d'arbre, et nécessitent davantage de câblage électrique. Ils présentent également des risques de défaillance, impactant ainsi la fiabilité globale du système.

Dans **les applications à très basse tension**, rencontrées dans les usages de la mobilité douce, les contraintes de coût deviennent des obstacles majeurs à la réduction du prix des machines destinées aux usages économiques, d'où la nécessité de solutions alternatives. Parmi celles-ci, IFPEN a privilégié le recours à **une commande sans capteur mécanique de position** qui, outre une réduction des coûts, permet d'assurer un contrôle performant et dynamique des machines électriques. Dans les applications pour le transport, une particularité du contrôle réside dans l'exigence d'**une large plage de fonctionnement** couvrant plusieurs zones opérationnelles, depuis l'arrêt complet jusqu'à la vitesse maximale. Ainsi, il est indispensable de connaître précisément la position électrique du rotor sur les différentes phases : « machine à l'arrêt », « faibles vitesses » et « moyennes et hautes vitesses ».

Les commandes sans capteur

Dans le cas des machines synchrones, ces commandes sans capteur se basent majoritairement sur l'acquisition des signaux électriques (courants/tensions) pour estimer **la vitesse de rotation et la position du rotor**. Ces méthodes efficaces en zone « moyennes et hautes vitesses », présentent des limites dans les zones « très faibles vitesses » et « à l'arrêt », où les amplitudes et les fréquences des signaux acquis sont faibles, voire inexistantes. Pour remédier à cela, **des injections hautes fréquences (HF) de signaux** peuvent être réalisées pour récupérer davantage d'informations sur le système piloté et identifier la position. Les performances de cette technique dépendent du choix de la méthode d'injection ainsi que des amplitudes et fréquences des signaux HF utilisés.

Les travaux menés par IFPEN ont porté sur les méthodes d'estimation de la position en zone de basse vitesse, y compris à l'arrêt, où l'injection de signaux HF constitue un enjeu critique. Le choix de la méthode d'injection HF est déterminant, car il influence directement les perturbations induites dans le système, notamment pour les machines fonctionnant à très basse tension.

Parmi les différentes approches, **la méthode d'injection de tension porteuse pulsée** a été privilégiée pour ses performances élevées et sa simplicité [1]. Cette méthode consiste à superposer une tension HF aux tensions de commande et à mesurer le courant statorique résultant, ce qui permet d'estimer la position électrique du rotor. Toutefois, l'application de ces méthodes aux machines à très

basse tension, utilisées dans des domaines tels que les véhicules hybrides, les voitures sans permis et la mobilité douce, pose des défis importants. En effet, ces machines se révèlent particulièrement sensibles aux effets des amplitudes d'injection élevées, qui peuvent engendrer des courants harmoniques importants et des ondulations du couple résultant sur l'arbre de la machine.

En définitive, **déterminer l'amplitude optimale de tension HF s'avère une tâche complexe** car, si une amplitude excessive risque de perturber le couple moteur, une amplitude trop faible peut quant à elle provoquer des erreurs lors de l'estimation de la position du rotor [2]. Afin de mieux appréhender cet équilibre délicat, nous nous sommes attachés à analyser l'impact des amplitudes d'injection sur l'estimation de la position [3] et avons proposé une méthode d'optimisation, basée sur des données expérimentales, visant à concilier précision d'estimation et minimisation des perturbations du système [4].

Méthode d'optimisation de l'amplitude d'injection HF

La méthode développée par IFPEN repose sur **une base de données expérimentale réduite**, enrichie numériquement, ce qui permet de limiter la quantité de données requises et le temps nécessaire à leur acquisition. Cette base comprend 4 amplitudes de tension HF (V_h), 4 niveaux de charge (I_{Abs}) et 3 valeurs de vitesse (N), comme illustré dans la figure 1. L'objectif est de déterminer l'amplitude de tension optimale en équilibrant la qualité de l'estimation de la position et les perturbations induites par l'injection, perçues comme des coûts pour le système.

La méthode s'appuie sur plusieurs critères d'évaluation, tels que **la minimisation de l'erreur d'estimation de la position et de sa variance**, pour garantir la qualité de la position estimée, ainsi que **la limitation des oscillations de couple et de la consommation de puissance continue**, facteurs pouvant être préjudiciables aux coûts de fonctionnement. Elle permet également de construire différents scénarios d'optimisation afin d'analyser l'influence de chaque paramètre sur le résultat optimal. À titre d'exemple, les figures 2 et 3 présentent 4 scénarios intégrant diverses pondérations des critères qualité et coût et leur impact sur l'amplitude de la tension HF optimale (V_{hopti}). Les pondérations sont désignées par w_{q1} et w_{q2} pour les critères de qualité, respectivement liés à la variance de l'erreur d'estimation de la position et à la valeur moyenne de l'erreur et par w_{c1} et w_{c2} pour les critères de coûts, correspondant respectivement aux oscillations de couple et à la consommation de puissance continue.

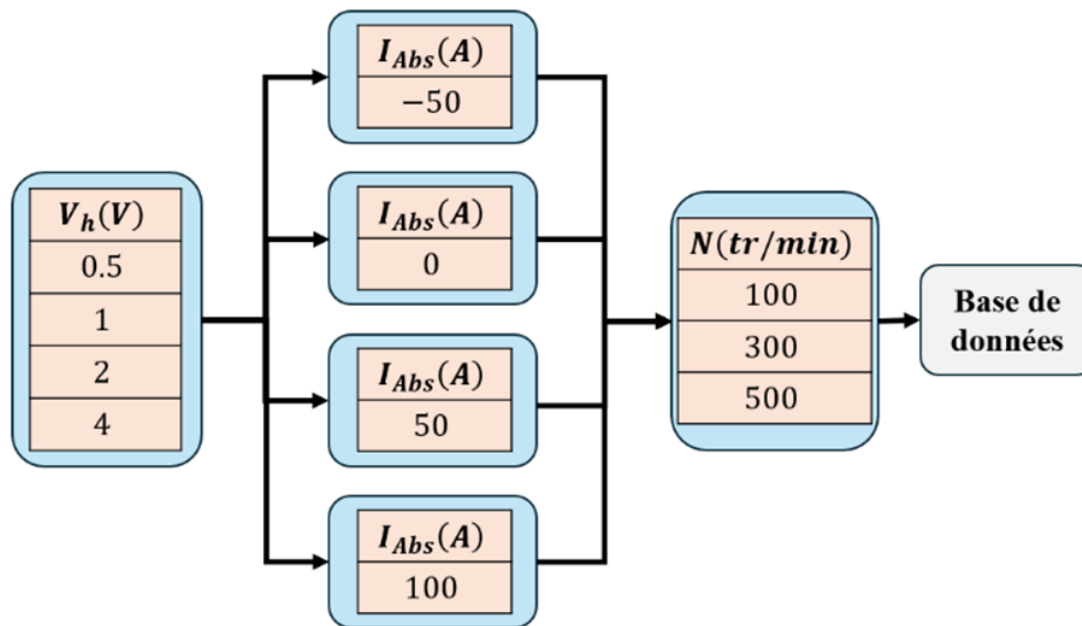


Figure 1 : Plan d'expérience utilisé pour l'acquisition de la base de données

Scénarios	S1	S2	S3	S4
Poids				
$w_{q1}(var_{\theta_{err}})$	1	1	1	1
$w_{q2}(\langle \theta_{err} \rangle)$	0	1	1	1
$w_{c1}(\Delta T_{HF})$	1	1	1	2
$w_{c2}(\Delta P_{dc})$	0	0	1	1
V_{hOpti}	$[0.9 ; 1.7] V$	$[1 ; 2.8] V$	$[1.4 ; 2.8] V$	$[1.2 ; 2.8] V$

Figure 2 : Exemple de scénarios d'optimisation de l'amplitude de la tension HF

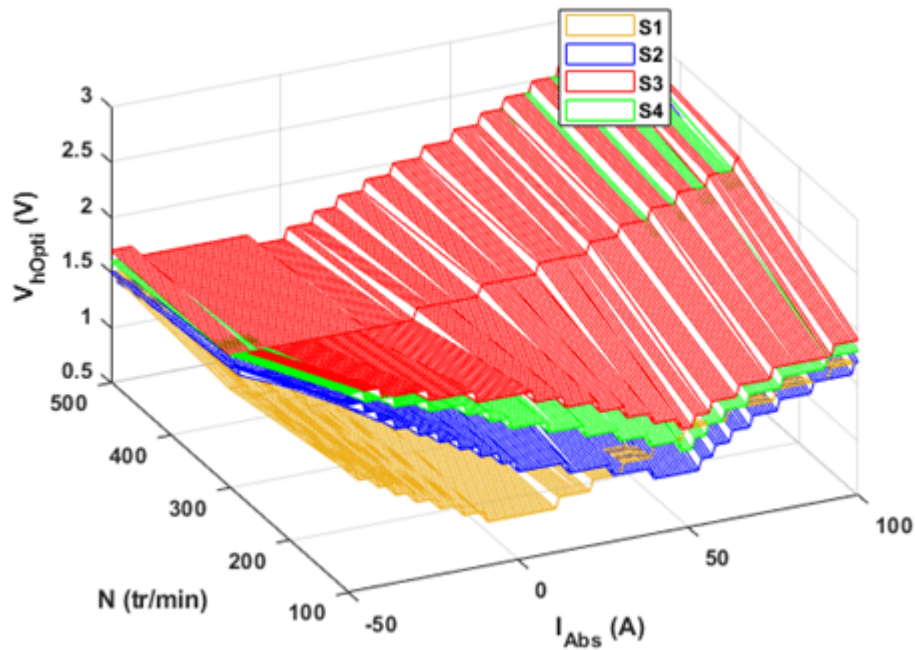


Figure 3 : Amplitude de tension HF optimale pour les 4 scénarios d'optimisation de la figure 2

La validation expérimentale de cette méthode, réalisée sur un banc d'essai et illustrée en figure 4, démontre **le bon fonctionnement de la commande sans capteur** avec une amplitude d'injection variable, sur une plage de vitesses allant de -100 tr/min à 500 tr/min, y compris à l'arrêt. Les résultats présentés dans cette figure ont été obtenus avec l'injection de tension optimisée selon le scénario 2. La sous-figure (a) présente une comparaison entre la vitesse estimée avec la tension HF optimisée ($N_{estimée}$), mettant en évidence la bonne convergence de la vitesse estimée. La sous-figure (b) illustre un extrait de la régulation de courant, montrant une comparaison entre les courants mesurés (I_{dqf}) et leurs valeurs de référence (I_{dq}^*). La sous-figure (c) affiche la tension HF optimisée (V_{hOpti}), tandis que la sous-figure (d) présente l'erreur d'estimation de la position (θ_{err}) obtenue avec V_{hOpti} .

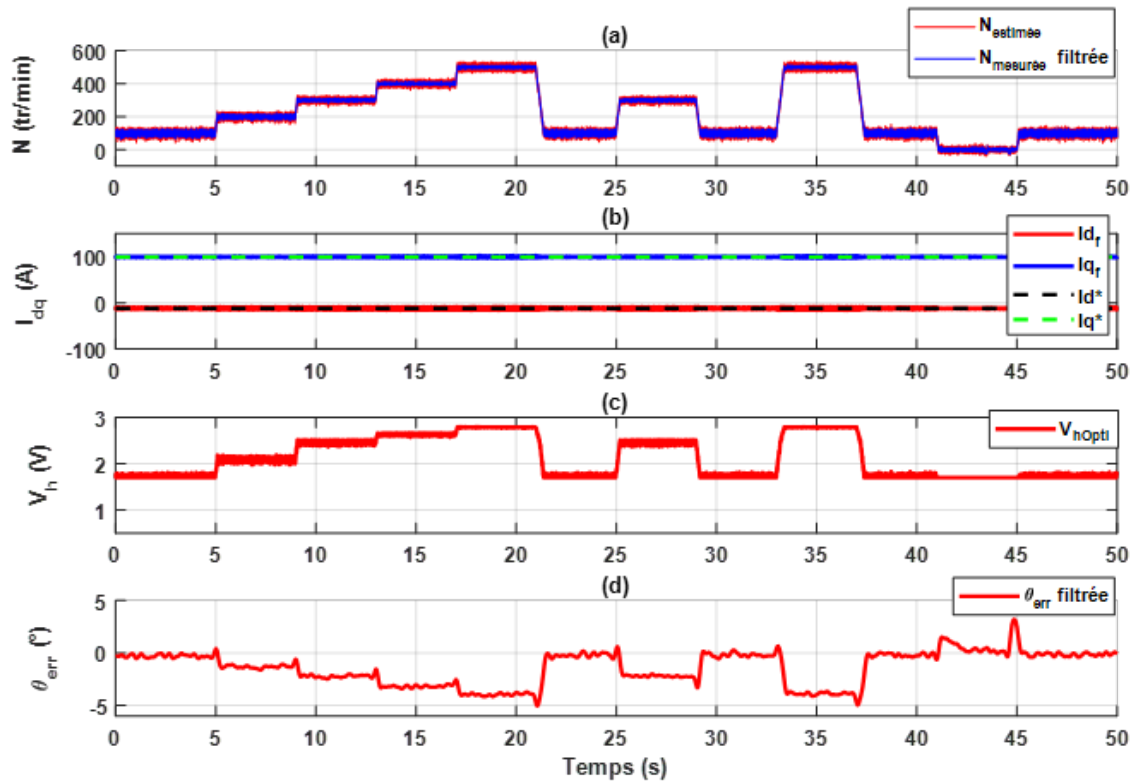


Figure 4 : Profil expérimental de variation de vitesse à courant constant (100A) : (a) vitesse mécanique estimée et mesurée, (b) courants I_{dq} , (c) amplitude de la tension HF optimisée V_{hOpti} , (d) erreur d'estimation de la position θ_{err}

Solution industrialisable

La méthode proposée par IFPEN, en plus d'optimiser l'amplitude de la tension HF, offre une solution **facilement déployable** dans un contexte industriel. De plus, grâce à l'utilisation d'une base de données expérimentale, cette démarche peut être facilement adaptée à d'autres machines électriques, quelle que soit leur plage de tensions d'alimentation ou leur puissance.

Références :

- [1] D. Raca, P. Garcia, D. D. Reigosa, F. Briz and R. D. Lorenz, "Carrier-Signal Selection for Sensorless Control of PM Synchronous Machines at Zero and Very Low Speeds," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 1, pp. 167-178, Jan.-feb. 2010,
>> DOI : [10.1109/TIA.2009.2036551](https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2036551)
- [2] A. A. Khan and O. Mohammed, "Wavelet filtering for position estimation of permanent magnet machine in carrier signal injection based sensorless control," 41st North American Power Symposium, Starkville, MS, USA, 2009, pp. 1-5,
>> DOI : [10.1109/NAPS.2009.5484072](https://doi.org/10.1109/NAPS.2009.5484072)
- [3] H. A. Belghazali, N. H. Obeid, N. -T. Trinh, L. Id-Khajine and E. Monmasson, "Application of a HF Signal Injection Sensorless Method for an Extra Low Voltage PMSynRel," 2024 IEEE 18th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-

POWERENG), Gdynia, Poland, 2024, pp. 1-6,

>> DOI : [10.1109/CPE-POWERENG60842.2024.10604399](https://doi.org/10.1109/CPE-POWERENG60842.2024.10604399)

[4] H. A. Belghazali, N. H. Obeid, E. Monmasson, N. -T. Trinh, L. Id-Khajine, "Data-Driven Optimisation Method for Tuning the HF Injection Parameters of an Extra Low Voltage Encoderless Synchronous Motor Drive," Power Electronics and Drives, vol.10 (45), 2025,

>> DOI : [10.2478/pead-2025-0022](https://doi.org/10.2478/pead-2025-0022)

Contacts scientifiques: [Najla Haje Obeid](#), [Ngoc-Tu Trinh](#)

VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR

[Numéro 30 de Science@ifpen - Commande et optimisation des systèmes complexes](#)

Mobilité douce : commande sans capteur des machines synchrones

10 mars 2026

Lien vers la page web :