

TEI 323 - BE

Institut Polytechnique des Sciences Avancées (IPSA)



Etude du système de contrôle de moteur brushless

Réalisé par :

Guilhem Perret-bardou

Encadrants :

M. SALVETAT

Année académique : 2024-2025

09/05/2025

Table des matières

Introduction	2
1 Etude de la notice technique : relevé d'informations	2
1.1 Type de moteur et avantages	2
1.2 Tension maximale admissible par le moteur	2
1.3 Tension nominale	2
1.4 Courant nominal et maximal admissible	2
1.5 Puissance maximale dissipée et mode de refroidissement	2
1.6 Nombre de pôles	2
1.7 Alliages utilisés, avantages et inconvénients	3
1.8 Valeur ohmique des bobines et pertes par effet joules (régime nominal)	3
1.9 Inductance et nombre de bobines	3
1.10 nombre de bobines par phases	3
1.11 Constante de temps électrique de l'induit	3
1.12 vitesse angulaire maximale à vide	3
1.13 valeur des couples (régime continu et pic)	3
2 Dimensionnement de l'alimentation	4
2.1 Nombre de cellules et architecture	4
2.2 Autonomie	4
2.3 Puissance et capacité	4
2.4 Avantage et Inconvénients	4
2.5 Avantage et Inconvénients d'un BMS	4
2.6 Résistance interne	4
2.7 Courant du circuit	4
2.8 Caractéristique du fusible	5
3 Dimensionnement du circuit de contrôle	5
3.1 Pulsation admissible (max) par le moteur et fréquence et période (max) de pilotage du moteur	5
3.2 Dimensionnement des transistors	5
3.3 Référence disponible	6
Conclusion	6

Introduction

Magnetic Innovations est une entreprise néerlandaise spécialisée dans la conception, le développement et la fabrication de moteurs électriques à entraînement direct (Direct Drive), principalement destinés aux applications industrielles, aérospatiales, automobiles et de haute technologie. Basée à Veldhoven, au cœur de la région technologique Brainport aux Pays-Bas, elle se positionne comme un acteur clé dans le domaine des solutions électromécaniques sur mesure.

Activités principales

Magnetic Innovations conçoit des moteurs à couple élevé, des moteurs linéaires, des actionneurs à bobine mobile (voice coil actuators) et des générateurs. Sa technologie d'entraînement direct élimine les composants mécaniques intermédiaires tels que les engrenages ou les courroies, réduisant ainsi les pertes d'énergie, l'usure et les besoins de maintenance.

Magnetic Innovations nous a sollicité pour le développement des systèmes électroniques de contrôle de ses moteurs PMSM. Notre chef de projet nous a confié la mission de valider le dimensionnement du système de commande associé. Le moteur concerné est un modèle référencé chez Magnetic Innovations, dont la référence est **250-75-1-N3-T2-AIR**. L'étude sera menée à partir des données techniques extraites de la fiche produit.

1 Etude de la notice technique : relevé d'informations

1.1 Type de moteur et avantages

Le moteur 250-75-1-N3-T2-AIR fait partie de la série MI-F qui sont des moteurs *out – runner*. Dans un moteur out-runner, le rotor (qui porte les aimants) tourne à l'extérieur du stator, ce qui permet une densité de couple plus élevée et une meilleure efficacité.

1.2 Tension maximale admissible par le moteur

Dans l'annexe, on peut voir que notre moteur a une tension maximale admissible de $600VDC$ (Volts Direct Current, Volts en courant continu).

1.3 Tension nominale

On suppose que la tension nominale est 80% de la tension maximale, avec un calcul simple :

$$\frac{80}{100} \times 600 = 480$$

La tension nominale est donc de $480VDC$.

1.4 Courant nominal et maximal admissible

Le courant nominal et le courant maximal admissible nous sont donnés dans l'annexe :

- Courant nominal (Continuous Current) : $38Arms$ (Amperes Root Mean Square, Ampères efficaces)
- Courant maximal admissible (Peak Current) : $239Arms$

1.5 Puissance maximale dissipée et mode de refroidissement

Toujours dans l'annexe, on trouve une Puissance Maximale dissipée (Max. Continuous Power Dissipation) de $261W$.

Comme son titre l'indique *AIR*. Ce moteur bénéficie d'un refroidissement par convection naturelle avec l'air.

1.6 Nombre de pôles

Le moteur possède 16 paires de pôles soit un total de 32 pôles.

1.7 Alliages utilisés, avantages et inconvénients

Deux alliages sont utilisés pour les parties magnétiques (aimants) :

- $NdFeB$: Aimants en Néodyme-Fer-Bore, Ce type d'aimant a pour avantage d'être le plus puissant sur le marché actuellement. En revanche ils résistent moins bien à la chaleur, c'est pour ça que *Magnetic Innovations*. Propose un deuxième alliage :
- $Sm-Co$: Aimants en Samarium-Cobalt, ils ont l'avantage de résister à de plus fortes températures malgré leur moindre puissance comparés aux néodymes ce qui peut entraîner une densité de couple inférieure.

1.8 Valeur ohmique des bobines et pertes par effet joules (régime nominal)

Les bobines ont une valeur ohmique de

$$R_{LL} = 0.08\Omega$$

On sait que $R_{LL} = 2 \times R_{Phase}$ donc $R_{Phase} = \frac{R_{LL}}{2} = \frac{0.08}{2} = 0.04\Omega$ Pour calculer la perte en effet joule (moteur triphasé) on utilise la formule suivant :

$$P_{joules} = 3 \times I_{RMS}^2 \times R_{Phase}$$

ce qui nous permet d'obtenir le résultat suivant :

$$P_{joules} = 3 \times (38)^2 \times 0.04$$

$$= 173.28W$$

1.9 Inductance et nombre de bobines

L'inductance Ligne-Ligne vaut $L_{LL} = 1.1mH$. En supposant que le nombre d'encoche est le même que le nombre de pôles, on peut donc dire qu'il y a 32 bobines.

1.10 nombre de bobines par phases

Le moteur possède 3 phases et 32 bobines on a donc : $\frac{32}{3} \approx 10.667$ ce qui implique un enroulement irrégulier (fractionnaire).

1.11 Constante de temps électrique de l'induit

La formule pour calculer τ est la suivante :

$$\tau = \frac{L_{Phase}}{R_{Phase}}$$

Or on a $L_{Phase} = \frac{L_{LL}}{2} = \frac{1.1 \times 10^{-3}}{2} = 0.55 \times 10^{-3}H$ et on avait calculé précédemment $R_{Phase} = 0.04\Omega$ Donc

$$\tau = \frac{0.55 \times 10^{-3}}{0.04}$$

$$= 0.01375s = 13.75ms$$

1.12 vitesse angulaire maximale à vide

La vitesse angulaire maximale à vide (Max. No load speed) est de $N = 994rpm$ avec une conversion rapide on trouve :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \approx 104.09rad/s$$

1.13 valeur des couples (régime continu et pic)

Pour notre moteur on a un couple en régime :

- Continu = 110.4 Nm
- Pic = 339.8 Nm

2 Dimensionnement de l'alimentation

2.1 Nombre de cellules et architecture

On veut obtenir une batterie capable d'alimenter 480VDC or la tension nominale de la batterie est de 3.7V Donc $\frac{480}{3.7} \approx 129.7$ Il nous faudra donc au minimum 130 Cellules en série et on doit alimenter 38A donc $\frac{38}{2.5} \approx 15.2$ Il nous faudra donc 16 cellules en parallèles. Ce qui nous donne donc une architecture **130S16P** et un total de $16 \times 130 = 2080$ cellules en tout.

2.2 Autonomie

On a une capacité totale de 2.5 Ah / cellules donc $2.5 \times 16 = 40Ah$ Le courant nominal est de 38 A donc on peut calculer l'autonomie ainsi : $\frac{40}{38} \approx 1.05h = 63mn$

2.3 Puissance et capacité

La formule pour calculer la puissance est la suivante :

$$\begin{aligned} P &= U \times I \\ &= 480 \times 38 = 18240W = 18.24kW \end{aligned}$$

La capacité énergétique quant à elle se calcule ainsi :

$$\begin{aligned} C_E &= U \times C_{total} \\ &= 480 \times 40 = 19200Wh = 19.2kWh \end{aligned}$$

2.4 Avantage et Inconvénients

La batterie NMC configurée en 130S16P offre une haute densité énergétique, atteignant 19,2 kWh dans un format relativement compact, ce qui la rend adaptée aux besoins de puissance et compacité. Elle délivre un courant continu de 38 A grâce à ses 16 branches en parallèle, idéale pour obtenir une autonomie suffisante

Cependant, il y a plusieurs contraintes. Son prix est élevé en raison des 2 080 cellules nécessaires et de la présence de cobalt, un matériau cher et pas optimal pour l'environnement. Le poids avoisine les 100 kg, sans compter le système de refroidissement.

2.5 Avantage et Inconvénients d'un BMS

Le BMS permet d'obtenir une certaine sécurité et performance (équilibre, surveillance, protection) mais alourdit le coût et la complexité du système. Indispensable pour les batteries lithium, il consomme aussi un peu d'énergie.

2.6 Résistance interne

On a :

$$\begin{aligned} R_{total} &= R_{parrallele} \times N_{series} \\ &= \frac{30m\Omega}{16} \times 130 = 243.75m\Omega \end{aligned}$$

2.7 Courant du circuit

$V_{total} = 3.7V \times 130 = 481V$ sachant qu'on a calculé précédemment $R_{total} = 243.75m$ On peut facilement calculer le courant de court-circuit ainsi :

$$I_{cc} = \frac{V_{total}}{R_{total}}$$

Ce qui nous donne :

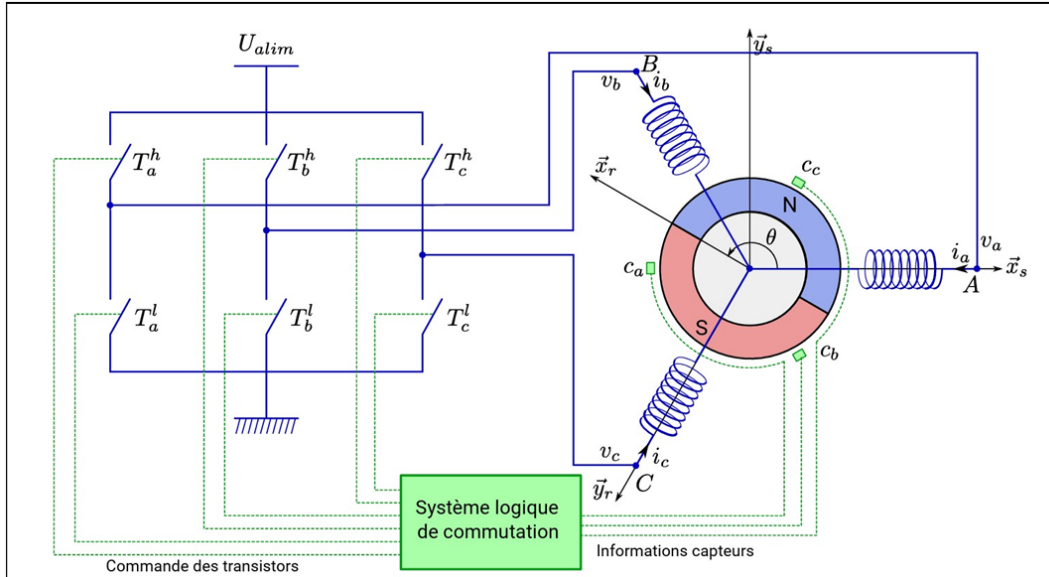
$$I_{cc} = \frac{481}{243.75 \times 10^{-3}} \approx 1973.33A$$

On peut donc dire que le courant de court-circuit vaut **1973A**

2.8 Caractéristique du fusible

Pour protéger la batterie 130S16P (tension nominale 481 V, courant nominal 40 Ah, courant de court-circuit 1973 A), un fusible rapide gPV ou aR est recommandé. Il doit avoir une tension nominale d'au moins 600 VDC (couvrant la tension max de 546 V), un courant nominal de 50 A (marge pour 40 Ah), et une capacité de rupture d'au moins 10 kA

3 Dimensionnement du circuit de contrôle



3.1 Pulsation admissible (max) par le moteur et fréquence et période (max) de pilotage du moteur

La pulsation électrique est liée à la vitesse mécanique par le nombre de paires de pôles ($p=16$)
En utilisant la formule suivante :

$$\omega_e = p \times \omega$$

Ce qui permet de trouver facilement la pulsation électrique.

$$\omega_e = 16 \times 104.09 = \boxed{1665.44 \text{ rad/s}}$$

Désormais on peut trouver la fréquence électrique car :

$$f_e = \frac{\omega_e}{2\pi} = \frac{1665.44}{2\pi} \approx \boxed{265.06 \text{ Hz}}$$

Enfin il nous reste plus qu'à déterminer la période :

$$T_e = \frac{1}{f_e} = \frac{1}{265.06} \approx 0.00377 \text{ s} = \boxed{3.77 \text{ ms}}$$

3.2 Dimensionnement des transistors

D'après le synoptique on a six transistors à dimensionner :

- T_a^h et T_a^l
- T_b^h et T_b^l
- T_c^h et T_c^l

On va choisir des transistors similaires. Dimensionnement du transistor :

- **Technologie :**

MOSFET - N Channel pour leur capacité à gérer des courants et tensions élevés dans des applications de commutation. Le moteur fonctionne à 480 VDC nominal (jusqu'à 600 VDC max) avec 38 Arms par phase (239 Arms en pic), nécessitant des transistors de puissance.

- **Tension maximale :**

Valeur : Les transistors doivent supporter au moins 600 VDC (tension max du moteur) avec une marge de sécurité (ex. 20-50% → 720-900 V).

- **Courant Maximal :**

Valeur : Courant par phase = 38 Arms nominal, 239 Arms en pic. Chaque transistor doit gérer ce courant par phase, plus une marge (ex. 20% → 287 A).

- **Puissance Dissipée :** Pertes par effet Joule par phase = 173.28W Avec 6 transistors (3 hautes, 3 basses), dissipation totale $\approx 173.28W \times 3 = 519.84W$ (si équilibrée). Chaque transistor dissipe environ 86.6W en moyenne, mais en pic, cela peut approcher 261W (puissance max moteur)

- **Boitier :** SOT-227B (ou module similaire comme ISOTOP)

- **Constante de temps :** $\tau = R_g \times C_{iss}$

$$R_g = R_{g,ext} + R_{g,int} = 10 + 1 = 11\Omega$$

$$C_{iss} \approx 10nF$$

$$\tau = R_g \times C_{iss} = 1.1 \times 10^{-7}s = 110ns$$

3.3 Référence disponible

Critère	Détails
Référence	IXYS IXFN360N10
Site marchand	DigiKey
Prix	40-50 USD (prix unitaire, mai 2025, sous réserve de stock)
Disponibilité	En stock (vérifié le 09/05/2025, 500 unités)
Lien notice technique	Télécharger la datasheet

Conclusion

Dans le cadre de notre collaboration avec Magnetic Innovations, nous avons mené une étude approfondie pour valider le dimensionnement du système de commande du moteur PMSM **250-75-1-N3-T2-AIR**. Ce projet s'inscrit dans la mission de Magnetic Innovations de proposer des solutions électromécaniques sur mesure pour des secteurs exigeants tels que l'industrie aérospatiale, automobile, etc.. À partir des données techniques de la fiche produit, nous avons fini par dimensionner les transistors (Ta, Tb, Tc et leurs complémentaires) en sélectionnant le MOSFET **IXFN360N10**, qui répond aux exigences de tension (1000 V), de courant (360 A) et de dissipation thermique (100 W par transistor), tout en assurant une commutation stable à 265.06 Hz avec une constante de temps de 110 ns.