

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des sciences de technologie

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en :
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes électriques

Thème :

Commande d'un moteur pas à pas

Préparé par :

Mell. ABDAERRAOUF Saida
Mell. Kasmi Esma

Membres de jury d'évaluation :

M. Chaabani SB	Président	MCB	Univ. Adrar
M. Abdi Djillali	Encadreur	MCB	Univ. Adrar
M. Oulad Ali Omar	Examineur	MCB	Univ. Adrar

Année Universitaire : 2021/2022




شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة) : عبد الوووق سعيدة
المشرف مذكرة الماستر الموسومة بـ : Moteur pas à pas

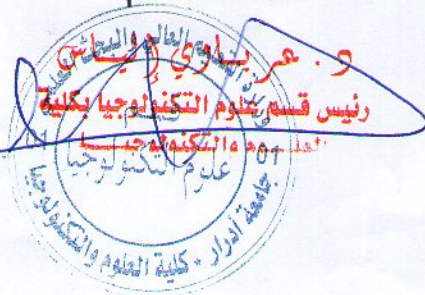
من إنجاز الطالب(ة) : عبد الوووق سعيدة
و الطالب(ة) : قاسمي أسماء
كلية : العلوم والتكنولوجيا
القسم : العلوم والتكنولوجيا
التخصص : تكم كهربائي عسوية
تاريخ تقييم / مناقشة : 2022-06-16

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين
النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
ويمكنهم إيداع النسخ الورقية (02) والايكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:


J. Abde.

ادرار في :
مساعد رئيس القسم:



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Mes remerciements également aux parents, la base de notre existence dans la vie et aussi le secret du succès et de l'excellence et sans notre vie ne serait pas complète.

Nous tenons à remercier notre encadrant, Dr. ABDI Djillali pour avoir abordé un sujet très intéressant et pour ses conseils et sa disponibilité et nous avoir fait bénéficier de ses connaissances et de sa qualité professionnelle.

Nous remercions également les membres du jury, Dr. CHAABANI et M. OULAD ALI Omar, pour l'intérêt qu'ils ont porté à nos recherches en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir de leurs suggestions.

Un grand merci à tous les enseignants de l'Université Ahmed Darya Adrar, en particulier le Département des sciences et technologies.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous... ..

الإهداء

لحمد لله الذي أروع بني آدم في تركيبه عقله

فأعطاه بذلك القدرة على جعل وسيلته الكفاح وغايته النجاح

قال الله تعالى: "وقضى ربك أن لا تعبدوا إلا إياه وبالوالدين إحساناً"

على ضوء هذه الآية أهدي ثمرة جهدي إلى من كلله الله بالهبة الوقار، إلى من علمني العطاء بدون انتظار، إلى من أحمل أسمه بكل افتخار، إلى من أشعل مصباح عقلي وأطفأ ظلمة جهلي وكان لي خير مرشد، من أنتظر أن يرى فلذة كبده متخرجة تخوض غمار الحياة، أبي العزيز رحمه الله وأسكنه فسيح جنانه.

إلى ملاكي في الحياة إلى معنى الحب والحنان والتفاني، إلى بسمّة الحياة وسر الوجود، إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي، إلى أغلى الحبايب أمي الحبيبة أطال الله في عمرها. إلى من تقاسمت معهم أجواء المحبة الأسرية إخواني: عبدالمجيد، عبدالرحمن وأخواتي: مريم، مبروكة، خيرة، نعيمة. وإلى كل عائلتي الكريمة.

إلى الصديقات التي عرفتهن وأحببتهن: كريمة، حنان، مينة، زهراء، زليخة، أسماء، خديجة... إلى زملائي وزميلاتي المفضلين في دفعة 2022.

كل من لم يذكره فمي من قريب أو بعيد، وإلى كل الأساتذة الكرام في دفعة 2022، وكل من تمنى لي التوفيق

Saida

الإهداء

باسم الخالق الذي أضاء الكون بنوره الهي وحده اعبده, و له وحده اسجد خاشعا شاكرا لنعمه
و فضله في إتمام هذا الجهد.

اهدي جهدي إلى من حملتني وهنا على وهن, إلى من يورقها حزني و تبكيها فرحتي, إلى من
دعواتها سر ناجحي.

إلى منبع الحنان السامي و الحب الصافي إلى الغالية أمي.

إلى من كان شمعة تحترق من أجل أن ينير لي دربي, إلى من علمني ان الدنيا كفاح و سلاحها
العلم و المعرفة, إلى منبع عزمي و قوتيوالدي العزيز.

إلى مثلي الأعلى في الحياة و نصفي الثاني, إلى النور الذي يضيء حياتي و المنبع الذي ارتوي
منه حبا و حنانا.....أختي الحنونة.

إلى من افترش بدعه اتهم سعا لمو اصلة الدرب حدتاء الكريمتان

, إلى عنوان البراءة كتاكتيت عائلتنا الصغار, و اخص بالذكر فلذات

كبدي وئام و حسام أبناء أختي, و بوزيان أخي الصغير و نائلة, أدعو الله لهم بالصلاح و أن
أراهم بأعلى المراتب انشالله.

إلى من أمر الله بوصلهم, و جعل فيهم أية في القران الكريم, إلى من رافقوني الدرب في هذه
الحياة منبع التفاؤل و الآمال الراقية ...دمتم... عائلتي الكريمة, كل باسمه و جميل وسمه.

إلى الكريم ابن الكرماء, إلى من كان لنا عوناً و أملاً و لم يبخل علينا بالدعاء شيخي المحترم.
إلى كل الأصدقاء و الأوفياء و الزملاء و الأعزاء و الأخوات الغاليات الذين جمعنتي بهم الحياة اخص

بالذكر رفيقتي و زميلتي في المذكرة سعيدة, و من كانوا سندي الكبير في مشوار دراستي, عبد
المالك و يوسف و شيماء و لطيفة و الزهراء.

إلى كل معلمي و أساتذتي في جميع مستويات التعلم, إلى كل من جال مفكرتي و سقط سهوا من
قلمي و لم تكتبهم مذكرتي.

اهدي هذا العمل المتواضع, سائلة المولى عز و جل أن ينفع به و ينفعنا به و يوفقنا جميعا لما
فيه صلاح البلاد و العباد.

Esma

Listes des acronymes et abreviations

Listes des acronymes et abréviations

Notations	Descriptions
δ	L'angle de pas du moteur
S_r	Nombre de pas par tour
θ	Position
N	Nombre de pas
ω	Vitesse angulaire
n	Vitesse du moteur
f	Fréquence du signal d'impulsion
$e_{A+}, e_{B+}, e_{A-}, e_{B-}$	Force contre-électromotrice induite à travers
$i_{A+}, i_{B+}, i_{A-}, i_{B-}$	Courant circulant
K_m	Constante de couple du moteur.
N_r	Nombre de dents sur chacun des deux pôles du rotor
R	Résistance du demi-enroulement
L	L'inductance du demi-enroulement
R_m	Résistance magnétisante.
B	L'amortissement en rotation.
J	L'inertie du système.
ω	Vitesse du rotor.
θ	L'angle du rotor.
T_d	L'amplitude du couple de détente.
N_w, N_t	Nombre d'enroulements dans le stator (N_w) et le nombre de dents sur le rotor (N_t),
u_a, u_b	Tension aux bornes des phases
R	Résistance de phase
i_a, i_b	Courant traversant chaque phase
L	L'inductance dans les deux phases
e_a, e_b	Sont les tensions
T_E	Couple électromagnétique produit
T_L	Couple résistant
T_D	Couple de détente
ω_r	Vitesse de rotation

Listes des acronymes et abreviations

K_v	Coefficient de frottement visqueux
K_m	Constante de couple
N_r	Nombre de dents du rotor (pôle paires)
θ_r	Position du rotor
VRM ou VR	Moteur pas à pas à réluctance variable (VRM: Variable Reluctance Motor)
PMSM ou PM	Moteur pas à pas à aimant permanent (PMSM: Permanent Magnet Stepper Motor)
HSM ou HM	Moteur pas à pas hybride (HSM: Hybrid Stepper Motor)
EMF	Force électromotrice

Liste des Tableaux

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Fig. I.1	Moteur pas à pas unipolaire cinq fils.	6
Fig. I.2	Arrangement polaire des transistors de commande de l'excitation des enroulements d'un moteur pas à pas unipolaire	6
Fig. I.3	Circuits d'électroaimants avec une prise centrale, (a) Le courant circule du centre vers la terre, (b) le courant circule du centre de l'enroulement vers le haut.	7
Fig. I.4	Connexions d'un moteur pas à pas unipolaire.	8
Fig. I.5	Exemple de câblage diagrammes en un pas à pas Fiche technique.	9
Fig. I.6	Séquence de la méthode d'excitation par pas d'onde : (a) dans le sens des aiguilles d'une montre, (b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.	10
Fig. I.7	Séquence de conduite en mode pas à pas (une phase activée).	10
Fig. I.8	Séquence de la méthode d'excitation à pas complet : (a) dans le sens des aiguilles d'une montre, (b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.	11
Fig. I.9	Séquence de la méthode d'excitation à demi-pas : (a) dans le sens des aiguilles d'une montre, (b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.	12
Fig. I.10	Moteur pas à pas à aimant permanent.	13
Fig. I.11	Structure interne d'un moteur pas à pas à aimant permanent (PM).	15
Fig. I.12	rotation d'un moteur pas à pas PM, (a) A+ est positif (pôle nord), A- est négatif (pôle sud) et la phase B+ n'est pas alimentée, (b) B+ est positif (pôle nord), B- est négatif (pôle sud) et la phase A+ n'est pas alimentée.	16
Fig. I.13	Rotation supplémentaire d'un moteur pas à pas PM. (a) B+ est négatif (pôle sud), B- est positif (pôle nord) et A+ n'est pas alimenté. (b) A+ est positif (pôle nord), A- est négatif (pôle sud) et B+ n'est pas alimenté.	17
Fig. I.14	Position des dents du rotor par rapport aux enroulements.	18

Liste des Tableaux

Fig. I.15	Structure d'un moteur pas à pas à réluctance variable (VR).	19
Fig. I.16	Rotation de 15° d'un moteur pas à pas VR. (a) B+ et B- sont alimentés , (b) C+ et C- sont alimentés.	20
Fig. I.17	<i>Pile unique.</i>	21
Fig. I.18	<i>Multi-empilement</i>	22
Fig. I.19	Moteur pas à pas hybride (HY).	23
Fig. I.20	Pôles de rotor d'un moteur pas à pas HY.	24
Fig. I.21	Stator dentelé d'un pas à pas HY.	25
Fig. I.22	Moteur pas à pas hybride 4 fils Câblage 4 fils.	25
Fig. I.23	Moteur pas à pas hybride 6 fils Câblage 6 fils.	25
Fig. I.24	Moteur pas à pas hybride 8 fils Câblage 8 fils.	26
Fig. I.25	Le circuit équivalent d'un HSM biphasé.	26
Fig. II.1	Block Simulink de contrôle (commande) d'un moteur pas à pas unipolaire	34
Fig. II.2	Signal Ref génère par le bloc <i>Demand</i> de la Fig. I.1 obtenu pour les paramètre d'entrés du tableau II.2 qui correspond un contrôle de position.	35
Fig. II.3	Signal Ref génère par le bloc <i>Demand</i> de la Fig. I.1 obtenu pour les paramètre d'entrés du tableau II.3 qui correspond un contrôle de vitesse.	35
Fig. II.4	Signaux du bloc Simulink de la Fig. II. 1, lors d'un contrôle de position. (a) Signal Ref du bloc Demand et nombre de pas effectués par l'arbre, (b) train d'impulsions généré par la MLI du pilote ainsi que le signal Pin ENA et Pin REN.	37
Figure II.5	Signaux du bloc Simulink de la Fig. II. 1, lors d'un contrôle de vitesse. (a) Signal Ref du bloc Demand et nombre de pas effectués par l'arbre, (b) train d'impulsions généré par la MLI du pilote ainsi que le signal Pin ENA et Pin REN.	38

Liste des Tableaux

Fig. II.6	Résultats de test de contrôle de position en mode à pas complet d'un moteur pas à pas unipolaire: (a) Signal Ref et nombre de pas et (b) vitesse angulaire.	39
Fig. II.7	Résultats de test de contrôle de vitesse en mode à pas complet d'un moteur pas à pas unipolaire. (a) Signal Ref et nombre de pas et (b) vitesse angulaire.	41
Fig. II.8	Résultats de test de contrôle de position en mode à demi-pas d'un moteur pas à pas unipolaire: (a) Signal Ref et nombre de pas et (b) vitesse angulaire.	42
Fig. II.9	Résultats de test de contrôle de vitesse en mode à demi-pas d'un moteur pas à pas unipolaire: (a) Signal Ref et nombre de pas et (b) vitesse angulaire.	43
Fig. II. 10	Block Simulink de commande d'un moteur pas à pas hybride	45
Fig. II.11	Signaux STEP et DIR qui sont la sortie du contrôleur et l'entrée du pilot	46
Fig. II.12	Moteur à deux phases.	47
Fig. II.13	Commutateurs à semi-conducteurs du circuit d'entraînement bipolaire pour moteur pas à pas hybride.	47
Fig. II.14	Chemins du courant dans une phase du moteur. (a) Chemin du courant qui fait tourner le moteur dans le sens horaire, (b) Chemin du courant qui fait tourner le moteur dans le sens antihoraire, (c) Chemin du court-circuit de l'alimentation.	48
Fig. II.15	Bloc Simulink du Pilote détaillé.	48
Fig. II.16	Caractéristiques à vide du moteur pas à pas hybride pour un contrôle de position (200 pas/s): (a) la tension par phase, (b) courant par phase, (c) couple électromagnétique, (d) vitesse angulaire du rotor, (e) position du rotor.	51
Fig. II.17.	Caractéristiques à vide du moteur pas à pas hybride pour un contrôle de vitesse (500 pas/s): (a) la tension par phase, (b) courant par phase, (c) couple électromagnétique, (d) vitesse angulaire du rotor, (e) position du rotor.	52
Fig. II.18	Caractéristiques en charge (couple résistant 0,1 Nm) du moteur pas à pas hybride pour un contrôle de position (200 pas/s): (a) la tension par phase, (b) courant par phase, (c) couple électromagnétique, (d) vitesse angulaire du rotor, (e) position du rotor.	53
Fig. II.19	Caractéristiques en charge (couple résistant 0,4 Nm) du moteur pas à pas hybride pour un contrôle de vitesse (500 pas/s): (a) la tension par phase, (b) courant par phase, (c) couple électromagnétique, (d) vitesse angulaire du rotor, (e) position du rotor.	54

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableaux	Titre	Page
Tableau I.1	Séquence de la méthode d'excitation par pas d'onde, (a) dans le sens des aiguilles d'une montre, (b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.	09
Tableau I.2	Séquence de deux phases sur la méthode d'excitation pas à pas.	11
Tableau I.3	Séquence de la méthode d'excitation par demi-pas.	12
Tableau I.4	Différence entre les types du moteur pas à pas à réluctance variable.	21
Tableau I.5	Comparaison entre les différents types de moteurs pas à pas.	29
Tableau II. 1	Paramètres du moteur pas à pas unipolaire	34
Tableau II. 2	Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de position	34
Tableau II. 3	Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de vitesse	34
Tableau II. 4	Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de vitesse à demi-pas	40
Tableau II. 5	Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de position à demi-pas	42
Tableau II. 6	Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de vitesse à demi-pas	43
Tableau II. 7	Actions que doit effectuer l'arbre du moteur et qui correspondent aux signaux STEP et DIR de la Fig. II. 12	46
Tableau II. 8	Paramètres du moteur pas à pas Hybride	49

Sommaire

Sommaire

Titre	Page
Remerciements	
Listes des acronymes et abréviations	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Sommer	
Introduction général	1
Chapitre I: État de l'Art des moteurs pas à pas	
I.1. Introduction.	3
I.2. Hystérique.	3
I.3. Type de moteurs pas à pas.	4
I.4. Domaines d'applications.	4
I.5. Moteur pas a pas unipolaire.	5
I.5.1. Construction et fonctionnement.	5
I. 5. 2. Commandes.	6
I.5. 2. 1. Mode à pas complet	9
I.5.2.1.a Méthode d'excitation par pas à pas d'onde (une phase activée)	9
I.5.2.1.b. Méthode d'excitation pas à pas complète (méthode d'excitation en deux phases)	10
I.5. 2. 2. Mode à demi-pas	11

Sommaire

I.5.3. Modèle mathématique	13
I.6. Moteur pas à pas à aimant permanent.	14
I.6.1. Construction et fonctionnement	15
I.6.2. Les avantages et les inconvénients du moteur pas a pas a aimant permanent	17
I.7. Moteur pas à pas à réluctance variable	17
I.7.1. Construction et Fonctionnement	18
I.7.2. Types de moteur pas à pas à réluctance variable	20
I.7.3. Les avantages et les inconvénients du moteur pas a pas variable réluctance:	21
I.8. Moteur pas à pas bipolaire	22
I.9. Moteur pas a pas hybride	22
I.9.1. Construction et fonctionnement	23
I.9.2. Commande	24
I.9.3. Modèle mathématique	25
I.9.4. Les avantages et l'inconvénient du moteur pas à pas hybride	27
I.10. Comparaison entre les différents types de moteurs pas à pas.	29
I.11. Les avantages et l'inconvénient d'un moteur pas à pas	29
I.12. Conclusion	30
Chapitre II Simulations et résultats.	
II. 1 Introduction	33
II. 2 Commande d'un moteur pas a pas unipolaire	33

Sommaire

II. 2. 1 Description du bloc Matlab/Simulink	33
II. 2. 1. 1. Moteur pas à pas unipolaire	34
II. 2. 1. 2. Bloc Demand	34
II. 2. 1. 3. Contrôleur	36
II. 2. 1. 4. Pilote	36
II. 2. 2. Résultats de la simulation du moteur unipolaire	38
II. 2. 2. 1. Test de contrôle de position en mode à pas complet	39
II. 2. 2. 2. Test de contrôle de vitesse en mode à pas complet	40
II. 2. 2. 3. Test de contrôle de position en mode à demi-pas	41
II. 2. 2. 4. Test de contrôle de vitesse en mode à demi-pas	43
II. 3 Commande d'un moteur pas a pas hybride	44
II. 3. 1 Description du bloc Matlab/Simulink	44
II. 3. 1. 1. Source de tension (alimentation)	45
II. 3. 1. 2. Contrôleur.	45
II. 3. 1. 3. Pilote.	46
II. 3. 1. 4. Moteur pas à pas hybride :	49
II. 3. 1. 5. Paramètres de sortie du moteur	49
II. 3. 2 Résultats de la simulation du moteur hybride	50
II. 3. 2. 1 Test de fonctionnement à vide du moteur hybride	50
II. 3. 2. 2 Test de fonctionnement en charge du moteur hybride	53
II. 4 Conclusion	55

Sommaire

Conclusion général	58
Référence	61
Résumé	

Introduction générale

Introduction générale

Comme tout moteur électrique le moteur pas à pas est constitué d'un rotor (partie mobile) et d'un stator (partie fixe). Contrairement à un moteur à courant continu ou un moteur asynchrone qui tournent en continu, le moteur pas à pas divise un tour complet de rotation en plusieurs étapes et tourne selon des angles de pas discrets, suite à des signaux d'entraînement externes appliqués aux bobines du stator. De ce fait, il est utilisé dans plusieurs applications de contrôle de mouvement, souvent en boucle ouverte (contrôle moins coûteux que celui de la boucle fermée) pour le positionnement de charge mécanique à grande vitesse. Ses applications appartiennent aux domaines : robotique, informatique, astronomie... etc. Un autre facteur de mérite important est le couple, en particulier le couple de maintien. Un moteur pas à pas est censé maintenir sa position lorsqu'il s'arrête. Vu l'utilité des moteurs pas à pas, nous avons réalisé le présent travail qui a comme thème: la commande d'un moteur pas à pas. Pour ce faire, nous l'avons répartie en deux chapitres.

Au 1^{er} chapitre nous essayerons de donner les informations et connaissances essentielles sur les moteurs pas à pas, en se focalisons sur deux types de moteurs pas à pas qui feront l'objet de simulations au chapitre II. A savoir le moteur pas à pas unipolaire et le moteur hybride.

Au 2^{ème} chapitre nous présenterons et discuterons les résultats des simulations obtenus à l'aide de bloc Matlab/simulink pour deux types de moteurs pas à pas. A la 1^{ère} partie de ce chapitre, nous commencerons par une commande (un contrôle) plus au moins simple est qui est celle d'un moteur pas à pas unipolaire. A la 2^{ème} partie, on passe à une commande (un contrôle) plus au moins compliquée est qui est le principal objectif de ce travail. Il s'agit de la commande (du contrôle) d'un moteur pas à pas hybride, qui est le moteur le plus sophistiqué des moteurs pas à pas.

Chapitre I

État de l'art du moteur pas à pas

I. 1 Introduction

Dans ce chapitre nous essayons de donner les informations et connaissances essentielles sur les moteurs pas à pas, en se focalisons sur deux types de moteurs pas à pas qui feront l'objet de simulations au chapitre II. Nous commençons le présent chapitre par une revue historique, et les types de moteur pas à pas ainsi que leurs domaines d'applications. Ensuite, on passe à la construction, le principe de fonctionnement ainsi que la commande et la modélisation mathématique de chacun des deux moteurs : pas à pas unipolaire et pas à pas hybride. Puis, on présente une comparaison entre les différents types de moteurs pas à pas suivie par les avantages et les inconvénients de chaque type. Enfin, on termine par les conclusions les plus intéressantes tirées de ce chapitre.

Comme tout moteur électrique le moteur pas à pas est constitué d'un rotor (partie mobile) et d'un stator (partie fixe). Le rotor est constitué d'aimants permanents ou de dent en matériaux ferromagnétique et ne contient pas de bobines. Ainsi, ce moteur n'a pas besoin de collecteur ou de balais, qui sont les points faibles d'un moteur à courant continu. Au tour du rotor se trouve le stator, qui contient une série d'électroaimants (bobines à noyau de fer). Contrairement à un moteur à courant continu ou un moteur asynchrone qui tournent en continu, le moteur pas à pas divise un tour complet de rotation en plusieurs étapes et tourne selon des angles de pas discrets, suite à des signaux d'entraînement externes appliqués aux bobines du stator. De ce fait, il est utilisé dans plusieurs applications de contrôle de mouvement, souvent en boucle ouverte (contrôle moins coûteux que celui de la boucle fermée) pour le positionnement de charge mécanique à grande vitesse. Ses applications appartiennent aux domaines : robotique, informatique, astronomie... etc. Un autre facteur de mérite important est le couple, en particulier le couple de maintien. Un moteur pas à pas est censé maintenir sa position lorsqu'il s'arrête

I.2. Historique

Les premiers moteurs pas-à-pas ont été utilisés par la marine de guerre britannique dans les années 1920, pour déplacer les indicateurs de direction de lance-torpilles et des canons. Dans les années 1930, l'ingénieur *Marius Lavet* a découvert un type particulier de moteur pas à pas à aimant, connu maintenant sous le nom de moteur *Lavet*, qui a permis le développement de cette machine dans le domaine de l'horlogerie grâce à sa miniaturisation et à son faible coût. Il équipe aujourd'hui presque toutes les montres à aiguilles. Le moteur pas à

pas classique est apparu dans les années 1940, mais c'est l'avènement de l'électronique numérique dans les années 1960 qui a permis son développement [1].

I.3. Types des moteurs pas à pas

Le principe de fonctionnement du moteur pas à pas est très simple car la position de repos du rotor s'ajuste avec une rotation à angle fixe en utilisant des commutateurs d'excitation des électroaimants du stator. C'est le concept de base pour tous les types de moteurs pas à pas. Cependant, par une caractérisation qui se base sur la structure de la machine et sur le principe de fonctionnement, le moteur pas à pas a trois types: *i*)le moteur pas à pas à réluctance variable (VRM: *Variable Reluctance Motor*), *ii*)le moteur pas à pas à aimant permanent (PMSM: *Permanent Magnet Stepper Motor*) et *iii*) Moteur pas à pas hybride (HSM: *Hybrid Stepper Motor*)[2].

Les moteurs à aimants permanents ont un rotor magnétisé, tandis que les moteurs à réluctance variable ont des rotors dentés en fer doux. Les moteurs pas à pas hybrides combinent des aspects à la fois de la technologie à aimant permanent et à réluctance variable. Le stator du moteur pas à pas contient plusieurs enroulements. La disposition de ces enroulements est le principal facteur qui distingue les différents types de moteurs pas à pas d'un point de vue électrique [3].

I.4. Domaines d'applications

Les moteurs pas à pas sont très utilisés dans toutes les applications mécaniques ou l'on doit contrôler simplement la position ou la vitesse d'un système en boucle ouverte, typiquement dans les systèmes de positionnement et d'indexation.

- Ils sont utilisés en robotique : positionnement des axes, vitesse variable du robot, les imprimantes classiques et imprimantes 3D, les scanner, les photocopieurs et les platines vinyles de DJ.
- En informatique : déplacement d'une tête de lecture, déplacement de la tête d'impression, avance du papier pour les imprimantes.
- En astronomie : positionnement du télescope pour suivre un astre.
- A la réception TV par satellites : positionnement d'une parabole.
- Ils sont présents aussi dans les pompes à perfusion, pousse- seringues, système de positionnement sur machine industrielle et machine-outil[4].

I. 5. Moteur pas à pas unipolaire

I. 5. 1. Construction et fonctionnement

Le moteur pas à pas unipolaire à un rotor à aimant permanent et son stator contient généralement deux phases qu'on nommera A et B (**Fig. I. 1**). Chaque phase comporte deux bobines (à l'origine c'est une seule bobine à point milieu), et chaque bobine peut être contrôlée indépendamment. Une bobine est soit excitée soit non excitée et son courant prend toujours une seule direction et ne change jamais de sens (bobine unipolaire). De cela vient le mot moteur unipolaire. Cet agencement des enroulements (des bobines) donne six fils, dont deux sont des fils communs. Ces derniers sont souvent câblés ensemble en interne pour que le moteur n'ait que cinq fils à sa sortie (A+, A-, B+, B- et commun) comme illustré à la (**Fig. I. 1**). La (**Fig. I. 2**) présente la technique d'alimentation de bobine d'un moteur pas à pas unipolaire. Le fils commun relie les prises centrales (A0 et B0) des deux phases à la borne positive de l'alimentation. Les ports (A+, B+, A- et B-) sont mis à la terre par l'intermédiaire de transistors (MOSFET). Ainsi, la commutation dans chacune des quatre bobines peut être facilement effectuée avec un seul transistor, qui agit comme un interrupteur pour chaque bobine. Lorsqu'une ou deux transistors reçoivent des impulsions, ils conduisent des courants qui excitent les bobines. Ces dernières produisent une force magnétique qui attire le rotor à une certaine position.

Chaque impulsion appliquée à un transistor conduit à l'excitation d'une bobine. Cette dernière se polarise et attire le rotor qui à son tour déplace l'arbre à un certain angle constant appelé l'angle de pas. L'angle de pas est défini comme l'angle auquel le rotor se déplace lorsqu'une impulsion d'entrée est appliquée au stator et il est donné par :

$$\delta = \frac{360^\circ}{S_r}$$

La position et la vitesse angulaire sont données par :

$$\theta = N\delta$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

La vitesse du moteur est donnée par :

$$n = \frac{60\delta}{360} f$$

Où δ est l'angle de pas du moteur en degré/pas, S_r est le nombre de pas par tour, θ est la position, N est le nombre de pas, ω est la vitesse angulaire en [rad/sec], n est la vitesse du

moteur en [tr/min], et f est la fréquence du signal d'impulsion en [Hz] (nombre d'impulsions d'entrée/sec).

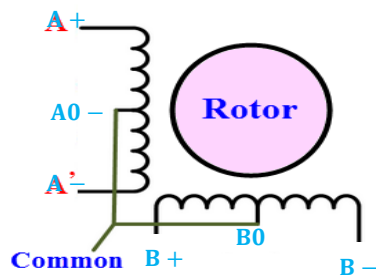


Fig. I. 1. Moteur pas à pas unipolaire à cinq fils.

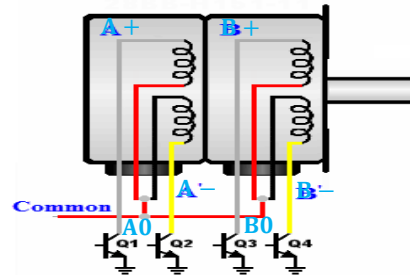


Fig. I. 2. Arrangement polaire des transistors de commande de l'excitation des enroulements d'un moteur pas à pas unipolaire.

I. 5. 2. Commande

A la commande d'un moteur pas à pas unipolaire, généralement, deux techniques sont utilisées. La première est appelée le mode à pas complet et la seconde est appelée mode à demi-pas.

Il faut dire d'emblée que bien qu'il s'agisse de la manière la plus simple et la moins chère de contrôler un moteur pas à pas, le couple obtenu est inférieur de 30% à celui d'un moteur bipolaire. Ce pilote est appelé pilote de tension constante $\frac{L}{R}$. Cela signifie que l'alimentation des bobines utilise une tension constante. La valeur maximale du courant traversant les enroulements dépend donc de sa résistance et de sa tension $I = \frac{U}{R}$. La bobine d'inductance détermine la variation maximale alors que le courant $\frac{di}{dt} = UL$. La vitesse maximale pouvant commander un pilote de moteur pas à pas unipolaire avec un tel enroulement dépend de l'inductance L , de sorte que sur un certain flux de vitesse, vous ne "progresserez" pas la tension. Cela peut encore apporter une telle amélioration du pilote en changeant l'électronique (qui est néanmoins devenue moindre) et utilisant une deuxième source de tension. La première tension de source, supérieure à la valeur nominale, sera utilisée pour alimenter l'enroulement pendant une courte période, uniquement pour augmenter la vitesse de variation du courant jusqu'à ce qu'il atteigne sa valeur nominale.

La première alimentation est déconnectée et la bobine sera en outre alimentée par la deuxième tension de source (valeur nominale) pour maintenir un courant constant (au maximum) dans les deux périodes de repos de la bobine alimentée [5].

Le câblage d'un moteur pas à pas unipolaire est plus compliqué que celui d'un moteur bipolaire, mais le but est le même : alimenter A+, A-, B+ et B- et régler leurs pôles nord/sud en conséquence. Pour comprendre comment cela se fait, considérez les deux circuits représentés sur la (**Fig. I. 3**).

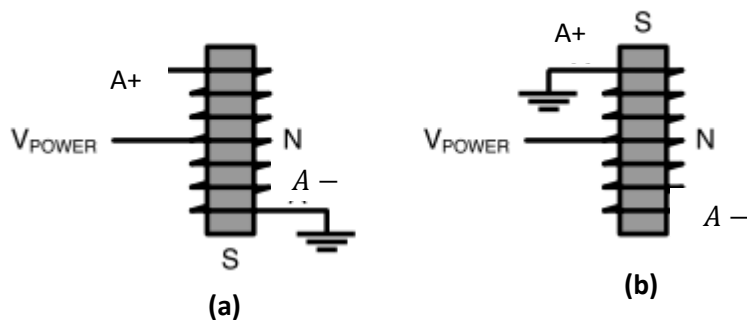


Fig. I. 3. Circuits d'électroaimants avec une prise centrale, (a) Le courant circule du centre vers la terre, (b) le courant circule du centre de l'enroulement vers le haut.

Dans les deux figures, V_{POWER} est connecté au centre de l'enroulement de l'électroaimant. Ce type de connexion s'appelle une prise centrale.

Sur la (**Fig. I. 3. a**). Le bas de l'enroulement est relié à la terre. Le courant circule du centre vers la terre, alimentant l'électroaimant et faisant du bas de l'enroulement (étiqueté A-) le pôle sud. Le pôle nord est situé au centre.

Maintenant, voici la partie délicate : le haut de l'enroulement n'est connecté à rien, donc aucun courant ne circule du haut de l'enroulement vers le centre. Cependant, tout le noyau de fer est magnétisé par le courant dans le fil inférieur, ce qui signifie que le sommet de l'enroulement se comporte également comme le pôle nord de l'électroaimant. Par conséquent, dans la (**Fig. I. 3. a**). A+ est le nord et A- est le sud. La (**Fig. I. 3. b**) illustre la situation inverse. Le haut de l'enroulement est relié à la terre, de sorte que le courant circule du centre de l'enroulement vers le haut. Cela fait du haut de l'enroulement (A+) le pôle sud et le centre de l'enroulement le pôle nord. Parce que tout le noyau de fer est magnétisé, le bas de l'enroulement (A-) se comporte également comme le pôle nord.

Du point de vue d'un concepteur de circuit, le contrôle d'un moteur pas à pas unipolaire biphasé nécessite trois étapes :

1. Fournir V_{POWER} aux enroulements A+/A- et B+/B-.
2. Pour chaque enroulement, connectez un fil à la terre pour définir les pôles magnétiques.
3. Laissez les autres fils non connectés.

La **Fig. I. 4** illustre les six fils entrant dans le moteur pas à pas unipolaire : deux portent l'alimentation ($V_{POWER A}$ et $V_{POWER B}$) et quatre sont connectés à A+, A-, B+ ou B-. Chacun de ces quatre derniers fils est connecté à un MOSFET. Lorsque la tension de grille du MOSFET dépasse son seuil, le fil est connecté à la terre. Sinon, le fil est laissé non connecté.

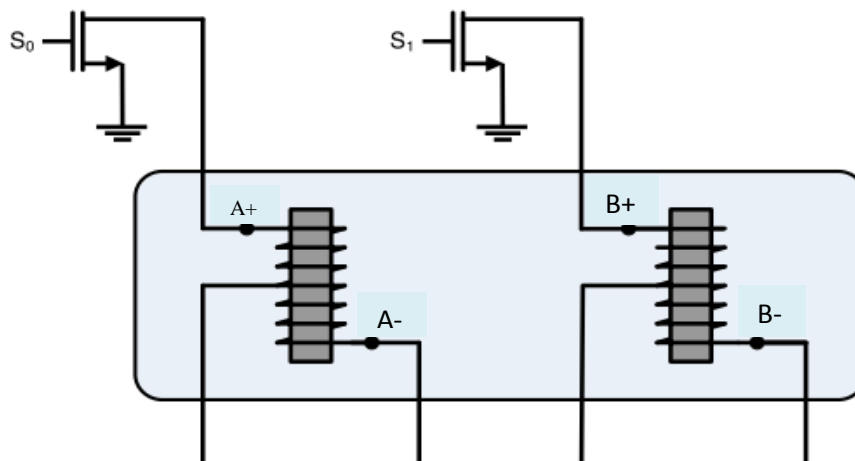


Fig. I.4. Connexions d'un moteur pas à pas unipolaire.

Lorsqu'un MOSFET s'allume, l'extrémité correspondante de l'enroulement devient le pôle sud. L'extrémité opposée de l'enroulement devient le pôle nord. Par exemple, lorsqu'une tension est appliquée à S1, le courant résultant fait de B+ le pôle sud et B- le pôle nord. De nombreux moteurs pas à pas unipolaires ont cinq fils au lieu de six. Pour ces moteurs, les deux fils d'alimentation, $V_{POWER A}$ et $V_{POWER B}$, sont connectés ensemble. Les quatre autres fils restent inchangés.

Les moteurs pas à pas unipolaires sont plus faciles à contrôler que les pas à pas bipolaires car il n'est pas nécessaire de gérer les commutateurs de deux ponts en H.

Cependant, lorsqu'un moteur pas à pas unipolaire est alimenté, seule la moitié de l'électroaimant est utilisée. Par conséquent, si un moteur pas à pas unipolaire et un moteur pas à pas bipolaire ont les mêmes enroulements, le moteur pas à pas unipolaire sera deux fois moins efficace.

Si vous ignorez les fils V_{POWER} d'un moteur pas à pas unipolaire, vous pouvez fournir du courant directement entre A+ et A- et entre B+ et B-. Essentiellement, il s'agit de piloter un moteur pas à pas unipolaire comme un moteur pas à pas bipolaire. Et **Fig. I. 5.** Montre un exemple de diagramme pour un moteur pas à pas bipolaire et un moteur pas à pas unipolaire.

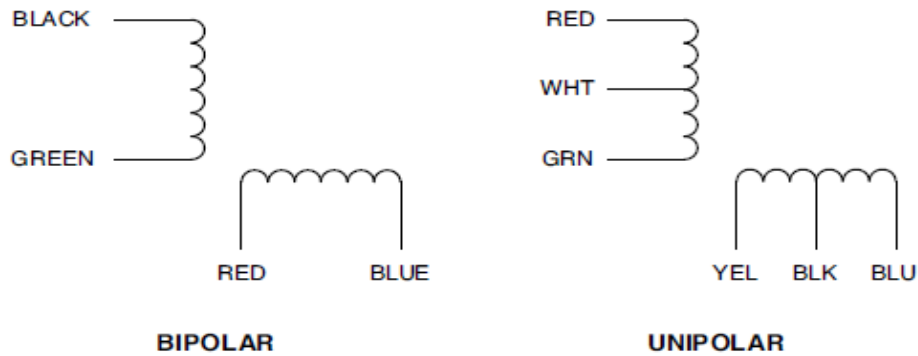


Fig. I.5. Exemple de câblage diagrammes en un pas à pas Fiche technique.

Comme de nombreuses fiches techniques, cette figure n'identifie pas quel enroulement est A+/A- et lequel est B+/B-. Si vous remplacez A+/A- par B+/B- dans une séquence de commande, la rotation du moteur ne sera pas sérieusement affecté[6].

I.5. 2. 1. Mode à pas complet

Entraînement pas à pas complet L'entraînement pas à pas complet peut être effectué avec une seule phase activée ou deux phases activées.

I.5.2.1.a. Méthode d'excitation par pas à pas d'onde (une phase activée) :

Lorsque la méthode à une phase est utilisée[7]. Un seul enroulement de phase est alimenté à une période. Les étapes sont dirigées dans l'instruction d'un à quatre. Après la quatrième étape, la commande est répétitive à partir de la première étape ; fait tourner le moteur dans le sens des aiguilles d'une montre, inverser l'ordre des étapes de quatre à un fera tourner le moteur dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, comme indiqué dans le **tableau I.1** et les **Fig. I.6**[8].

Étape	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

(a) Sens horaire

Étape	Q1	Q2	Q3	Q4
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	1	0	0	0

(b) Sens antihoraire

Tableau I.1. Séquence de la méthode d'excitation par pas d'onde, (a) dans le sens des aiguilles d'une montre, (b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

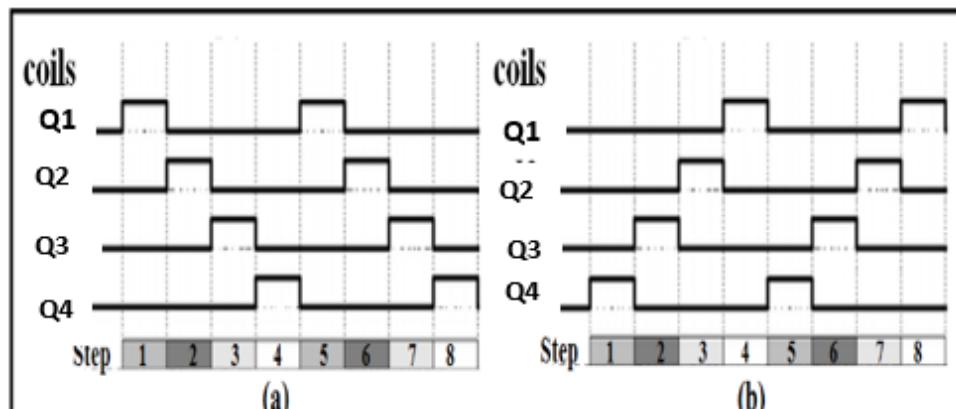


Fig. I.6. Séquence de la méthode d'excitation par pas d'onde : (a) dans le sens des aiguilles d'une montre, (b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Le moteur tourne avec une seule phase alimentée à la fois. Ainsi, dans ce mode, la quantité de puissance est inférieure au pilote de l'un des modes d'excitation[9].

La **Fig. I. 7** montre à quoi ressemble la séquence de signalisation lors du contrôle d'un moteur pas à pas dans ce mode[6].

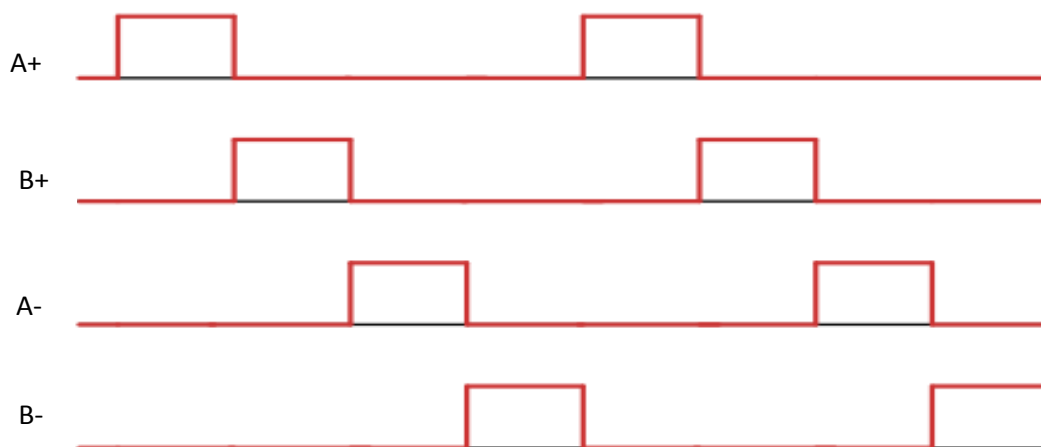


Fig. I.7. Séquence de conduite en mode pas à pas (une phase activée).

I.5.2.1.b. Méthode d'excitation pas à pas complète (méthode d'excitation en deux phases):

En mode pas à pas (deux phases activées), le contrôleur alimente deux enroulements à la fois[6].

Cette méthode est aussi appelée pas à pas excitation car elle provoque une rotation par étapes naturelles complètes. L'ordre dans lequel les bobines doivent être alimentées est donné dans le

tableau (I.2-a). Comme en mode monophasé, l'ordre d'inversion le fait tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre comme dans le **tableau I.2** et les **Fig. I.8** [8].

Deux phases sont toujours actives afin que le moteur fournisse son couple nominal maximal. Dès qu'une phase est désactivée, une autre est activée [7].

Étape	Q1	Q2	Q3	Q4
1	1	0	0	1
2	1	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1

(a) dans le sens des aiguilles d'une montre.

Étape	Q1	Q2	Q3	Q4
1	0	0	1	1
2	0	1	1	0
3	1	1	0	0
4	1	0	0	1

(b) sens anti-horaire.

Tableau. I.2. Séquence de deux phases sur la méthode d'excitation pas à pas.

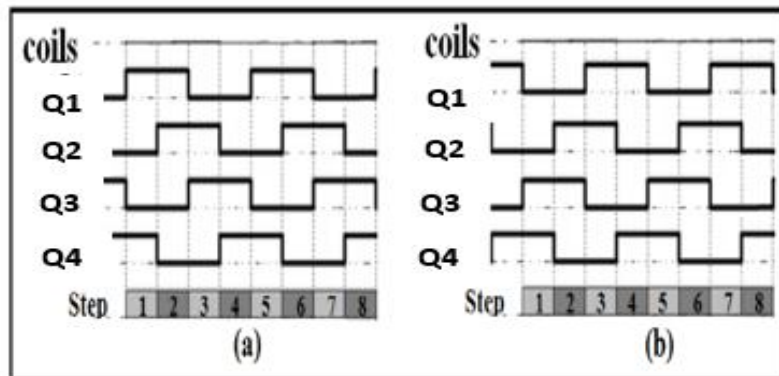


Fig. I.8. Séquence de la méthode d'excitation à pas complet : (a) dans le sens des aiguilles d'une montre, (b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

I.5. 2. 2. Mode à demi-pas

Excitation à demi-pas : la commande à demi-pas alterne entre la mise sous tension d'une phase et de deux phases simultanément (c'est-à-dire qu'une séquence de demi-pas est un mélange de séquences de pas d'onde et de pas complets) [8].

Cela augmente la résolution angulaire [7].

Dans ce mode, le rotor s'aligne avec les enroulements (lorsqu'un enroulement est alimenté) et entre les enroulements (lorsque deux enroulements sont alimentés). Cela réduit efficacement l'angle de pas du moteur de moitié. Autrement dit, si l'angle de pas du moteur pas à pas est de $1,8^\circ$, il tournera à $0,9^\circ$ en mode demi-pas [6]. Ce mode donne deux fois la résolution et un fonctionnement plus fluide par rapport au mode pas à pas complet. Le mode demi-pas fournit 15 % de couple en moins que le mode pas à pas complet biphasé. La modification en demi-pas supprime ce couple en diminuant mais en augmentant le courant appliqué au moteur lorsqu'une seule phase est alimentée[9].

L'inconvénient de ce mode est que, lorsqu'un seul enroulement est alimenté, le rotor tourne avec environ 20 % de couple en moins[6].

Cela peut être atténué en augmentant le courant dans l'enroulement actif pour compenser[7].

Etape	Q1	Q2	Q3	Q4
1	1	0	0	1
2	1	0	0	0
3	1	1	0	0
4	0	1	0	0
5	0	1	1	0
6	0	0	1	0
7	0	0	1	1
8	0	0	0	1

Etape	Q1	Q2	Q3	Q4
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	0	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	0	0
6	1	1	0	0
7	1	0	0	0
8	1	0	0	1

(a) dans le sens des aiguilles d'une montre.

(b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre

Tableau. I.3. Séquence de la méthode d'excitation par demi-pas.

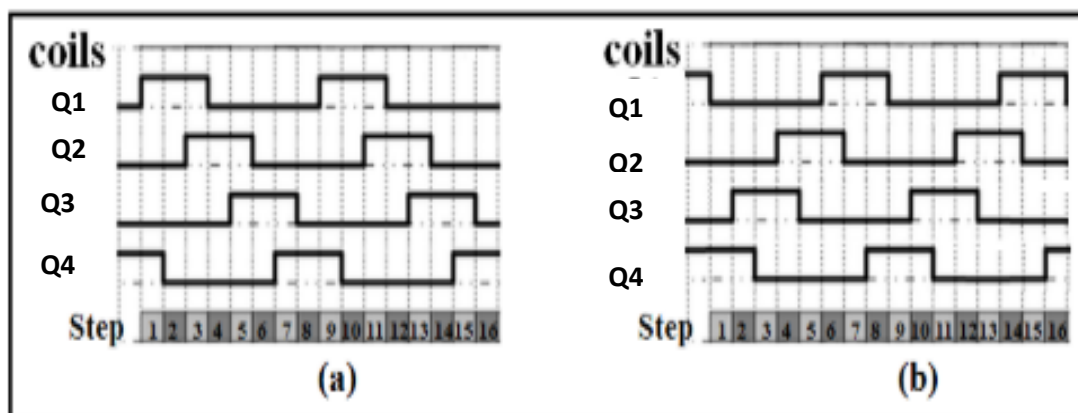


Fig. I.9. Séquence de la méthode d'excitation à demi-pas : (a) dans le sens des aiguilles d'une montre, (b) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

La séquence en demi-pas a le plus de couple et est la plus stable à des vitesses plus élevées. Cela a aussi la résolution la plus élevée des principales méthodes de pas à pas ; par conséquent, ce type d'excitation pas à pas est préféré au mode complet [8].

I.5.3. Modèle mathématique

Moteur pas à pas unipolaire représente un moteur pas à pas qui a des prises centrales sur les enroulements biphasés. Les courants d'enroulement et la puissance mécanique sont définis par les équations suivantes:

$$e_{A+} = -K_m \omega \sin(N_r \theta) \quad (I.1)$$

$$e_{A-} = K_m \omega \sin(N_r \theta) \quad (I.2)$$

$$e_{B+} = K_m \omega \sin(N_r \theta) \quad (I.3)$$

$$e_{B-} = -K_m \omega \sin(N_r \theta) \quad (I.5)$$

$$\frac{di_{A+}}{dt} = \frac{(v_{A+} - Ri_{A+} - e_{A+})}{L} \quad (I.6)$$

$$\frac{di_{A-}}{dt} = \frac{(v_{A-} - Ri_{A-} - e_{A-})}{L} \quad (I.7)$$

$$\frac{di_{B+}}{dt} = \frac{(v_{B+} - Ri_{B+} - e_{B+})}{L} \quad (I.8)$$

$$\frac{di_{B-}}{dt} = \frac{(v_{B-} - Ri_{B-} - e_{B-})}{L} \quad (I.9)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_e \quad (I.10)$$

$$T_e = -K_m \left(i_{A+} - i_{A-} - \frac{i_{A+} - i_{A-}}{R_m} \right) \sin(N_r \theta) + K_m \left(i_{B+} - i_{B-} - \frac{i_{B+} - i_{B-}}{R_m} \right) \cos(N_r \theta) - T_d \sin(4N_r \theta) \quad (I.11)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (I.12)$$

- e_{A+} : est la force contre-électromotrice induite à travers le demi-enroulement A+ à A0.
- e_{A-} : est la force contre-électromotrice induite à travers le demi-enroulement A- à A0.
- e_{B+} : est la force contre-électromotrice induite à travers le demi-enroulement B+ à B0.
- e_{B-} : est la force contre-électromotrice induite à travers le demi-enroulement B- à B0.
- i_{A+} : est le courant circulant du port A+ au port de prise central A0.
- i_{A-} : Est le courant circulant du port A- au port de prise central A0.
- i_{B+} : Est le courant circulant du port B+ au port de prise central B0.
- i_{B-} : Est le courant circulant du port B- au port de prise central B0.

- v_{A+} : Est la tension au port A+ par rapport au port de prise centrale A0.
- v_{A-} Est la tension au port A- par rapport au port de prise centrale A0.
- v_{B+} Est la tension au port B+ par rapport au port de prise centrale B0.
- v_{B-} Est la tension au port B- par rapport au port de prise centrale B0.
- K_m Est la constante de couple du moteur.
- N_r : est le nombre de dents sur chacun des deux pôles du rotor. Le paramètre de taille de pas entier est $(\pi/2)/N_r$.
- R : est la résistance du demi-enroulement. Par exemple, c'est la résistance entre les ports A+ et A0.
- L : est l'inductance du demi-enroulement. Par exemple, c'est l'inductance entre les ports A+ et A0.
- R_m : est la résistance magnétisante.
- B : est l'amortissement en rotation.
- J : est l'inertie.
- ω : est la vitesse du rotor.
- θ : est l'angle du rotor.
- T_d : est l'amplitude du couple de détente.

I.6. Moteur pas à pas à aimant permanent :

Ce type de moteur a des électroaimants au niveau du stator et un rotor à aimants permanents **Fig. I. 10** et **Fig. I.11**. Il s'agit d'un moteur à vitesse relativement faible et à faible couple avec de grands angles de pas de 45 ou 90 degrés. Sa construction simple et son faible coût en font un choix idéal pour les applications non industrielles, telles qu'un positionneur de roue d'imprimante. Il est également appelé moteur à courant continu sans balais à vitesse variable [10]. Nous pouvons améliorer la résolution de la rotation du rotor ou diminuer l'angle de pas dans un rotor à aimant permanent en augmentant le nombre de paires de pôles sur le rotor lui-même. Nous pourrions également augmenter la résolution en ajoutant plus d'électroaimants sur le stator.

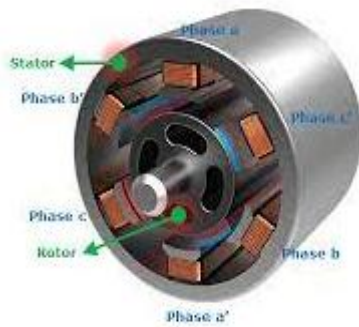


Fig. I.10 Moteur pas à pas à aimant permanent.

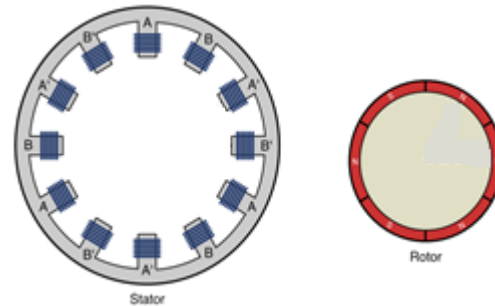


Fig. I.11. Structure interne d'un moteur pas à pas à aimant permanent (PM).

I.6.1. Construction et fonctionnement

- Ne contient pas de brosse ou de réflecteur mécanique.
- Le rotor est à l'intérieur, avec des aimants permanents montés sur son périmètre.
- Le stator est à l'extérieur, avec des électroaimants (appelés enroulements) à l'intérieur des encoches.
- Le contrôleur alimente les enroulements avec des impulsions de courant continu.
- De nombreux enroulements sont connectés ensemble. Chaque groupe d'enroulements connectés forme une phase.

Pour comprendre le fonctionnement d'un moteur pas à pas à aimant permanent, il est crucial de voir comment son angle de pas est déterminé par le nombre d'enroulements du stator et d'aimants du rotor. Cette discussion se concentre sur le moteur présenté par la **Fig. I.11**. Son stator a 12 enroulements et son rotor a six aimants montés sur son périmètre.

Les moteurs pas à pas sont généralement des moteurs biphasés. Sur la **Fig. I.11**, les différentes phases sont notées A+ et B+. Les enroulements référencés A- et B- reçoivent le même courant que ceux référencés A et B, mais dans le sens opposé. Autrement dit, si A se comporte comme un pôle nord, A- se comporte comme un pôle sud. Chaque enroulement a l'un des trois états suivants : courant positif, courant négatif et courant nul. Pour cette discussion, le courant positif implique un pôle nord et le courant négatif implique un pôle sud. Voyons maintenant comment fonctionnent ces moteurs. La **Fig. I.12** illustre un seul tour d'un moteur pas à pas à aimant permanent. Dans les enroulements, un petit "N" implique que l'enroulement se comporte comme un pôle nord en raison du courant positif. Un petit "S" implique que l'enroulement se comporte comme un pôle sud en raison du courant négatif. Si un enroulement n'a pas de N ou de S, il ne reçoit pas de courant.

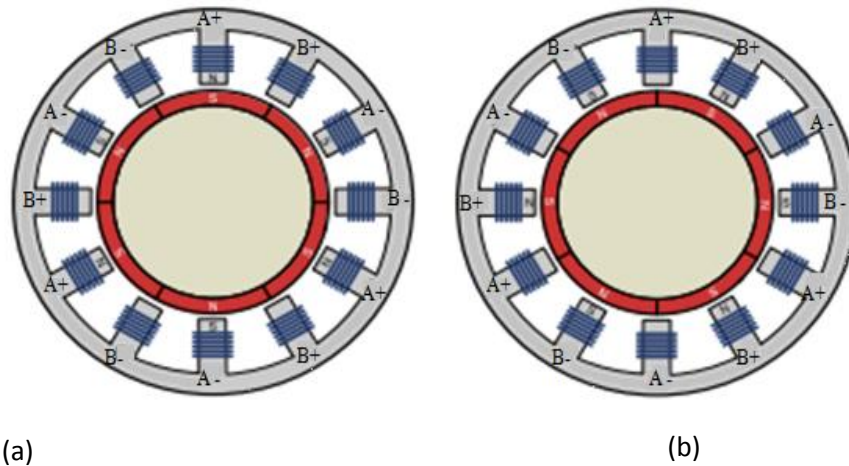


Fig. I.12. rotation d'un moteur pas à pas PM, **(a)** A+ est positif (pôle nord), A- est négatif (pôle sud) et la phase B+ n'est pas alimentée, **(b)** B+ est positif (pôle nord), B- est négatif (pôle sud) et la phase A+ n'est pas alimentée.

Dans la **Fig. I.12(a)**, A+ est positif (pôle nord), A- est négatif (pôle sud) et la phase B+ n'est pas alimentée. Le rotor s'aligne de manière à ce que ses pôles sud soient attirés par les enroulements A+ et ses pôles nord par les enroulements A-. Dans la **Fig. I.12(b)**, B+ est positif (pôle nord), B- est négatif (pôle sud) et la phase A+ n'est pas alimentée. Le rotor tourne de sorte que ses pôles s'alignent avec les enroulements B+ et B-. L'angle de rotation est égal à l'angle entre les enroulements A+ et B+, ce qui signifie que le rotor tourne exactement de 30° dans le sens des aiguilles d'une montre. Cette disposition de huit enroulements et six pôles est courante pour les moteurs pas à pas PM, bien que d'autres tournent à des angles de 15° et $7,5^\circ$. Au cas où ce ne serait pas clair, regardons un deuxième mouvement. La **Fig. I.13** présente une autre rotation de 30° d'un moteur pas à pas PM. Dans la **Fig. I.13 a**, B+ est négatif (pôle sud), B- est positif (pôle nord) et A+ n'est pas alimenté. Le rotor est positionné de sorte que ses pôles s'alignent avec les enroulements B+. Dans la **Fig. I.13 b**, A+ est positif (pôle nord), A- est négatif (pôle sud) et B+ n'est pas alimenté. Le rotor tourne exactement de 30° dans le sens des aiguilles d'une montre pour s'aligner entre les enroulements A+.

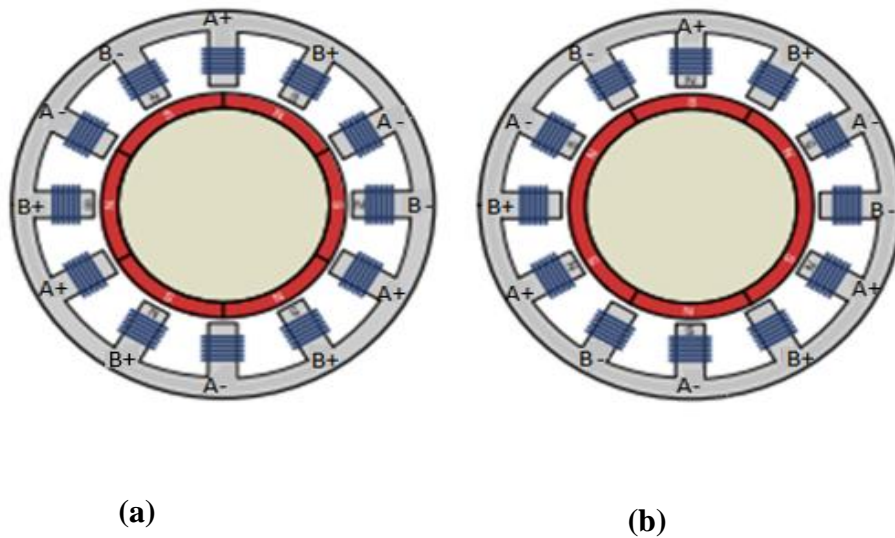


Fig. I.13. Rotation supplémentaire d'un moteur pas à pas PM. **(a)** B+ est négatif (pôle sud), B- est positif (pôle nord) et A+ n'est pas alimenté. **(b)** A+ est positif (pôle nord), A- est négatif (pôle sud) et B+ n'est pas alimenté.

Le travail du contrôleur consiste à fournir du courant aux enroulements afin que le rotor continue de tourner par incréments de 30° .

I.6.2. Les avantages et les inconvénients du moteur pas à pas à aimant permanent :

Avantages :

- Besoin de faible puissance.
- Couple de détente élevée par rapport au moteur à réluctance variable.
- Le rotor ne nécessite pas de courant d'excitation externe.
- Il produit plus de couple par courant de stator ampère.

Désavantage:

- Le moteur a une inertie plus élevée.
- Accélération plus lente [11].

I.7. Moteur pas à pas à réluctance variable

Il a des pôles de stator bobinés mais les pôles du rotor sont en matériau ferromagnétique. Il peut être du type à pile unique ou du type à plusieurs piles, ce qui donne des angles de pas plus petits [10]. Le stator est le même que celui utilisé dans le moteur pas à pas de type permanent. Le sens de rotation du moteur est indépendant de la polarité du courant stator. Il

est appelé moteur à réluctance variable car la réluctance du circuit magnétique formé par les dents du rotor et du stator varie avec la position angulaire du rotor. Dans ce type de moteur :

- Le noyau de fer non magnétique est utilisé comme rotor.
- Le stator est un enroulement électromagnétique qui entoure le rotor.
- Le rotor est constitué de dents. Ces dents sont attirées vers l'enroulement sous tension lorsque le chemin magnétique est généré autour de la bobine et du rotor.

A la rotation, le rotor subit un couple (produit par la force d'attraction produite par les bobines du stator) et s'aligne avec la bobine sous tension pour minimiser le chemin du flux. Si l'enroulement suivant est alimenté, le rotor se déplacera vers lui. De cette manière, une séquence continue d'impulsions d'enroulement provoque la rotation continue du rotor. Enfin, on note que les dents du rotor sont disposées de telle manière qu'à la fois, une seule dent du rotor et une paire de bobines d'enroulement sous tension s'alignent tandis que les autres dents s'écartent légèrement des autres enroulements. Comme le montre la **Fig. I.14**, l'enroulement sous tension C s'aligne avec les dents du rotor[8].

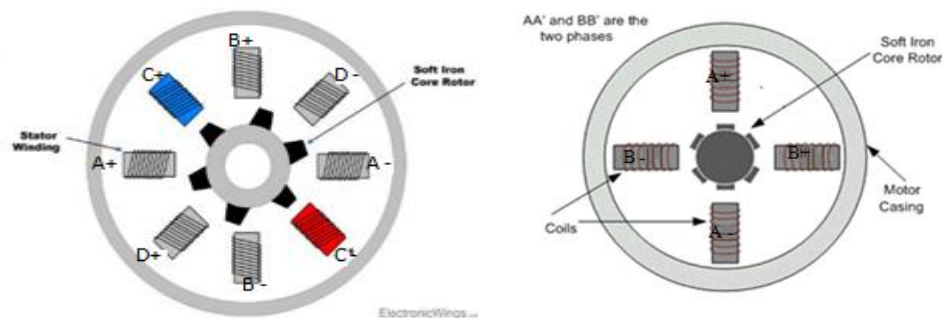


Fig. I.14. Position des dents du rotor par rapport aux enroulements.

I.7.1. Construction et Fonctionnement

Structurellement parlant, les steppers à réluctance variable (VR) ont beaucoup en commun avec le moteur pas à pas PM. Les deux ont des enroulements sur leur stator et des enroulements opposés sont connectés à la même source de courant. Cependant, il existe deux différences principales entre le moteur pas à pas VR et le moteur pas à pas PM :

- Rotor — Contrairement à un moteur pas à pas PM, le rotor d'un moteur pas à pas VR n'a pas d'aimants. Au lieu de cela, le rotor est un disque de fer avec de petites protubérances appelées dents.

- Phases — Dans un moteur pas à pas PM, le contrôleur alimente les enroulements en deux phases. Pour un moteur pas à pas VR, le contrôleur alimente indépendamment chaque paire d'enroulements opposés. En d'autres termes, si le stator a N enroulements, il reçoit $N/2$ signaux du contrôleur.

La **Fig. I.15** illustre le rotor et le stator d'un moteur pas à pas VR. Dans ce moteur, le stator a huit enroulements et le rotor a six dents.

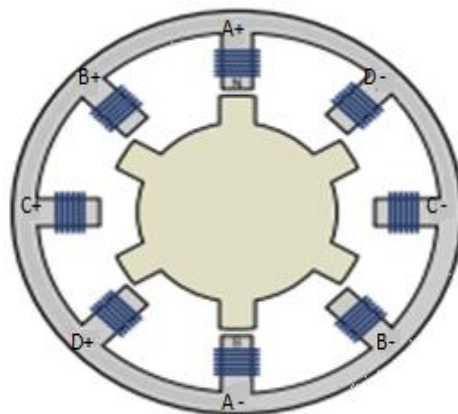


Fig. I.15. Structure d'un moteur pas à pas à réluctance variable (VR).

Le rotor n'a pas d'aimants, mais comme il est en fer, ses dents sont attirées par les enroulements sous tension. Dans la **Fig. I.15**, les enroulements A+ et A- sont étiquetés N et S, ce qui montre comment ils sont alimentés par le contrôleur. Les dents du rotor s'alignent avec ces enroulements pour fournir un chemin pour le flux magnétique entre A+ et A-.

Comme illustré à la **Fig. I.15**, une seule paire de dents est alignée avec les enroulements à tout moment. Lorsque le contrôleur alimente une deuxième paire d'enroulements, le rotor tourne de sorte qu'une paire de dents différente soit alignée. Parce que les dents ne sont pas magnétisées, peu importe si un enroulement se comporte comme un pôle nord ou comme un pôle sud. Cela peut prêter à confusion, donc la figure 4.6 illustre la rotation d'un moteur pas à pas VR. Dans cet exemple, le stepper tourne de 15° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Dans la **Fig. I.16.a**, le contrôleur a fourni du courant aux enroulements B+ et B-, et le rotor s'est aligné en conséquence. Sur la **Fig. I.16.b**, les enroulements C+ et C- sont alimentés. Les enroulements C+ et C- attirent la paire de dents la plus proche, ce qui déplace le rotor de 15° dans le sens des aiguilles d'une montre. Si vous connaissez le nombre d'enroulements dans le stator (N_w) et le nombre de dents sur le rotor (N_t), l'angle de pas d'un moteur pas à pas VR peut être calculé avec l'équation suivante :

$$\text{stepangle} = 360^\circ \times \frac{N_w - N_t}{N_w N_t}$$

Dans la **Fig. I.16**, N_w est égal à 8 et N_t est égal à 6. Par conséquent, l'angle de pas peut être calculé comme $360(2/48) = 15^\circ$. La résolution angulaire peut être améliorée en augmentant le nombre d'enroulement et de dents. Avec la bonne structure, l'angle de pas peut être bien inférieur à celui d'un moteur pas à pas PM.

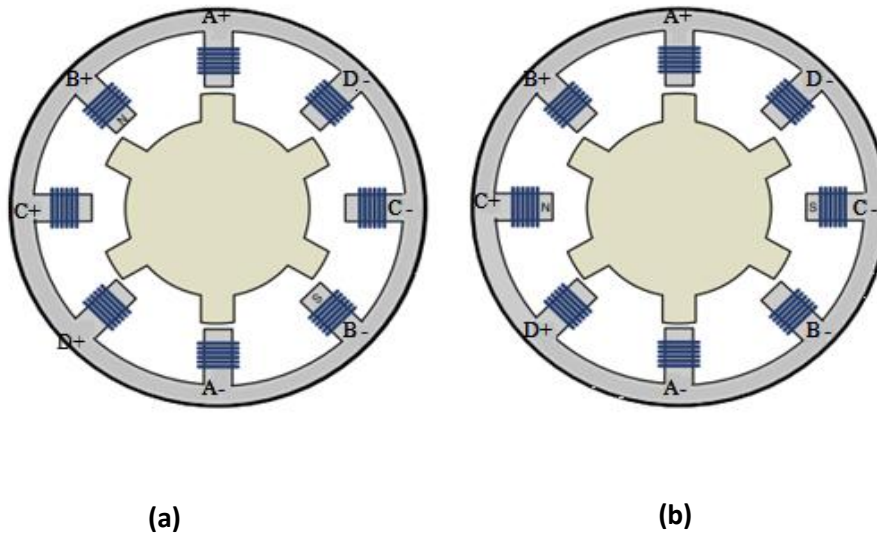


Fig. I.16. Rotation de 15° d'un moteur pas à pas VR. (a) B+ et B- sont alimentés, (b) C+ et C- sont alimentés.

Cependant, il y a un problème. Le couple d'un moteur pas à pas VR est si faible qu'il ne peut pas tourner une charge importante. Pour cette raison, les moteurs pas à pas VR ne sont pas couramment trouvés dans les systèmes pratiques.

Pour pallier les lacunes du moteur pas à pas VR, les ingénieurs ont conçu un moteur qui combine la résolution d'un moteur VR et le couple d'un moteur PM. C- est ce qu'on appelle un moteur pas à pas hybride (HY).

I.7.2. Types de moteur pas à pas à réluctance variable

- a) Type à pile unique
- b) Type multi-empilement[11].

S. No	Type à pile unique	Type multi-empilement
1	Le nombre de pôles du stator doit être différent de celui des pôles du rotor.	Le nombre de pôles du stator doit être égal aux pôles du rotor.
2	Chaque pôle du stator porte une bobine de champ.	Il est utilisé pour obtenir de petites tailles de pas. Il se compose de m moteur à réluctance variable à pile unique identique avec les supports de rotor sur un seul arbre.

Tableau. I.4. Différence entre les types du moteur pas à pas à réluctance variable.

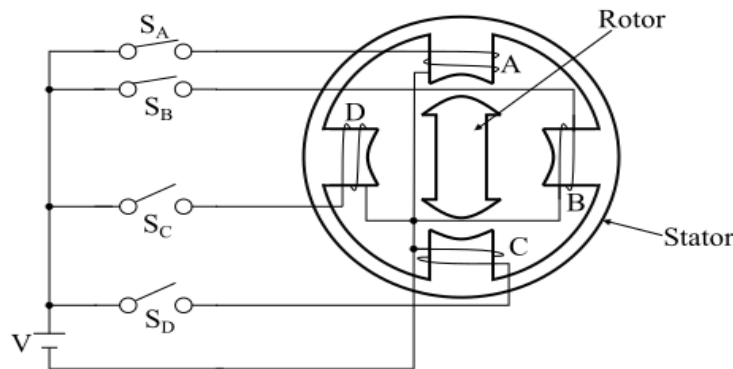


Fig. I.17. pile unique.

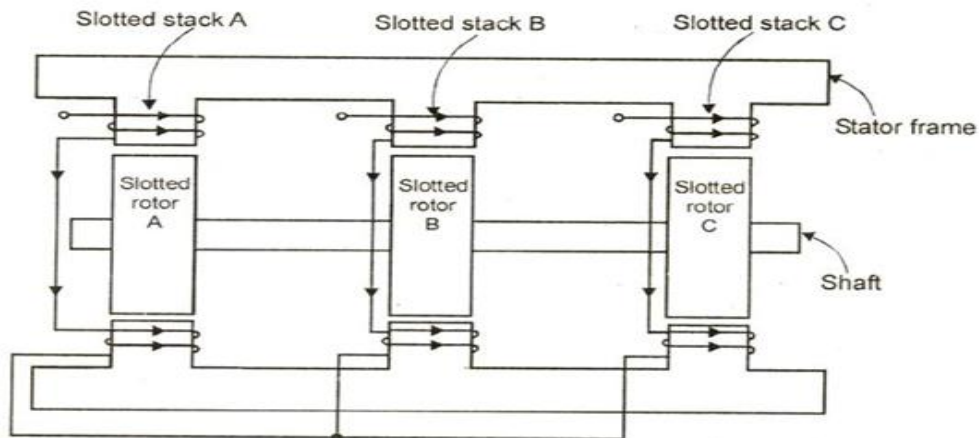


Fig. I.18. multi-empilement.

I.7.3. Les avantages et les inconvénients du moteur pas a pas variable réluctance:

Avantage:

- Faible inertie du rotor.
- Rapport couple/inertie élève.

- Poids léger.
- Capable d'un taux de pas élève.
- Capacité de roue libre.

Désavantage:

- Normalement disponible dans des angles de pas de $3,6^\circ$ à 30° .
- Aucun couple de détente disponible avec les enroulements hors tension[11].

I.8. Moteur pas à pas bipolaire

Les moteurs pas à pas bipolaires sont composés de deux enroulements [12], ces deux bobines les distinguent principalement des moteurs pas à pas unipolaires qui sont des câbles de mesure de la résistance entre les fils et deux paires de fils sont de résistance égale [2]. Et ont quatre fils. Contrairement aux moteurs unipolaires, les moteurs bipolaires n'ont pas de prise centrale. L'avantage de ne pas avoir des prises centrales est que le courant traverse un enroulement entier à la fois au lieu de seulement la moitié de l'enroulement [12].

Par conséquent, le moteur bipolaire produira plus de couple qu'un moteur unipolaire de même taille. Par rapport au moteur unipolaire, le moteur bipolaire a une structure peu compliquée mais nécessite un contact positif et source négative et circuit électrique de commutation extra complexe. Le d'excitation des bobines du stator dans d'un moteur unipolaire et unidirectionnel (comme on la vue précédemment), tandis que, le courant d'excitation dans le moteur bipolaire est bidirectionnel. Ce qui signifie que les bobines du stator changent polarité magnétique au cours du fonctionnement du moteur bipolaire [13]. Dans un moteur pas à pas bipolaire, nous n'avons pas de fil commun comme dans un moteur pas à pas unipolaire [8].

I.9. Moteur pas à pas hybride

Ce sont des moteurs qui convertissent les trains d'impulsions numériques en mouvements incrémentiels minute [14]. Les moteurs hybrides (HSM) combinent le fonctionnement de base d'un moteur à réluctance variable et d'un moteur pas à pas de type à aimant permanent [15]. Un moteur pas à pas hybride (HY) offre le meilleur des deux types de moteurs cités précédemment. Comme le moteur pas à pas PM, son rotor contient des aimants qui fournissent un couple comme lecteur VR [6]. Le HSM le plus courant se compose d'un stator et de deux rotors. Le stator du moteur comporte deux enroulements de commande placés chacun sur deux pôles diamétralement opposés. Les rotors sont espacés axialement par des aimants permanents dans la circonférence, ce qui montre que les dents sont uniformément

réparties et que le premier rotor est déplacé en diagonale sur la dent. Le HSM développe un couple mécanique supérieur à celui produit par les moteurs pas à pas à réluctance variable [14].

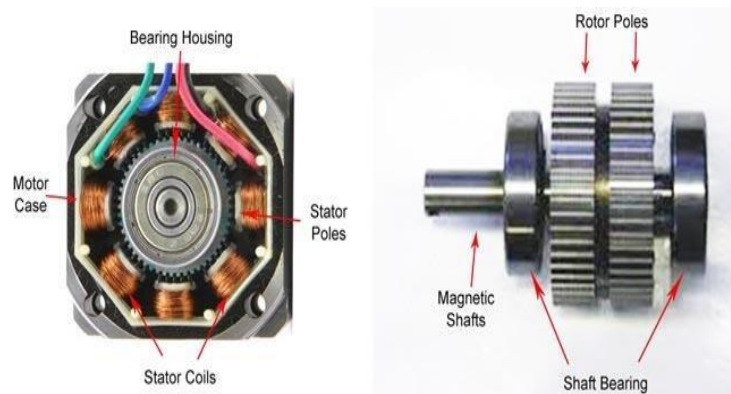


Fig. I.19. Moteur pas à pas hybride (HY).

I.9.1. Construction et fonctionnement

Leurs rotors et stators sont différents de ceux des deux types de pas à pas à aimant permanent et à réluctance variable, mais le principe de leur fonctionnement est similaire.

Rotor:

Les pôles du rotor sont magnétisés de sorte que l'un se comporte comme le pôle Nord et l'autre se comporte comme le pôle Sud. Chaque arbre a ses propres dents et les dents d'un pôle du rotor passent entre les dents de l'autre. La différence angulaire entre les deux ensembles de dents détermine l'angle de pas du moteur. Plus le rotor a de dents, meilleure est la précision angulaire. Le rotor de la **Fig. I.20** a une paire de pôles de rotor, mais tous les autres HY peuvent avoir deux, trois paires ou plus. L'ajout des pôles du rotor augmente le couple du moteur pas à pas hybride, mais augmente également sa taille et son poids [6].

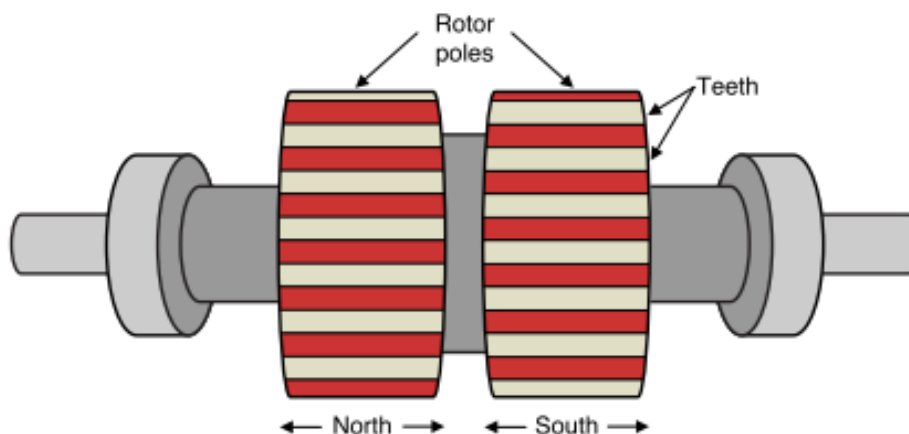


Fig. I.20. Pôles de rotor d'un moteur pas à pas hybride (HY).

Stator:

Le stator est une unité de signal unique (gainée) où les trous d'enroulement sont parallèles à l'arbre du moteur. Le couple dans le HSM est produit par l'interaction du champ tournant avec le stator résultant. Le champ rotorique est produit par PM et reste donc constant. Le champ statorique est proportionnel au courant de phase, et il existe deux modes de fonctionnement d'excitation. Excitation à deux étages, dans laquelle deux phases du stator sont excitées simultanément pour fournir le meilleur amortissement au rotor [15].

Les moteurs hybrides présentent deux inconvénients. Premièrement, le moteur pas à pas HY peut être beaucoup plus cher que le moteur PM. Deuxièmement, le moteur pas à pas HY est plus grand et plus lourd que le moteur pas à pas PM [6].

Comme un moteur pas à pas VR, un moteur pas à pas HY peut avoir plusieurs phases, une pour chaque paire d'enroulements. Mais la majorité du moteur pas à pas HY sont comme des moteurs PM. C'est-à-dire, que les enroulements sont divisés en deux phases : A+/A- et B+/B-. Ce sont les phases indiquées dans la **Fig. I.21**. Chaque phase reçoit un courant positif, un courant négatif et un courant nul. Lorsqu'une phase est alimentée, ses enroulements attirent les dents d'un pôle du rotor. Lorsque la phase suivante est alimentée, ses enroulements attirent les dents de l'autre pôle du rotor. Les moteurs pas à pas hybrides ont généralement 50 à 60 dents sur un pôle de rotor, ce qui augmente la résolution angulaire. Il est courant de voir des moteurs pas à pas hybrides avec des angles de pas aussi bas que $1,8^\circ$ et $0,9^\circ$.

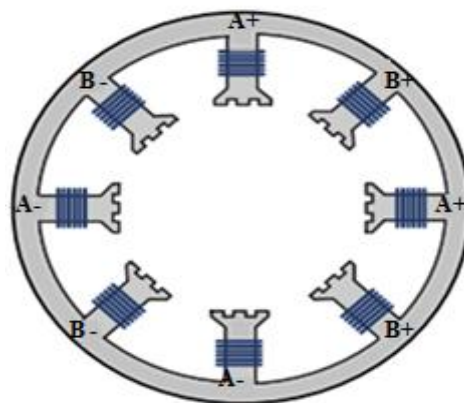


Fig. I.21. Stator dentelé d'un pas à pas HY.

I.9.2. Commande

Nous venons de voir que pour commander un moteur pas à pas hybride, comme pour un moteur à aimant permanent, on doit contrôler le sens courant dans chacune des bobines. En

pratique, le bobinage est généralement réalisé sur une pièce en fer doux dentée, et polarise cette pièce suivant le sens du courant. Pour cela, il existe 3 types de câblages pour les moteurs pas à pas :

I.9.2.1. Câblage 4 fils :

Il n'y a qu'une seule bobine pour chaque pôle. Ce type de configuration impose de pouvoir changer le sens du courant au niveau du système d'alimentation. Ces moteurs sont appelés moteurs pas à pas bipolaires, car lors de leur rotation chacune des bobines va être polarisée de deux façons différentes.

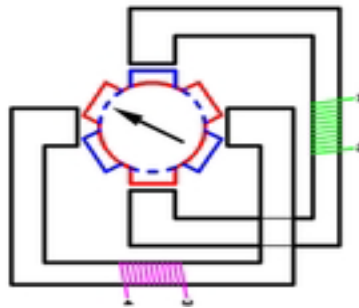


Fig. I.22. Moteur pas à pas hybride à câblage 4 fils.

I.9.2.2. Câblage 6 fils :

Un point milieu est créé sur chacun des bobinages. Généralement ces deux points milieux (2 et 5) sont reliés à une borne du dispositif d'alimentation. En alimentant un des 4 autres points on peut choisir le sens du courant sans avoir d'inversion de polarité. L'inconvénient est qu'on n'utilise que la moitié du cuivre, ces moteurs pas à pas unipolaires ont donc un rendement massique plus faible.

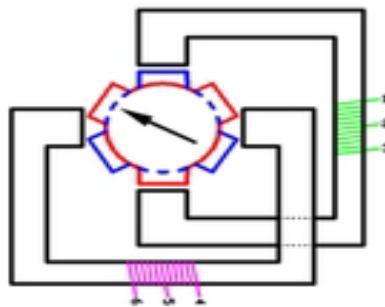


Fig. I.23. Moteur pas à pas hybride à câblage 6 fils.

I.9.2.3. Câblage 8 fils :

Cette configuration de moteur pas à pas permet de choisir entre les deux configurations précédentes au moment du câblage. On peut relier les bobines de chaque groupe en série ou en parallèle pour utiliser le moteur en bipolaire, ou les relier en série en gardant le point milieu pour l'utiliser en unipolaire[16].

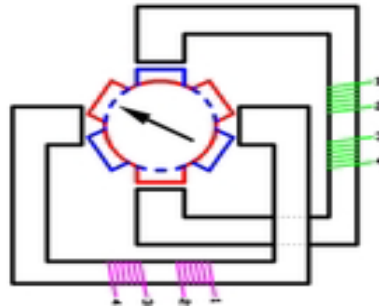


Fig. I.24. Moteur pas à pas hybride à câblage 8 fils.

I.9.3. Modèle mathématique

Les équations décrivant le modèle dynamique d'un moteur pas à pas hybride peuvent être divisées en deux parties : i) les équations régissant les performances électriques, et ii) les équations concernant les relations mécaniques. Le modèle final d'un moteur pas à pas dérivé ici est couramment utilisé dans la littérature connexe et les hypothèses formulées seront brièvement introduites.

Initialement, les équations électriques du système (la tension dans les deux phases) peuvent être modélisées comme :

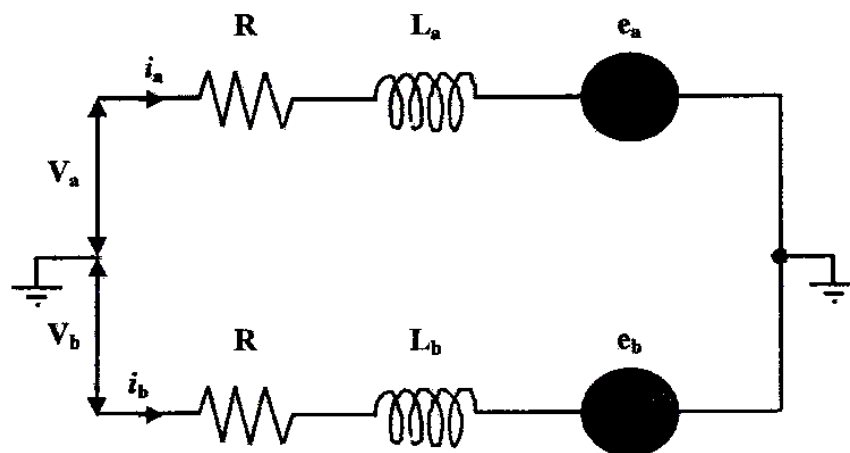


Fig. 1.25. Le circuit équivalent d'un HSM biphasé.

$$u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (I.13)$$

$$u_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (I.14)$$

Où u_a et u_b est la tension aux bornes des phases a et b [en V], R est la résistance de phase [en Ω], i_a et i_b est le courant traversant chaque phase [A], L est l'inductance dans les deux phases [H] et enfin e_a et e_b sont les tensions [V] de la force contre-électromotrice. Dans Boucher. Soutiennent que l'inductance dans les bobines dépend de la position en raison d'une distance d'écart variable entre le rotor et le stator, introduisant ainsi un changement de réluctance.

Les équations mécaniques décrivant le HSM peuvent être écrites comme:

$$T_E - T_L - T_D = J \frac{d\omega_r}{dt} + K_v \omega_r \quad (I.15)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (I.16)$$

Où:

$$T_E = K_m (-i_a \sin(N_r \theta_r) + i_b \cos(N_r \theta_r)) \quad (I.17)$$

Dans laquelle T_E est le couple électromagnétique produit [en N •m], T_L est le couple résistant [en N •m], T_D est le couple de détente [en N •m], J est l'inertie du système [en $kg .m^2$], ω_r est la vitesse de rotation [en rad/ s], K_v est le coefficient de frottement visqueux [en N .m. s/rad], K_m est la constante de couple [en V.s/rad], N_r est le nombre de dents du rotor (pôle paires) et enfin θ_r est la position du rotor [en rad]. Le terme de couple de détente T_D provient de l'interaction des rotors magnétiques avec le matériau magnétique des pôles du stator.

Les tensions de contre-EMF (force électromotrice) dans les équations électriques peuvent être réécrites selon Schweid et. Al. Comme:

$$e_a = -K_m \omega_r \sin(N_r \theta_r) \quad (I.18)$$

$$e_b = K_m \omega_r \cos(N_r \theta_r) \quad (I.19)$$

Pour décrire le système sous forme d'espace d'états, l'état doit être déclaré. En voyant les termes des dérivées de courant dans les équations électriques (I.13) et (I.14) l'état peut être choisi avantageusement comme :

$$x^T = [i_a \quad i_b \quad \omega_r \quad \theta_r] \quad (I.20)$$

En utilisant les équations (I.17) et (I.18) (ainsi qu'en négligeant le couple de détente), les équations du système (I.13)-(I.16) peuvent être réécrites sous forme d'espace d'état non linéaire comme:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L}(u_a - Ri_a + k_m w_r \sin(N_r \theta_r)) \quad (\text{I. 21})$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L}(u_b - Ri_b - k_m w_r \cos(N_r \theta_r)) \quad (\text{I. 22})$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(k_m w_r \cos(N_r \theta_r) - T_L - k_m w_r \sin(N_r \theta_r) - K_v \omega_r) \quad (\text{I. 23})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (\text{I. 24})$$

Où les tensions u_a et u_b peuvent être considérées comme des entrées du système et le couple de charge T_L peut être traité comme une perturbation du système.

I.9.4. Les Avantages et l'inconvénient du moteur pas à pas hybride

Avantages :

- Moins de tendance à résonner.
- Fournit un couple de détente avec des enroulements hors tension.
- Capacité de couple de maintien plus élevée
- Capacité de taux de pas élevée.

Désavantage:

- Inertie et poids supérieurs grâce à la présence de l'aimant du rotor.
- Performance affectée par le changement de force magnétique[11]

I.10. Comparaison entre les différents types de moteurs pas à pas

	VR Moteur pas à pas	PM Moteur pas à pas	Moteur pas à pas hybride
1	Faible inertie du rotor	Grande inertie	Grande inertie
2	Moins de poids	Plus de poids	Plus de poids
3	Pas de couple de détente disponible	Fournit un couple de retenue	Fournit un couple de détente avec des enroulements hors tension
4	Le rotor n'a pas d'aimant permanent	Le rotor est un aimant permanent	Le rotor est un aimant permanent
5	Le rotor est un type à pôle saillant	Le rotor est de type cylindrique	Le rotor est un type à pôle saillant

Tableau. I.5. Comparaison entre les différents types de moteurs pas à pas.**I.11. Les avantages et l'inconvénient d'un moteur pas à pas****Avantages:**

- Positionnement précis sans boucle de retour grâce au fonctionnement pas à pas.
- Couple élevé à basse vitesse ou pas à pas.
- Couple de maintien élevé.
- Haute fiabilité et durée de vie, pas de balais[17].

Désavantage:

- A haute vitesse le couple diminue
- Le moteur pas à pas a tendance à être plus volumineux que d'autres technologies de moteur. On le contrôle sous forme de pas, par incrément, il est possible de lisser le mouvement en le subdivisant en "micro pas", mais en contrepartie, le couple fourni entre 2 micro pas est réduit.
- Le moteur fonctionne en boucle ouverte, ainsi s'il est mal dimensionné et qu'il "saute un pas" (couple à fournir trop important) il est impossible de le détecter à moins d'utiliser un encodeur.
- Pour maintenir la position, le moteur doit être alimenté et donc consommer du courant[18].

I. 12. Conclusion

Ce chapitre est le fruit de la recherche bibliographique que nous avons effectué. Cette recherche se focalisée sur l'état de l'art des moteurs pas à pas et il en résulte ce qui suit:

- Le moteur pas à pas classique est apparu dans les années 1940, mais c'est l'avènement de l'électronique numérique dans les années 1960 qui a permis son développement.

- Comme tout moteur électrique, le moteur pas à pas (P-à-P) est constitué d'un rotor et d'un stator. Le rotor est constitué d'aimants permanents ou de dent en matériaux ferromagnétique. Au tour du rotor se trouve le stator, qui contient une série d'électroaimants. Le moteur P-à-P divise un tour complet de rotation en plusieurs étapes et tourne selon des angles de pas discrets. De ce fait, il est utilisé dans plusieurs applications de contrôle de mouvement, souvent en boucle ouverte pour le positionnement de charge mécanique à grande vitesse. Ses applications appartiennent aux domaines : robotique, informatique, astronomie... etc.

- Il excite dans la littérature spécialisée, différents types de moteurs P-à-P. Selon une classification qui se base sur la confection du rotor, on a trois types de moteurs P-à-P dont le rotor est: à aimant permanent, à reluctance variable et hybride (à aimant permanent et reluctance variable). Lorsqu'on ajout à la classification précédent, une classification qui se base sur le câblage (la connexion) des bornes des enroulements satatorique, on a les moteurs P-à-P suivants :

Le Moteur P-à-P à aimant permanent unipolaire, qui se distingue par des enroulements statoriques, dont le courant d'excitation est unidirectionnel. Chaque phase du stator comporte 2 bobines et un point milieu relié à la borne positive d'une source de tension. A la commande, une borne de chaque bobine est reliée au point milieu et l'autre borne est reliée à un seul transistor.

Le moteur P-à-P bipolaire, qui se distingue par un enroulement statorique dont le courant d'excitation est bidirectionnel. Chaque phase se compose d'une seule bobine est ainsi il n'a pas de point milieu. A la commande, chaque phase est reliée à un pont en H qui comporte 4 transistors. Ce qui permet de changer le sens du courant d'excitation de la phase.

Le moteur P-à-P à réluctance variable, qui a des enroulements similaires à ceux du moteur à aimant permanent, mais reliés d'une manière différente. Chaque deux enroulements qui sont placé sur le même axe mécanique du stator sont mis en série pour former une paire d'enroulement. Ils sont reliés de façon à ce que le courant dans le 1^{er} enroulement a le sens opposé de celui du 2^{ème} enroulement. Ce type de moteur possède plusieurs paires d'enroulement réparties sur le stator. À la commande, chaque paire d'enroulements est reliée à

un pont de transistor en H et pour que le rotor tourne d'un pas, une seule paire d'enroulement est excitée.

Le moteur P-à-P hybride possède des paires d'enroulements comme le moteur à réluctance mais ces paires d'enroulements sont soit raccordés d'une façon similaire à celle d'un moteur P-à-P unipolaire, ou similaire à celle d'un moteur P-à-P bipolaire ou bien mixte (qui peut fonctionner en unipolaire ou bipolaire). A la commande, chaque paire d'enroulements est reliée à un pont de transistor en H et pour que le rotor tourne d'un pas, toutes les paires d'enroulement sont excitées.

- Les moteurs pas à pas sont excellents pour les applications de positionnement. Ils peuvent être contrôlés avec précision en termes de position et de vitesse simplement en faisant varier le nombre et la fréquence des impulsions appliquées aux transistors. Leur nombre élevé de pôles leur donne de la précision tout en fonctionnant en boucle ouverte. S'il est correctement dimensionné pour l'application, un moteur pas à pas ne manquera jamais une étape. Et parce qu'ils n'ont pas besoin de rétroaction de position, ils sont très rentables.

Au prochain chapitre nous effectuons des tests de commande sur deux types de moteurs. A savoir, le moteur P-à-P unipolaire dans la commande est relativement simple et le moteur P-à-P hybride dans la commande est plus compliquée.

Chapitre II

Simulations et

résultats

II. 1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons et discutons les résultats des simulations obtenus à l'aide de bloc Matlab/simulink pour deux types de moteurs pas à pas. A la 1ère partie de ce chapitre, nous commençons par une commande (un contrôle) plus au moins simple est qui est celle d'un moteur pas à pas unipolaire. A la 2ème partie, on passe à une commande (un contrôle) plus au moins compliquée est qui est le principal objectif de ce travail. Il s'agit de la commande (du contrôle) d'un moteur pas à pas hybride, qui est le moteur le plus sophistiqué des moteur pas à pas. Pour chacun des deux types de moteurs cités précédemment, on étudie deux différentes commandes (contrôles). A savoir, le contrôle de position et le contrôle de vitesse et chacun de ces contrôles est effectué pour le mode de fonctionnement à pas complet et le mode à demi-pas. Particulièrement, le moteur pas à pas hybride est testé lorsqu'il est a vide (le couple résistant appliqué à l'arbre du moteur est égal à zéro) et en charge (le couple résistant appliqué à l'arbre du moteur est différent de zéro). A la fin du présent chapitre, nous terminons par une conclusion qui réunit les enseignements les plus intéressants tirés des différents types de contrôles et de tests (essais) effectués sur le moteur pas à pas unipolaire et pas à pas réduit.

II. 2 Commande d'un moteur pas a pas unipolaire

Cette première partie des résultats de simulations concerne la commande d'un moteur pas à pas unipolaire. En réalité ce moteur s'appelé : moteur pas à pas à aimants permanents unipolaire. Mais souvent, il prend la nomination unipolaire. Pour le quel, nous abordons deux volés essentiels de commande : la commande à pas complet et la commande à demi-pas. Dans chacune de ces commandes, on présente les résultats de simulation obtenus lors de la commande de position et lors de la commande de la vitesse du rotor du moteur en question.

II. 2. 1 Description du bloc Matlab/Simulink

Le block Matlab/Simulink de commande d'un moteur pas à pas unipolaire que nous avons utilisé aux simulations est présenté par la Fig. II. 1. Il se compose des parties suivantes:

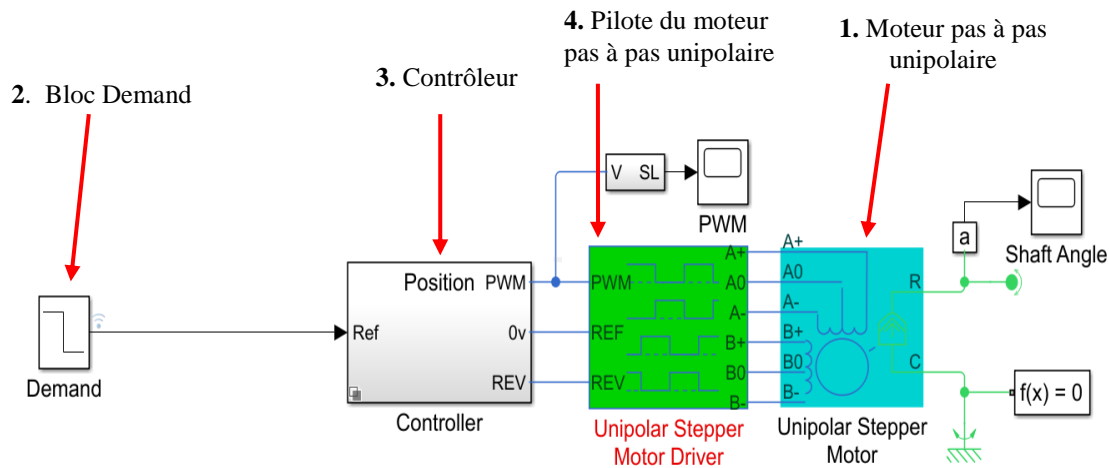


Fig. II. 1 : Block Simulink de contrôle (commande) d'un moteur pas à pas unipolaire

II. 2. 1. 1 Moteur pas à pas unipolaire

Les paramètres de simulation du moteur pas à pas unipolaire utilisés dans le bloc de simulation de la Fig. II.1 sont récapitulés au tableau I. 1, suivant :

Tableau II. 1 Paramètres du moteur pas à pas unipolaire

Resistance d'une bobine	0,55 Ω
Inductance d'une bobine:	0,0015 H
Constante du couple moteur	0,19 Nm/A
Couple de détente	0 Nm
Resistance de magnétisation	∞ [Ω]
Taille d'un pas complet	1.8°
Inertie du rotor	4.5 10^{-5} Kg m ²
Amortissement du rotor	10 ⁻² Nm/(rd/s)
Vitesse initiale du rotor	0 tr/min
Angle initial du rotor	0°

Pour la stratégie de contrôle (commande) d'un moteur pas à pas unipolaire voir paragraphes (I. 5. 1) et (I. 5. 2).

II. 2. 1. 2 Bloc Demand

Le bloc *Demand* permet de faire entrer les paramètres suivants :

- Durée de la rotation dans le sens horaire
- Le nombre de pas [sans unité], lors de la rotation de l'arbre du moteur dans le sens horaire.

- Le nombre de pas [sans unité], lors de la rotation de l'arbre du moteur dans le sens antihoraire.

A partir de ces trois paramètres le bloc *Demand* produit un signal de référence (Ref) comme celui présenté par la Fig. II. 2 et celui présenté par la Fig. II. 3.

A la Fig. II. 2, le signal Ref de sortie du bloc Demand est obtenu pour les paramètres donnés par le tableau II. 2, qui correspondent à un contrôle de position. OÙ, l'arbre du moteur doit tourner 20 pas dans le sens horaire suivi de 10 pas dans le sens antihoraire puis l'arbre s'arrête.

A la Fig. II. 3, le signal Ref de sortie du bloc Demand est obtenu pour les paramètres donnés par le tableau II. 3, qui correspondent à un contrôle de vitesse. OÙ, l'arbre du moteur doit tourner 20 pas dans le sens horaire puis il s'arrête.

Tableau II. 2 Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de position

Durée de la rotation dans le sens horaire en [s]	1
Nombre de pas [sans unité], pour une rotation dans le sens horaire	20
Nombre de pas [sans unité], pour une rotation dans le sens antihoraire	10

Tableau II. 3 Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de vitesse

Durée de la rotation dans le sens horaire en [s]	1
Nombre de pas [sans unité], pour une rotation dans le sens horaire	20
Nombre de pas [sans unité], pour une rotation dans le sens antihoraire	0

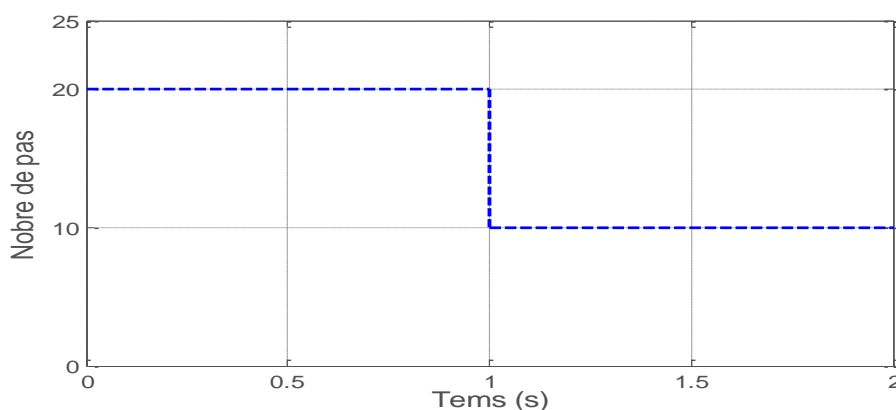


Fig. II. 2 Signal Ref génère par le bloc *Demand* de la Fig. I.1 obtenu pour les paramètres d'entrés du tableau II.2 qui correspond un contrôle de position.

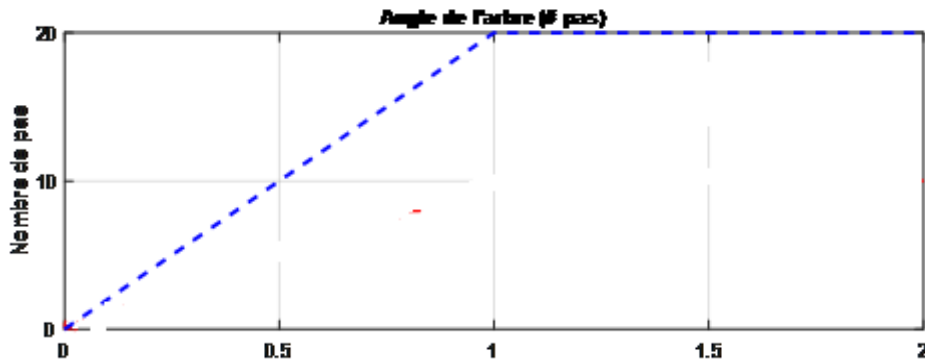


Fig. II. 3 Signal Ref génère par le bloc *Demand* de la Fig. I. 1 obtenu pour les paramètres d'entrés du tableau II.3 qui correspond un contrôle de vitesse.

II. 2. 1. 3 Contrôleur

Le contrôleur offre deux différentes options de contrôle de l'arbre du moteur: la première est le contrôle de position et la seconde est le contrôle de vitesse. Lorsqu'on veut effectuer un contrôle de position, le signal de référence (Ref) qui entre au contrôleur doit avoir un nombre déterminé de pas, que se soit pour une rotation dans le sens horaire ou antihoraire, comme dans le cas du signal Ref de la **Fig. II. 2**. Tandis que, lorsqu'on veut effectuer un contrôle de la vitesse, la référence d'entrée du contrôleur (Ref) est le nombre de pas requis par seconde, comme dans le cas du signal Ref de la **Fig. II. 3**. Où, la vitesse ciblée est de 20 pas/s. Ce qui donne pour notre moteur qui a un pas de $1,8^\circ$, une vitesse angulaire de $(1,8^\circ \times 20)/s$ soit $0,2\pi$ rd/s ce qui correspond à une vitesse de 6 tr/min.

II. 2. 1. 4 Pilote

Le pilote reçoit à partir du contrôleur le type contrôle de l'arbre du moteur (le contrôle de position ou bien contrôle de vitesse), ainsi que le mode de fonctionnement (mode à pas complet ou le mode à demi-pas). Il reçoit aussi, le nombre de pas et la direction de rotation, lorsqu'il s'agit d'un contrôle de position ou bien, il reçoit la vitesse, lorsqu'il s'agit d'un contrôle de vitesse. À partir de ces informations, le pilote procède à la création des trains d'impulsion nécessaire à la commande des transistors reliés aux bobines du stator du moteur (**Fig. I. 2**). Selon les impulsions produites par le pilote, le moteur tourne dans un sens ou dans le sens opposé ou bien s'arrête (pour plus de détails sur la commande du mouvement, voir paragraphe I. 5. 2) et fonctionne en mode à pas complet ou en mode à demi-pas (pour plus de détails sur ces modes de fonctionnement voir paragraphes (I. 5. 2. 1) et (I. 5. 2. 1)).

Pour mieux comprendre le rôle des différentes parties: Demand, contrôleur, et pilote du bloc Simulink de la **Fig. II.1**, on donne les deux exemples présentés par les **Fig. II. 4** et **II. 5**. Les résultats de la **Fig. II. 4** correspondent à un contrôle de position et ceux des signaux de la **Fig. II. 5** correspondent à un contrôle de vitesse. Dans ces figures, le signal Ref est celui généré

par le bloc Demand. Les signaux Pin A+, Pin A-, Pin B+, et Pin B- sont générés par la MLI (PWM) du pilote. Ces des trains d'impulsions de commande des transistors reliés aux bobinages de stator. Le signal Pin ENA est gènère par le contrôleur à la MLI du pilote pour décider du type de contrôle (contrôle de position ou de vitesse). Le signal Pin REV est gènère par le bloc Demand qui le transmis au contrôleur, et qui à son tour le transmis au pilot, pour décider du sens de rotation.

A la **Fig. II. 4**, où il s'agit d'un contrôle de position, le signal Ref (**Fig. II. 4 (a)**) est obtenu après la saisie dans le bloc Demand, des paramètres d'entrée présentés par le tableau II. 2. La réponse de l'arbre du moteur est présentée par la **Fig. II. 4 (a)**. On voit effectivement, que l'arbre du moteur effectue 20 pas dans un sens et 10 dans le sens opposé puis il s'arrête. La **Fig. II. 4(b)** présente les trains d'impulsions générés par la MLI du pilote qui permettent l'excitation des phases du stator. Le signal Pin ENA est le même tous le long du temps de simulation car dans les deux cas de rotation dans le sens horaire ou antihoraire, il s'agit d'un contrôle de position. Le signal Pin REV responsable de la direction de rotation prend deux différentes valeurs: une valeur nulle pour que le moteur tourne dans le sens horaire et prend une valeur positive pour que le moteur tourne dans le sens antihoraire.

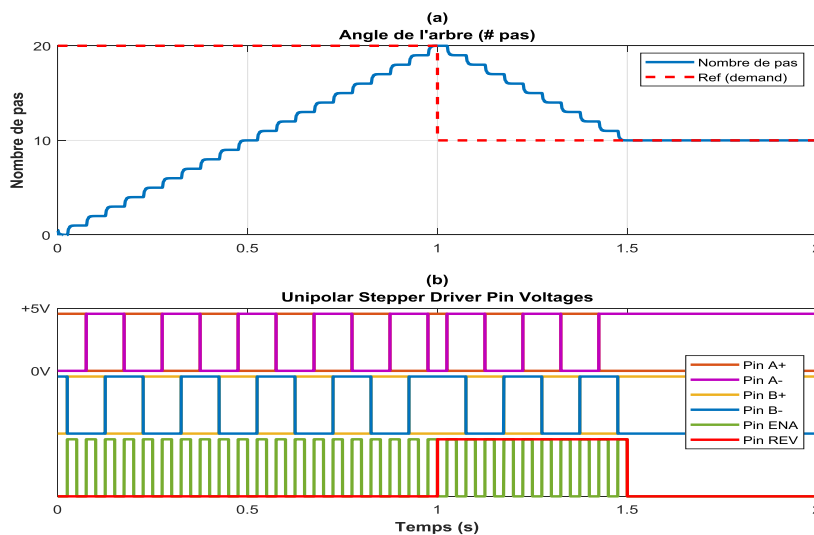


Fig. II. 4 Signaux du bloc Simulink de la Fig. II. 1, lors d'un contrôle de position. (a) Signal Ref du bloc Demand et nombre de pas effectués par l'arbre, (b) train d'impulsions généré par la MLI du pilote ainsi que le signal Pin ENA et Pin REN.

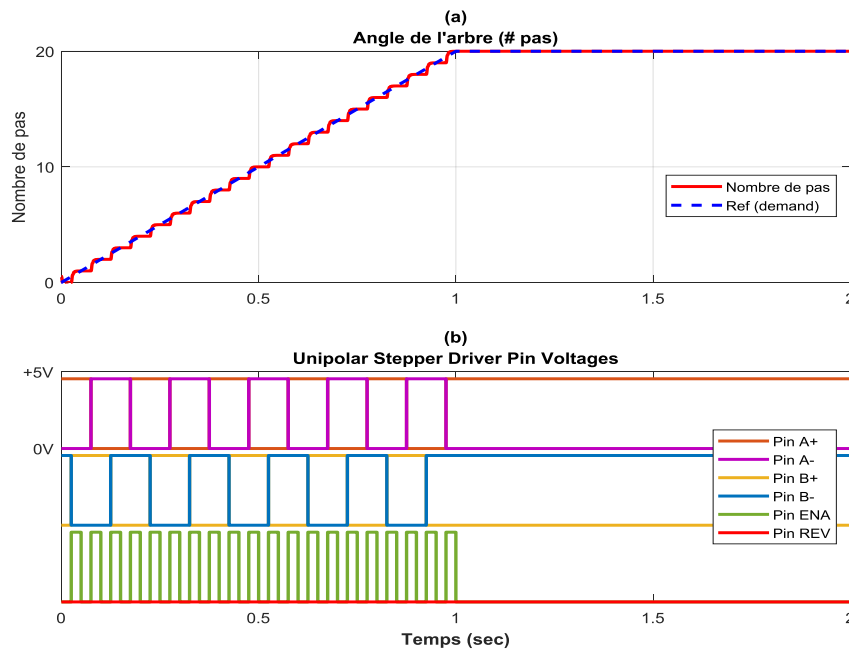


Fig. II. 5. Signaux du bloc Simulink de la Fig. II. 1, lors d'un contrôle de vitesse. (a) Signal Ref du bloc Demand et nombre de pas effectués par l'arbre, (b) train d'impulsions généré par la MLI du pilote ainsi que le signal Pin ENA et Pin REN.

A la **Fig. II. 5**, où il s'agit d'un contrôle de vitesse, le signal Ref (**Fig. II. 5 (a)**) est obtenu après la saisie dans le bloc Demand, des paramètres d'entrée présentés par le **tableau II. 3**. La réponse de l'arbre du moteur est présentée par la **Fig. II. 4 (a)**. On voit effectivement, que l'arbre du moteur tourne avec une vitesse de 20 pas/s. La **Fig. II. 5(b)** présente les trains d'impulsions générés par la MLI du pilote qui permettent l'excitation des phases du stator. Le signal Pin ENA est le même tous le long du temps de simulation car il s'agit d'un contrôle de vitesse seulement. Le signal Pin REV responsable de la direction de rotation prend une seule valeur et qui est nulle pour que le moteur tourne seulement dans le sens horaire.

En fin, il est à observer que le signal Ref du bloc Demand prend la forme d'une droite horizontale, lorsqu'il s'agit d'un contrôle de position et il prend la forme d'une droite inclinée, lorsqu'il s'agit d'un contrôle de vitesse (comparez le signal Ref de la **Fig. II. 4 (a)** à celui de la **Fig. II. 4 (a)**).

II. 2. 2 Résultats de la simulation du moteur unipolaire

Dans cette partie de notre projet, nous présentons les résultats de simulation obtenus au moyen du bloc matlab/simulink de la **Fig. II. 1**, lors de tests de contrôles d'un moteur pas à pas unipolaire. Dans un premier temps, on expose les résultats obtenus pour le test de contrôle de position et dans un second temps, on expose les résultats obtenus pour le test de contrôle de vitesse. Chacun des deux tests précédents est effectué pour le mode pas à pas complet puis pour le mode à demi-pas. La durée du temps de simulation choisie est de deux seconds (2s).

II. 2. 2. 1 Test de contrôle de position en mode à pas complet

A la réalisation du test de contrôle de position en mode à pas complet d'un moteur pas à pas unipolaire, on a donné les consignes présentées par le **tableau II. 2** au bloc Demand de la **Fig. II. 1**. Rappelons que ces consignes correspondent au mode à pas complet et on a sélectionné le fonctionnement en contrôle de position au niveau du contrôleur.

La **Fig. II. 6** présentes les résultats de simulation obtenue lors du test de contrôle de position en mode à pas complet. Le signal Ref ainsi que le nombre de pas sont présentés par la **Fig. II. 6 (a)** et la vitesse de l'arbre du rotor pour chaque pas effectué est présentée par la **Fig. II. 6 (b)**.

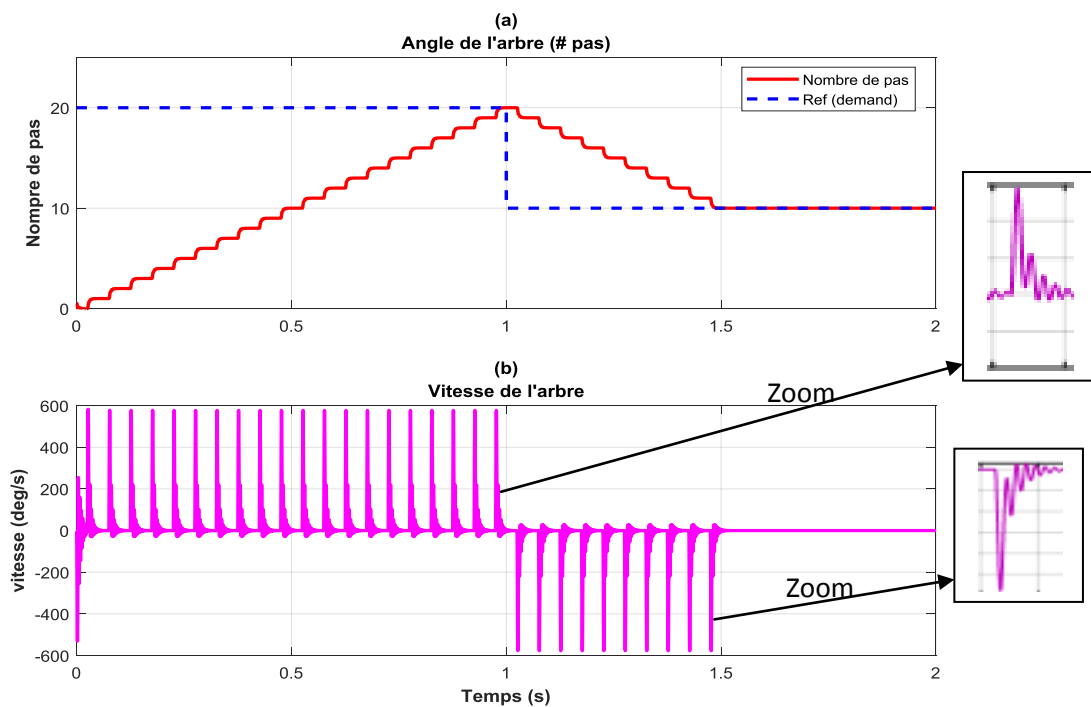


Fig. II. 6 Résultats de test de contrôle de position en mode à pas complet d'un moteur pas à pas unipolaire: (a) Signal Ref et nombre de pas et (b) vitesse angulaire.

La **Fig. II. 6 (a)** montre que l'arbre du moteur effectue 20 pas en une seconde dans un sens de rotation suivi de 10 pas en 0,5 secondes dans le sens inverse, puis il s'arrête. De ce résultat on peut obtenir la durée de chaque pas : $1\text{s}/20\text{ pas} = 0,05\text{ s}$, à savoir que dans cette durée de temps (0,05s), la durée d'arrêt entre deux pas successifs de l'arbre est incluse. On peut aussi déterminer la position de l'arbre du rotor à l'arrêt final, après une rotation de 20 pas dans un sens et de 10 dans le sens inverse (rappelant que la taille du pas de notre moteur est de $1,8^\circ$): position de l'arbre = $20 \times 1,8^\circ - 10 \times 1,8^\circ = 18^\circ$.

La **Fig. II. 6 (b)** montre que à chaque pas effectué par l'arbre (dans le sens horaire ou antihoraire) la vitesse augmente rapidement jusqu'à une valeur maximale proche de $600^\circ/\text{s}$, puis elle diminue progressivement pour s'annuler. Au cours de sa diminution (voir le zoom) et avant de s'annuler, l'onde de vitesse présente des ondulations qui ressemblent à des oscillations amorties. On peut expliquer cela comme suit : lorsque des enroulements du stator sont alimentés ils attirent le rotor (en aimant permanent) pour être en alignement avec les pôles créés par ces enroulements. Ainsi le rotor attiré prend une vitesse de rotation maximale et lorsqu'il arrive sous les pôles du stator il est arrêté (freiné) par la force d'attraction des enroulements statorique. A ce moment, le rotor vibre sous l'effet de sa vitesse initiale et l'effet de la force d'attraction des enroulements. Après avoir fait des allés par rapport à l'axe des enroulements du stator, le rotor fini par s'arrêter.

II. 2. 2. 2 Test de contrôle de vitesse en mode à pas complet

A la réalisation du test de contrôle de vitesse en mode à pas complet d'un moteur pas à pas unipolaire, on a donné les consignes présentées par le **tableau II. 4** au bloc Demand de la **Fig. II. 1**. Rappelons que ces consignes correspondent au mode à pas complet et on a sélectionné le fonctionnement en contrôle de vitesse au niveau du contrôleur.

Tableau II. 4 Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de vitesse à demi-pas

Durée de la rotation dans le sens horaire en [s]	1
Nombre de pas [sans unité], pour une rotation dans le sens horaire	100
Nombre de pas [sans unité], pour une rotation dans le sens antihoraire	0

Il est à observer que dans le **tableau II. 4** qui correspond à un contrôle de vitesse, le nombre de pas par second est élevé par rapport au nombre de pas du contrôle de position (5 fois le nombre de pas de contrôle de position). Cela vient du fait, que lorsqu'on augmente le nombre de pas par seconde du moteur, on réduit ainsi le temps d'arrêt de l'arbre et de cette manière, on passe d'un contrôle de position à un contrôle de vitesse. Cela conduit à une rotation presque continue (presque sans arrêts) est qui s'approche beaucoup de celle d'un moteur à CC ou un moteur Asynchrone.

La **Fig. II. 7** présentes les résultats de simulation obtenus lors du test de contrôle de vitesse en mode à pas complet. Le signal Ref ainsi que le nombre de pas sont présentés par la **Fig. II. 7 (a)** et la vitesse de l'arbre du rotor est présentée par la **Fig. II. 7 (b)**.

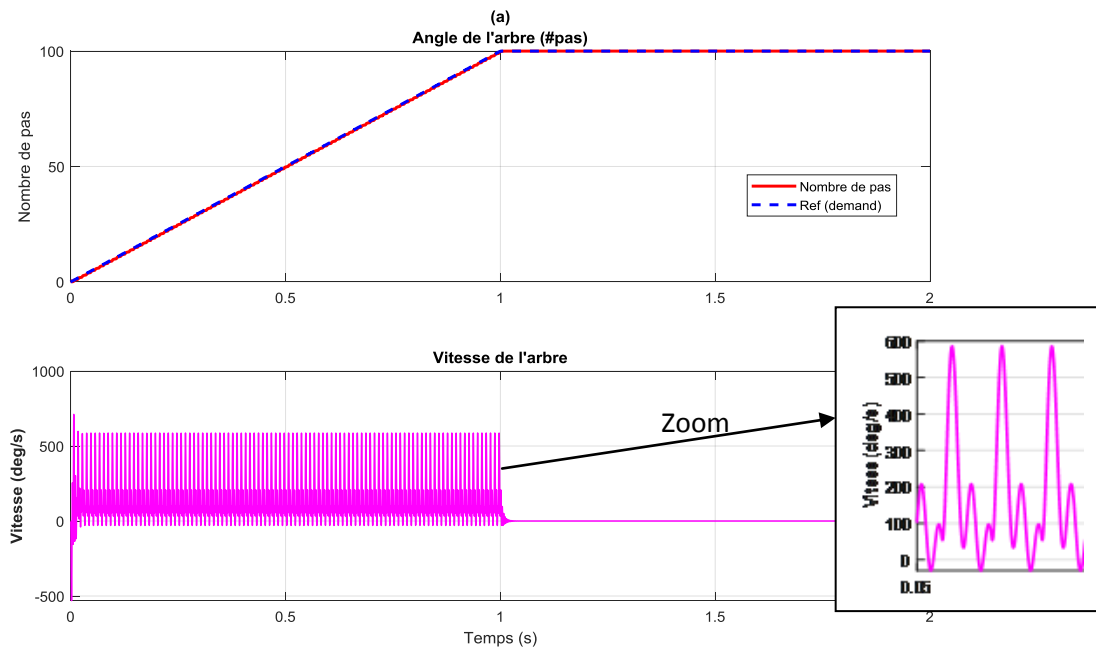


Fig. II. 7 Résultats de test de contrôle de vitesse en mode à pas complet d'un moteur pas à pas unipolaire. (a) Signal Ref et nombre de pas et (b) vitesse angulaire.

La **Fig. II. 7 (a)** montre que l'arbre du moteur obéit aux consignes du signal Ref. Il (arbre du moteur) effectue 100 pas/s, puis il s'arrête à la position finale.

La **Fig. II. 7 (b)** montre que la vitesse oscille au tour d'une valeur moyenne d'environ $250^\circ/\text{s}$ et les valeurs maximal et minimal de la vitesse sont respectivement de $600^\circ/\text{s}$ et $0^\circ/\text{s}$ (voir Zoom). Les ondulations (oscillations) sont présentes dans le cas de contrôle de vitesse comme dans le cas de contrôle de position. La cause de ces ondulations est la même comme expliqué dans le cas de contrôle de position de la **Fig. I. 6 (b)**. Aussi, il est à noter que la commutation des courants (l'ouverture de transistors et la fermeture d'autres transistors) contribue dans l'onde des ondulations de vitesse. Rappelons que à la commutation le courant diminue dans un enroulement du stator qui a déjà attiré le rotor et augmente dans l'enroulement qui va attirer le rotor pour effectuer un nouveau pas.

II. 2. 2. 3 Test de contrôle de position en mode à demi-pas

A la réalisation du test de contrôle de position en mode à demi-pas d'un moteur pas à pas unipolaire, on a donné les consignes présentées par le **tableau II. 5** au bloc Demand de la Fig. II. 1. Rappelons que ces consignes correspondent au mode à demi-pas et on a sélectionné le fonctionnement en contrôle de position au niveau du contrôleur.

Tableau II. 5 Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de position à demi-pas

Durée de la rotation dans le sens horaire en [s]	1
Nombre de demi-pas [sans unité], pour une rotation dans le sens horaire	20
Nombre de demi-pas [sans unité], pour une rotation dans le sens antihoraire	10

Il est à observer que dans le **tableau II. 5**, les paramètres du signal Ref du bloc Demand, à savoir, les nombres 20 et 10 correspondent aux nombres de demi-pas est non pas au nombre de pas. Car il s'agit d'un mode à demi-pas et qui est différent du mode à pas complet que nous avons vu précédemment. En mode à demi-pas, le moteur effectue 2 demi-pas à la place de 1 seul pas complet.

La **Fig. II. 8** présentes les résultats de simulation obtenus lors du test de contrôle de position en mode à demi-pas. Le signal Ref ainsi que le nombre de pas sont présentés par la **Fig. II. 8 (a)** et la vitesse de l'arbre du rotor pour chaque pas effectué est présentée par la **Fig. II. 8(b)**.

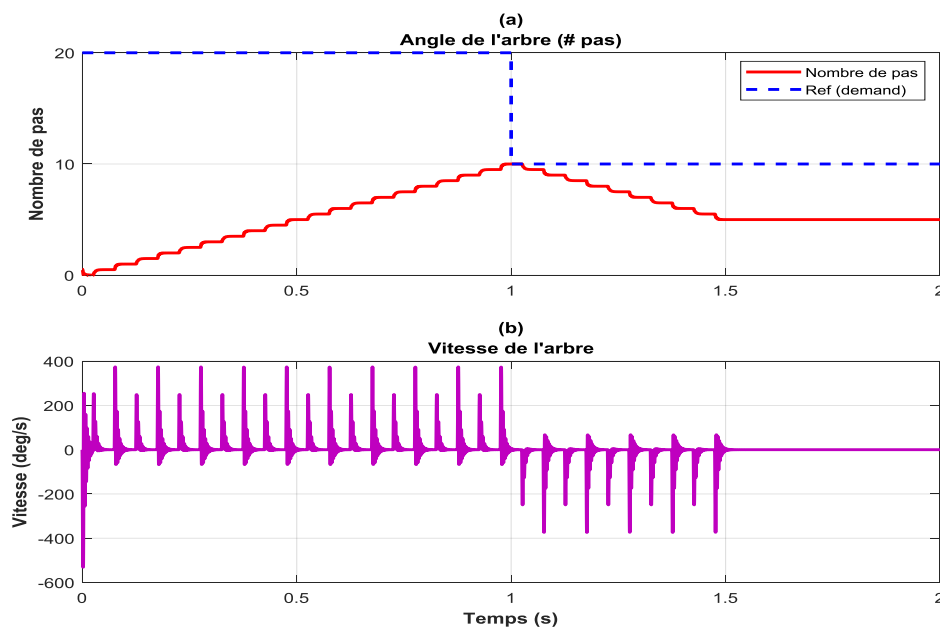


Fig. II. 8 Résultats de test de contrôle de position en mode à demi-pas d'un moteur pas à pas unipolaire: (a) Signal Ref et nombre de pas et (b) vitesse angulaire.

La **Fig. II. 8 (a)** montre que l'arbre du moteur obéit aux consignes du signal Ref qui sont la rotation de 20 demi-pas (équivalent à 10 pas complet) dans le sens horaire et 10 demi-pas dans le sens antihoraire (équivalent à 5 pas complets). Puis, Il (arbre du moteur) s'arrête à la position finale.

La **Fig. II. 8 (b)** montre que pour les deux sens de rotation (horaire et antihoraire) la vitesse prend une valeur maximale de environ $400^{\circ}/s$ pour un demi-pas puis elle diminue pour

prendre une valeur maximale de environ $250^\circ/s$, pour le demi-pas qui vient après. Cela est du au fait, que pour avoir un mode à demi-pas, on excite 2 enroulements du stator puis 1 enroulement puis 2 enroulement puis 1 enroulement et ainsi de suite (voir paragraphe I. 5. 2 .2, Tableau I.3). A l'excitation de deux enroulements la force d'attraction exercée sur le rotor est élevée par rapport à celle produite par un seul enroulement, ce qui conduit à une vitesse élevée lors de l'excitation de deux enroulements et vitesse moins élevée lors de l'excitation d'un seul enroulement.

II. 2. 2. 4 Test de contrôle de vitesse en mode à demi-pas

A la réalisation du test de contrôle de vitesse en mode à demi-pas d'un moteur pas à pas unipolaire, on a donné les consignes présentées par le **tableau II. 6** au bloc Demand de la **Fig. II. 1**. Rappelons que ces consignes correspondent au mode à demi-pas et on a sélectionné le fonctionnement en contrôle de vitesse au niveau du contrôleur.

Tableau II. 6 Paramètres du signal Ref du bloc Demand correspondant à un contre de vitesse à demi-pas

Durée de la rotation dans le sens horaire en [s]	1
Nombre de demi-pas [sans unité], pour une rotation dans le sens horaire	100
Nombre de demi-pas [sans unité], pour une rotation dans le sens antihoraire	0

La **Fig. II. 9** présente les résultats de simulation obtenus lors du test de contrôle de vitesse en mode à demi-pas. Le signal Ref ainsi que le nombre de pas sont présentés par la **Fig. II. 9 (a)** et la vitesse de l'arbre du rotor est présentée par la **Fig. II. 9 (b)**.

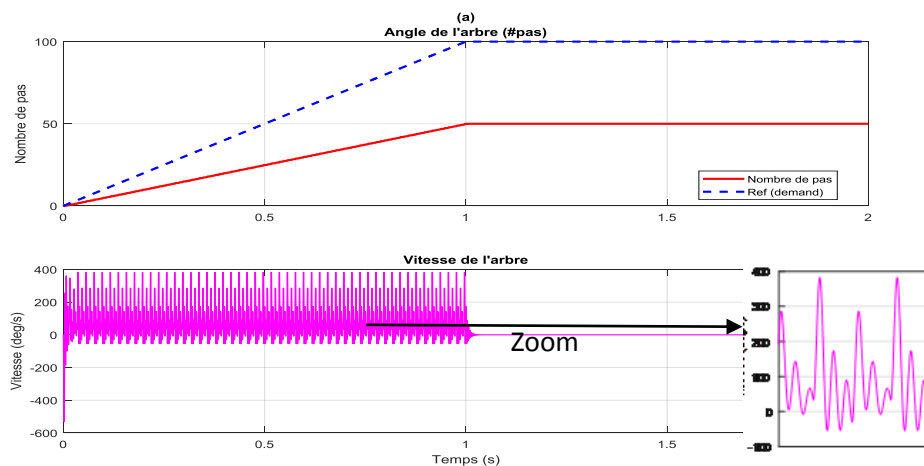


Fig. II. 9 Résultats de test de contrôle de vitesse en mode à demi-pas d'un moteur pas à pas unipolaire: (a) Signal Ref et nombre de pas et (b) vitesse angulaire.

La **Fig. II. 9 (a)** montre que l'arbre du moteur obéit aux consignes du signal Ref. Il (arbre du moteur) effectue 100 demi-pas/s (soit 50 pas complet par seconde) puis il s'arrête à la position finale.

La **Fig. II. 9 (b)** montre que la vitesse oscille au tour d'une valeur moyenne d'environ $200^\circ/\text{s}$ et les valeurs maximal et minimal de la vitesse sont respectivement d'environ $400^\circ/\text{s}$ et $-50^\circ/\text{s}$ (voir Zoom). Les ondulations (oscillations) sont présentes dans le cas de contrôle de vitesse comme dans le cas de contrôle de position. La cause de ces adulations et la même comme expliqué dans le cas de contrôle de position de la **Fig. I. 6 (b)**. Aussi, il est à noter que la commutation des courants (l'ouverture de transistors et la fermeture d'autres transistors) contribue dans l'onde des ondulations de vitesse.

En comparant la **Fig. II. 9 (b)** à la **Fig. II. 7 (b)** qui correspond respectivement au mode à demi-pas et au mode à pas complet et qui sont obtenues toutes les deux pour un contrôle de vitesse, on voit que la vitesse moyenne du mode à demi-pas ($200^\circ/\text{s}$) est inférieure à celle du mode à pas complet ($250^\circ/\text{s}$). Cela vient du fait que dans la **Fig. II. 9 (b)** où le mode est à demi-pas, l'excitation des enroulements est comme on a expliqué au paragraphe précédent, suit la séquence : deux enroulements, un enroulement, deux enroulements et ainsi de suite, tandis, que au mode à pas complet (**Fig. II. 7 (b)**) la séquence d'excitation est de deux enroulements à chaque pas. Pour les séquences d'excitation en mode à demi-pas voir paragraphe I. 5. 2. 2 (**Fig. I. 3**) et pour les d'excitation en mode à pas complet voir paragraphe I. 5. 2. 1. b (**Fig. I. 2**).

II. 3 Commande d'un moteur pas à pas hybride

Cette deuxième et dernière partie des résultats de simulations, concerne la commande du moteur le plus sophistiqué, des moteurs pas à pas. Il s'agit du moteur pas à pas hybride. Ce dernier est testé pour le fonctionnement à vide et le fonctionnement en charge et les deux tests de fonctionnement sont effectués pour un contrôle de position ainsi que pour un contrôle de vitesse.

II. 3. 1 Description du bloc Matlab/Simulink

Le block Matlab/Simulink de commande d'un moteur pas à pas hybride que nous avons utilisé aux simulations est présenté par la **Fig. II. 10**. Il se compose des parties suivantes:

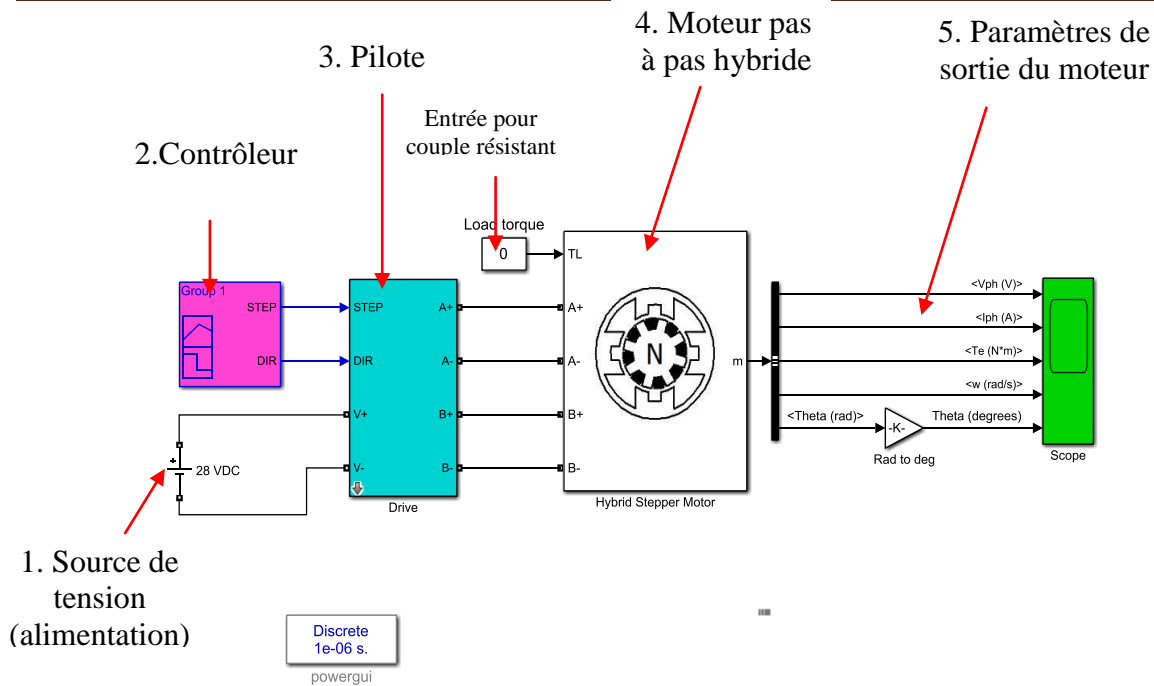


Fig. II. 10 Block Simulink de commande d'un moteur pas à pas hybride

II. 3. 1. 1. Source de tension (alimentation) : Le bloc de source de tension met en œuvre une source de tension continue idéale. Les électrodes du bloc source de courant tension (positive et négative) sont connectées respectivement aux bornes (V+ et V-) du Pilote. La tension peut être ajustée à tout moment pendant la simulation. La valeur de la tension continue utilisée au cours des simulations est de 28 V.

II. 3. 1. 2. Contrôleur: C'est un bloc de construction de signaux de contrôle du mouvement de l'arbre du moteur (marche ou arrêt) et du sens de rotation. Ce bloc permet de construire deux signaux : le premier est nommé STEP et le second est nommé DIR. Le signal STEP contrôle le mouvement de l'arbre du moteur (marche ou arrêt) ainsi que la durée du mouvement et de l'arrêt. Lorsque le signal STEP prend la valeur "1" le moteur tourne, tandis que lorsqu'il prend la valeur "0" le moteur s'arrête. Le signal DIR contrôle le sens de rotation de l'arbre du moteur. Lorsque qu'il prend la valeur "1" le moteur tourne dans le sens horaire, tandis que lorsqu'il prend la valeur "0" le moteur tourne dans le sens antihoraire. La **Fig. II. 11** présente un exemple de signaux STEP et DIR générés pas le contrôleur.

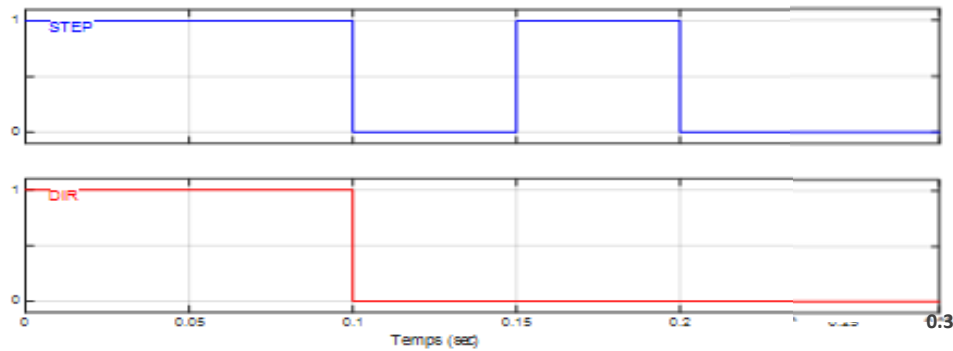


Fig. II.11. Signaux STEP et DIR qui sont la sortie du contrôleur et l'entrée du pilote.

Le **tableau II. 7** récapitule les actions que doit effectuer l'arbre du moteur et qui correspondent aux signaux STEP et DIR de la **Fig. II. 11**.

Tableau II. 7 Actions que doit effectuer l'arbre du moteur et qui correspondent aux signaux STEP et DIR de la **Fig. II. 11**

Signal STEP	Signal DIR	Durée des signaux	Action que doit effectuer l'arbre du moteur
1	1	De 0,0 à 0,10s	Rotation dans le sens horaire.
0	0	De 0,1 à 0,15s	Arrêt
1	0	De 0,15 à 0,20s	Rotation dans le sens antihoraire.
0	0	De 0,20 à 0,30s	Arrêt

II. 3. 1. 3. Pilote: Il convertit les signaux de commande (STEP, DIR) qui lui sont transmis par le contrôleur en trains d'impulsion nécessaire à la commande des transistors reliés aux enroulements du stator du moteur (**Fig. II. 12**). Selon les impulsions produites par le pilote, des enroulement bien précis sont excités et le moteur tourne dans un sens ou dans le sens opposé ou bien s'arrête. Pour comprendre, soit le moteur biphasé illustré à la **Fig. II.12** (notez qu'au simulation, nous allosn utilisé un moteur biphasé). Lorsque les deux phases sont alimentées en courant continu, le moteur s'arrête de tourner et se verrouille en position. Si le courant est inversé dans une phase, le moteur se déplacera d'un pas dans un sens (connue) et si le courant est inversé dans l'autre phase, le moteur se déplacera d'un pas dans l'autre sens. Comme le montre la **Fig. II.03**, chaque phase (chaque bobine du moteur) est contrôlée par un circuit utilisant un MOSFET comme interrupteur de puissance contrôlable. Les deux MOSFET de chaque phase sont actionnés simultanément en fonction de la position et du sens de rotation souhaitées.

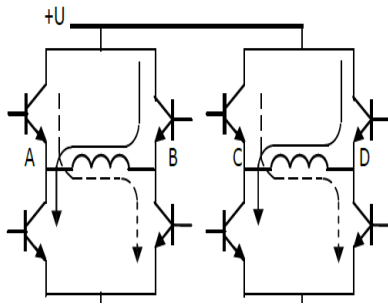


Fig. II.12. Moteur à deux phases.

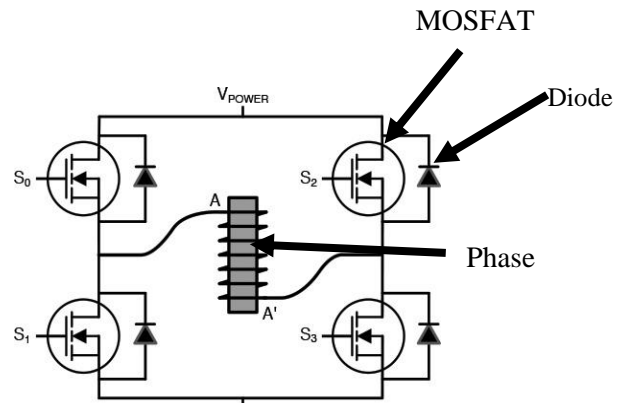


Fig. II.13. Commutateurs à semi-conducteurs du circuit d'entraînement bipolaire pour moteur pas à pas hybride.

La plupart des circuits intégrés de moteur pas à pas reposent sur la nature inductive des enroulements du moteur pas à pas pour mettre en œuvre la régulation du courant par modulation de largeur d'impulsion MLI (en anglais PWM). En utilisant l'arrangement en pont en H des MOSFET de puissance pour chaque bobine, une tension d'alimentation est appliquée à la bobine au début du cycle MLI, provoquant l'accumulation de courant à travers l'inductance de l'enroulement (bobine ou phase). Le sens du courant dans un enroulement doit être inverser pour avoir un changement des pôles d'une phase. Le pont en H contrôle la commutation du courant dans différentes phases. Ce pont se compose de quatre interrupteurs qui contrôlent le courant dans le stator (voir **Fig. II. 13**) interrupteurs S0 et S3 sont fermés (et que S1 et S2 sont ouverts), une tension positive sera appliquée aux bornes du moteur. Le courant passe de A à A' faisant de A le pôle nord et A' le pôle sud (**Fig.II.14.a**). En ouvrant les interrupteurs S0 et S3 et en fermant les interrupteurs S1 et S2, cette tension est inversée et le courant passe de A' à A, faisant de A' le pôle nord et A le pôle sud (**Fig. II.14.b**). Les interrupteurs S0 et S1 ou (S3 et S2) ne peuvent jamais être fermés en même temps, car cela pourrait provoquer un court-circuit dans la source de tension d'entrée (**Fig. II.14.c**). Ce qui conduit effectivement à un court-circuit de l'alimentation et peut conduire à la détruire le pont. Il y a un élément de commutation de chaque côté du pont afin de fournir un chemin de courant pendant ces courtes périodes de commutation sans que la tension du moteur n'ait à augmenter de manière spectaculaire. En fin, le pont est doté de diodes (**Fig.II.13**) qui sont des éléments de protection du pont, car ils aident à réduire la surintensité du courant lors de la fermeture ou de l'ouverture des interrupteurs côté haut et bas exactement en même temps.

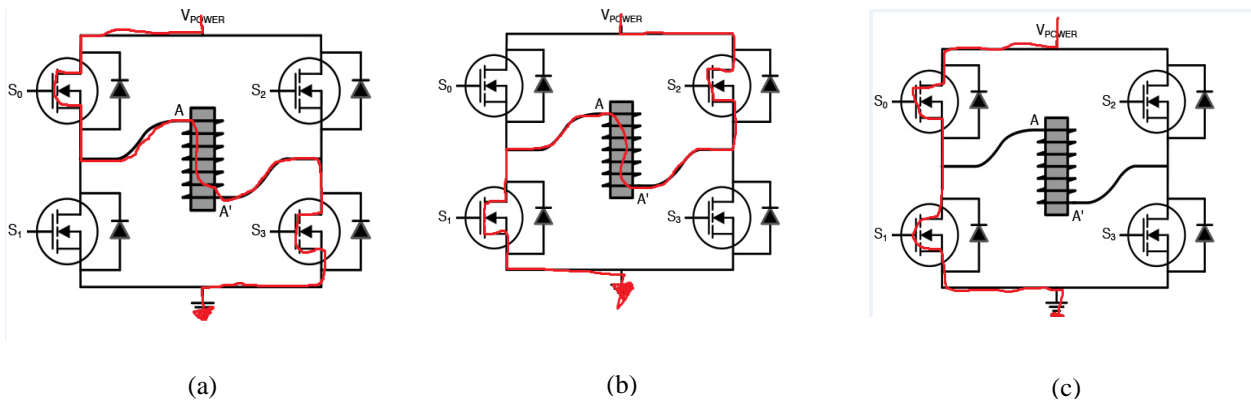


Fig. II.14 Chemins du courant dans une phase du moteur. (a) Chemin du courant qui fait tourner le moteur dans le sens horaire, (b) Chemin du courant qui fait tourner le moteur dans le sens antihoraire, (c) Chemin du court-circuit de l'alimentation.

La **Fig. II .15** présente en détail les différent composante du pilote utilisé dans le bloc Smulink de la **Fig. II .10**

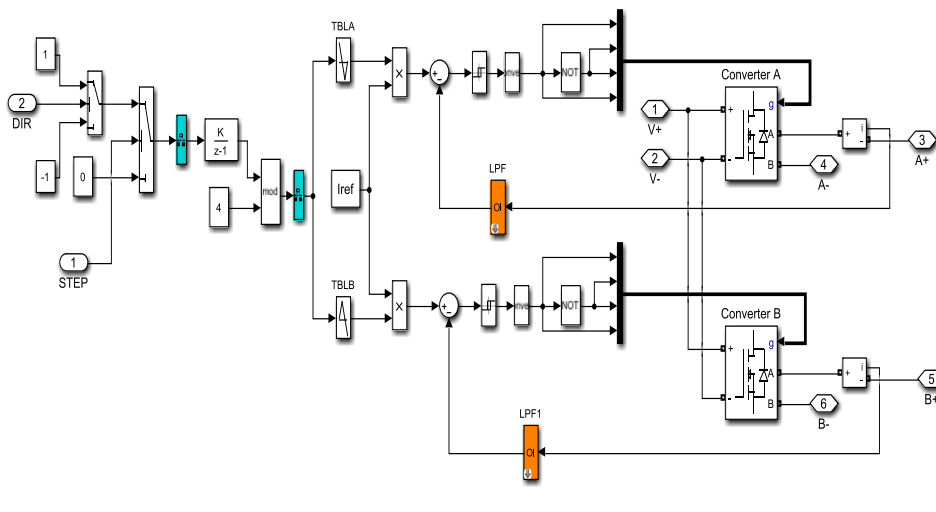


Fig. II.15. Bloc Simulink du Pilote détaillé.

A par les deux signaux STEP et DIR que reçoit le pilote à partir du contrôleur (voir **Fig. II. 10**), on doit effectuer une saisie du nombre de pas par seconde et une valeur maximal que le courant de phase ne doit pas dépasser. Pour avoir un contrôle de position, le nombre de pas

par seconde doit être réduit (aux environs de 200 pas/s et moins) et pour avoir un contrôle de vitesse, le nombre de pas par seconde doit être élevé (aux environs de 500 pas/s et plus)

II. 3. 1. 4. Moteur pas à pas hybride :

Aux simulations, les circuits équivalents au moteur ont été construits en supposant que le circuit magnétique du moteur n'est saturé en flux magnétique (le flux varie linéairement avec le courant d'excitation des phases) et que l'inductance mutuelle entre phases est négligeable. La partie mécanique du moteur est simulée par un modèle d'espace statistique basé sur le moment d'inertie et le coefficient de frottement visqueux. Les paramètres d'entrée du moteur sont (voir **Fig. II. 10**) : la charge mécanique appliquée sur l'arbre moteur T_L [en N.m] et les phases du moteur sont alimentées par des onduleurs MOSFET PWM à pont en H connectés à une source de tension continue 28V.

Les paramètres de simulation du moteur pas à pas hybride utilisés dans le bloc de simulation de la **Fig. I. 10** sont récapitulés au **tableau II. 8**, suivant :

Tableau II. 8 Paramètres du moteur pas à pas Hybride

Nombre de phases	2
Inductance d'enroulement	$1.4 \cdot 10^{-3}$ H
Résistance d'enroulement	0.7Ω
Angle de pas	1.8 deg
Liaison de flux maximale	0.005 Vs
Couple de détente maximal	0.002 N.m
Inertie totale	1.210^{-7} Kg m ²
Coefficient de frottement visqueux total	$10^{-7} \cdot 1000$ Kg.m/S
Vitesse initiale	0 rad/s
Position initiale	0 degrés

II. 3. 1. 5. Paramètres de sortie du moteur: Nous avons utilisé le Scope Simulink présenté par la Fig. II. 1, pour visualiser les résultats des simulations. Ces résultats, que nous avons nommé paramètres de sortie du moteur sont : la tension par phase V_{ph} en [V], le courant par phase I_{ph} en [A], le couple électromagnétique T_e en [Nm], la vitesse angulaire du rotor ω en [rad/s] et la position du rotor en [degrés].

II. 3. 2 Résultats de la simulation du moteur hybride

Au cours de ce paragraphe, nous présentons les résultats de simulation obtenus au moyen du bloc matlab/simulink de la **Fig. II.10**. Dans un premier temps, on expose les résultats obtenus pour le test en fonctionnement à vide pour un contrôle de position suivi par un contrôle de vitesse. Dans un second temps, on expose les résultats obtenus pour le test de fonctionnement en charge, aussi pour un contrôle de position puis pour un contrôle de vitesse. Tous les résultats de simulation qui seront présentés pour le cas d'un moteur pas à pas hybride, ont une durée de temps totale de simulation de 0,3 seconde. Au contrôle de position, les consignes des actions (mouvement dans le sens horaire ou en antihoraire ou bien arrêt) que le moteur doit suivre, pendant la durée de simulation de 0,3s sont ceux donnés par les signaux STEP et DIR présentés par la **Fig. II. 11** et récapitulés au **tableau II. 7**. Au contrôle vitesse, les signaux STEP et DIR prennent respectivement, les valeurs "1" et "0" tout le long du temps de simulation (0,3s), ce qui correspond à une rotation de dans un seul sens (le sens choisi et le sens antihoraire).

II. 3. 2. 1 Test de fonctionnement à vide du moteur hybride

A la réalisation du test de fonctionnement à vide du moteur hybride, on saisie une valeur de zéro au niveau du bloc moteur de la Fig. II. 10. Cette valeur correspond à un couple résistant nul.

La Fig. II. 16 présente les résultats de simulation obtenus lors du test de fonctionnement à vide du moteur hybride pour un contrôle de position. Ce dernier contrôle correspond à une vitesse de 200 pas/s. Cette valeur est saisie au niveau du pilote, ainsi qu'une valeur maximale de 2A que le courant de phase ne doit pas dépasser. Les **Fig. II. 16 (a), (b), (c), (d) et (e)** présentent respectivement, la tension par phase V_{ph} , le courant par phase I_{ph} , le couple électromagnétique T_e , la vitesse angulaire du rotor ω et la position du rotor.

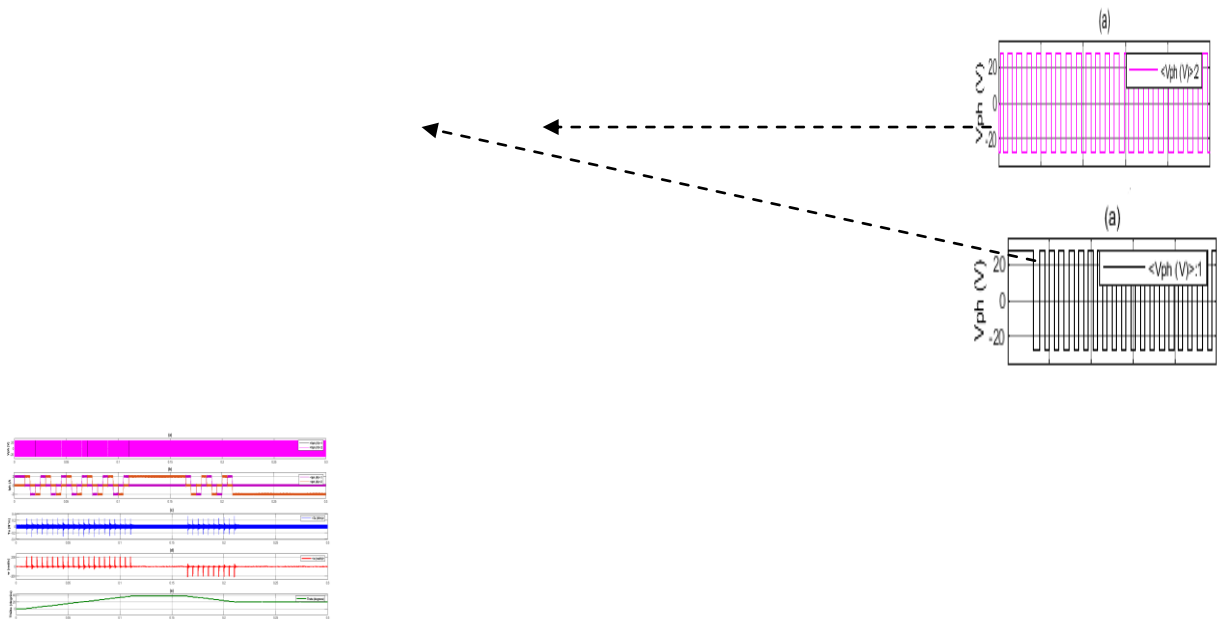


Fig. II.16. Caractéristiques à vide du moteur pas à pas hybride pour un contrôle de position (200 pas/s): (a) la tension par phase, (b) courant par phase, (c) couple électromagnétique, (d) vitesse angulaire du rotor, (e) position du rotor.

La Fig. II. 16 (a) montre que la tension de chaque phase prend la séquence suivante :

La **fig. II.16(a)** montre qu'après un régime transitoire, la tension de chaque phase répète la séquence suivante : positive, négative, lorsqu'une tension de phase est positive l'autre prend la valeur opposée à celle-ci. Par conséquent, on en déduit que les phases sont excitées à leur tour, et chaque phase a une polarité lorsqu'elle est excitée et change de polarité lors de l'excitation suivante. Cela signifie que les phases sont contrôlées aux pôles.

La **Fig. II. 16 (b)** montre qu'après un régime transitoire, le courant de chaque phase répète la séquence suivante : positif, nul et négatif et lorsque l'un des courants de phase est nul l'autre prend une valeur positive ou négative. D'où, on déduit que les phases sont excitées à tour de rôle, et chaque phase a une polarité lorsqu'elle est excitée et change de polarité à l'excitation suivante. Cela signifie que les phases sont commandé en bipolaire.

La **Fig. II. 16 (c)** montre qu'après un régime transitoire, le couple présente 20 oscillations impotentes, lorsque le moteur tourne dans le sens horaire et 10 autres, lorsque le moteur tourne dans le sens antihoraires. Aussi, le couple est nul, lorsque le moteur est à l'arrêt et donc on est dans un contrôle de position. Par un simple calcul pour une durée de 0.1s et une vitesse de 200 pas/s, on obtient le nombre de pas $200 \times 0.1 = 20$ pas. De la même façon, pour une durée de 0.05s, le nombre de pas est $200 \times (0,05) = 10$ pas. Les oscillations importantes que prend le couple sont produites par la force d'attraction exercée par les enroulements de phase sur le rotor, lorsqu'ils sont excités (voir Fig. II. 17. (b)). Cela conduit à la création d'un couple qui fait tourner le rotor.

La **Fig. II. 16 (d)** montre qu'après un régime transitoire, la vitesse angulaire prend 20 fois une valeur maximale d'environ 200 rd/s, lorsque le moteur tourne dans le sens horaire et 10 fois, lorsque le moteur tourne dans le sens antihoraires. Aussi, la vitesse est nulle, lorsque le moteur est à l'arrêt. Ce comportement reflète clairement qu'il s'agit d'un contrôle de position.

La **Fig. II. 16 (e)** montre qu'après un régime transitoire, la position du moteur passe de 0° à environ 40° , lorsque le moteur tourne dans le sens horaire et elle passe d'une position d'environ 40° à une position d'environ 20° . On peut vérifier cela par un simple calcul, sachant que notre moteur à un pas de $1,8^\circ$. Pour la rotation dans le sens horaire de 20 pas : $20 \times 1,8^\circ = 36^\circ$, qui est la position exacte de l'arbre du rotor après 20 pas. Pour la rotation dans le sens antihoraire de 10 pas : on a $36^\circ - 20 \times 1,8^\circ = 18^\circ$ qui est la position exacte de l'arbre du rotor après 10 pas dans le sens inverse.

La **Fig. II.17** présentes les résultats de simulation obtenus lors du test de fonctionnement à vide du moteur hybride pour un contrôle de vitesse. Ce dernier contrôle correspond à une vitesse de 500 pas/s. Cette valeur est saisie au niveau du pilote, ainsi qu'une valeur maximale de 2A que le courant de phase ne doit pas dépasser.

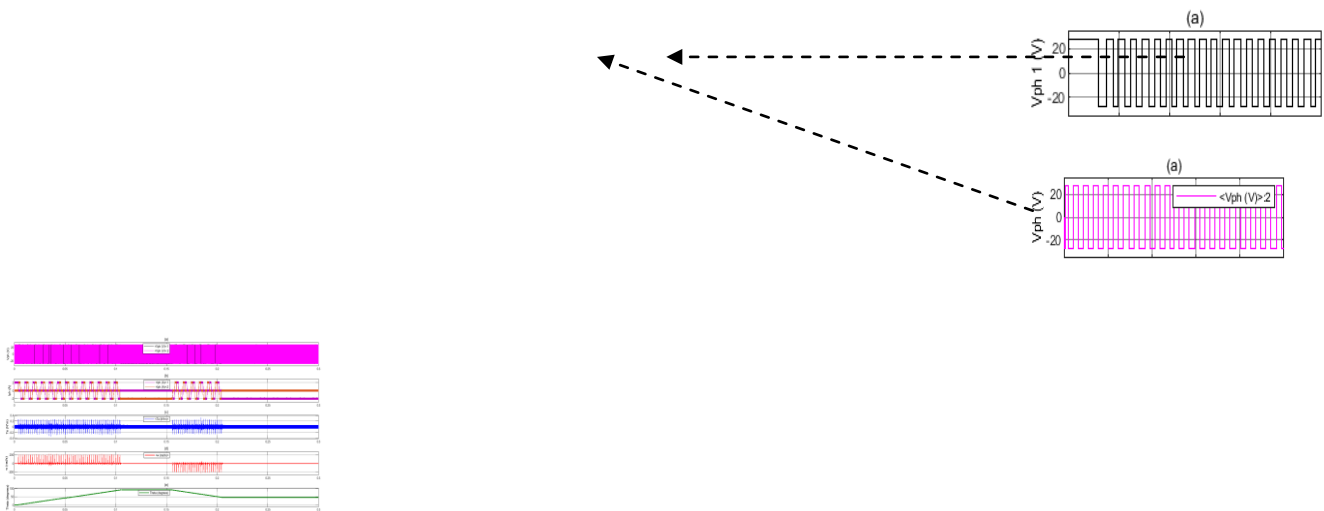


Fig. II.17. Caractéristiques à vide du moteur pas à pas hybride pour un contrôle de vitesse (500 pas/s): (a) la tension par phase, (b) courant par phase, (c) couple électromagnétique, (d) vitesse angulaire du rotor, (e) position du rotor.

La Fig. II. 17 (a) montre que la tension de chaque phase prend la séquence suivante :

La figure 16(a) montre qu'après un régime transitoire, la tension de chaque phase répète la séquence suivante : positive, négative, lorsqu'une tension de phase est positive l'autre prend la valeur opposée à celle-ci. Par conséquent, on en déduit que les phases sont excitées à leur tour, et chaque phase a une polarité lorsqu'elle est excitée et change de polarité lors de l'excitation suivante. Cela signifie que les phases sont contrôlées aux pôles.

La **Fig. II. 17 (b)** montre qu'après un régime transitoire, le courant a le même comportement que celui du contrôle de position (**Fig. II.16(b)**), décrit précédemment. Sauf que, les durées de temps du courant, au cours d'un contrôle de vitesse sont plus réduites.

La **Fig. II. 17 (c)** montre qu'après un régime transitoire (couple très faible), le couple oscille au tour d'une valeur moyenne d'environ 0.3Nm, tous le long de la durée de rotation du moteur. Cette valeur moyenne est le couple que doit développer le moteur pour tourner et vaincre son inertie.

La **Fig. II. 17 (d)** montre qu'après un régime transitoire (vitesse très faible), la vitesse angulaire prend une valeur d'environ 200 rd/s, tous le long de la durée de rotation du moteur. Cela prouve, que le moteur est sous un contrôle de vitesse.

La **Fig. II. 17 (e)** montre qu'après un régime transitoire où l'angle de l'arbre du rotor est nul, la position change est sa valeur en degré augmente presque linéairement, jusqu'à la fin des simulations. Cela aussi prouve, que le moteur est sous un contrôle de vitesse.

II. 3. 2. 2 Test de fonctionnement en charge du moteur hybride

A la réalisation du test de fonctionnement en charge du moteur hybride, on a saisie une valeur de 0,1 Nm, au niveau du bloc moteur de la **Fig. II. 10**.

La **Fig. II. 18** présentes les résultats de simulation obtenus lors du test de fonctionnement en charge du moteur hybride pour un contrôle de position (qui obéit aux consignes du **tableau II.7**). Ce dernier contrôle correspond à une vitesse de 200 pas/s. Cette valeur est saisie au niveau du pilote, ainsi qu'une valeur maximale de 2A que le courant de phase ne doit pas dépasser. Les **Fig. II. 18 (a), (b), (c), (d) et (e)** présentent respectivement, la tension par phase V_{ph} , le courant par phase I_{ph} , le couple électromagnétique T_e , la vitesse angulaire du rotor ω et la position du rotor.

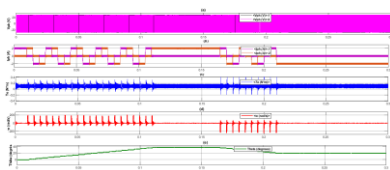


Fig. II.18 Caractéristiques en charge (couple résistant 0,1 Nm) du moteur pas à pas hybride pour un contrôle de position (200 pas/s): (a) la tension par phase, (b) courant par phase, (c) couple électromagnétique, (d) vitesse angulaire du rotor, (e) position du rotor.

La **Fig. II. 18** montre que lors d'un contrôle de positions, les caractéristiques du fonctionnement en charge sont similaires aux caractéristiques du fonctionnement à vide. La différence principale réside dans le fait, qu'en charge, le couple électromagnétique développé par le moteur n'est pas nul pendant les durées des arrêts du moteur (comparez la **Fig. II. 18 (c)** avec **Fig. II. 16 (c)**). Cela est dû au fait que le moteur doit produire un couple qui permet de vaincre le couple résistant de la charge et ainsi maintenir la charge à la position où se trouve l'arbre du rotor. Cette figure montre aussi que la valeur moyenne du couple électromagnétique (0,1 Nm) est égale à la valeur du couple résistant de la charge et qui est de 0,1 Nm.

A la réalisation du test de fonctionnement en charge du moteur hybride, on a saisi une valeur de 0,1 Nm, au niveau du bloc moteur de la **Fig. II. 10**.

La **Fig. II. 19** présente les résultats de simulation obtenus lors du test de fonctionnement en charge du moteur hybride pour un contrôle de vitesse. Le couple résistant a été augmenté de 0,1 à 0,4 Nm (dans l'objectif de voir si le moteur présente des dysfonctionnements) et la vitesse, elle aussi, a été augmentée de 200rd/s à 500 rd/s, car cela permet de passer d'un contrôle de position à un contrôle de vitesse. Pendant ce test, les signaux STEP et DIR prennent respectivement les valeurs "1" et "0" tout le long du temps de simulation. Ainsi le moteur ne tourne que dans le sens antihoraire.

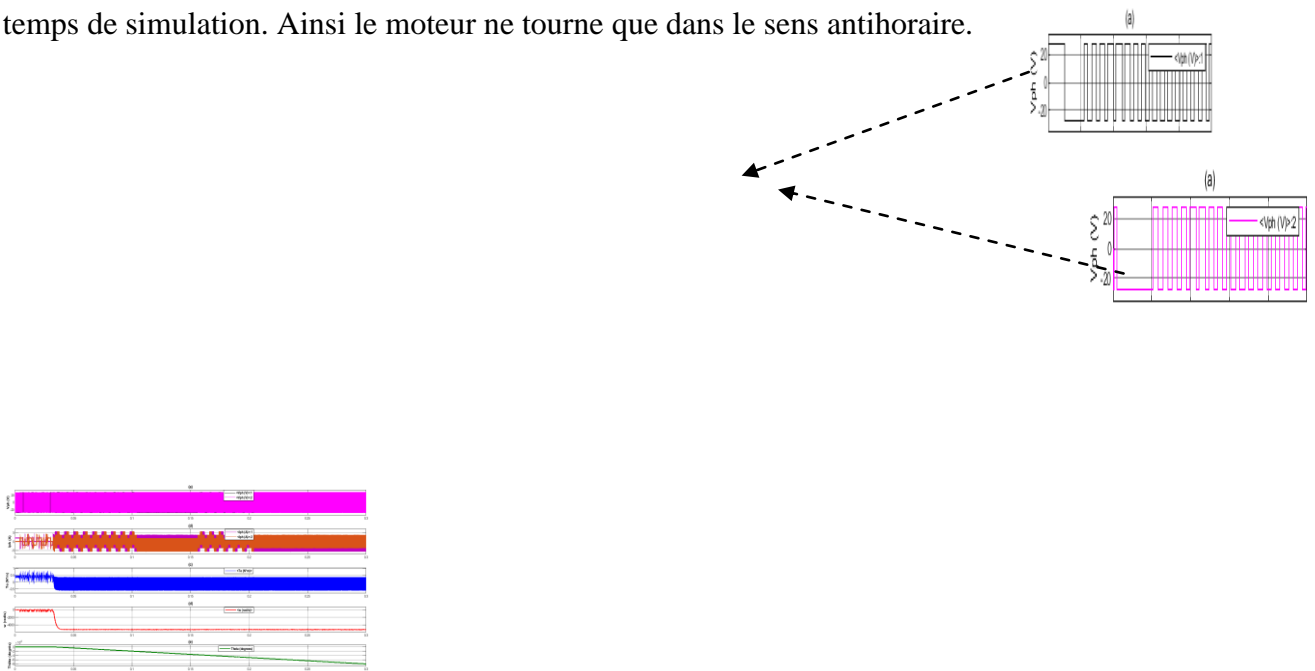


Fig. II.19 Caractéristiques en charge (couple résistant 0,4 Nm) du moteur pas à pas hybride pour un contrôle de vitesse (500 pas/s): (a) la tension par phase, (b) courant par phase, (c) couple électromagnétique, (d) vitesse angulaire du rotor, (e) position du rotor.

La **Fig. II. 19** montre que lors d'un contrôle de vitesse, les caractéristiques du fonctionnement en charge sont similaires aux caractéristiques du fonctionnement à vide (comparez la **Fig. II. 19** avec la **Fig. II. 17**). La différence principale réside dans la

caractéristique du couple. Où, en charge, le moteur développe un couple électromagnétique de valeur moyenne de 0,4 Nm est qui est égale à la valeur du couple résistant de la charge (0,4 Nm). Tendis qu'à vide, le couple est presque nul pendant les durées des arrêts. En charge, le moteur doit produire un couple qui permet de vaincre le couple résistant de la charge pour pouvoir l'entraîner (la faire tourner).

II. 4 Conclusion

Dans ce chapitre deux blocs Matlab/Simulink ont été mis en œuvre. L'un pour la commande d'un moteur pas à pas unipolaire et l'autre pour la commande d'un moteur pas à pas hybride.

A la commande d'un moteur pas à pas unipolaire, nous avons effectué quatre tests de commande (de contrôle) : Les deux premiers, en mode à pas complet effectués pour un contrôle de position et un contrôle de vitesse. Les deux seconds en mode à demi-pas effectués aussi pour un contrôle de position et un contrôle de vitesse.

Au contrôle de position à pas complet, tous les pas on la même vitesse maximale. Cela est du au fait, que chaque pas de rotation du rotor est obtenu par l'excitation de deux enroulements du stator. Tendis que lors du mode à demi-pas, la vitesse de deux demi-pas successifs est différente. Cela revient au fait, qu'un demi-pas de rotation du rotor est obtenu par l'excitation de deux enroulements du stator et le demi-pas qui suit est obtenu par l'excitation d'un seul enroulement.

Au contrôle vitesse, le temps des arrêts est très réduit est peut être considéré comme nul. Pour un contrôle de vitesse à pas complet, la vitesse moyenne du rotor est supérieure à celle obtenue en mode à demi-pas. La raison de cette différence est que la séquence d'excitation du mode pas à pas est différente de celle du mode à pas complet.

A la commande d'un moteur pas à pas hybride, nous avons effectué quatre tests de commande (de contrôle) : Les deux premiers en fonctionnement à vide pour un contrôle de position et un contrôle de vitesse. Les deux en fonctionnement en charge effectués aussi pour un contrôle de position et un contrôle de vitesse.

Au contrôle position, les caractéristiques du courant statorique, de la vitesse angulaire et de la position de l'arbre du rotor sont similaire, lorsqu'il s'agit du fonctionnement à vide ou du fonctionnement en charge. Tendis que, la réponse du couple électromagnétique produite par le moteur est différente pendant les périodes des arrêts du moteur. A vide, le couple du moteur est nul, tendis qu'en charge le couple du moteur est égal au couple résistant de la charge.

Au contrôle de vitesse, les caractéristiques du fonctionnement en charge sont similaires aux caractéristiques du fonctionnement à vide. La différence principale réside dans la caractéristique du couple. Où, en charge, le moteur développe un couple électromagnétique de valeur moyenne qui est égale à la valeur du couple résistant de charge. Tandis qu'à vide, le couple est presque nul pendant les durées des arrêts. En charge, le moteur doit produire un couple qui permet de vaincre le couple résistant de la charge pour pouvoir l'entraîner (la faire tourner).

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Pour pouvoir réaliser l'objectif de ce travail, qui est la commande d'un moteur pas à pas. Nous avons réalisé deux chapitres.

Au 1^{er} chapitre nous avons résumé les informations et connaissances récoltées à près une recherche bibliographique. Cette recherche à été focalisée sur l'état de l'art des moteurs pas à pas et il en a résulté ce qui suit:

- Le moteur pas à pas classique est apparu dans les années 1940, mais c'est l'avènement de l'électronique numérique dans les années 1960 qui a permis son développement.
- Il existe dans la littérature spécialisée, différents types de moteurs P-à-P qui sont: Le moteur P-à-P à aimant permanent unipolaire ou bipolaire, le moteur P-à-P à réluctance variable unipolaire ou bipolaire et le moteur P-à-P hybride unipolaire, ou bipolaire ou bien unipolaire et bipolaire à la fois.
- Les moteurs pas à pas sont excellents pour les applications de positionnement. Ils peuvent être contrôlés avec précision en termes de position et de vitesse simplement en faisant varier le nombre et la fréquence des impulsions appliquées aux transistors. Leur nombre élevé de pôles leur donne de la précision tout en fonctionnant en boucle ouverte. S'il est correctement dimensionné pour l'application, un moteur pas à pas ne manquera jamais une étape. Et parce qu'ils n'ont pas besoin de rétroaction de position, ils sont très rentables.

Au 2^{ème} chapitre, deux blocs Matlab/Simulink ont été mis en œuvre. L'un pour la commande d'un moteur pas à pas unipolaire et l'autre pour la commande d'un moteur pas à pas hybride. Les conclusions tirées de ce chapitre sont comme suit :

A la commande d'un moteur pas à pas unipolaire, et au contrôle de position à pas complet, tous les pas on la même vitesse maximale. Cela est du au fait, que chaque pas de rotation du rotor est obtenu par l'excitation de deux enroulements du stator. Tandis que lors du mode à demi-pas, la vitesse de deux demi-pas successifs est différente. Cela revient au fait, qu'un demi-pas de rotation du rotor est obtenu par l'excitation de deux enroulements du stator et le demi-pas qui suit est obtenu par l'excitation d'un seul enroulement. Au contrôle vitesse, le temps des arrêts est très réduit est peut être considéré comme nul. Pour un contrôle de vitesse à pas complet, la vitesse moyenne du rotor est supérieure à celle obtenue en mode à demi-pas. La raison de cette différence est que la séquence d'excitation du mode pas à pas est différente de celle du mode à pas complet.

A la commande d'un moteur pas à pas hybride, au contrôle de position, les caractéristiques du courant statorique, de la vitesse angulaire et de la position de l'arbre du rotor sont similaire,

Conclusion général

lorsqu'il s'agit du fonctionnement à vide ou du fonctionnement en charge. Tandis que, la réponse du couple électromagnétique produite par le moteur est différente pendant les périodes des arrêts du moteur. A vide, le couple du moteur est nul, tandis qu'en charge le couple du moteur est égal au couple résistant de la charge.

Au contrôle de vitesse, les caractéristiques du fonctionnement en charge sont similaires aux caractéristiques du fonctionnement à vide. La différence principale réside dans la caractéristique du couple. Où, en charge, le moteur développe un couple électromagnétique de valeur moyenne qui est égale à la valeur du couple résistant de la charge. Tandis qu'à vide, le couple est presque nul pendant les durées des arrêts. Cela vient du fait, qu'en charge, le moteur doit produire un couple qui permet de vaincre le couple résistant de la charge pour pouvoir l'entraîner.

Référence

Référence

- [1] “Dédicace Je dédie ce travail à la source de tendresse : mes très chers parents . Tout en étant convaincue que mon succès est une récompense pour tous leurs sacrifices , qu’ils trouvent ici l’expression de ma plus profonde gratitude . À mes sœurs , À m”.
- [2] M. K. Prajapati and D. Singh, ““ Design and Analysis of speed control of Bipolar Stepper Motor by using GA with PID Approach Technique ,”” *Int. J. Res. Electron. Comput. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 2348–2281, 2019.
- [3] R. Condit, “Stepping Motors Fundamentals,” *Microchip Technol.*, vol. AN907, pp. 1–22, 2004.
- [4] I. Introduction, “Introduction :,” pp. 1–16, 2018.
- [5] S. Dorin-Mirel, M. Ion, and O. Mihai, “The analysis of different frequency for a stepper motor open loop operation,” *Proc. 8th Int. Conf. Electron. Comput. Artif. Intell. ECAI 2016*, 2017, doi: 10.1109/ECAI.2016.7861187.
- [6] M. Scarpino, *MOTORS for MAKERS : A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines*. 2015. [Online]. Available: http://eprints.undip.ac.id/5613/1/METODE_PENELITIAN_-_dharmainto.pdf
- [7] M. Papoutsidakis, A. Chatzopoulos, E. Symeonaki, and D. Tseles, “Methodology of PID Control – A Case Study for Stepper Motors,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 179, no. 30, pp. 34–38, 2018, doi: 10.5120/ijca2018916689.
- [8] Z. Axis and X. Axis, “Stepper Motor Stepper Motor Stepper Motor,” no. May, 2019.
- [9] T. A. Khan, T. A. Taj, and I. Ijaz, “Hybrid stepper motor and its controlling techniques a survey,” *Proc. 2014 IEEE North West Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng. Conf. ElConRusNW 2014*, pp. 79–83, 2014, doi: 10.1109/ElConRusNW.2014.6839207.
- [10] Lc. oneynne B. Hare, “Chapter one,” *Qual. Prog.*, vol. 35, no. 8, pp. 77–79, 2002, doi: 10.7829/j.ctv1w0xcfk.4.
- [11] E. Engineering, “Department of Electrical and Electronics Engineering”.
- [12] I. Virgala, M. Kelemen, A. Gmitterko, and T. Lipták, “Control of Stepper Motor by Microcontroller,” *J. Autom. Control*, vol. 3, no. 3, pp. 131–134, 2015, doi:

Référence

- 10.12691/automation-3-3-19.
- [13] O. Mahmood Altaee, A. Ibraheem Alnaib, and N. Abed AlBary Aljawady, “Design and Realization of a Stepper Motor Driver with PLC,” *Al-Kitab J. Pure Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 35–45, 2018, doi: 10.32441/kjps.v2i1.137.
- [14] G. Mihalache, A. Zbant, and G. Livint, “Open-loop control of hybrid stepper motor with two phases using voltage to frequency converter,” *2013 - 8th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2013*, no. 1, pp. 23–26, 2013, doi: 10.1109/ATEE.2013.6563389.
- [15] “article_145220_1a0af781531820f69c2b26999c30f0b2.pdf.”
- [16] “Composition d ’ un moteur pas à pas hybride : Fonctionnement d ’ un moteur pas à pas hybride : Commande d ’ un moteur pas à pas hybride ;,” pp. 3–5.
- [17] A. Note, “How to drive a unipolar stepper motor with the TLE8110ED Product Family : Flex Multichannel Low Side Switches,” pp. 1–26.
- [18] P. K. Sanfins, “Comment contrôler un moteur pas à pas Avantage Désavantage”.

الملخص

يتم استخدام المحرك السائر على نطاق واسع للوضع الدقيق و السرعة مراقبة. تركز هذه الدراسة على تقديم وصفا و نمودجا وظيفيا لمحرك متدرج أحادي القطب و محرك متدرج هجين. يسمح نظام القيادة بالتحكم في حركة محرك السائر عن طريق تحديد خيارات نصف الخطوة أو الخطوة الكاملة, تمت مقارنة خصائص نتائج المحاكاة التجريبية للتحقق من النموذج, توضح هذه الدراسة أن محرك متدرج ذو الحلقة المفتوحة يمكن ان يكون محاكاة دقيقة للتنبؤ بأداء الأجهزة الحقيقي. الكلمات المفتاحية : المحرك السائر, المحرك السائر احادي القطب, المحرك السائر الهجين, خطوة المحرك, الحلقة المفتوحة, محاكاة, نمودج.

Résumé

Le moteur pas à pas est largement utilisé pour le positionnement précis et le contrôle de la vitesse.

Cette étude se concentre sur la présentation d'une description et d'un modèle fonctionnel d'un moteur pas à pas unipolaire et d'un moteur pas à pas hybride.

Le système d'entraînement permet de contrôler le mouvement du moteur pas à pas en sélectionnant les options demi-pas ou pas complet,

Les caractéristiques des résultats de la simulation expérimentale ont été comparées pour vérifier le modèle, cette étude montre que le moteur pas à pas en boucle ouverte peut être une simulation précise pour prédire les performances réelles des dispositifs.

Mots clés : moteur pas à pas, moteur pas à pas unipolaire, moteur pas à pas hybride, moteur pas à pas, boucle ouverte, simulation, modèle.

Abstract

The stepper motor is widely used for precise positioning and speed control.

This study focuses on presenting a description and a functional model of a unipolar stepper motor and a hybrid stepper motor.

The drive system allows the stepper motor movement to be controlled by selecting half-step or full-step options.

The characteristics of the experimental simulation results were compared to verify the model, this study shows that the open loop stepper motor can be an accurate simulation to predict the real performance of the devices.

Key words : Stepper motor, unipolar stepper motor, hybrid stepper motor, stepper motor, open loop, simulation, model.