

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées



Département Electrotechnique

Polycopie de Cours

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Traction Electrique

Rédigé par

Dr. IFFOUZAR Koussaila

Maitre de Conférences Classe A

Intitulé

Machines Electriques Spéciales

Année universitaire : 2024/2025

©Copyright by Dr. IFFOUZAR Koussaila 2025

All Rights Reserved

Sommaire

Avant-propos

Introduction générale

Chapitre 1: Introduction aux machine spéciales

1. Machines Alternatives Multiphasées	2
2. Machines synchrones spéciales	3
3. Machines linéaires.....	3
4. Machines supraconductrices	5
5. Micromachine	5
6. Selsyns (synchromachine)	6

Chapitre 2 : Machines asynchrones spéciales

Partie I : Moteur asynchrone monophasé

1. Problématique de démarrage du moteur asynchrone monophasé.....	7
2. Théorie des champs à doubles rotations des moteurs asynchrones monophasés...7	
3. Différents types de moteur asynchrone monophasé.....	9
4. Inversion du sens de rotation.....	13
5. Utilisation des moteurs triphasés par alimentation monophasée sans rebobinage..	14
6. Circuit équivalent.....	14

Partie II : Moteur asynchrone linéaire (LIM)

1. Description.....	18
2. principe de fonctionnement.....	18
3. Caractéristique.....	20
4. Bilan de puissance	21
5. Utilisation des moteurs linéaires dans les systèmes ferroviaires.....	22

Chapitre 3 : Moteur Synchrone Pas à Pas

1. Principe de fonctionnement du moteur pas à pas élémentaire	24
2. Effet de l'inertie.....	25
3. Effet de la charge mécanique.....	26
4. Couple du moteur pas à pas.....	26
5. Typologie des moteurs Pas à Pas.....	27
6. Alimentation des moteurs Pas à Pas.....	28

Chapitre 4 : Synchromachine

1. SELSYN monophasée.....35
2. Synchromachines triphasées.....38
3. Utilisation des synchromachines.....39

Conclusion générale

Référence bibliographique

Avant-propos

Le domaine des machines électriques est un pilier fondamental de l'ingénierie électrique, jouant un rôle crucial dans la conversion et la gestion de l'énergie électrique. Les machines électriques spéciales, en particulier, représentent une catégorie distincte qui se distingue par leurs conceptions innovantes et leurs applications spécifiques. Ces machines, souvent optimisées pour des usages particuliers, offrent des performances supérieures dans des contextes où les machines électriques traditionnelles ne seraient pas aussi efficaces.

Ce cours a pour objectif de vous familiariser avec les principes de fonctionnement, les caractéristiques et les applications des machines électriques spéciales. Nous aborderons des concepts avancés tels que les moteurs pas à pas, les moteurs linéaires, les machines à réluctance variable, synchro machine. Chacune de ces machines possède des propriétés uniques qui les rendent adaptées à des applications spécifiques, allant de la robotique de précision aux systèmes de propulsion avancés.

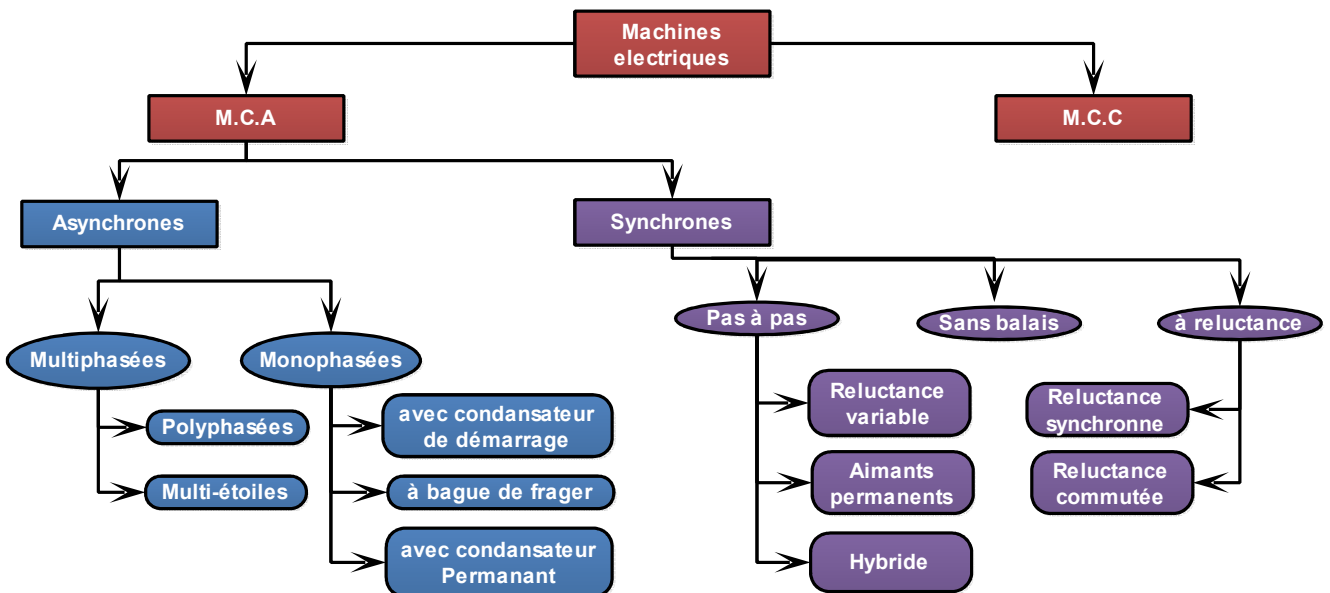
À travers ce cours destiné aux étudiants de traction électrique du département électrotechnique de l'École Nationale Supérieure des Technologies Avancées, ces derniers vont acquérir une compréhension approfondie des aspects théoriques de ces machines, ainsi que des compétences essentielles pour leur conception, leur analyse et leur intégration dans des systèmes complexes.

Introduction générale

Les machines électriques occupent une place centrale dans le monde moderne, jouant un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, et vice versa. Elles sont omniprésentes dans notre quotidien, que ce soit dans les industries, les transports, les appareils domestiques ou les systèmes de production d'énergie renouvelable. Parmi ces machines, les **machines électriques spéciales** se distinguent par leur conception innovante et leurs applications spécifiques, souvent en réponse à des besoins technologiques ou industriels particuliers. Contrairement aux machines électriques conventionnelles (telles que les moteurs asynchrones ou les machines synchrones classiques), les machines électriques spéciales sont conçues pour répondre à des exigences précises en termes de performance, de précision, de compacité ou d'efficacité énergétique. Elles incluent des technologies telles que les **moteurs pas à pas**, utilisés pour le positionnement précis dans les systèmes robotiques, les **moteurs linéaires**, qui permettent des mouvements linéaires sans pièces mécaniques intermédiaires, ou encore les **machines à réluctance variable**, connues pour leur simplicité de construction et leur robustesse. Ce cours se propose d'explorer en détail ces machines électriques spéciales, en mettant l'accent sur leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques techniques et leurs domaines d'application. Nous aborderons également les défis liés à leur conception et à leur intégration dans des systèmes complexes, ainsi que les avancées technologiques récentes qui repoussent les limites de leurs performances.

Introduction aux machines spéciales

Depuis plus d'un siècle les machines électriques jouent un rôle de premier plan dans les applications industrielles en raison de la souplesse de leur mise en œuvre et de l'importance des applications dans lesquelles elles peuvent s'intégrer. Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, hormis quelques rares périodes de crise, le recours aux machines électriques fut stimulé par l'accroissement de la demande en biens de consommation nécessitant des moyens de production industriel plus performants en vue de répondre au mieux à cette hausse. On en trouve ainsi partout, dans les systèmes les plus futiles pour la distraction du consommateur-acheteur, jusqu'aux applications les plus avancées attachées, par exemple, à la santé, à la production, au contrôle de l'énergie, aux transports et à l'exploration spatiale. La réalité actuelle ne dément pas l'usage accru des machines électriques. La prise de conscience individuelle et collective de la limitation des ressources fossiles et de la nécessité de limiter les émissions polluantes remet en cause les actionneurs fondés sur des principes thermodynamiques. Une ère nouvelle vise à substituer le plus largement possible des actionneurs électriques à des machines assurément trop polluantes.

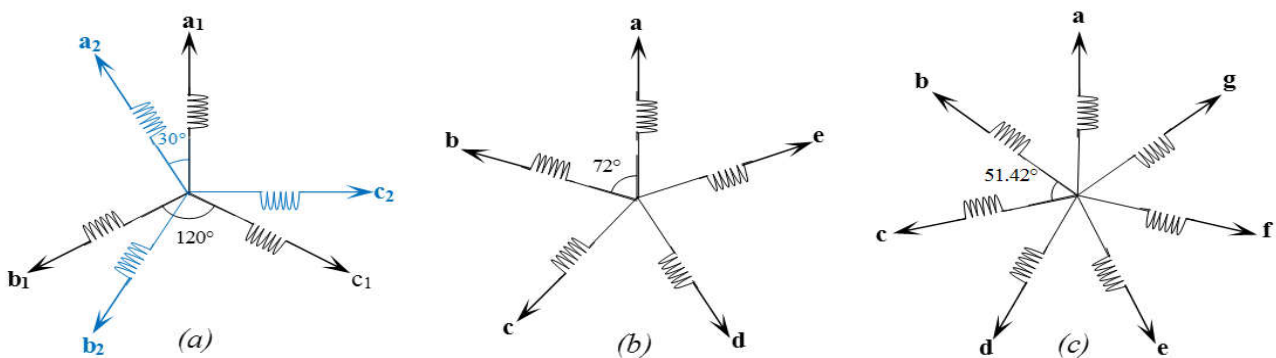


Classification des machines électriques spéciales

1. Machines Alternatives Multiphasées

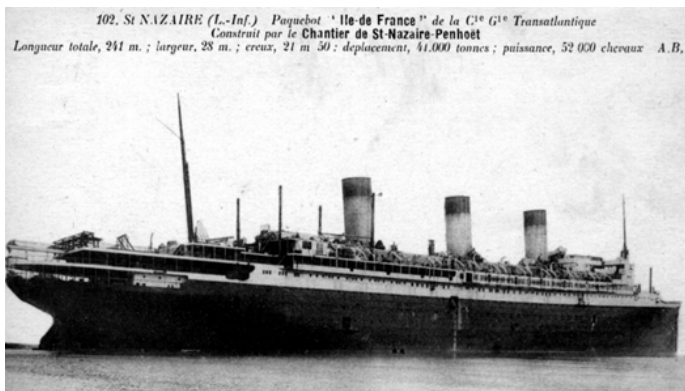
L'augmentation de la puissance a toujours posé un problème surtout au niveau des convertisseurs statiques, les interrupteurs doivent en effet alors commuter des tensions et des courants d'amplitude plus élevée, ce qui rend le coût de l'interrupteur plus élevé et la pollution électromagnétique plus accrue. Ce qui nuit au bon fonctionnement des systèmes embarqués.

Dès le début du XX^{ème} siècle, l'une des premières applications de motorisation électrique embarquée de très forte puissance concernait la propulsion de navires de croisière, en raison de la possibilité de répartir les mesures des différents organes de puissance tout en s'affranchissant d'un arbre de transmission mécanique de grande dimension. En 1932, le **Normandie** constituait une application prestigieuse avec ses quatre moteurs de 30 MW avec un confort de voyage de qualité. En cherchant la furtivité, les applications militaires profitent de cet intérêt en usant à leur tour de machines fractionnées (deux fois treize phases de **Framatome/ Jeumont** ou trois fois cinq phases d'Alstom en 2003 pour le Destroyer type 45 de la marine britannique).



Exemples d'organisation des enroulements des machines multiphasées

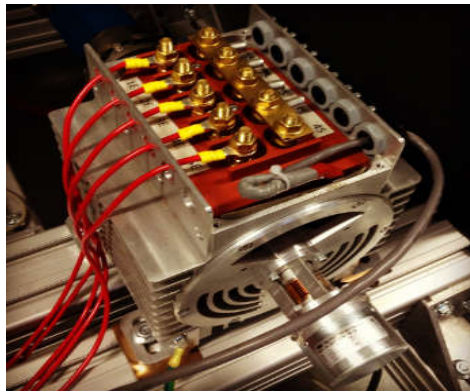
a) double étoiles ; b) cinq phases ; c) sept phases



Le **NORMANDIE** avec quatre moteurs de 30 MW



Le **Destroyer type 45** de la marine Britannique



Machine synchrone à cinq phases (pentaphasée)

2. Machines synchrones spéciales

Pour les machines synchrones spéciales, leurs particularités par rapport à la machine synchrone multiphasée réside dans le type d'excitation : par aimants permanents au lieu du courant continu (cas de la machine à aimant permanent) ou encore absence carrément d'une excitation mais avec un rotor à pole saillants (cas de machine à reluctance variable). Nous verrons aussi le cas des machines pas à pas dont la spécificité est liée aussi au type de mouvement (qui est incrémental).



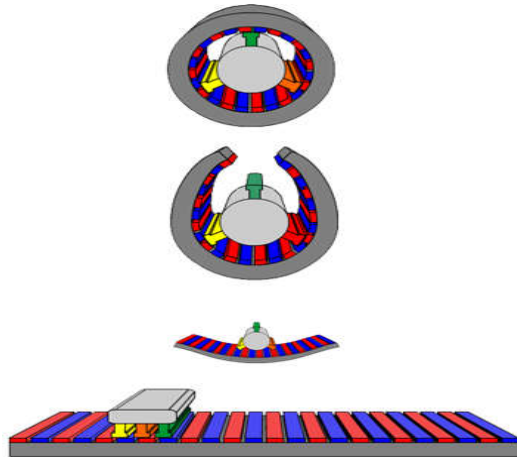
Machine synchrone à reluctance variable



Moteur pas à pas

3. Machines linéaires

Les moteurs linéaires sont essentiellement des moteurs électriques qui « ont été déroulé » de sorte qu'au lieu de produire un couple (rotation), ils produisent une force linéaire sur sa longueur. Ils demandent donc beaucoup moins d'adaptations que les machines classiques où le mouvement linéaire est obtenu en couplant un moteur rotatif à une vis sans fin à bille ou à une crémaillère. Il y a donc moins de pièces en mouvement et donc moins d'inertie en jeux. De ce fait, le moteur linéaire s'impose lorsque la vitesse linéaire et la précision importent vraiment.



Mise à plat d'un moteur rotatif synchrone triphasé

Ce type moteur se devise en deux grands groupes :

1- Moteur à grande course

Ce groupe aussi, se divise en deux catégories selon leur accélération :

- moteur à grande course à faible accélération, utilisés généralement dans le transport tel que le Transrapid ou le SkyTrain.



Transrapid 08

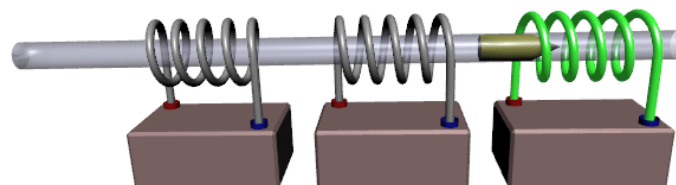


Transrapid 05



SkyTrain

- Moteur à grande course à forte accélération, utilisés généralement dans les armes comme le canon magnétique et les engins spatiaux.



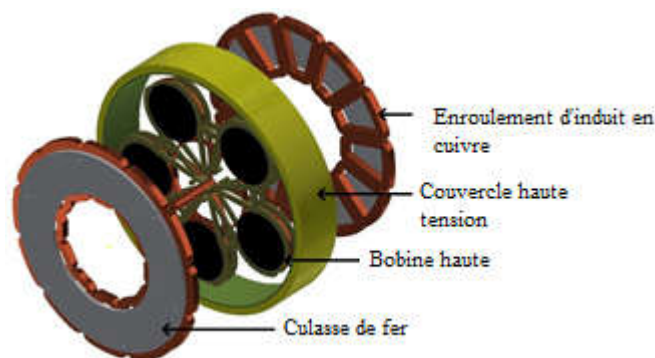
Canon magnétique « Rail Gun »

2- Moteur à course limitée

Ce groupe englobe tous les actionneurs de translation utilisés dans l'automatisme tel que les tables traçante et les vérins.

4. Machines supraconductrices

Les machines supraconductrices sont équipées de matériaux supraconducteurs à la place des bobines en cuivre utilisées habituellement. Ces machines sont en cours d'étude, la difficulté que rencontre les constructeurs de machine et la conception des différentes pièces qui composent la machine supraconductrice. Le coût de revient d'une machine supraconductrice la rend inaccessible pour les petits consommateurs.



Moteur Supraconducteur destiné pour l'aéronautique

5. Micromachines

On appelle micromachines électrique les machines à courant continu et alternatif d'une puissance allant des fractions de Watts jusqu'à 750 W .d'après destination et le champ d'application, on distingue deux classe des micromachines :

1) Micromachines d'usage générales

Ce groupe comprend essentiellement les micromachines à collecteur, asynchrone et synchrones, appelés à assurer la commande individuelle ou par groupe de divers ensembles et mécanismes, des appareils d'usage domestique.



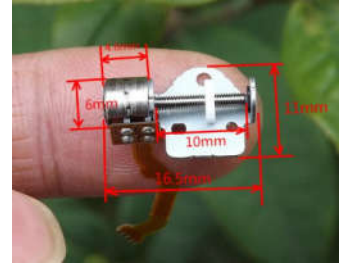
Machine C.C 12V, 10W



Moteur asynchrone 25W



Moteur synchrone 4W



Moteur pas à pas 3V, 0.7 W

2) Les micromachines électriques d'automatique

Qui suivant leurs fonction peuvent être divisées en trois sous-groupes :

- Micromachines de puissance qui transforment l'énergie électrique en mécanique.
- Micromachines d'informatique qui transforment l'angle de rotation, la vitesse et l'accélération angulaire en signales électrique.
- Convertisseurs de la valeur et de la nature de tension, convertisseur de fréquence et amplificateurs de puissance.

6. Selsyns (synchromachine)

On appelle synchromachine un dispositif admettant d'assurer le synchronisme des mouvements de deux ou plusieurs arbres mécaniques sans liaison mécanique (dont l'un transmetteur et l'autre ou les autres sont récepteurs), lorsque la liaison mécanique, pneumatique ou hydraulique est difficile à réaliser ou n'est pas fiable. Ces dispositifs de liaison synchrone susceptible de réaliser des auto-synchronisations. Le maximum du couple des selsyns réalisés généralement se trouve dans l'intervalle de 2 à 20 N.m.



SELSYN avec l'affectation des bornes

Partie I : Moteur asynchrone monophasé

Introduction

De tous les moteurs à courant alternatif, le moteur monophasé est celui qui nous est le plus familier, car il est utilisé dans les appareils ne requérant qu'une faible puissance, comme les machines-outils portatives et les appareils électroménagers. D'une façon générale, on doit l'utiliser dans les installations où l'on ne dispose pas de courant triphasé.

I.1 Problématique de démarrage du moteur asynchrone monophasé

Le moteur asynchrone monophasé souffre d'un handicap sévère. Comme il n'y a qu'un seul enroulement statorique, le champ magnétique d'un moteur asynchrone monophasé est stationnaire. Ce dernier émet des impulsions de direction fixe. Comme il n'y a pas de champ magnétique tournant au stator, le moteur n'a pas de couple de démarrage.

$$\begin{aligned} C_{em} &= k\vec{B}_R \bullet \vec{B}_S \\ &= kB_R B_S \sin \alpha \\ &= kB_R B_S \sin(180^\circ) = 0 \end{aligned}$$

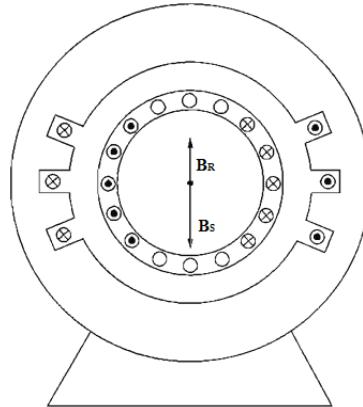


Fig.1 Moteur asynchrone monophasé dans les conditions de démarrage. L'enroulement du stator induit des tensions et des courants opposés dans le circuit du rotor, ce qui crée un champ magnétique du rotor aligné avec le champ magnétique du stator.

I.2 Théorie des champs à doubles rotations des moteurs asynchrones monophasés

La théorie du double champ tournant des moteurs asynchrone monophasés stipule en principe qu'un champ magnétique pulsé stationnaire peut être divisé en deux champs magnétiques rotatifs, d'amplitudes égales mais tournant dans des directions opposées. La densité de flux du champ magnétique stationnaire est donnée par :

$$B_S = (B_{\max} \cos \omega t) \vec{u}$$

En exprimant cette relation dans la base Eulérienne (appliquant le développement d'Euler), on obtient :

$$\begin{aligned} \vec{B}_S &= B_{\max} \cos \omega t = \frac{B_{\max}}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \\ &= \frac{B_{\max}}{2} e^{j\omega t} + \frac{B_{\max}}{2} e^{-j\omega t} \\ \vec{B}_S &= \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \end{aligned}$$

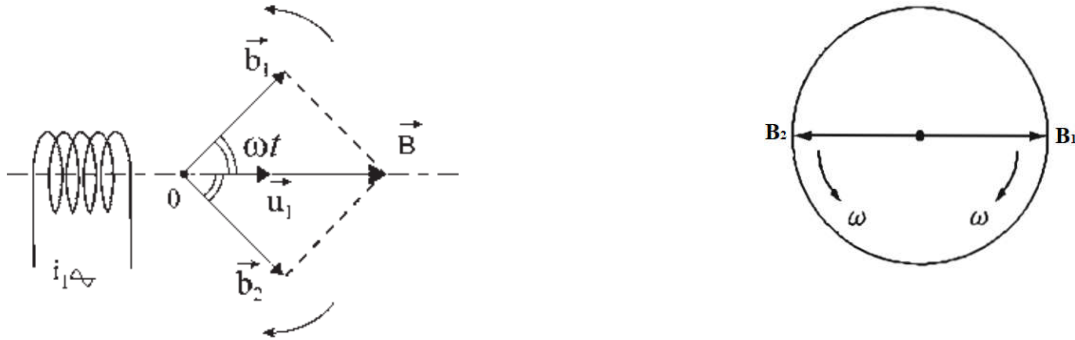


Fig.2 Division d'un seul champ magnétique pulsé en deux champs magnétiques tournants d'amplitudes égales et de directions opposées

Ainsi, on peut considérer que le champ pulsatif du stator agit sur le rotor de la même façon que deux champs tournants, le couple résultant sera donc la somme de deux couples correspondant à ces deux champs tournants, chacun d'eux agissent de façon similaire à un moteur polyphasé (figure 3). On obtient le couple résultant en faisant la somme des deux couple antagonistes (C_d et C_i) pour chaque valeur de vitesse.

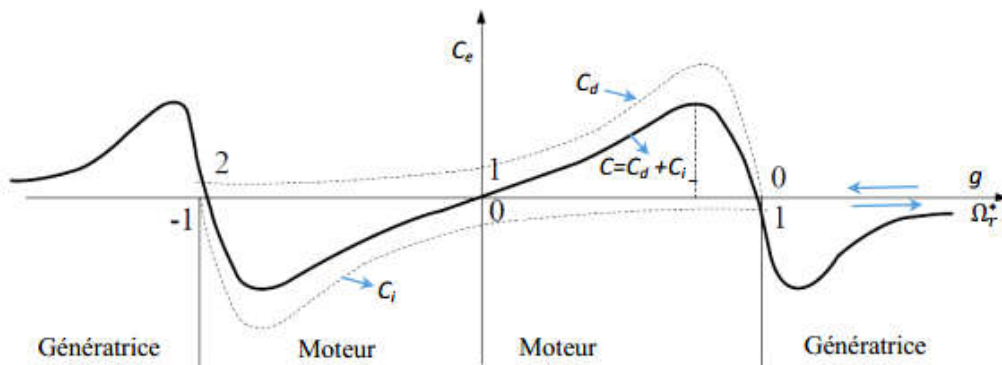


Fig.3 Différents couples dans une machine monophasée asynchrone

Le glissement des **f.m.m** produites par le champ direct et inverse est :

$$g_1 = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s} \text{ :Glissement de } \mathbf{f.m.m} \text{ direct}$$

$$g_2 = \frac{n_s + n}{n_s} = 1 + \frac{n}{n_s} = 2 - g_1 \text{ Glissement de } \mathbf{f.m.m} \text{ inverse}$$

I.3 Différents types de moteur asynchrone monophasé

En vu de répondre à la problématique de démarrage du moteur asynchrone monophasé, une mise on place sur le stator d'un enroulement auxiliaire rend possible le démarrage du moteur (**Fig.4**) : on utilise un enroulement auxiliaire au départ qu'est ensuite débranché par un interrupteur centrifuge lorsque la vitesse atteint 75% de sa valeur nominal. Habituellement cet enroulement occupe 1/3 restant disponible des encoches du stator, et il est branché en parallèle sur l'enroulement principal, donc aussi alimenté par la source. Le but recherché est de crée un champ tournant avec ces deux enroulement, c.a.d. de déphasé le courant qui circule dans l'enroulement auxiliaire (I_a) de 90° par rapport au courant qui circule dans l'enroulement principal (I_p) (puisque ces deux enroulement sont déjà décalés dans l'espace de 90° électrique). Si le déphasage n'est pas exactement 90° , on obtient tout de même un champ elliptique et le moteur démarre malgré tout. Les principales techniques utilisées pour le démarrage sont données ci-après.

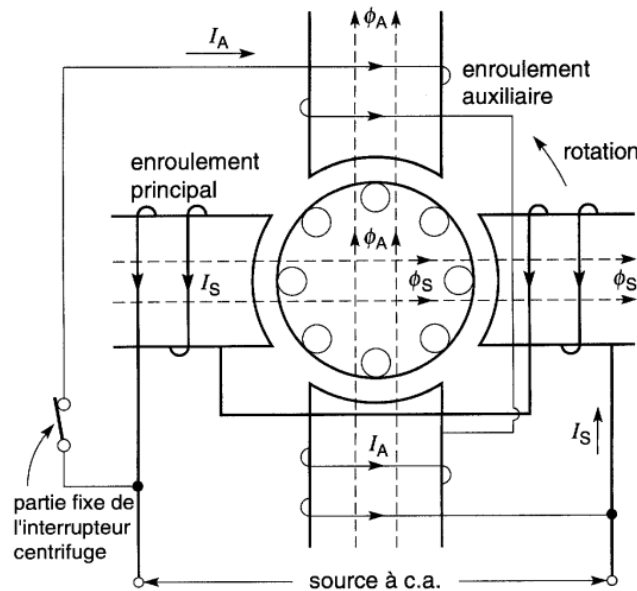


Fig.4 Courants et flux pendant le démarrage d'un moteur monophasé avec enroulement auxiliaire

I.3.1 Moteur à phase auxiliaire résistive

Dans le moteur à phase auxiliaire résistive **Fig.5**, l'enroulement principal comporte un nombre considérable de spires de fil de section importante. Sa réactance inductive est donc élevée et sa résistance est faible ; le courant I_s qui y circule est donc fortement en retard sur la tension E . D'autre part, l'enroulement auxiliaire compte un nombre moindre de spires de fil de section faible. Sa résistance est

donc plus élevée et sa réactance inductive plus faible que pour l'enroulement principal ; le courant I_a qui parcourt l'enroulement auxiliaire est presque en phase avec la tension E de la source.

PS : vue la faible section de l'enroulement secondaire et le fort courant de démarrage 6 à 7 fois le courant nominal. Le circuit secondaire est débranché grâce à un interrupteur centrifuge qui se déclenche après 1 à 2 second du démarrage.

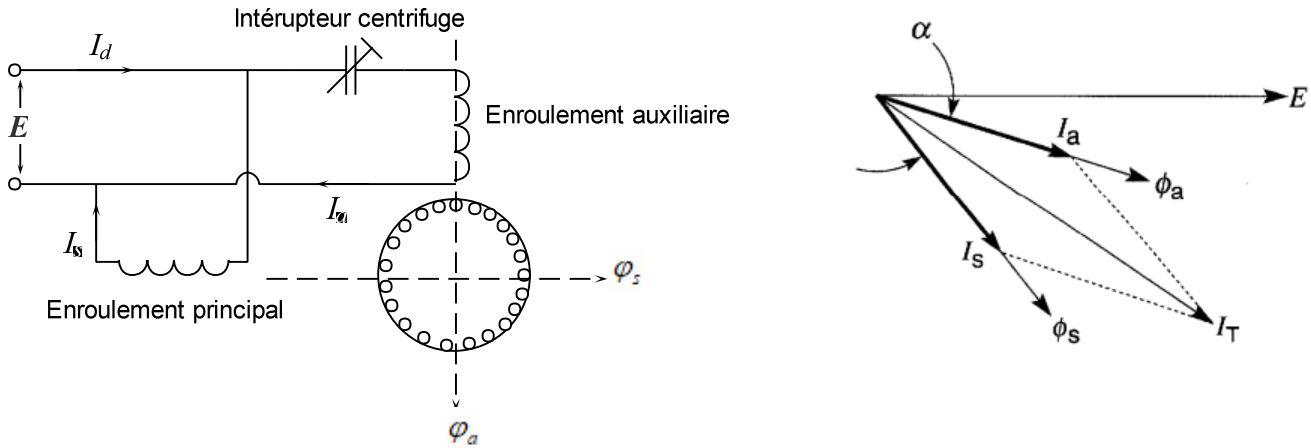


Fig 5. Moteur monophasé à enroulement auxiliaire résistive

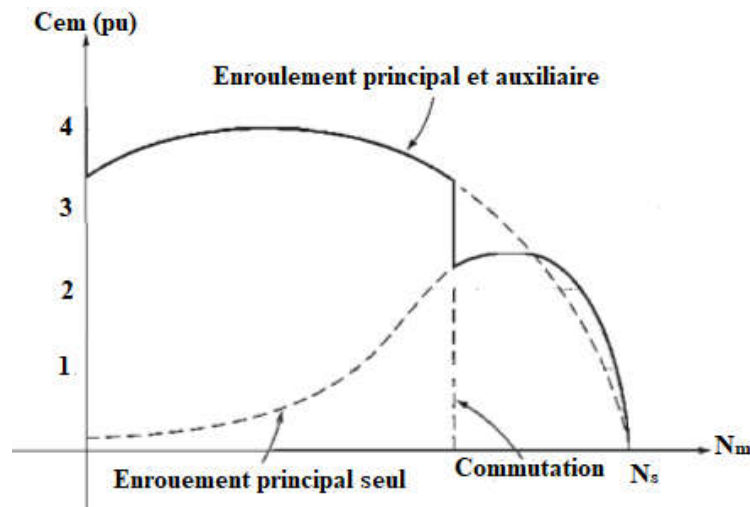


Fig 6. Caractéristique Couple-Vitesse lors d'un fonctionnement avec un enroulement auxiliaire de démarrage

I.3.2 Moteur à démarrage par condensateur

Le moteur à démarrage par condensateur (Fig .7) ressemble au moteur à démarrage par phase auxiliaire résistive. Cependant, son enroulement auxiliaire a pratiquement autant de spires mais avec un fil de plus faible section que l'enroulement principal. De plus, un condensateur est connecté en série avec l'enroulement auxiliaire. Un interrupteur centrifuge met la phase auxiliaire hors circuit lorsque la vitesse

atteint environ 75 % de la vitesse nominale. La réactance capacitive du condensateur est choisie de façon que le courant I_a dans la phase auxiliaire soit déphasé en avance sur la tension appliquée E .

PS : l'emploi très répandu des moteurs à démarrage par condensateur est dû au perfectionnement des condensateurs électrolytiques c.a.d, peu couteux et offrant de fortes capacitances pour de faibles encombrements. Bien que ces condensateurs ne puissent pas rester continuellement sous tension, ils conviennent très bien à un usage momentané.

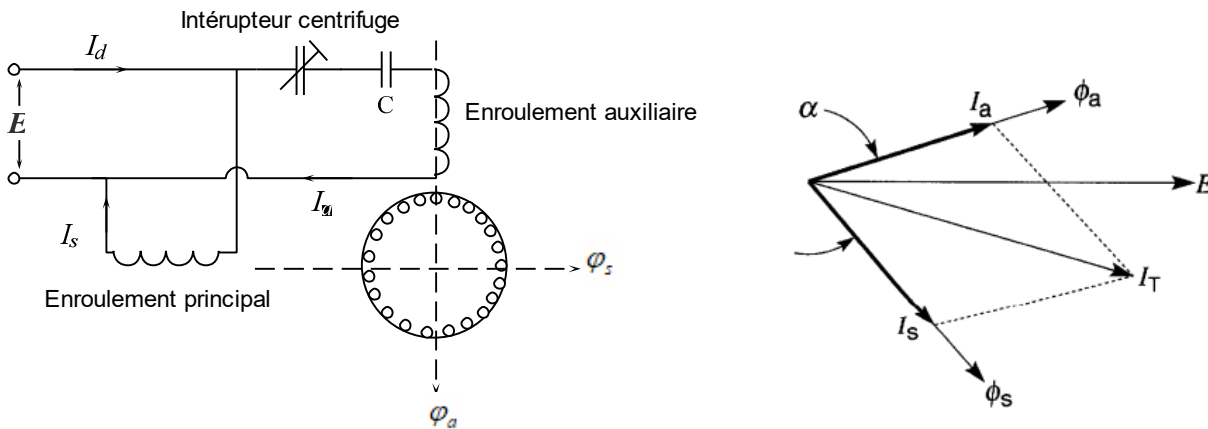


Fig.7 Moteur à démarrage par condensateur

I.3.2.1 Moteur à condensateur permanent

Le moteur à condensateur permanent est essentiellement un moteur diphasé ; il comporte un enroulement auxiliaire en série avec un condensateur à papier imprégné d'huile. La phase auxiliaire, aussi bien que la phase principale, reste alimentée par la source tant que le moteur est en marche. On emploie ce moteur particulièrement silencieux dans les hôpitaux, les studios radiophoniques. Pour entraîner des charges consistantes.

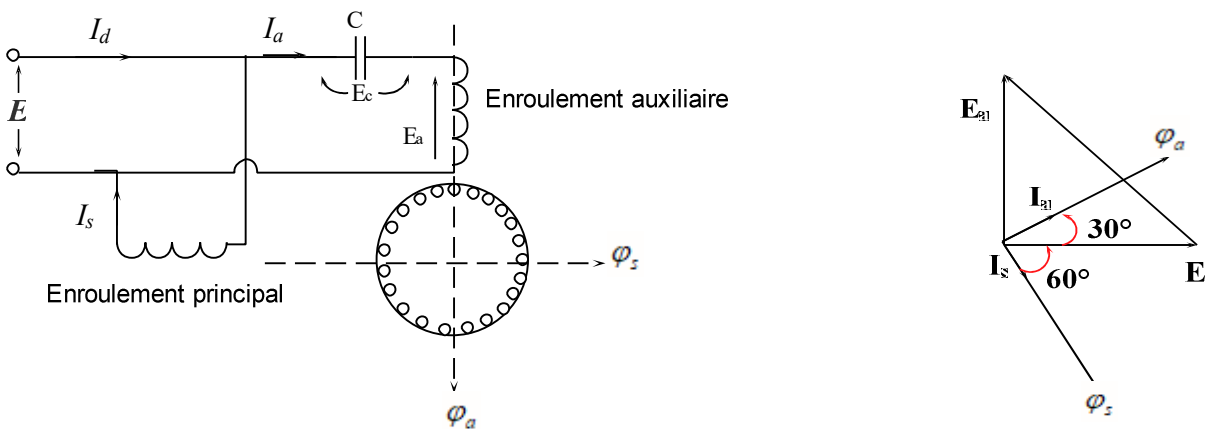


Fig.8 Moteur à démarrage par condensateur permanent

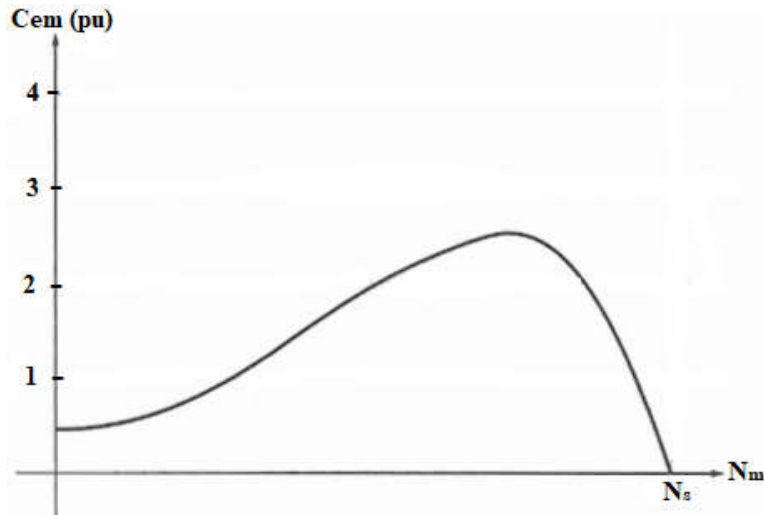


Fig.9 Caractéristique Couple-Vitesse lors d'un fonctionnement avec un condensateur permanent

I.3.2.2 Moteur asynchrone monophasé avec la spire Frager

Un moteur à spire de Frager (à bague de démarrage) est un type de moteur asynchrone monophasé à cage d'écreuil. Dans ces moteurs, une partie de chaque pôle est munie d'une bague de cuivre dite « spire de court-circuit (Frager) ». On peut réaliser une dissymétrie des champs glissants en disposant de ces spires sur une portion de la carcasse portant l'enroulement statorique. Une partie du flux pulsant est ainsi déphasée (retardée) (par les courants induits dans ces spires court-circuitées) sur le flux principal, c'est pourquoi ces anneaux peuvent être considérés comme une variante simplifiée d'une phase auxiliaire de démarrage. Ces moteurs ne possèdent qu'un seul bobinage statorique, mais n'exigent aucun condensateur, ni starter.

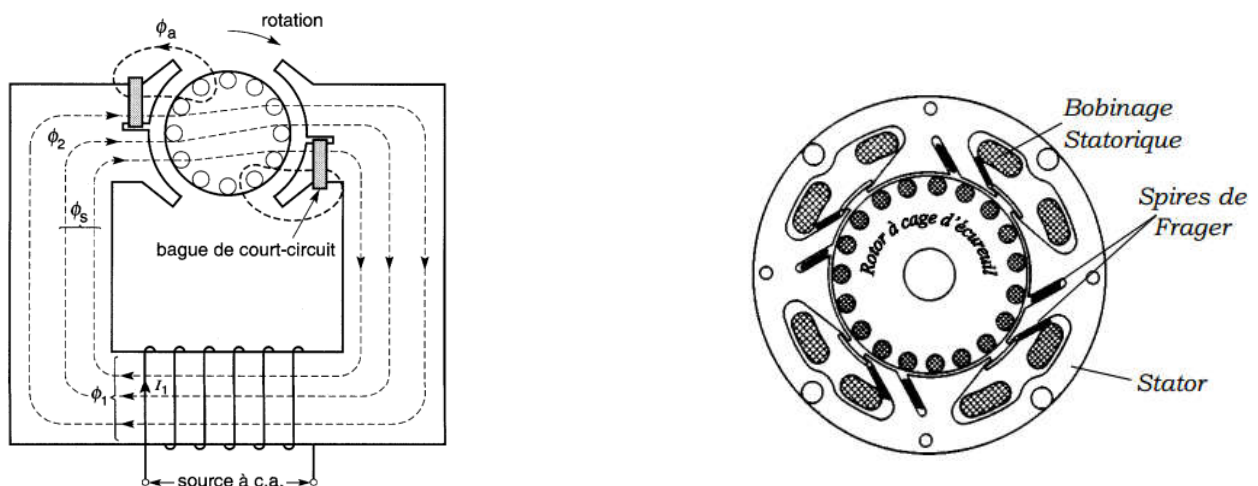


Fig.10 Moteur monophasé à cage d'écreuil avec la spire Frager

L'utilisation de ces moteurs reste très étroite, on les trouve dans les faibles puissances (de quelques Watts à 300 Watts) à savoir moteur de tourne-disques, de servomécanisme, petits ventilateurs.

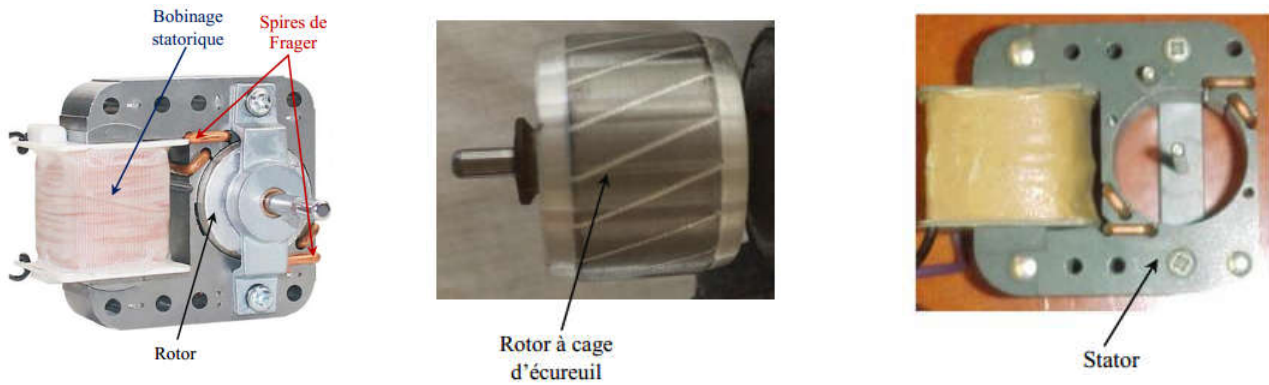


Fig.11 Différentes parties d'un moteur à spire Frager

Avantages

- Facilité d'emploi (convient aux matériels domestiques) ;
- Facilité de fabrication ;
- Grande fiabilité.

Inconvénients :

- Faible rendement (0,25 ... 0,4) à cause des pertes dans les spires de Frager ;
- Faible facteur de puissance ($\cos\varphi \approx 0,4 \dots 0,6$) ;
- Faible couple de démarrage $C_d = (0,2 \dots 0,5) \text{ N.m}$;
- Un sens de rotation depuis sa construction ;
- Grande sensibilité de la vitesse de rotation par rapport aux variations du couple de charge ;
- Vitesse de rotation non réglable et fixée par la fréquence du réseau.

I.4 Inversion du sens de rotation

Pour inverser le sens de rotation des moteurs monophasés discutés jusqu'ici on doit intervertir les bornes de l'enroulement principal ou de l'enroulement auxiliaire. Cependant, si le moteur contient un interrupteur centrifuge, on ne peut pas changer la rotation lorsque le moteur est en marche. Si l'on intervertit les bornes de l'enroulement principal, le moteur continuera à tourner dans le même sens. Dans le cas du moteur à condensateur permanent, on peut inverser le sens de rotation parce que les deux enroulements sont toujours en service. Ainsi, un simple commutateur à 2 pôles permet de changer la rotation (**Fig. 12**). Dans ce type de moteur, les deux enroulements sont identiques. Lorsque le commutateur est en position 1 la tension de la ligne apparaît aux bornes de l'enroulement A et le condensateur est en série avec l'enroulement B. Dès que le commutateur bascule en position 2, le moteur ralentit, arrête, puis retourne à pleine vitesse dans le sens opposé.

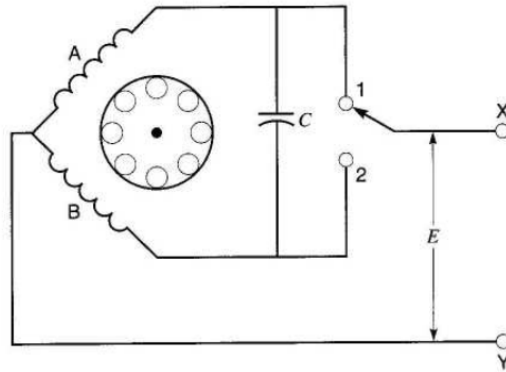


Fig.12 Moteur réversible à condensateur permanent

I.5 Utilisation des moteurs triphasés par alimentation monophasée sans rebobinage

On peut modifier le fonctionnement d'un moteur triphasé en moteur monophasé à l'aide d'un condensateur relié en parallèle avec une ou deux phases statoriques. Ce type de moteur peut débiter une puissance entre **70%** et **85%** de la puissance en triphasé suivant la connexion des extrémités des bobines. On utilise généralement l'un des schémas de la **Fig.13**.

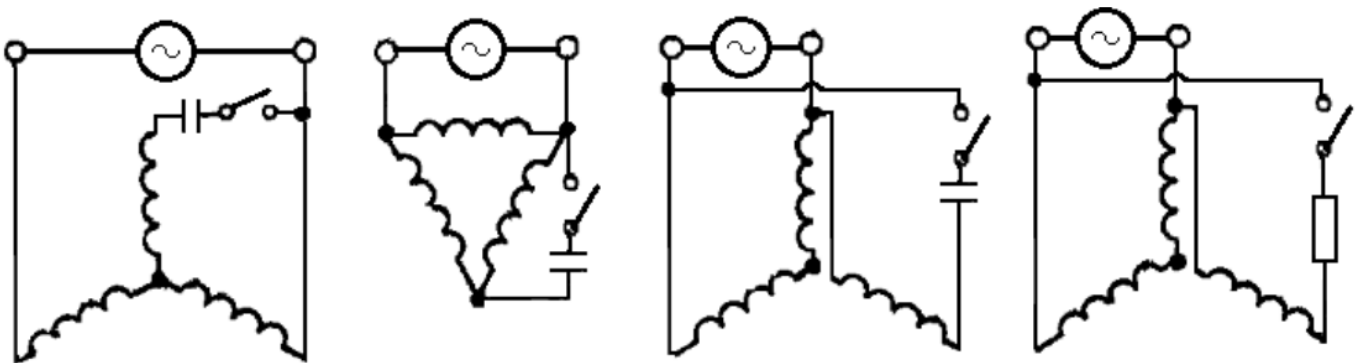


Fig.13 Différents schémas d'alimentation monophasée des bobines triphasées

I.6 Circuit équivalent

Un moteur à induction monophasé peut être considéré comme composé de deux moteurs ayant un enroulement de stator commun, mais deux rotors tournants dans des directions opposées. Le circuit équivalent de ce moteur basé sur une théorie à doubles champs rotatifs est illustré **Fig.14**.

Moteur à induction monophasé a été imaginé pour être composé d'un enroulement de stator et de deux rotors imaginaires. L'impédance statorique est :

$$Z=R_1+jX_1$$

L'impédance de chaque rotor est égale à $0.5(R_2+ jX_2)$. Les pertes en fer généralement négligées, la branche excitante est illustrée et se compose uniquement d'une réactance excitante. Chaque rotor a reçu la moitié de la réactance magnétisante.

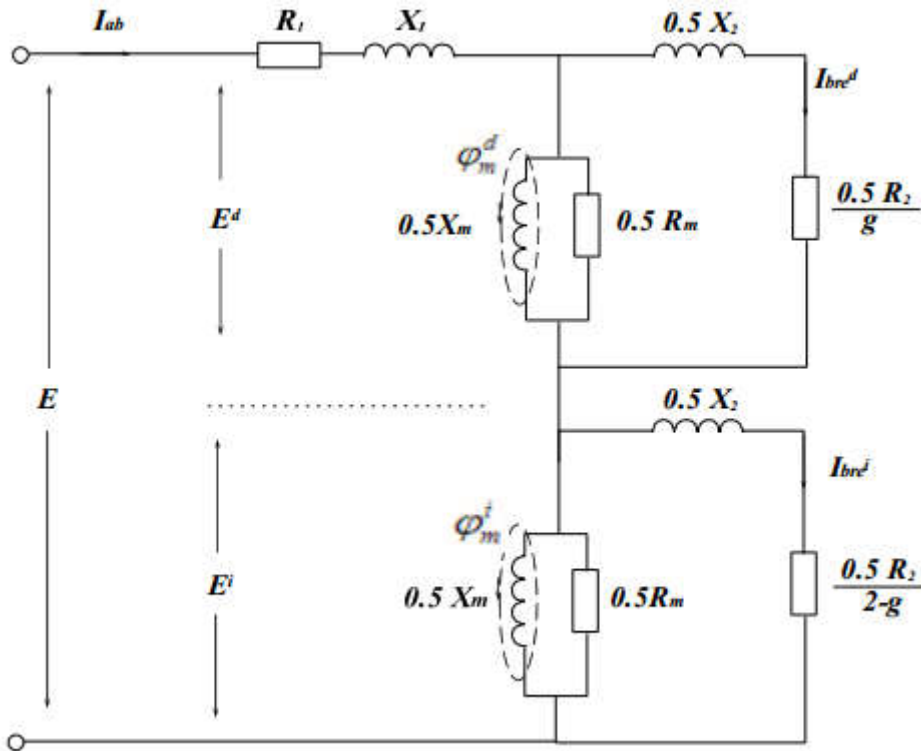


Fig.14 Circuit équivalent d'un moteur asynchrone monophasé

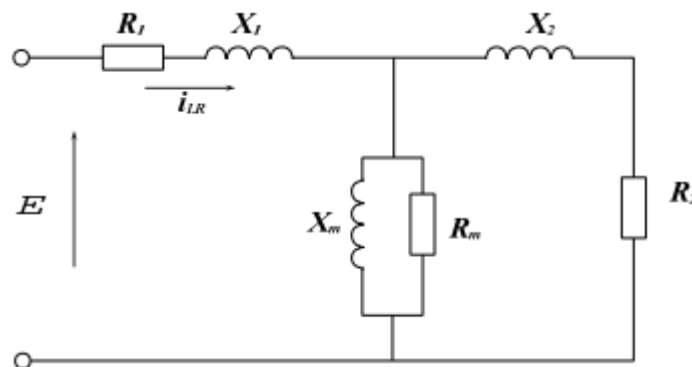


Fig.15 Circuit équivalent d'un moteur asynchrone lorsque le rotor est bloqué

- R_1 : Résistance du stator ;
- R_2 : Résistance du rotor ramenée au stator ;
- X_1 : Réactance du stator ;
- X_2 : Réactance du rotor ramenée au stator ;
- R_m : Résistance correspondant aux pertes dans le fer et par friction et aération ;
- X_m : Réactance magnétisante.

1.6.1. Bilan de puissance

Généralement les pertes fers sont négligées de ce fait sa facilite le calcul et l'élaboration du bilan de puissance du moteur asynchrone monophasé.

a. Calcul du courant absorbé

Pour le calcul du courant d'entrée (absorbé), on définit deux impédances Z_d et Z_i avec :

Z_d : est l'impédance équivalente de tous les impédances du champ magnétique direct.

$$Z_d = R_d + jX_d = \frac{(r_2/g + jx_2)(r_m // jx_m)}{(r_2/g + jx_2) + (r_m // jx_m)}$$

Et Z_i : est l'impédance équivalente de tous les impédances du champ magnétique inverse.

$$Z_i = R_i + jX_i = \frac{(r_2/(2-g) + jx_2)(r_m // jx_m)}{(r_2/(2-g) + jx_2) + (r_m // jx_m)}$$

Avec : $R_2 = 2r_2, X_2 = 2x_2, R_1 = 2r_1, X_1 = 2x_1$

En terme de Z_d et Z_i le courant absorbé par le moteur s'écrit :

$$I_{ab} = \frac{V}{Z + Z_d + Z_i}$$

b. Calcul des tensions rotorique

Après la détermination du courant absorbé par la machine, le calcul des tensions rotoriques (inverse et directe) E^d et E^i est indispensable.

$$E^d = Z_d \cdot I_{ab} \text{ et } E^i = Z_i \cdot I_{ab}$$

c. Calcul des courants rotoriques (branche excitatrice)

Pour calculer la puissance transmise au rotor il est indispensable de calculer les courants circulant dans les deux branches excitatrice du rotor.

$$I_{rbe}^d = \frac{E^d}{Z_{rbe}^d} \text{ avec } Z_{rbe}^d = \frac{r_2}{g} + jx_2$$

$$I_{rbe}^i = \frac{E^i}{Z_{rbe}^i} \text{ avec } Z_{rbe}^i = \frac{r_2}{2-g} + jx_2$$

d. Calcul des puissances

La puissance électromagnétique ou transmise au rotor peut être exprimée comme suit :

$$P_{tr} = P_{tr}^d - P_{tr}^i$$

Avec

$$P_{tr}^d = \frac{r_2}{g} (I_{rbe}^d)^2 \text{ et } P_{tr}^i = \frac{r_2}{2-g} (I_{rbe}^i)^2$$

Le couple électromagnétique s'écrit en fonction de la puissance transmise avec la vitesse de synchronisme :

$$C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$$

Les pertes Joules rotoriques sont en fonction des pertes Joules dues aux champs magnétiques directe et inverse. Et Puisque ces deux pertes de puissance dans le rotor ont des fréquences différentes, la perte de puissance totale du rotor n'est alors que leur somme.

$$P_{jr} = P_{jr}^d + P_{jr}^i$$

Avec :

$$P_{jr}^d = g P_{tr}^d$$

et

$$P_{jr}^i = g P_{tr}^i$$

La puissance convertie de la forme électrique en forme mécanique dans un moteur à induction monophasé est donnée par la même équation que P_m pour les moteurs à induction triphasés. Cette équation est :

$$P_{mec} = C_{em} \Omega$$

Avec : $\Omega = (1-g)\Omega_s$, alors l'équation de la puissance mécanique peut s'écrire :

$$P_{mec} = \Omega_s (1-g) C_{em}$$

Comme elle peut être écrite en fonction de la puissance transmise au rotor :

$$P_{mec} = (1-g) P_{tr}$$

Alors :

Le rendement peut s'exprimer comme ce qui suit :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} \text{ avec } P_u = P_{mec} - P_{rot}$$

Ce bilan est résumé sur la figure suivante :

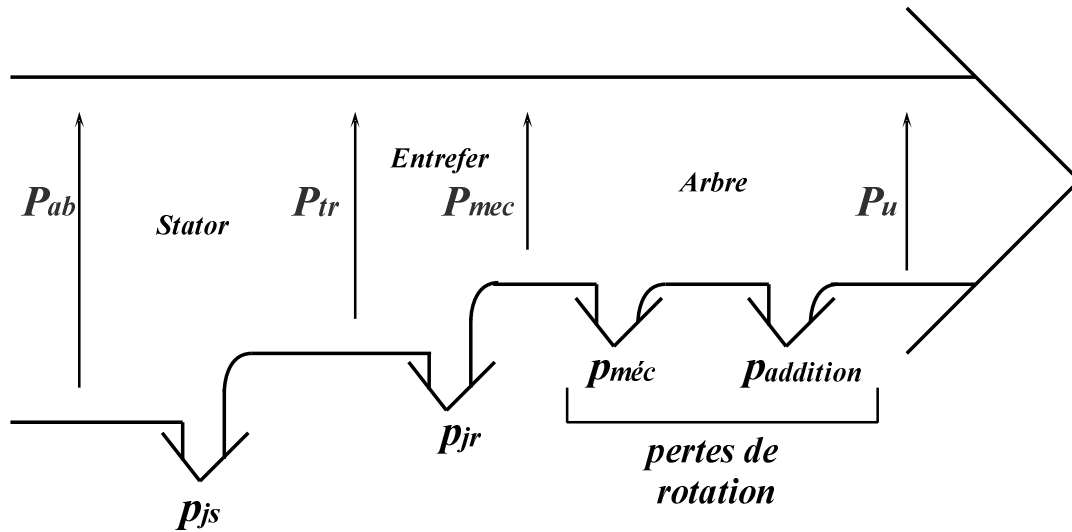


Fig.16 Bilans de puissance de la machine asynchrone monophasée

Questions de compréhension

- 1) Expliquer les principes de fonctionnement des moteurs suivants :
 - a. monophasé à spire Ferrager ;
 - b. pas à pas à reluctance variable .
- 2) Expliquer comment peut-on augmenter le nombre de pas par tour dans les moteurs pas à pas à reluctance variable.

Partie II : Moteur asynchrone linéaire (LIM)

I) Description :

Les moteurs linéaires à inductions sont des moteurs fonctionnant selon le même principe que les moteurs asynchrones rotatifs (polyphasé à induction, courant alternatif), mais qui auraient été déroulés. Ces moteurs ont ainsi une structure linéaire, ou les enroulements du stator créent un induction « glissante » (non tournante), et ou le rotor est entraîné par une force de translation le long de l'entrefer.

II) principe de fonctionnement

Soit le moteur linéaire à induction représenter sur la figure ci-dessous. Supposant que l'induit se déplace selon l'axe longitudinal Ox , à la vitesse mécanique v . les enroulement d'excitation logés dans les encoches, les inducteurs plans (chaque inducteur des stator 1 et 2 porte 3 bobine dans les axes sont parallèle à la direction Oy , et respectivement décalés d'une distance de $\frac{\lambda}{3}$, dans la direction de Ox , circulent des courants de direction Oy , créant un champ principal d'induction magnétique dirigé selon l'axe transversale Oz .

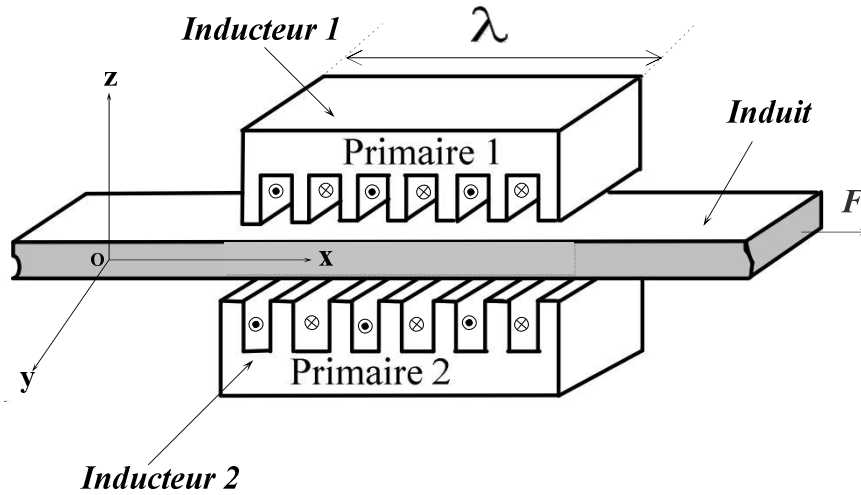


Fig.17 Moteur asynchrone linéaire avec deux primaires

Si ces enroulements convenablement alimenté, sont alimentés par un réseau polyphasé de pulsation ω , le champ magnétique principal et la **f.m.m** se propagent selon Ox, sous la forme d'une onde glissante à la vitesse linéaire $v = \frac{\omega \lambda}{2 \pi} = \lambda f$ avec λ : longueur d'onde (m/s).

$$v_c = \frac{\omega}{k}, \text{ avec } k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ (rd/m)}$$

k : Nombre d'ondes

Cette induction est une « onde » à répartition sinusoïdale en fonction de l'espace et du temps. Ces composantes selon l'axe **Oxyz** sont :

$$\begin{cases} B_x = B_{\max} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x) \\ B_y = 0 \\ B_z = 0 \end{cases}$$

B_{\max} : induction maximale (T) ;

λ : distance linéaire entre les axes de deux bobine consécutive appartenant a la même phase (m), appelé aussi intervalle polaire ;

$$f = \frac{\omega}{2\pi} : \text{fréquence en (Hz)}.$$

Le flux correspondant au courant inducteur traversant l'entrefer engendre dans l'induit des f.e.m donc induisent des courants ; le flux dirévant de ces courant induit glisse par rapport à l'inducteur, mais reste immobile par rapport au flux principale. L'interaction entre ces deux flux crée une poussée linéaire qui est motrice. La vitesse mécanique de la partie mobile est inférieur à celle du champ inducteur . on peut

définir par analogie avec un moteur asynchrone classique, le glissement comme la différence relative entre les vitesses v_c et v du rotor.

$$g = \frac{v_c - v}{v_c} = 1 - \frac{v}{v_c}$$

En fonction de ce glissement, la vitesse de rotation vaut :

$$v = (1 - g)v_c = (1 - g) \cdot \lambda f$$

Si on désigne « P » la puissance totale absorbée par le rotor, la force électromagnétique exercée vaut :

$$\text{Si } v < v_c \text{ alors } F = \frac{P}{g v_c}$$

On note que dans la théorie des champs glissants, on admet que la force exercée sur l'induit résulte de l'absorption de l'énergie électromagnétique de l'onde. La force électromagnétique exercée sur le rotor vaut à l'arrêt :

$$F = \frac{P}{v_c}$$

III. Caractéristique

Il est possible de tenir compte des effets de pénétration sur le schéma équivalent monophasé du moteur linéaire, où est représenté sur la figure suivante :

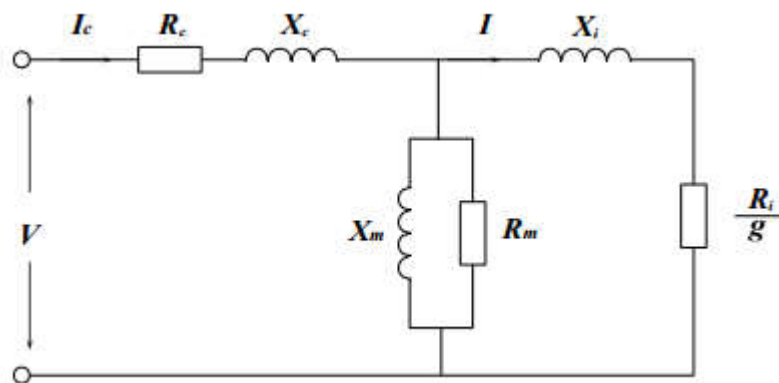


Fig.18 Schéma équivalent du moteur linéaire

- R_c et X_c représentent la résistance et la réactance de fuites des enroulements inducteurs ;
- R_i et X_i représentent la résistance et la réactance de fuite de l'induit.
- X_m est la réactance de couplage magnétique entre l'inducteur et l'induit.
- R_m est une résistance représentant les pertes électromagnétiques.

- Les propriétés du moteur linéaire sont presque identiques à celles du moteur asynchrone conventionnel. Par conséquent, les expressions pour le glissement, la force de traction, la puissance, etc..., sont similaires.

En ramenant la réactance X_c et R_c au secondaire, on peut écrire que

$$X_c + X_i = N_\omega$$

a) Essai à vide :

$$R_m = \frac{3V^2}{P_{10}}$$

$$X_m = \frac{3V^2}{Q_{10}}$$

b) Essai à induit bloqué

$$N_\omega = \frac{Q_c}{3I_c^2}$$

$$R_i = \frac{P_c}{3I_c^2} \text{ avec un glissement } g=1$$

IV) Bilan de puissance

Le bilan de puissance ne diffère pas de celui de la machine triphasée.

Le glissement :

$$g = \frac{V_s - V}{V_s} \text{ avec } V_s \text{ la vitesse synchrone linéaire et } V \text{ la vitesse linéaire du rotor en mètre par}$$

seconde.

Puissance fournie au rotor :

$$P_{tr} = P_{ab} - p_{js} - p_{fer}$$

Pertes joules rotor :

$$p_{jr} = gP_{tr}$$

Pertes joule stator :

$$p_{js} = 3R_c I_c^2$$

Puissance mécanique :

$$P_m = P_{tr} - p_{jr}$$

Force de traction :

$$F = \frac{P_{tr}}{V_s}$$

Avantage :

- Aménagement mécanique simple et un nombre minimum de pièce en mouvement ;
- Une poussée directe, peu d'usure ;
- Grande force de déplacement ;
- Libre accès au moteur pour effectuer la maintenance (pas de pièce internes en mouvement).
- Faible réactance de magnétisation et faible inertie mécanique.

Inconvénients :

- Un faible rendement (entre 30 et 40% en pratique) ;
- Le jeu mécanique et les difficultés associées de précision de positionnement ;
- Bruit acoustique élevé ;
- Difficultés d'intégration de l'actionneur au système complet (encombrement)
- Limite de vitesse maximale faible.

V) Utilisation des moteurs linéaires dans les systèmes ferroviaires

Il existe depuis longtemps des applications avec des moteurs linéaires dans le domaine ferroviaire. Les moteurs linéaires se sont développés grâce à leurs capacités à générer des systèmes de lévitation, mais aussi pour leurs capacités de traction. Un moteur linéaire permet de générer directement une force de poussée sans aucun système mécanique intermédiaire. Actuellement, les applications de ces types des moteurs linéaires pour le ferroviaire peuvent être divisées principalement en deux catégories : les trains traditionnels avec des roues avec le troisième rail et les trains sans roues qui utilisent la technologie de la Lévitation Magnétique (**Maglev**).

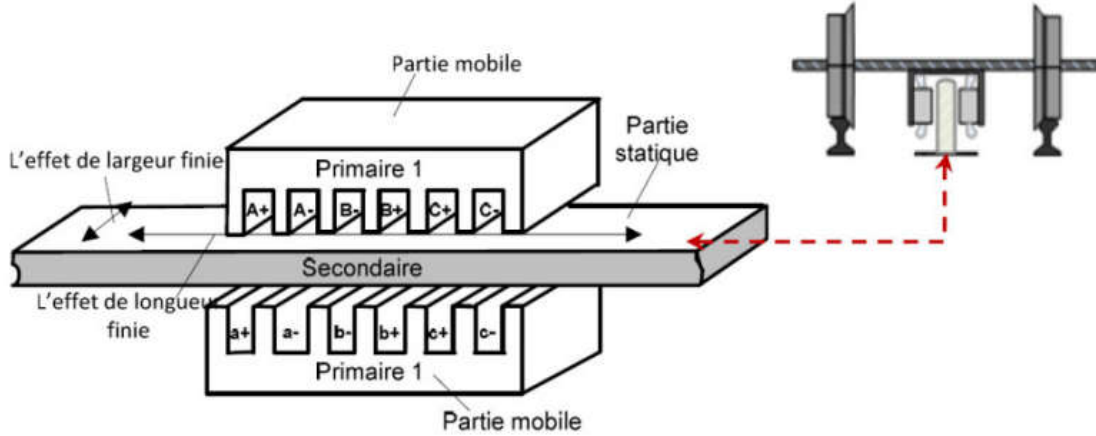


Fig.19 Application du moteur linéaire dans la traction ferroviaire avec troisième rail

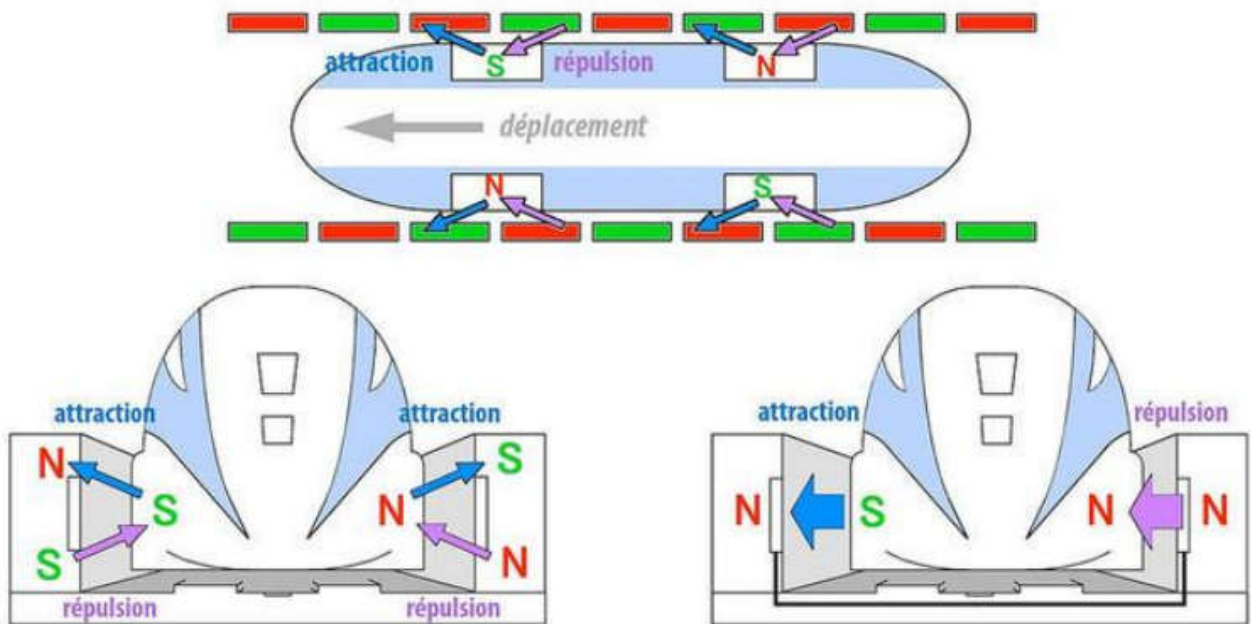
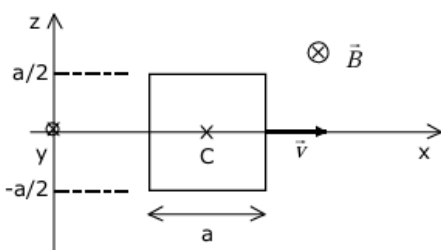


Fig.20 Trains sans roues qui utilisent la technologie de la Lévitiation Magnétique (Maglev)

Exercice d'application:

Un cadre carré, de côté a , de centre C , indéformable, conducteur de résistance R , est plongé dans un champ magnétique de la forme :

$$\vec{B} = B_0 \cos\left(2p \frac{x}{l} - \omega_0 t\right) \vec{e}_y$$



Le cadre se déplace à la vitesse constante $V_x = v$, la normale au plan du cadre restant parallèle à e_y , et l'on néglige les phénomènes d'auto-induction.

- 1) Calculer le flux $\Phi(t)$; on notera $x(t)$ l'abscisse du centre C du cadre, et l'on considérera que $x(0)=0$.
- 2) En déduire la f.e.m d'induction $e(t)$, ainsi que le courant $i(t)$ induit dans le cadre ; on posera $v_0 = l\omega_0/2p$

Chapitre 3 : Moteur Synchrone Pas à Pas

Introduction

Les moteurs pas à pas sont des moteurs spéciaux utilisés pour commander avec une grande précision le déplacement et la position d'un objet. Comme leur nom l'indique, ces moteurs tournent par incréments discrets. Chaque incrément de rotation est provoqué par une impulsion de courant fournie à l'un des enroulements du stator.

1. Principe de fonctionnement du moteur pas à pas élémentaire

Nous montrons à la Fig.1 un moteur pas à pas très simple. Il est composé d'un stator ayant trois pôles saillants, et d'un rotor bipolaire en fer doux. En manipulant les trois commutateurs A, B, C, on peut raccorder les enroulements, à tour de rôle, à une source à courant continu.

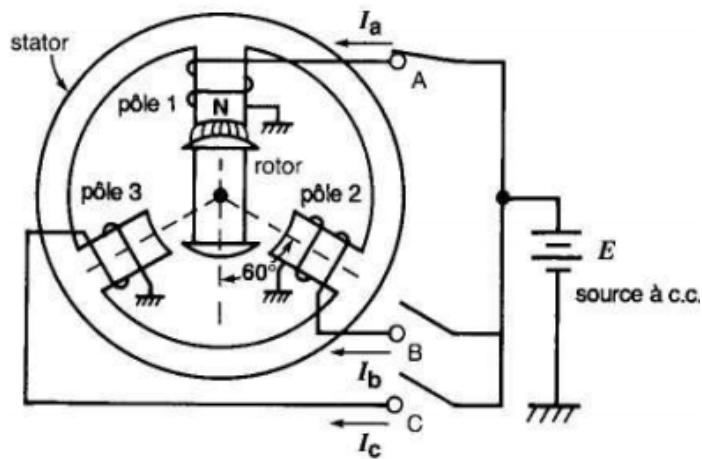


Fig.1. Moteur pas à pas

Lorsque les commutateurs sont ouverts, le rotor peut occuper n'importe quelle position. Cependant, si l'on ferme le commutateur A, le champ magnétique produit par le pôle 1 attirera le rotor, de sorte qu'il s'alignera dans la position indiquée à la Fig.1. Si, ensuite, on ouvre le commutateur A, tout en fermant le commutateur B, le rotor s'alignera avec le pôle 2. Le rotor tournera donc de 60° dans le sens antihoraire. Ensuite, en ouvrant le commutateur B tout en fermant le commutateur C, le rotor tournera d'un angle additionnel de 60° , pour s'aligner avec le pôle 3.

On peut ainsi faire tourner le rotor par incréments de 60° en fermant et en ouvrant les commutateurs dans la séquence A,B,C,A,B,C. Pour inverser le sens de rotation il suffit d'appliquer la séquence contraire, soit A,C,B,A,C,B. Pour maintenir le rotor à sa dernière position, on doit garder le dernier commutateur de la séquence en position fermée. Cela empêche le rotor de se déplacer sous

l'influence d'un couple extérieur. Tant que le couple extérieur ne dépasse pas le couple statique («holding torque») du moteur, le rotor demeure bloqué.

Lorsque le rotor tourne d'une position donnée à la position suivante, son mouvement est influencé par les forces de frottement et d'inertie.

La vitesse du moteur pas à pas est définie en pas par second comme suit :

$$v = \frac{1}{\tau}$$

avec :

v : Vitesse en pas/s

τ : La durée d'un pas

Le temps requis pour exécuter un tour complet est donc :

$$t = \frac{n_{\tau}}{v}$$

avec t : temps nécessaire pour effectuer un tour en (s)

n_{τ} : nombre de pas sur un tours

La vitesse de rotation moyenne est définie alors comme suit :

$$n = \frac{60}{t}$$

avec n : vitesse de rotation moyenne en tr/min

2. Effet de l'inertie

Lors du déplacement du rotor d'un pole vers un autre il se produit un dépassement de l'axe médiane du pole par le rotor qui est due à l'accélération et à l'inertie. De ce fait le rotor oscille autour de cet axe avec une diminution de l'amplitude du mouvement jusqu'à sont arrêt.

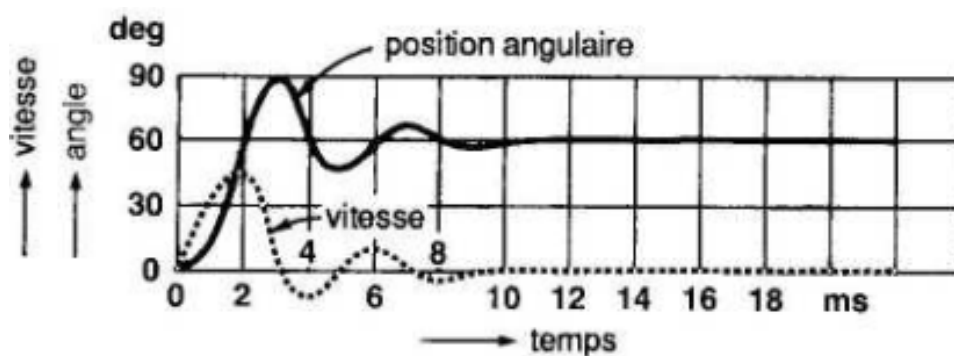


Fig.2 effet de l'inertie sur la vitesse et la position

3. Effet de la charge mécanique

Si le moteur entraîne un charge avec une importante inertie cela augmenterait d'avantage la durée d'un pas. Donc, pour effectuer un pas rapide, qui se stabilise rapidement, on doit :

- minimiser l'inertie totale du rotor et de sa charge et
- amortir les oscillations au moyen d'un frein visqueux.
- On peut aussi réduire la durée d'un pas en augmentant le courant dans les enroulements. Toutefois, l'échauffement dû aux pertes Joule limite le courant admissible.

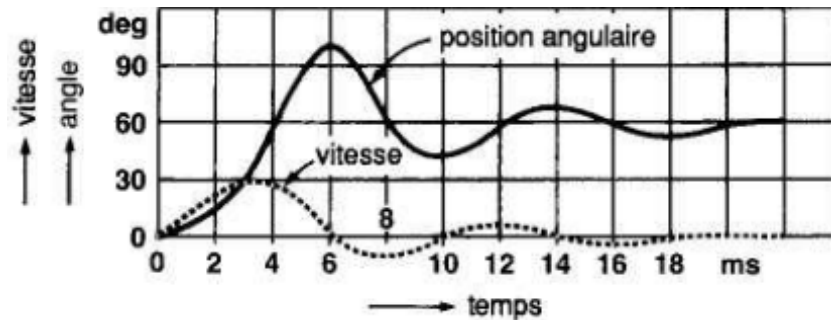


Fig.3 effet de la charge sur la vitesse et la position

4. Couple du moteur pas à pas

Le couple développé par un moteur pas à pas dépend du courant. La caractéristique montre la relation couple-courant d'un moteur typique. Noter que le couple développé n'est pas constant, mais dépend de la position du rotor. Le couple montré est le couple maximal que le moteur peut exercer lors de son passage d'une position à la position suivante. Ce couple porte le nom de couple dynamique maximal («pull-over torque»).

De tels moteurs ont des couples allant de 1 μ N.m à 40 N.m dans un moteur de 15 cm de diamètre adapté aux applications de machines-outils. Leur puissance varie d'environ 1W à 2500W maximum. La seule pièce mobile d'un moteur pas à pas est son rotor qui ne comporte ni enroulement, ni commutateur, ni balais. Cette caractéristique rend le moteur assez robuste et fiable.

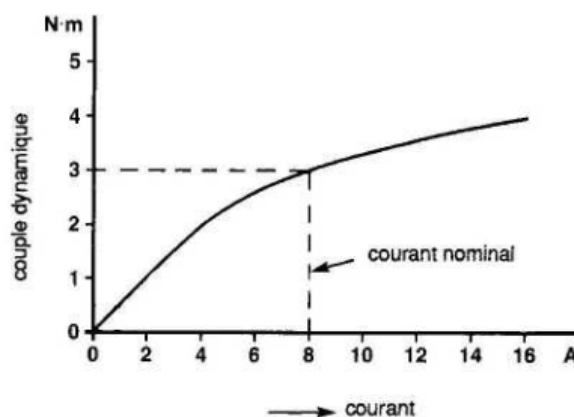


Fig.4 couple dynamique du moteur pas à pas en fonction du courant

Lorsque le rotor cesse de tourner, on doit faire circuler un courant de maintien dans la dernière bobine alimentée, afin de le maintenir à sa dernière position.

5. Typologie des moteurs Pas à Pas

Il existe 3 types principaux de moteurs pas à pas :

- moteurs à réluctance variable
- moteurs à aimant permanent
- moteurs hybrides

a. Moteurs à réluctance variable

Leur stator possède souvent 4 pôles (au lieu de 3) et des encoches sont taillées dans la face des pôles afin de produire une série de dents. Le rotor est également denté, chaque dent correspondant à un pôle saillant miniature. Le nombre de dents (pôles) du rotor et du stator détermine l'avance angulaire d'un pas. Les pas de 18° , 15° , $7,5^\circ$, 5° , et $1,8^\circ$ sont les plus répandus.

b. Moteur à Aimants permanents

Les moteurs à aimants permanents sont semblables aux moteurs à réluctance variable, sauf que le rotor possède des pôles aimantés. Soit un moteur à aimant permanent possédant 4 pôles sur le stator et 6 pôles aimantés sur le rotor. Le rotor demeure bloqué à sa dernière position lorsque le bloc d'alimentation cesse de fournir des impulsions à cause des aimants permanents. Les bobines A1, A2 du stator sont connectées en série, de même que les bobines B1, B2. Le rotor tourne de 30° lorsque les bobines B sont excitées. Le sens de rotation dépend de la direction du courant. Les moteurs à aimant permanent sont toujours utilisés lorsque le couple à développer est important.

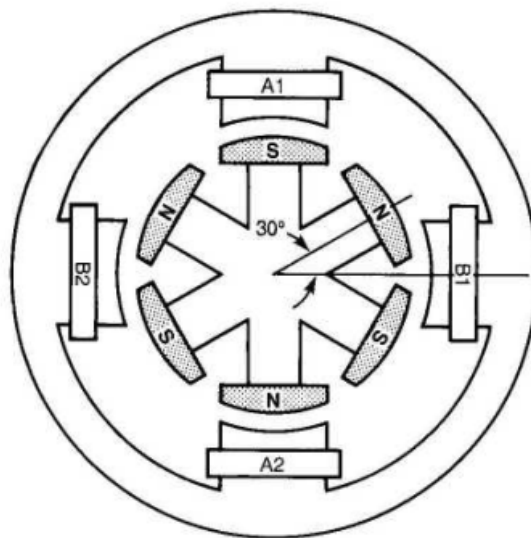


Fig.5 Moteur Pas à Pas à aimants permanents

c. Moteur Hybride

Le rotor du moteur du type hybride possède deux armatures identiques en fer doux, montées sur le même arbre. Ces deux armatures sont décalées l'une par rapport à l'autre afin que leurs pôles saillants se chevauchent. Cet arrangement donne au moteur l'apparence d'un moteur à réluctance variable. Cependant, un aimant permanent « AP » est coincé entre les armatures. L'aimant produit une FMM axiale, avec le résultat que tous les pôles de l'armature 1 sont des pôles N, alors que ceux de l'armature 2 sont des pôles S. Comme dans le cas du moteur à aimant permanent, le moteur demeure à sa dernière position lorsque le courant dans les bobines est nul.

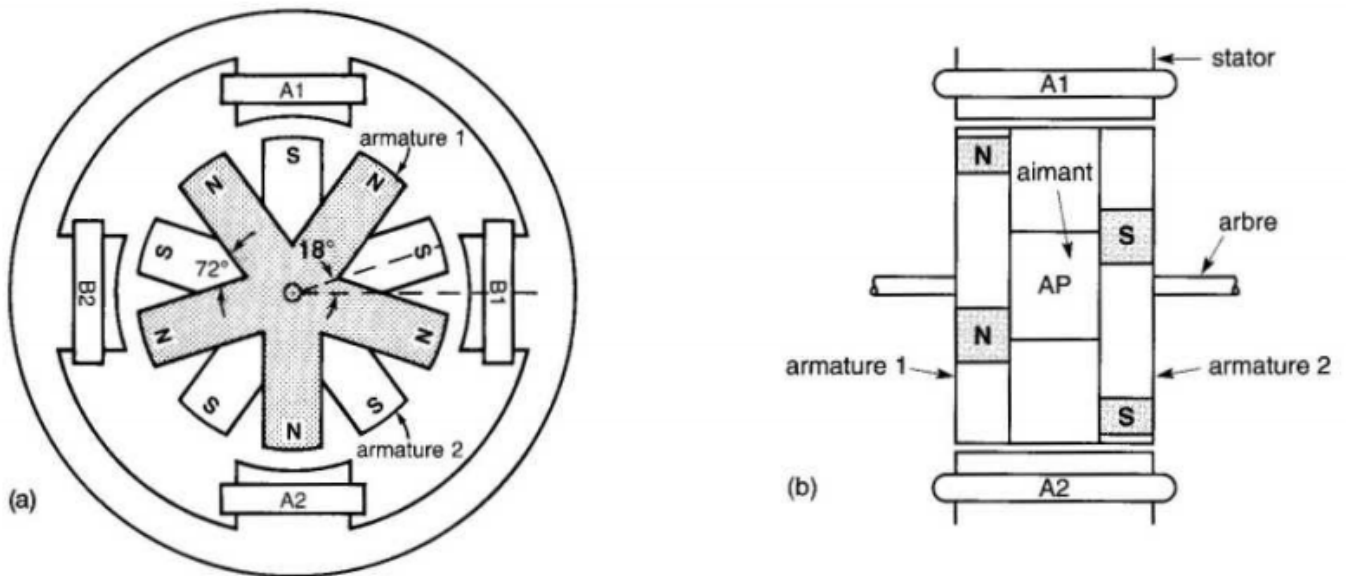


Fig.6 Moteur pas à pas Hybride

6. Alimentation des moteurs Pas à Pas

Les enroulements du stator d'un moteur pas à pas sont de type bipolaire ou unipolaire. De plus, chacun de ces types d'enroulement peut être alimenté par différents modes d'excitation.

a. Moteur pas à pas bipolaire

Les enroulements du stator n'ont pas de point milieu. Chaque borne de chaque enroulement est alimentée par une polarité positive puis négative (d'où le terme bipolaire).

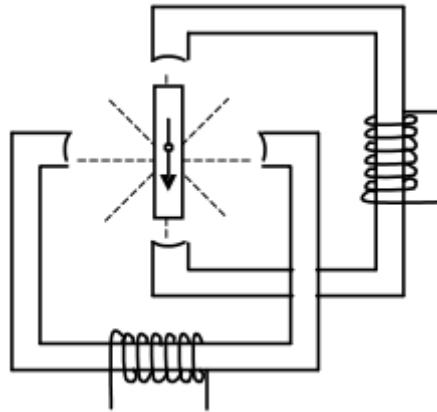


Fig.7 Moteur Pas à Pas bipolaire

b. Moteur pas à pas unipolaire

Les enroulements sont à point milieu. Les bornes sont toujours alimentées par une polarité de même signe (d'où le terme unipolaire).

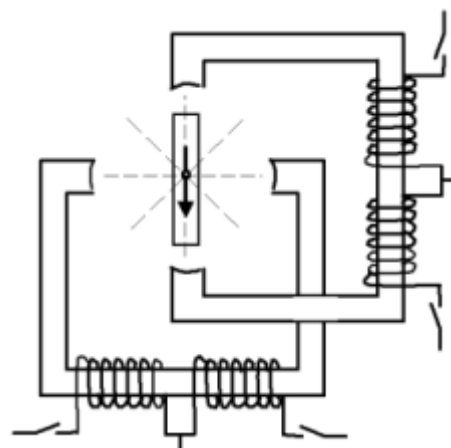


Fig.8 Moteur Pa à Pas unipolaire

7. Alimentation de moteur à enroulement bipolaire

Si on prend un stator à 4 pôles, l'enroulement bipolaire comprend deux groupes de bobines A,A' et B,B'. Les courants I_a , I_b circulant dans le groupe A et B respectivement, changent de direction périodiquement. Et vu que les courants I_a , I_b sont continus, alors un système de commutation s'impose. Les commutateurs sont des transistors T1 à T8 car ils permettent d'initier et de bloquer le courant à des instants bien précis. Grâce à ces commutateurs, on peut exciter les bobines, en séquence, de trois manières différentes.

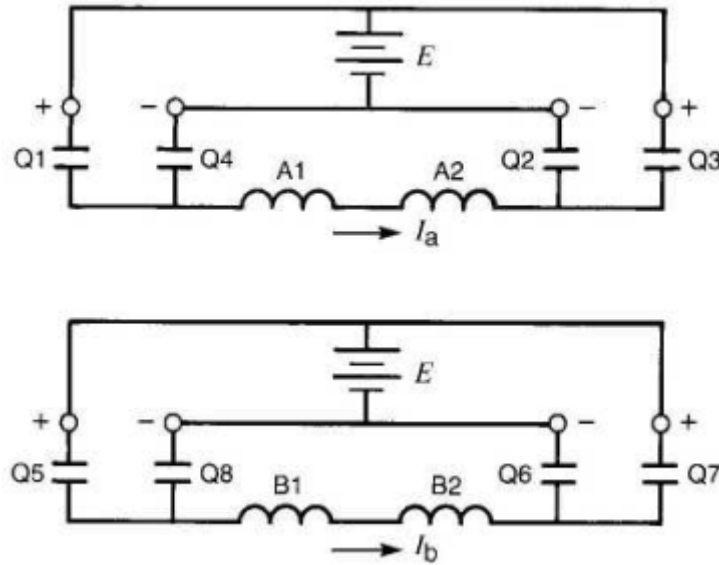


Fig.9 Alimentation à enroulements bipolaires

a. Alimentation ondulée « wave drive »

Lorsqu'on utilise l'excitation ondulée, seulement un groupe de bobines (A1, A2 ou B1, B2) est alimenté à la fois. La commutation donnant une rotation horaire est donnée dans le tableau; les impulsions de courant I_a , I_b correspondantes sont montrées sur le chronogramme. Le flux créé par I_a et I_b tourne de 90° à chaque étape.

Tab 1. Séquences d'alimentation ondulée

étape		1	2	3	4	1
interrupteurs						
T1	T2	F	O	O	O	F
T5	T6	O	F	O	O	O
T3	T4	O	O	F	O	O
T7	T8	O	O	O	F	O

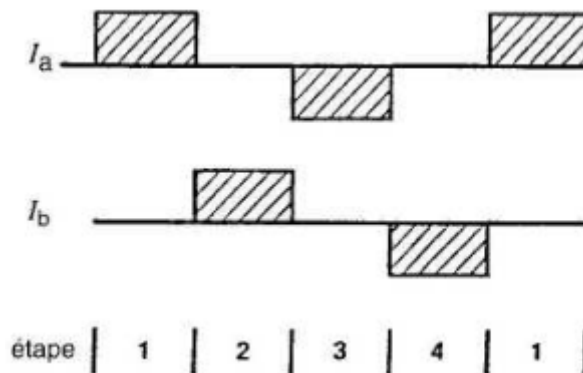


Fig.10 Séquence d'alimentation ondulée

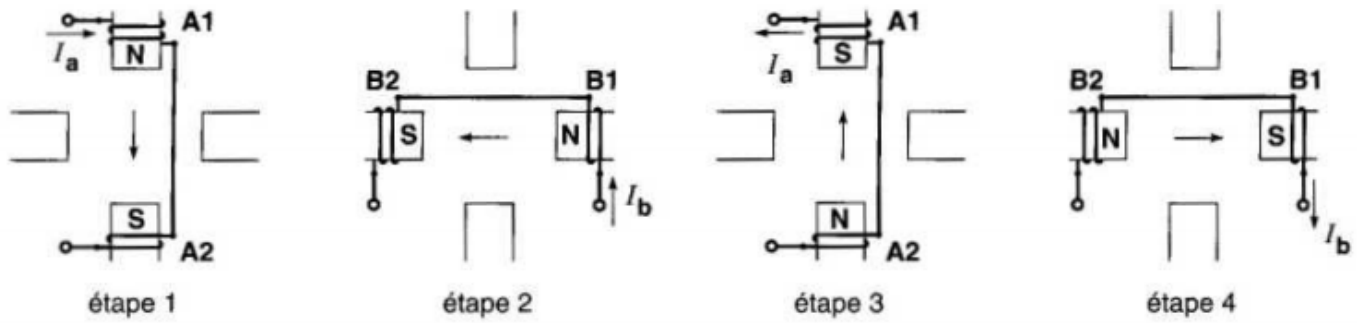


Fig.11 Orientation du flux pour chaque état

b. Alimentation standard « normal drive »

Lorsqu'on utilise l'excitation standard, les deux groupes de bobines sont alimentés en même temps. La commutation donnant une rotation horaire est donnée dans le tableau; les impulsions de courant I_a , I_b qui en résultent sont montrées chronogramme. Noter qu'à chaque étape le flux résultant se trouve à mi-chemin entre les pôles. Cependant, chaque pas correspond encore à un incrément de 90° . L'excitation standard a l'avantage de produire un couple légèrement supérieur à celui de l'excitation ondulée.

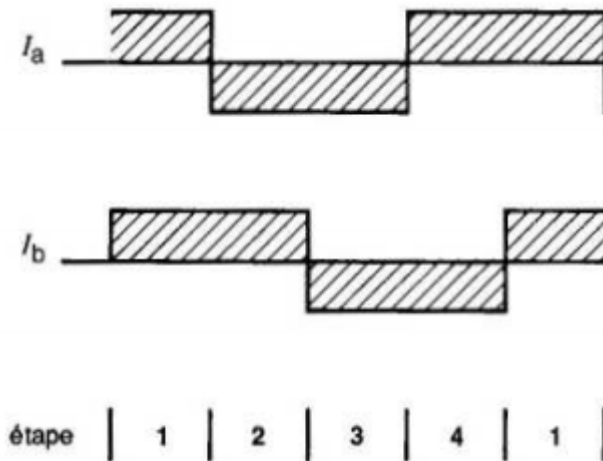


Fig.12 Séquence d'une alimentation standard

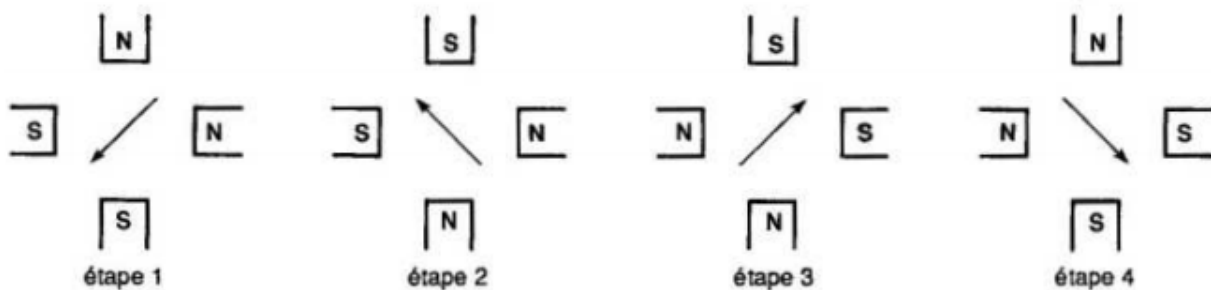


Fig.13 Orientation du flux pour chaque état

étape		1	2	3	4	1
interrupteurs						
T1	T2	F	O	O	F	F
T5	T6	F	F	O	O	F
T3	T4	O	F	F	O	O
T7	T8	O	O	F	F	O

c. Excitation à demi-pas .

L'excitation à demi-pas est une combinaison des excitations ondulée et standard. La commutation donnant une rotation horaire est donnée dans le tableau; les impulsions de courant I_a , I_b sont montrées sur le chronogramme. Le flux tourne seulement de 45° par étape. Le principal avantage de l'excitation à demi-pas est qu'il améliore la résolution position. De plus, ce mode d'excitation diminue le problème de résonance.

Tableau de séquences :

étape		1	2	3	4	5	6	7	8	1
interrupteurs										
T1	T2	F	F	O	O	O	O	O	F	F
T5	T6	O	F	F	F	O	O	O	O	O
T3	T4	O	O	O	F	F	F	O	O	O
T7	T8	O	O	O	O	O	F	F	F	O

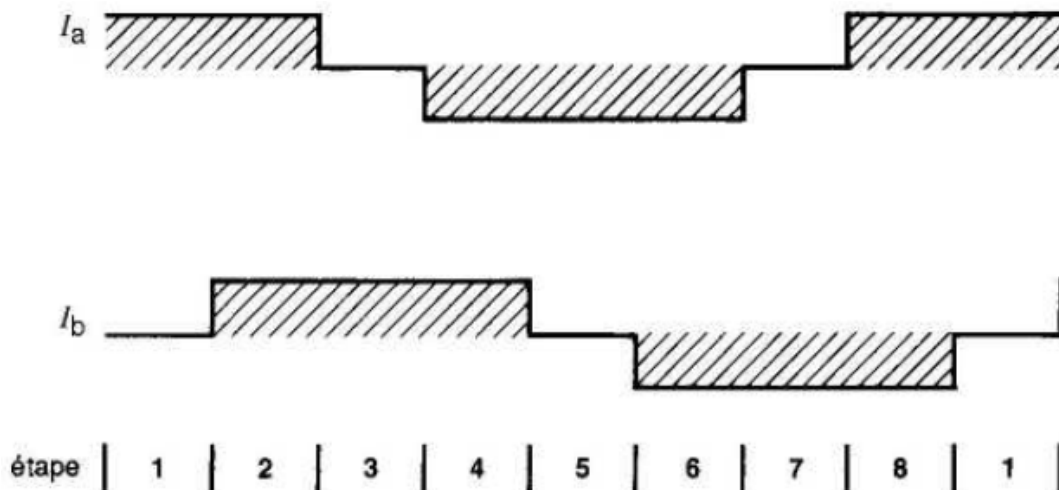


Fig.14 Impulsion des courants

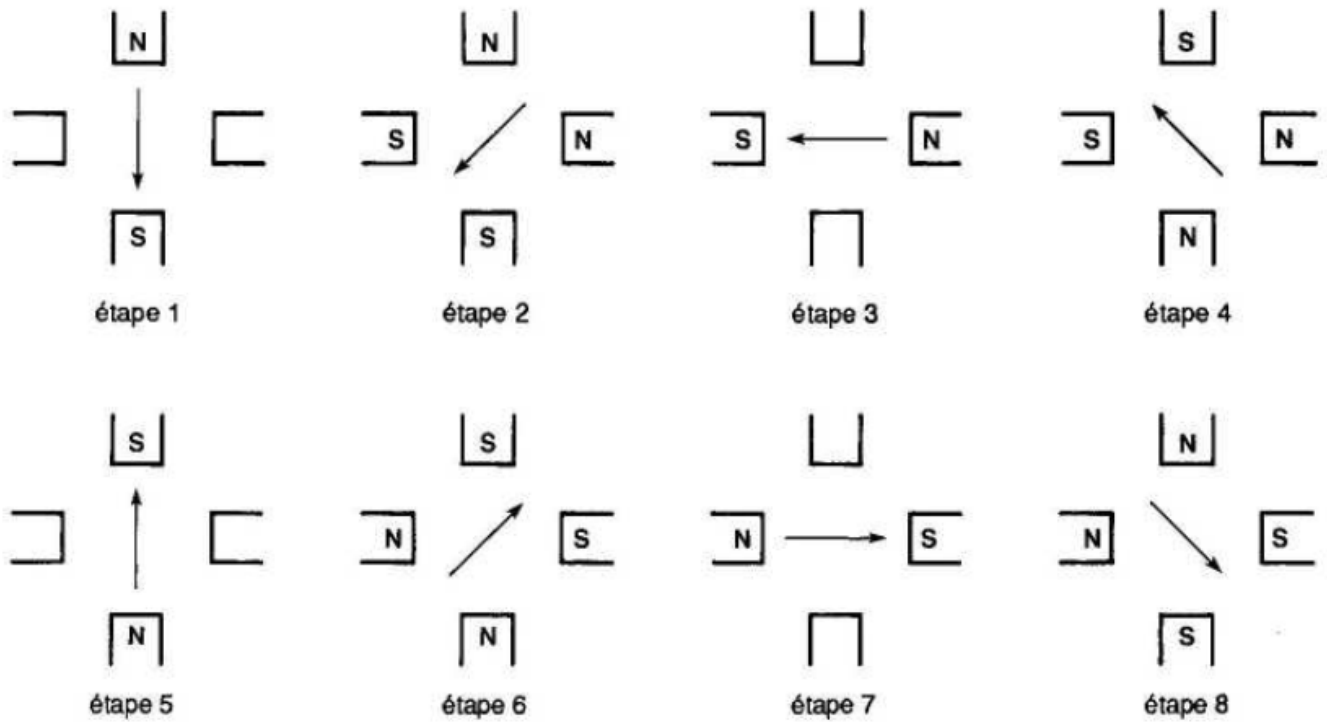


Fig.15 Orientation de flux pour chaque étape

8. Enroulement unipolaire

La technique de l'enroulement unipolaire consiste à utiliser deux bobines par pôle au lieu d'une seule (enroulement à point milieu). Le premier groupe de bobines A1, A2 produit un flux dans le sens inverse du deuxième groupe 1A, 2A . Il en résulte un flux alternatif lorsque les deux groupes sont alimentés à tour de rôle par la même source. L'enroulement unipolaire possède l'avantage de réduire le nombre de commutateurs (transistors) de 8 à 4, et d'améliorer un peu le temps de réponse. La **Fig .16** et **Fig.17** donne le diagramme schématique des enroulements et la séquence de commutation utilisant le mode ondulé.

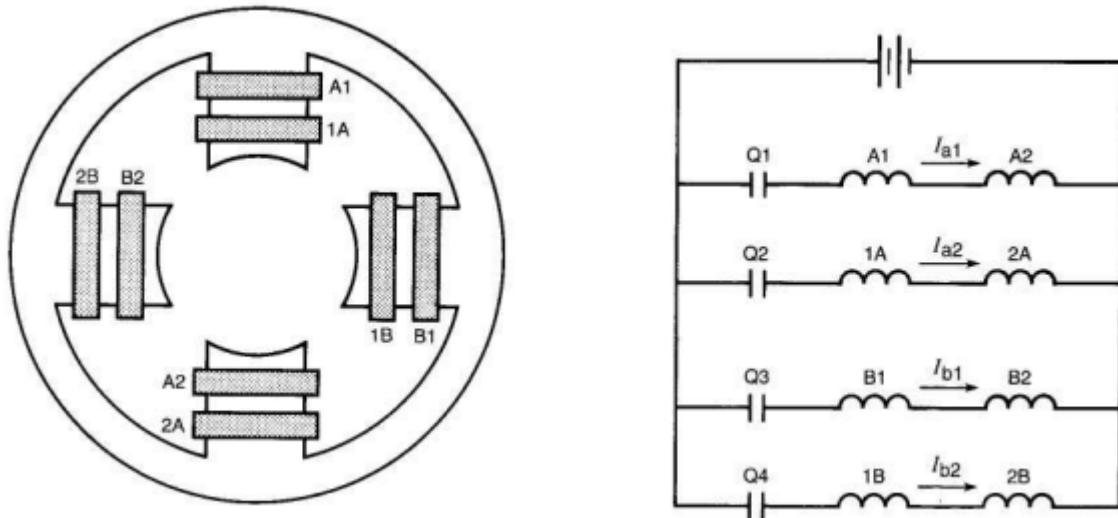


Fig.16 Alimentation enroulement unipolaire

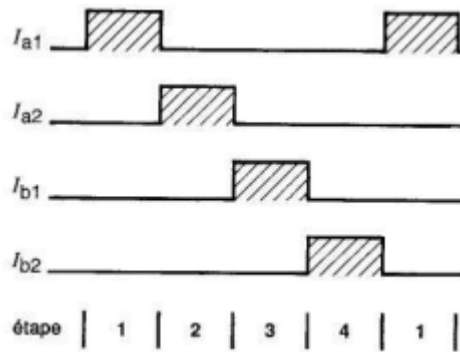
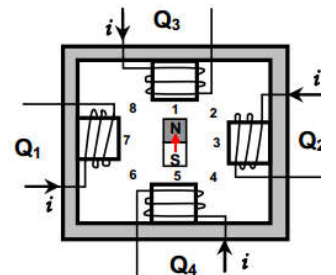


Fig.17 Séquences d'alimentation pour chaque étape

Exercice d'application

Soit le moteur pas à pas sur la figure ci-contre :

- 1) Déterminer le nombre de phases m et le nombre de pair de pôle du rotor p
- 2) Compléter le tableau suivant



Phases excitées				Position
Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	
0	0	1	0	1
				2
				3
				4
				5
				6
				7
				8

- 3) Quel est le type de commutation : symétrique ou asymétrique
- 4) Déterminer le nombre de pas par tour ($N_{p/tr}$)

Chapitre 4 : Synchromachine

Introduction

Les dispositifs électromécaniques à induction destinés au téléaffichage d'angle dans les systèmes de transmissions synchrones (en anglais: self synchronizing) à courant alternatif sont appelés SELSYNS ou synchromachines.

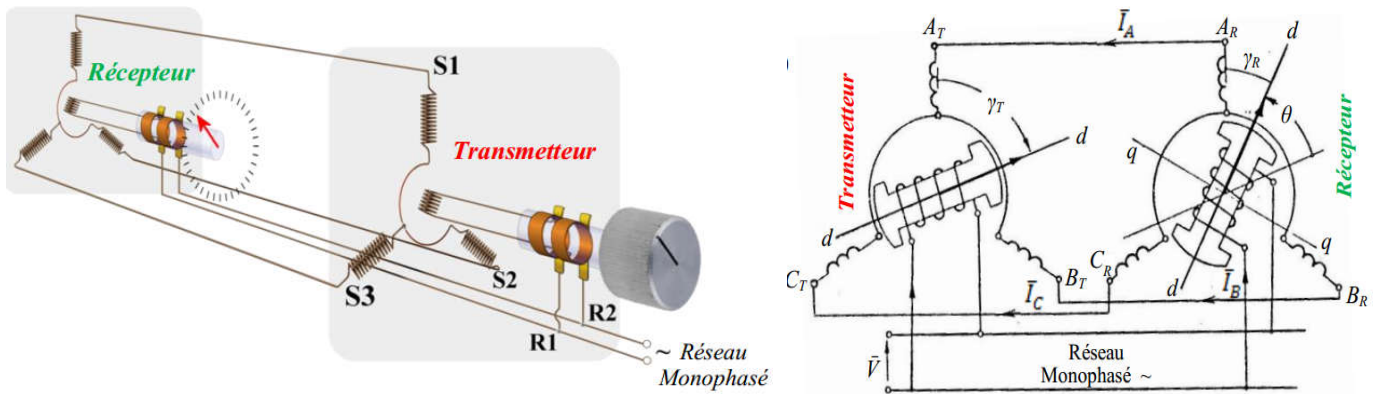
Ce Dispositif est un type de transformateur électrique rotatif qui est utilisé en général par paire, et sert à transmettre un couple par l'intermédiaire d'une connexion électrique analogique, Ce système est très utilisé pour afficher des mesures, dans le domaine de l'aviation. De nombreux systèmes exigent une synchronisation de positions angulaires de deux arbres à des endroits différents par réception d'une indication d'un mouvement angulaire pour être reproduit à distance.

Cette technologie a été développée et la fiabilité et la rentabilité des systèmes qui en découlent sont inégalées. Le maximum du couple des selsyns réalisés généralement se trouve dans l'intervalle de 2 à 20 N.m et l'erreur de l'angle est de $0,25^\circ$ à $2,5^\circ$. Les plus répandus sont les systèmes de liaison synchrone à induction et ils peuvent être classés :

- En synchromachines monophasées : pour les petites puissances (dans le cas de la téléaffichage ou la synchro-détection).
- En synchromachines triphasées ;

1. SELSYN monophasée

Ces systèmes sont largement utilisés dans les différentes installations commandées de faibles puissances, comme dispositifs servant à la transmission des indicateurs à distance ou pour la commande de différents organes de contrôle tels que régulateurs, vannes, systèmes asservis, etc. Par exemple la figure ci-dessous montre le schéma d'une chaîne de télé indication. Ils sont en général, des machines à stator triphasé (Secondaire) et rotor monophasé à pôles saillants (Primaire). Les enroulements rotoriques sont alimentés en parallèle par un réseau monophasé par contre les bornes homologues des deux stators sont connectées entre elles. Dans le cas où $\gamma_T = \gamma_R$ les f.é.m. induites, dans des enroulements statoriques homologues, par les champs pulsants rotoriques, sont différentes ; d'où des courants statoriques et des couples conduisant à l'alignement des deux rotors. Le positionnement de l'un des rotors reproduit à distance celui de l'autre.



Schémas de connexion d'un synchronomachine (Selsyn) monophasée à induction

Ces f.é.m. induites, dans des secondaires, par les champs pulsants primaires, sont :

F.e.m au secondaire du transmetteur

$$\begin{cases} E_{AT} = E_m \cos(p\gamma_T) \\ E_{BT} = E_m \cos\left(p\gamma_T - \frac{2\pi}{3}\right) \\ E_{CT} = E_m \cos\left(p\gamma_T + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

F.e.m au secondaire du récepteur

$$\begin{cases} E_{AR} = E_m \cos(p\gamma_R) \\ E_{BR} = E_m \cos\left(p\gamma_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ E_{CR} = E_m \cos\left(p\gamma_R + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Les différences des f.e.m

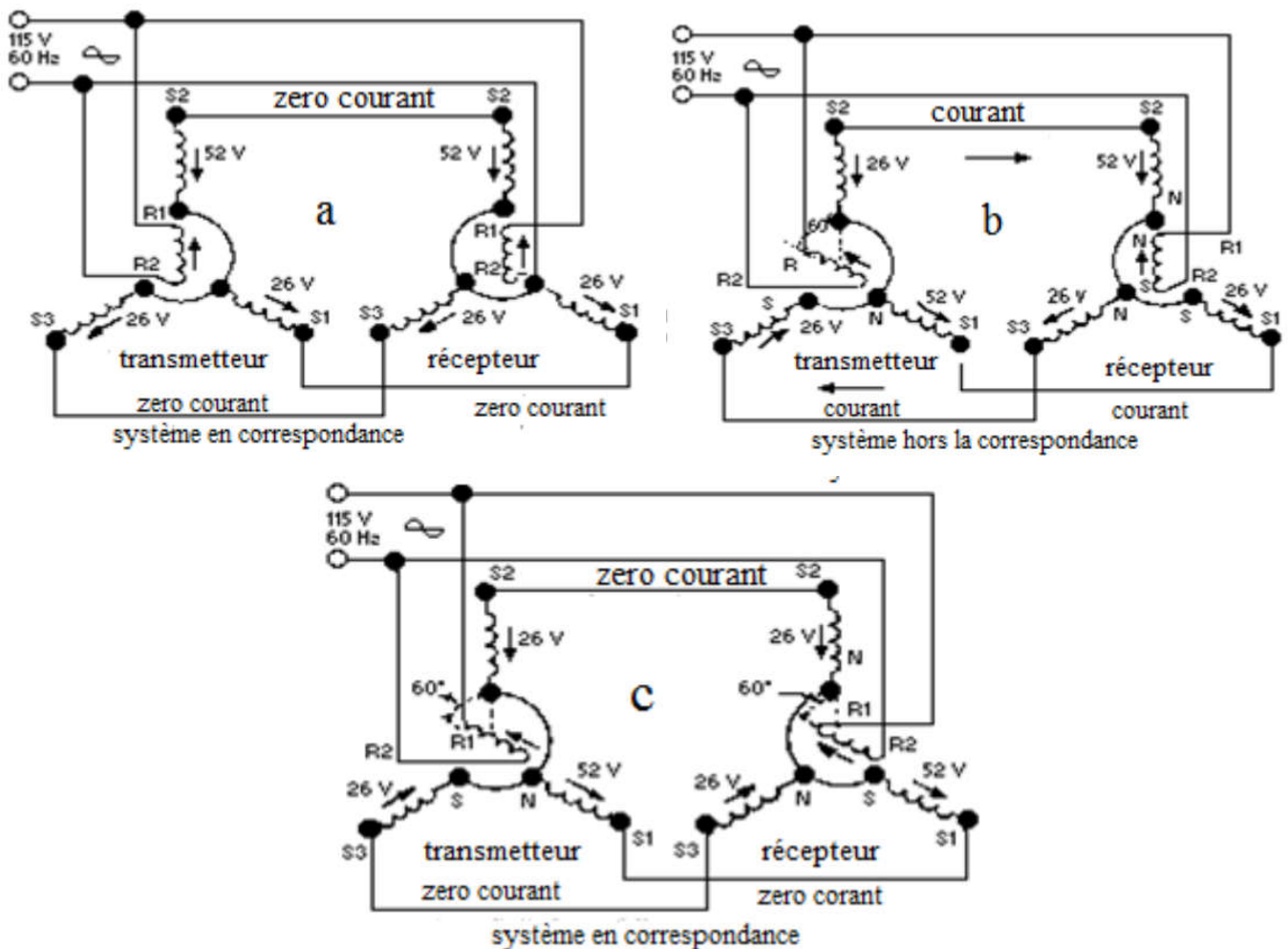
$$\begin{cases} \Delta E_A = E_{AR} - E_{AT} = E_m [\cos(p\gamma_R) - \cos(p\gamma_T)] = 2E_m \sin\left(\frac{p\gamma_R - p\gamma_T}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \\ \Delta E_B = E_{BR} - E_{BT} = E_m \left[\cos\left(p\gamma_R - \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(p\gamma_T - \frac{2\pi}{3}\right) \right] = 2E_m \sin\left(\frac{p\gamma_R - p\gamma_T}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \\ \Delta E_C = E_{CR} - E_{CT} = E_m \left[\cos\left(p\gamma_R + \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(p\gamma_T + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = 2E_m \sin\left(\frac{p\gamma_R - p\gamma_T}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \end{cases}$$

Les courants de circulation dans les secondaires des deux machines :

$$\begin{cases} I_A = \frac{\Delta E_A}{Z} = 2 \frac{E_m}{Z} \sin\left(\frac{p\gamma_R - p\gamma_T}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \\ I_B = \frac{\Delta E_B}{Z} = 2 \frac{E_m}{Z} \sin\left(\frac{p\gamma_R - p\gamma_T}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \\ I_C = \frac{\Delta E_C}{Z} = 2 \frac{E_m}{Z} \sin\left(\frac{p\gamma_R - p\gamma_T}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \end{cases}$$

Où : Z est l'impédance des deux secondaires et leur liaison.

L'interaction entre ces courants et les flux primaires (flux d'excitation) c'est la cause de la création de deux couples électromagnétiques (C_{em_T} : Couple de transmetteur (Couple frein) et C_{em_R} : Couple de récepteur (couple moteur)). Ces deux couples sont pour le but de réduire l'écart angulaire ($\theta \rightarrow 0$).



Exemple de fonctionnement

2. Synchromachines triphasées

La figure 1 montre le schéma de principe d'un montage garantissant le synchronisme de deux arbres (un transmetteur et un récepteur). Deux MAS triphasées à rotor bobiné sont connectées en parallèle sur le même réseau via leurs stators (primaires), par contre les deux rotors (secondaires) sont mis en parallèle. Lorsque les enroulements rotoriques occupent des positions identiques, c'est-à-dire $\theta = 0$. Dès lors, le moindre déplacement de transmetteur mènera à des f.é.m. secondaires différentes, donc à la naissance de courants rotoriques de circulation; d'après la loi de Lenz, ces courants tendent à réduire la cause de leur apparition.

Si le rotor du transmetteur est décalé d'un angle $\pm \theta$ et les f.e.m du transmetteur et du récepteur sont décalées aussi d'un angle électrique $\pm \theta_e$ et le récepteur tournera aussi de même angle mécanique (*si le couple moteur de la machine est suffisant*).

$$\underline{I}_r = \frac{E_{21} + E_{211}}{\underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{211}} = \underline{E}_2 \frac{1 - \ell^{\pm \theta_e}}{2 \underline{Z}_2}$$

Avec :

$\underline{E}_{21}, \underline{E}_{211}$ et $\underline{Z}_{21}, \underline{Z}_{211}$: f.e.m et impédance rotoriques des deux MAS respectivement.

$\theta_e = p\theta$: Angle électrique et mécanique.

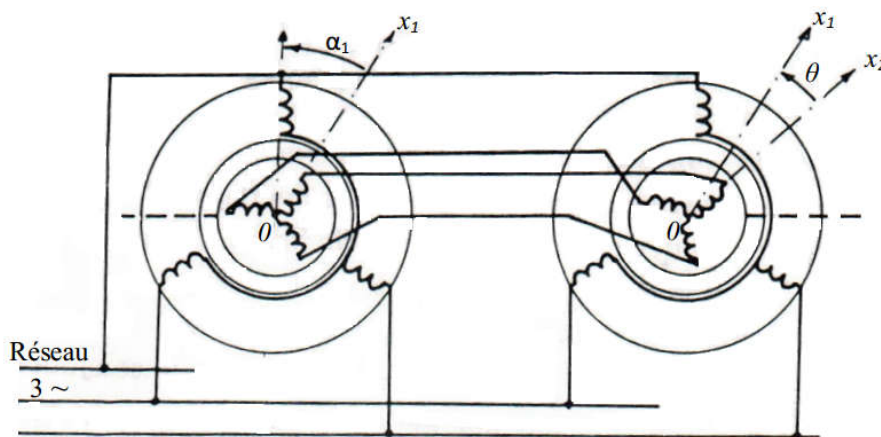
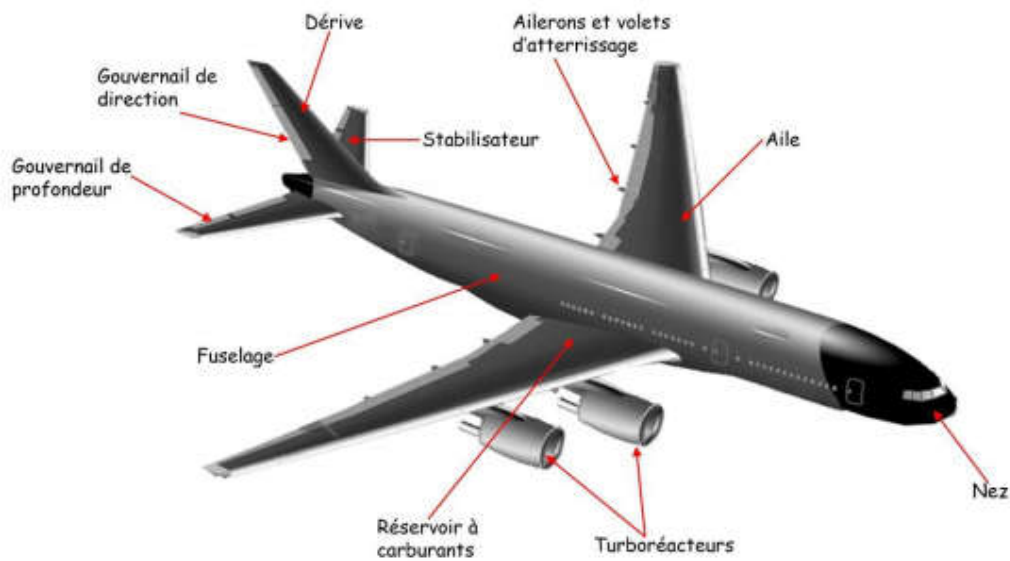


Figure 1: Synchromachine à base de deux MAS à rotor bobiné

Le courant rotorique a une composante en phase avec la f.e.m rotorique du récepteur, c'est pourquoi ce récepteur crée un couple qui agit dans le sens de rotation du champ, par contre dans le transmetteur le courant rotorique a une composante en opposition de phase avec la f.e.m de ce transmetteur dans ce cas cette machine développe un couple de freinage. Les deux couples créés par le courant de circulation tendent à réduire à zéros l'angle des deux rotors. Le couple résultant augmente avec l'accroissement de l'angle θ .

3. Utilisation des synchromachines

Les synchros ont été premièrement utilisés dans des chaînes de téléaffichage par exemple pour mesurer la position d'une valve ou d'un arbre dans une usine, ou encore d'une antenne de radar ou dans l'aéronautique, lorsque le pilote veut transmettre des angles d'un certain nombre de dispositifs (volets, ailerons, gouvernails) à distance. Dans ces chaînes un synchro transmetteur est directement relié à un synchro récepteur dont l'aiguille suit la position du transmetteur. Des synchros différentiels peuvent être intercalés pour réaliser des opérations sur différents angles. De tels synchros sont appelés synchro de téléaffichage. L'avantage du synchro sur le résolveur est qu'il est triphasé et peut donc fournir davantage de puissance. Les synchros peuvent être aussi utilisés en automatisme, par exemple pour positionner un moteur. On parle de synchro de commande.



Différents organes d'un avion civil

Questions de compréhension

- 1) Quelle est la principale application des synchronachines (SELSYN), et dans quel domaine sont-elles particulièrement utilisées ?
- 2) Expliquez brièvement le principe de fonctionnement d'un système SELSYN monophasé. Quels sont les rôles du transmetteur et du récepteur ?
- 3) À partir des expressions des f.é.m. induites dans les secondaires du transmetteur et du récepteur, montrez comment est exprimée la différence de f.é.m ; Quelle est la signification physique de cette différence ?
- 4) Dans le cas des synchronachines triphasées, que se passe-t-il lorsque les rotors du transmetteur et du récepteur ne sont pas alignés ? Expliquez le rôle des courants rotoriques et des couples qui en résultent.

Conclusion générale

Au terme de ce cours sur les machines électriques spéciales, nous avons exploré un domaine riche et diversifié, où l'innovation et l'ingénierie se rencontrent pour répondre à des besoins technologiques spécifiques. Les machines électriques spéciales, qu'il s'agisse des moteurs pas à pas, des moteurs linéaires, des machines à réluctance variable ou des machines sans balais, représentent des solutions adaptées à des applications exigeantes en termes de précision, de performance et d'efficacité. À travers cette étude, nous avons mis en lumière les principes de fonctionnement de ces machines, leurs avantages techniques et leurs limites, ainsi que leurs domaines d'application variés, allant de la robotique industrielle aux systèmes de propulsion avancés. Nous avons également abordé les défis liés à leur conception, leur contrôle et leur intégration dans des systèmes complexes, tout en soulignant les avancées technologiques qui continuent de repousser les frontières de ce domaine. Les machines électriques spéciales jouent un rôle clé dans la transition énergétique et l'automatisation croissante de nos sociétés. Leur capacité à offrir des solutions performantes et adaptées en fait des composants indispensables dans des secteurs aussi variés que les énergies renouvelables, les transports intelligents ou la fabrication industrielle de pointe. Ce cours vous a permis d'acquérir les bases théoriques et pratiques nécessaires pour comprendre, analyser et concevoir ces systèmes. Nous espérons qu'il a éveillé votre curiosité et vous a donné les outils pour contribuer aux innovations futures dans ce domaine en pleine évolution. En conclusion, les machines électriques spéciales incarnent l'ingéniosité et la créativité de l'ingénierie moderne. Elles témoignent de la capacité humaine à repousser les limites technologiques pour répondre aux défis actuels et futurs. Que vous soyez étudiant, professionnel ou passionné, nous vous encourageons à poursuivre votre exploration de ce domaine fascinant et à participer activement à son développement. Merci pour votre engagement et votre intérêt tout au long de ce cours. Nous vous souhaitons beaucoup de succès dans vos projets futurs, qu'ils soient académiques, professionnels ou personnels.

Références bibliographiques

- [1] Abderrezak Rezzoug, Mohammed El-HadiZaïm, Non-conventional Electrical Machines , ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., United States,2012.
- [2] J. Stephen Chapman, Electric Machinery Fundamentals, FIFTH Edition, McGraw-Hill Companies, Inc.,Australia, 2012.
- [3] Théodore Wildi, Gilbert Sybille, Electrotechnique 3éme édition,DeBoeck, Canada, 1999.
- [4] Théodore Wildi, Gilbert Sybille, Electrotechnique 4éme édition, DeBoeck, Canada, 2005.
- [5] B.L. Theraja, A textbook of electrical technology , volume 2 AC and DC machines, S.CHAND, India, 2015.
- [6] M. Kostenko, L. Piotrovski, Machines Electriques 3éme édition Tome 1, Edition MIR Moscou, Russie 1979.
- [7] M. Kostenko, L. Piotrovski, Machines Electriques 3éme édition Tome 2, Edition MIR Moscou, Russie 1979.
- [8] [3] Jean-Pierre Fanton , Électrotechnique machines et réseaux , Ellipses (2002)