
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mohamed Khider de Biskra



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département De Génie Electrique

Filière : Electromécanique

Matière : *Machines Spéciales*

Moteur a Reluctance Variable

1^{er} Année Master Electromécanique

2019_2020

MOTEUR A RELUCTANCE VARIABLE-MRV

Depuis toujours les hommes n'ont cessés d'innover, de développer et d'améliorer les outils afin de remédier aux exigences du quotidien. Et avec l'avènement de la révolution industrielle, les machines ont joué un rôle pas des moindres dans ce domaine. D'ailleurs de nos jours, on ne peut concevoir une économie développée sans impliquer des industries mettant en œuvres des machines robustes et fiables. Les machines électriques classiques, tel que les machines à courant continu et celles à courant alternatif ont toujours fait leurs preuves. Cela est dû en partie, à leur adaptabilité à différents domaines ainsi qu'à leurs performances en puissances et en vitesses. Mais vers la fin des années soixante, une nouvelle génération de machines tournantes a connu un essor, notamment avec le développement de l'électronique de puissance. Parmi ces machines nous citons les moteurs à reluctance variable (MRV) ; Ce sont des machines de très simple construction, robustes, peu coûteuses et qui procurent un bon fonctionnement sur des plages très étendues de vitesses et de puissances. Aujourd'hui les MRV trouvent de plus en plus de domaines d'application comme les appareils ménagers, la traction automobile et ferroviaire et les systèmes embarqués, pour ne citer que l'essentiel.

IV.1.HISTORIQUE

Historique du moteur à réluctance variable. Avec le développement de l'électromagnétisme au 19eme siècle, de nombreux dispositifs utilisant le principe de la réluctance variable ont vu le jour. Certains auteurs parlent même du fait que ce serait l'un des premiers principes utilisés pour la conversion de l'énergie électromagnétique en énergie mécanique. En effet JACOBI, le physicien russe, a proposé une structure tournante à reluctance variable en 1834. A la même époque l'américain C.Grafton Page a réalisé plusieurs dispositifs à fer tournant. Seulement, les bobines utilisaient des commutateurs mécaniques ayants pour inconvénients du bruit et des étincelles nocives. En 1845 C.FROMENT réalise un dispositif tournant probablement l'ancêtre des machines à reluctance variables actuelles. Les machines à reluctances variables furent devancées par les machines à courant continu et à courant alternatif, justement à cause du problème de commutation mécanique ; Leurs applications étaient restreintes à l'horlogerie (horloge FROMENT, 1854), les rasoirs (société REMINGTON) les tourne-disques (les Etablissements RAGONOT) et enfin le domaine des jouets avec les moteurs FROMENT.

Mais ils ne furent pas délaissées pour autant, à cette époque déjà, on leur reconnaissait leur simplicité et leur robustesse comme qualités. Vers 1927 les machines à reluctance variable ont refait surface grâce a une publication décrivant les dispositifs de transmission de mouvement dans les bateaux de guerre. Dans les années 1960, en Angleterre, on s'intéressa de nouveau à ces moteurs ; et ce fut

probablement le point de départ des travaux des équipes de plusieurs universités anglaises, notamment celles de Leeds et Nottingham. Au début, LAWRENSON (qui est d'ailleurs considéré comme le « doyen » de la recherche sur le MRV moderne) et son équipe (université de Leeds) n'ont pas été pris au sérieux par la communauté scientifique, mais avec le temps l'évidence devint irréfutable quand il quitta le domaine académique et créa sa propre usine de production, mettant ainsi en relief les avantages de cette machine et la diversité de ses applications. Dans les années 1970, avec le développement de l'électronique de puissance, les commutateurs mécaniques encombrants ont été remplacés par des circuits électroniques plus rapides, plus fiables, et surtout silencieux et moins dangereux. L'âge d'or des MRV ne faisait que commencer.

IV.2. INTRODUCTION

La dénomination de machine à réluctance variable (MRV) englobe des machines de structures différentes dont la propriété commune est une variation sensible de la forme de l'entrefer durant la rotation. Mais ces machines n'ont nullement les mêmes caractéristiques ni les mêmes performances et ne sont nullement destinées au même usage. Dans le présent chapitre, nous nous proposons d'abord de faire une étude succincte des structures à réluctance variable pouvant fonctionner en régime synchrone et d'en dénombrer celles qui présentent les caractéristiques de fonctionnement les plus intéressantes pour une éventuelle commande vectorielle, ensuite nous établirons les équations qui régissent leur fonctionnement et nous terminerons par l'étude de leur fonctionnement en régime stationnaire.

IV.3. POURQUOI RELUCTANCE VARIABLE ?

On parle ici de réluctance variable car on se concentre avant tout ici sur le champ magnétique qui se produit dans ce type de moteur. Le terme réluctance concerne ce fameux champ magnétique, et en l'occurrence ici un circuit magnétique. Hopkinson a en effet découvert qu'il y avait un lien intrinsèque entre circuit électrique et circuit magnétique (car oui, on peut générer des circuits magnétiques, et ils se comportent comme des circuits électriques).

La réluctance est le terme pour définir la résistance dans un champ magnétique. Sur un circuit électrique c'est donc le mot résistance et sur un circuit magnétique c'est réluctance (on parlera aussi de perméance côté magnétique pour parler de la permittivité électrique). Ici on parle de réluctance car la résistance au niveau du circuit magnétique (formé lors de l'excitation d'une phase) dépend de l'importance de l'entrefer (distance entre une dent du stator et une dent du rotor) car la force magnétique traverse plus difficilement l'air que le métal. Plus il y aura un espace (entrefer) important entre le stator et le rotor, plus la réluctance sera importante. Bref, vous allez mieux saisir de quoi il s'agit lors de la description du fonctionnement.

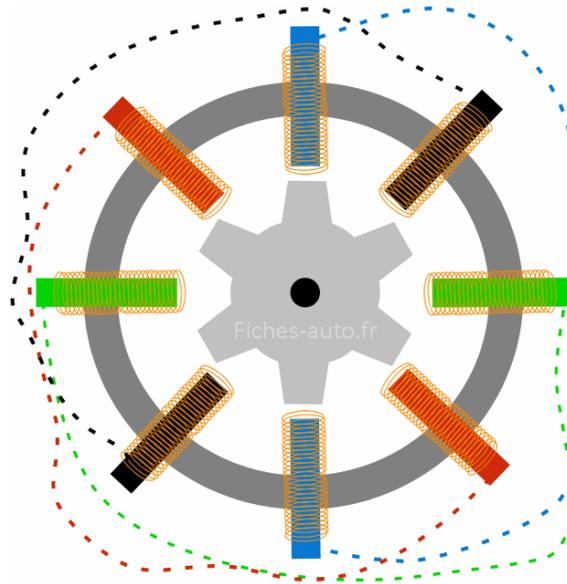


Figure IV.1 la description du fonctionnement.

IV.4. LES APPLICATIONS DU MRV.

D'une façon générale, le MRV présente beaucoup d'avantages et peut être employé avec succès en tant que moteur à vitesse variable. Il fournit des solutions pour des applications très variées, notamment des applications de traction de petite taille, avec des performances très satisfaisantes et des puissances pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilowatts. Le MRV présente une alternative dans une multitude d'applications. Parmi ces applications nous pouvons citer: - Les applications spécifiques : compresseurs, ventilateurs, pompes. Les équipements médicaux et de laboratoires comme les pousse-seringues [27] (figure I.1), les centrifugeuses (figure I.2), ainsi que les fauteuils roulants électriques (figure I.3)...



Figure IV.2. Pousse seringue médicale.



Figure IV.3. Fauteuil roulant électrique

- Les appareils ménagers : Robot ménager, lave-linge, lave-vaisselle, horlogerie, jouets...



Figure IV.4. Robot ménager. Figure IV.5. Lave-linge.

Les applications pour véhicules électriques et hybrides, le domaine de traction électrique sur rails comme les MRV linéaires ainsi que les rotors « in Wheel » directement associés aux roues et les équipements de bord.

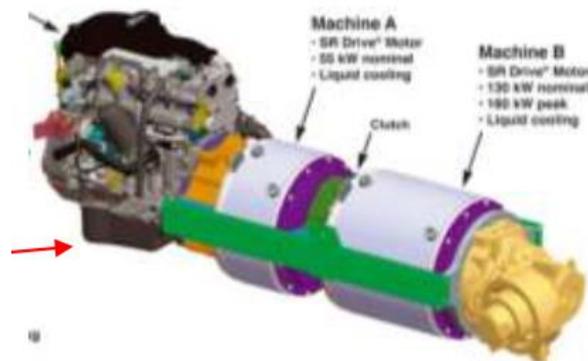


Figure IV.6. Moteur hybride destiné à la traction.



Figure IV.7. Système d'aération dans les transports en commun



Figure IV.8. Moteur « in Wheel » pour véhicules.

Les automatismes industriels : ascenseurs, servomécanismes, portes automatiques , actionneurs, positionnement...



Figure IV.9. Portes automatiques

Les équipements informatiques et bureautiques : impression, ventilateur, têtes de lecture...

- Les pompes à fuel et appareillages embarqués à bord des avions, navettes spatiales, fusées et différents équipements aéronautiques et aérospatiaux ;

Le manque d'une atmosphère dans l'espace fait que le moteur électronique est le seul choix viable pour les systèmes de propulsion des robots d'exploration spatiale. L'agence NASA pour son programme d'exploration de mars a conçu un MRV pouvant supporter une température de 540° pendant 27heures.

IV.5. CLASSIFICATION DES MRV

En électrotechnique, il a été convenu de classer les machines électrique selon le type d'énergie électrique (**continu ou alternative**). Mais cela n'empêche pas que certaines classifications prennent en considération la géométrie, le type de mouvement (**linéaire, rotatif ou combiné**)...etc. En menant notre recherche bibliographique, nous avons constaté que les **MRV** ne se plient pas à une classification évidente. En effet, pour la même géométrie, ils peuvent fonctionner avec de l'énergie continu comme le **MRV** pure à double saillance, ou avec de l'énergie alternative comme le **MRV** synchrone, VERNIER, hybride, ...etc.

Certains auteurs ont tenté de lui trouver sa place dans « **l'arbre généalogique** » des machines électriques. Dépourvu de collecteur, le MRV se place du côté des machines à courant alternatif comme le montre la figure IV.1..

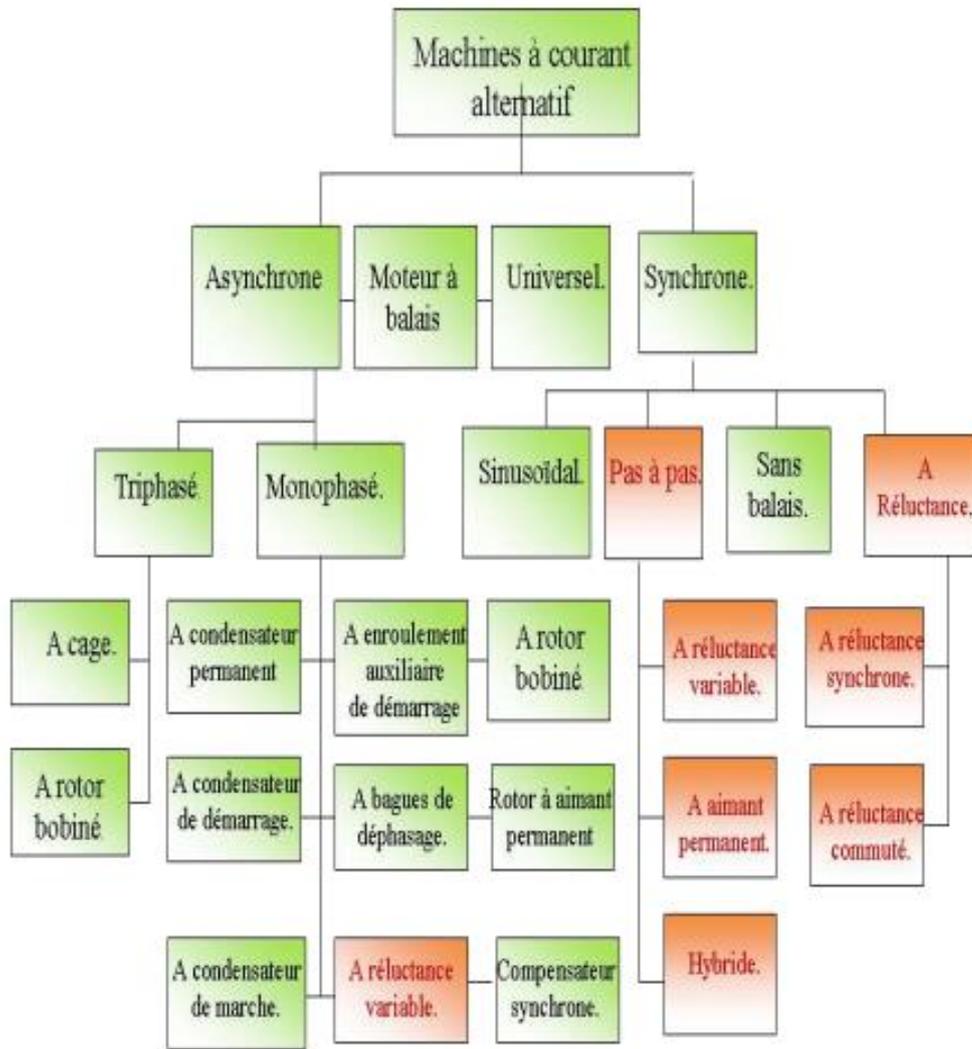


Figure IV.10. L'arbre généalogique

IV.6. TOPOLOGIES DES MRV TOURNANTES

Les MRV peuvent être à mouvement rotatif ou linéaire, mais dans notre cas nous allons nous intéresser aux machines tournantes. Il existe plusieurs configurations géométriques pour les MRV rotatifs, les plus usuelles sont celles qui considèrent le nombre de pôles statoriques plus élevé que le nombre de pôles rotoriques (cela n'empêche pas que dans certains cas le rotor contient plus de dent que le stator).

Le choix du nombre des dents et des phases doit se faire par rapport à l'application envisagée et aux performances souhaitées. Les critères qui peuvent influencer le choix pour une topologie particulière incluent, entre autres :

La valeur du couple et sa forme lors du démarrage, du freinage et en régime permanent.

- Le type d'alimentation (triphase, monophasé, etc.) et le circuit de commande utilisé.
- Les chemins de flux magnétique et les pertes fer produites.

IV.6.1. LES MRV PURS.

Les MRV dits "purs" ont une structure saillante au rotor et au stator, avec un stator "actif" où sont situés les bobinages et un rotor "passif" (sans bobinage ni aimants). Alimentés avec une tension ou un courant de forme rectangulaire (alimentation en créneaux), ils induisent des couples à caractère pulsé considéré comme inconvenient. On peut citer divers types de structures de MRV purs :

- ❑ -Structures à double denture à gosses dents à 2 dents par phase (figure ci-dessous).
- ❑ Structures à double denture à gosses dents à plus de 2 dents par phase.
- ❑ -Structures à pôles statoriques dentés (« petites dents ») où un bobinage excite plusieurs dents à la fois : on parle de « bobinage global ».



Figure IV.11. MRV pur à grosses dents.

IV.6.2. LES MRV A EFFET VERNIER.

Les MRV à effet Vernier ont des structures identiques aux MRV purs sauf qu'ils possèdent des enroulements repartis et sont alimentées en courant alternatif sinusoïdal et non en créneaux. Il existe des machines dites «Vernier à grand nombre de dents », qui possèdent deux armatures saillantes (figure II.3); sur chaque armature, les dents sont identiques et équi-réparties mais les nombres de dents statoriques et

rotoriques sont légèrement différents (similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse), ce qui permet d'obtenir une perméance sinusoïdale.

Il y a aussi les machines dites « Vernier à grosses dents » dans lesquelles chaque pôle statorique constitue lui-même la dent. Les nombres de pôles sont alors relativement faibles et les performances couple-vitesse sont comparables à celles des machines asynchrone et synchrone à aimants avec des fréquences d'alimentation voisines.



Figure IV.12. MRV à effet Vernier

IV.6.3. LES MRV HYBRIDES.

Les MRV hybrides ont parfois la même structure que les deux types précédents, mais en plus ils sont dotés d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances. L'adjonction d'aimants dans les structures à double saillance permet de compenser un entrefer trop élevé. Deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRVDS: l'une met en œuvre des aimants placés au rotor (figure II.4), la machine se rapprochant des machines synchrones à aimants enterrés (Interior Permanent Magnet); la seconde conserve le rotor passif de la MRV pure et utilise des aimants placés au stator: on obtient alors une machine à double saillance et aimants permanents statoriques (DSPMM) dite « MRV polarisée ».

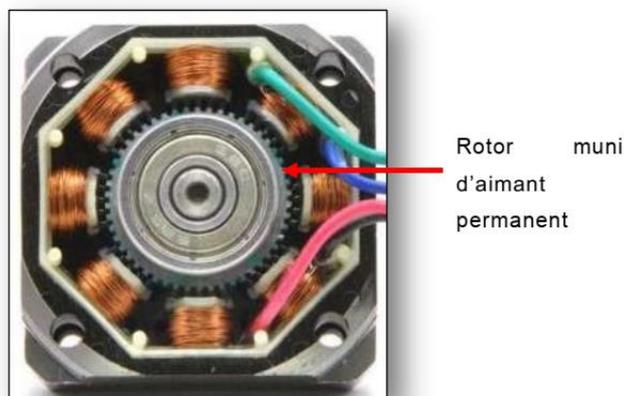


Figure IV.13. MRV hybride.

IV.7 PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU MRV.

Le MRV est caractérisé par plusieurs paramètres qui déterminent la durée de commutation et le sens de rotation.

IV.7.1. LE PAS INCREMENTAL.

Le pas incrémental du MRV est l'angle entre la position de conjonction et celle d'opposition. C'est une grandeur très importante pour déterminer les durées d'alimentations des bobines et les périodes de commutation des composants du circuit d'alimentation.

On désigne le pas polaire statorique α_s tel que

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{N_s}$$

Et le pas polaire rotorique α_r par :

$$\alpha_r = \frac{2\pi}{N_r}$$

Pour une machine symétrique, l'espacement des pôles statorique et rotorique est régulier. Entre deux commutations, le déplacement angulaire sera égal à la différence entre α_s et α_r . Le pas incrémental sera donc égal à:

$$\alpha_p = |\alpha_r - \alpha_s|$$

Dans le cas d'une MRV 6/4 nous aurons $\alpha_s=60^\circ$, $\alpha_r=90^\circ$ et le pas polaire $\alpha_p=30^\circ$. Chaque bobine sera donc excitée pendant une période de 30° .

IV.7.2. LE SENS DE ROTATION.

Le sens de rotation du rotor du MRV dépend lui aussi du nombre de pôles statoriques N_s et rotoriques N_r

Si $N_s < N_r$ ou $\alpha_s > \alpha_r$ alors :

$$\alpha_p = \alpha_s - \alpha_r$$

Le sens de rotation du rotor est identique au sens de l'alimentation des bobines statorique.

Si au contraire $N_s > N_r$ ou $\alpha_s < \alpha_r$ alors :

$$\alpha_p = \alpha_r - \alpha_s$$

Le sens de rotation du rotor est alors opposé à celui de l'alimentation des bobines statorique avec

$$\alpha_r = q \alpha_p .$$

Pour un MRV 6/4 le sens de rotation est donc contraire au sens d'alimentation des phases. Le nombre de pas par tour est donné par :

$$N_p = \frac{2\pi}{\alpha_p}$$

IV.8. QU'EST-CE QUI COMPOSE UN MOTEUR A RELUCTANCE VARIABLE ?

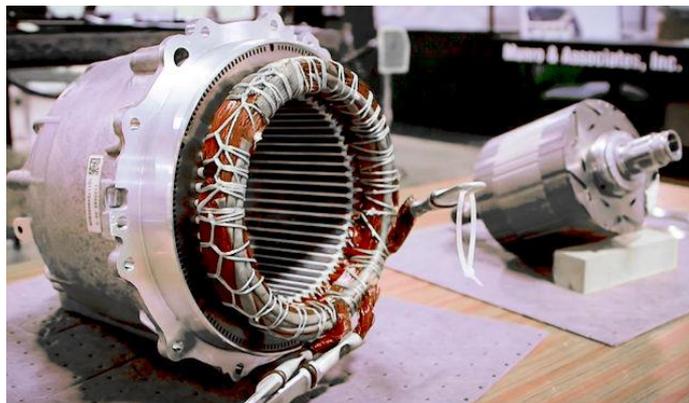


Figure IV.14. stator et rotor du MRV

Comme toujours on a un stator et un rotor ...

Le stator est ici incarné par plusieurs phases / bobines (nombre paire obligatoire) comme on peut le voir sur un moteur à aimant permanent synchrone. Cependant chaque phase est doublée, ce qui veut dire qu'une phase correspond à deux bobinages l'un en face de l'autre : ils seront commutés en même temps.

Au centre, le rotor (barreau de ferrite) n'est ni un matériau aimanté / magnétique ni un matériau sur lequel on pourra induire du courant ... Alors comment peut-il marcher puisque le rotor ne semble pas pouvoir être sensible aux bobines du stator ? Essayons de décrypter tout cela ...

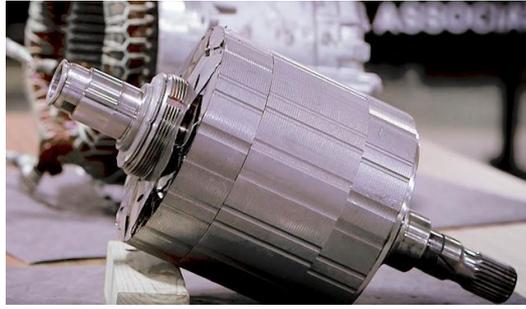


Figure IV.15. rotor du MRV

IV.8.PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MRV.

Le fonctionnement des MRV repose sur le principe très simple de l'attraction entre un électro-aimant et une structure ferromagnétique. L'électro-aimant est représenté par les pôles du stator et la structure en fer par les dents du rotor. Pratiquement cette attraction entraîne une variation de la réluctance du circuit magnétique de la machine. Ce circuit magnétique est constitué des culasses et des dents statorique et rotoriques ainsi que de l'entrefer. Le mouvement du rotor a pour effet la variation de la configuration de l'entrefer, et par conséquent sa perméance (d'où le nom moteur à reluctance variable).

Pour bien illustrer le fonctionnement du MRV, deux positions de référence sont déterminées pour chaque phase :

- La position d'opposition qui est la position de désalignement de l'axe de la dent rotoriques (la dent N°1 dans la figure II.6- (a)) par rapport à l'axe de la dent statorique active; c'est à partir de cette position que la phase est généralement excitée. C'est la position de référence 0°.
- La position de conjonction qui est la position d'alignement de la dent rotorique N°1 (figure II.6- (b)) avec la dent statorique active. Et c'est à cette position de 30° qu'aura lieu l'extinction de la tension.

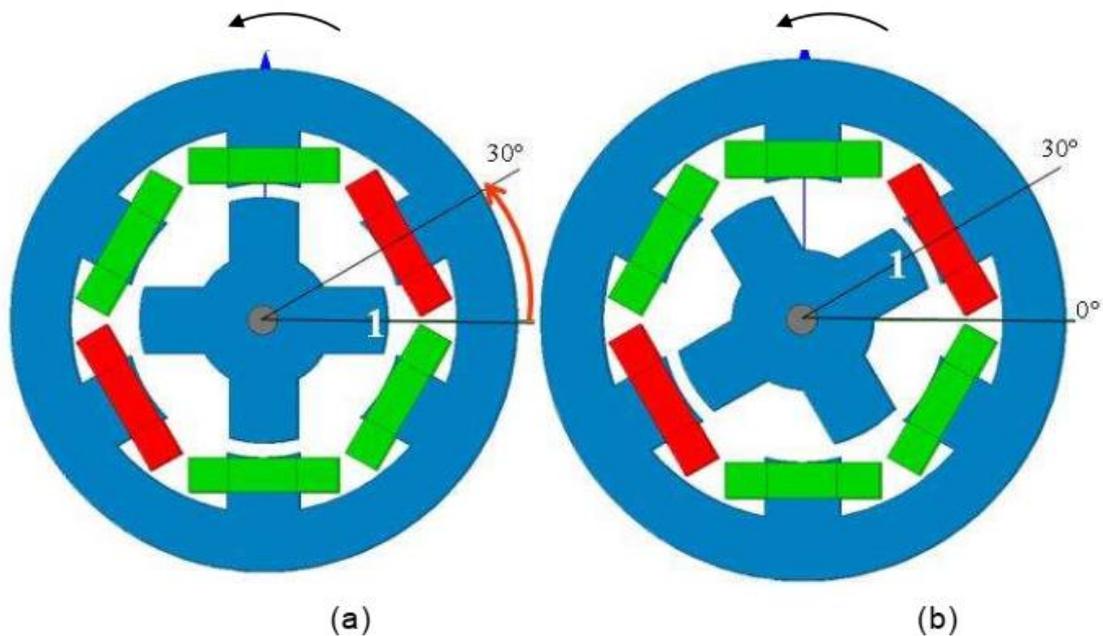


Figure IV.16. Positions de référence de la dent rotorique.
(a) position d'opposition (b) position de conjonction.

Lorsqu'une phase du stator est alimentée, un courant électrique circule dans le bobinage et crée un flux magnétique qui se répartit dans toutes les parties magnétiques du moteur. Les lignes de flux qui traversent l'entrefer denté et qui sont de nature raides se trouvent par endroits brisés ; c'est cette nature même qui génère un couple « réactif » qui tente de redresser ces lignes de flux et minimiser le chemin qu'elles traversent (et par conséquent, la réactance). La dent rotorique N°1 la plus proche (figure II.6) se trouve alors attirée vers le pôle excité. C'est le principe du flux maximal. L'alimentation successive des phases statoriques entraîne un mouvement continu du rotor.

IV.9. FONCTIONNEMENT DU MOTEUR ELECTRIQUE A RELUCTANCE VARIABLE

Si les moteurs électriques traditionnels utilisent la force magnétique pour provoquer une interaction directe entre le rotor et stator (j'émetts un champ par le stator et le rotor sensible au magnétisme bouge), le moteur à réactance va quant à lui faire la chose de manière un peu différente (malgré que ce soit toujours la force magnétique qui soit employée) ...

Cette fois-ci on va utiliser un autre phénomène physique : la réactance variable selon l'importance de l'entrefer. Comme la force magnétique "préfère" se propager dans de la matière ferreuse plutôt que de l'air, on va utiliser cela pour faire bouger le rotor.

Quand j'active une double phase (car pour une phase il y a deux bobines face-face) je crée un circuit magnétique qui va vouloir se propager de la bobine de la phase jusqu'à la dent du rotor. Ce circuit/champ magnétique va subir une plus grande résistance en traversant de l'air (entrefer entre rotor et stator), et ce dernier va vouloir naturellement limiter cet espace (constitué de vide) en le réduisant au maximum (comme si une corde se tendait). Le résultat est que le rotor va bouger et se positionner pour que l'espace soit le plus faible possible. On l'appelle moteur pas à pas car la rotation du rotor se fait par différents pas bien définis : les bobines qui incarnent les différentes phases du moteur.

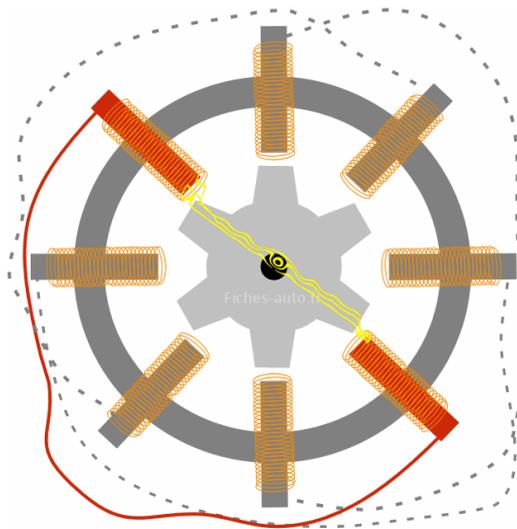


Figure IV.17 Deux bobines face-face

La réluctance est ici importante en raison de l'entrefer accrue (espace entre le bout des bobines excitées et la dent du rotor la plus proche)

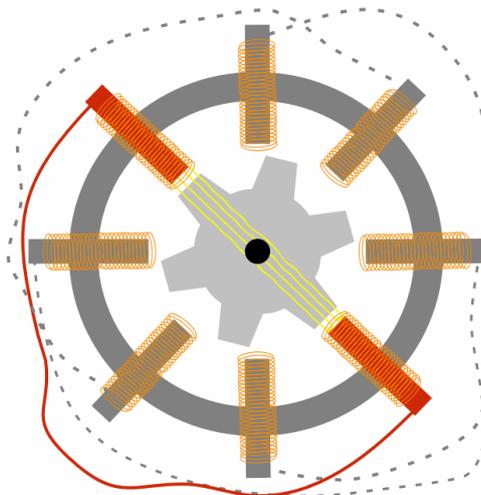


Figure IV.17 bobines excitées

La réluctance s'est ici drastiquement réduite grâce au phénomène physique (le champ magnétique préfère la matière à l'air, et ce champ provoque un genre de tension comme une corde tirée), et c'est tant mieux car cela a permis de faire légèrement tourner le rotor. Si on s'arrête ici (on laisse alimenté cette phase) le moteur est bloqué dans cette position. Et chaque position représente un pas, d'où le nom de moteur pas à pas.

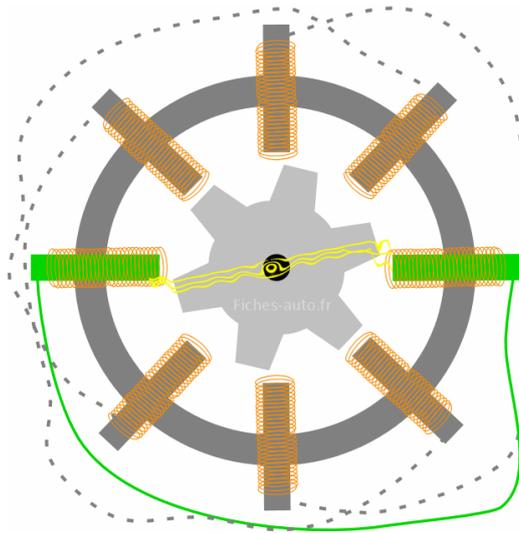


Figure IV.18. Le moteur est bloqué dans cette position

On continue sur d'autres phases, la génération d'un champ magnétique induit donc la formation d'un circuit magnétique qui n'aime vraiment pas traverser l'air : l'entrefer se réduit et donc le rotor se met à tourner pour arriver dans la position où ce fameux entrefer est diminué à son maximum. Autant l'expliquer de plusieurs manières afin de multiplier vos chances de compréhension.

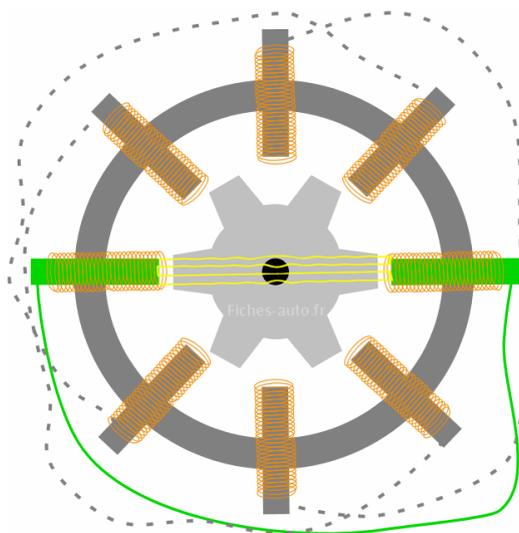


Figure IV.19. Le rotor se met à tourner

Ainsi de suite ... Et ici l'électronique de puissance est particulièrement utile pour piloter ce genre de moteur

IV.10. COURBE COUPLE /VITESSE MRV.

Une caractéristique typique de couple dynamique d'un moteur pas à pas est représentée par la figure suivante :

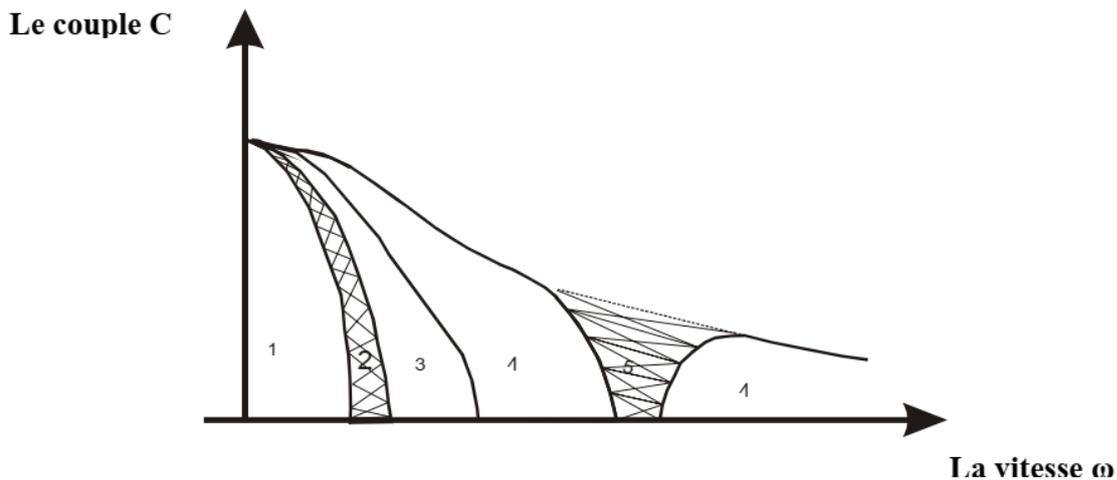


Figure IV.20 caractéristique du couple en fonction de la vitesse

Cette caractéristique présente généralement plusieurs zones que l'on peut identifier comme suit :

- **La zone 1** : correspond au fonctionnement à très basse vitesse et garantit une marche stable.
- **La zone 2** : présente des phénomènes d'instabilité de par la présence d'interactions entre la fréquence de commande et la fréquence propre du moteur.
- **La zone 3** : est stable dans tous les cas .le moteur peut démarrer directement avec une fréquence de commande correspondant à cette zone (domaine dit start-stop).
- **La zone 4** : correspond à un fonctionnement stable du moteur à haute vitesse toutefois, cette zone ne peut pas être atteinte que par une accélération progressive du moteur.
- **La zone 5** : présente des phénomènes d'instabilité dynamique pouvant provoquer la perte de synchronisme à haute vitesse.

IV.11.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU MOTEUR A RELUCTANCE VARIABLE

- Ce moteur est plein d'avantages, notamment économique : pas cher à produire il est aussi compacte et léger (parfait pour l'intégration et l'économie d'énergie grâce à la réduction de la masse). Son rendement est désormais très bon grâce à l'emploi de matériaux optimaux pour le rotor mais aussi par l'emploi d'une électronique de puissance programmée aux petits oignons qui permet d'améliorer l'efficacité de ce moteur. on parle aujourd'hui d'un rendement jusqu'à 95%, ce qui est pour le coup le meilleur moteur électrique qui soit. Cela est en grande partie dû au fait que ce moteur ne chauffe pas beaucoup, et donc on a moins de perte thermique (un moteur thermique perd la majorité de son énergie en chaleur ...).
- On en arrive donc aux inconvénients, ce moteur est particulièrement difficile à exploiter et les marques qui se lancent dans l'aventure ont intérêt d'avoir des ingénieurs de qualité pour arriver à leur fin. La fabrication est aussi assez compliquée puisque ce moteur nécessite un assemblage de grande précision. Les entrefers doivent en effet être les plus réduits possibles afin d'obtenir un rendement satisfaisant.

IV.12. CONCLUSION.

Nous avons présenté les notions indispensables à la compréhension du fonctionnement du MRV ainsi que sa classification parmi les moteurs conventionnels, son principe de fonctionnement.