

Machine à Réluctance Variable

I.1. Machine à Réluctance Variable et effet Vernier

La réluctance magnétique est une grandeur qui caractérise un élément de volume traversé par un flux magnétique. Elle est fonction des dimensions géométriques de l'élément et de la perméabilité magnétique du matériau.

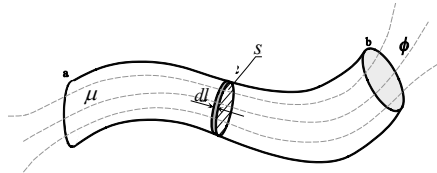


Figure 1.1

Ainsi, la réluctance d'une zone de l'espace traversée par un champ magnétique figure (1.1), s'exprime par la relation suivante :

$$\mathcal{R} = \int_a^b \frac{dl}{\mu s} \quad (1.1)$$

Avec :

dl : longueur élémentaire.

s : surface radiale par rapport aux passages des lignes de champ.

μ : perméabilité magnétique du matériau occupant la zone considérée.

Il est alors évident que, pour une géométrie donnée, une faible réluctance nécessite des matériaux de grande perméabilité magnétique.

L'exemple, donné à la figure (1.2) permet d'illustrer cette affirmation à l'aide d'un dispositif électrotechnique simple. Deux circuits magnétiques, excités par les mêmes ampères-tours, permettent de visualiser les lignes de champ dans les deux géométries, figures 1.2.a et figure 1.2.b.

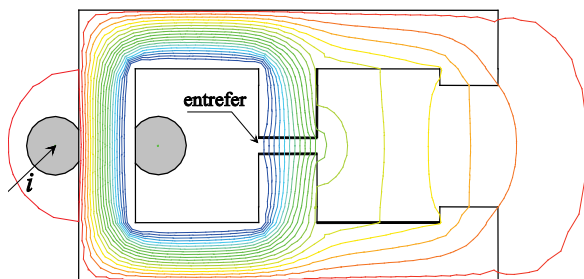


Figure 1.2.a

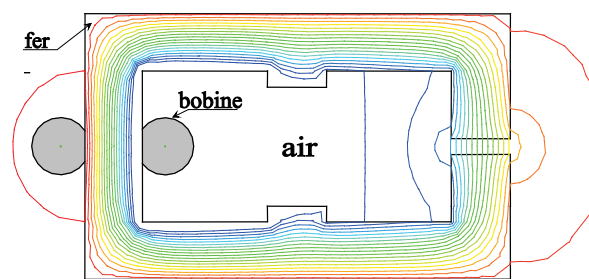


Figure 1.2.b

La perméabilité magnétique du fer étant nettement plus élevée que celle de l'air, les lignes de champ passent en priorité dans les zones qui présentent le moins d'entrefer, c'est à dire les endroits les moins réticants.

Dans le cas d'un système mobile, la variation de la réticance d'entrefer est utilisée pour moduler l'énergie d'entrefer, et par conséquent créer un couple. En effet, le rotor ayant un degré de liberté, il va chercher, lors de l'excitation de l'armature fixe, à tendre vers un état stable. Cet état est déterminé par la plus faible réticance au vu des lignes de champ magnétique et donc par le passage d'un maximum de flux entre les deux armatures.

L'alternance, dans le temps, des polarités d'un bobinage porté par l'armature fixe permet alors d'assurer un mouvement.

Les structures, basées sur ce principe de conversion de l'énergie sont appelées Machines à Réticance Variable (MRV). Il est à noter que cette appellation est générique et englobe plusieurs structures utilisant, d'une manière différente, la variation de la réticance pour la conversion de l'énergie (MRV pas à pas, MRV synchrone, MRV Vernier ...) [1-3].

Dans le cas de notre travail, nous nous intéresserons plus spécifiquement à cette dernière catégorie.

Afin de montrer l'intérêt et l'apport de l'effet Vernier, nous allons, dans le paragraphe suivant, utiliser un exemple simple basé sur la génération de l'énergie électrique.

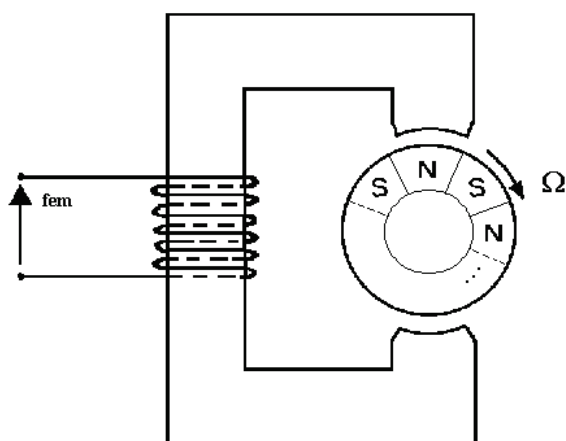


Figure 1.3.a : structure classique

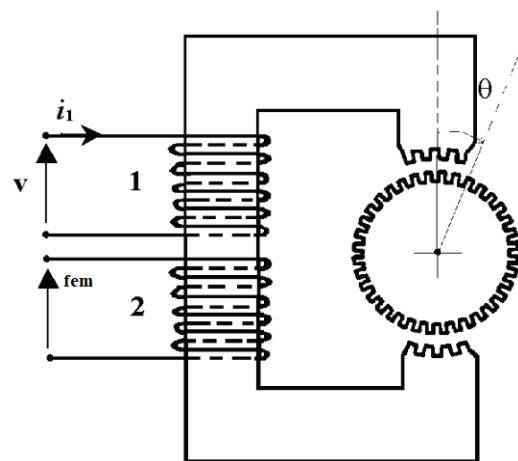


Figure 1.3.b : structure à effet Vernier

Soit la structure « classique » composée d'une roue polaire à p paires de pôles et

d'une culasse ferromagnétique supportant un enroulement figure (1.3.a). Lorsque la roue est entraînée à une vitesse de rotation constante Ω , une *f.e.m.* de pulsation ω est induite dans le bobinage entourant la culasse. Cette pulsation est directement proportionnelle au produit $p.\Omega$. Dans le cas où la vitesse est faible, la pulsation, et donc la fréquence, l'est aussi. Par conséquent, pour obtenir une *f.e.m.* de fréquence 'significative' tout en ayant une vitesse de rotation faible, il faut augmenter le nombre de paires de pôles.

Soit maintenant la structure donnée à la figure (1.3.b). Elle est constituée d'une culasse ferromagnétique avec N_s dents et d'une roue à N_r dents. Par ailleurs, deux bobinages distincts sont enroulés autour de la culasse. Le premier, qu'on appellera circuit d'excitation, est parcouru par un courant i_1 , continu ou alternatif, et assure la magnétisation du circuit. Le second recueillera la *f.é.m.* induite.

Les deux extrémités du circuit magnétique de cette structure, ainsi que la roue interne, présentent un nombre de dents important. Ces dernières peuvent prendre, dans le cas général, une infinité de formes géométriques. Celles de l'exemple traité figure (1.3.b) seront supposées droites afin de simplifier le raisonnement. Par ailleurs, en définissant θ comme étant la position d'un axe de référence du rotor par rapport à celui du stator, la réluctance totale de l'entrefer $\mathcal{R}(\theta)$ peut être constante ou variable. En effet, il est tout à fait possible d'obtenir une réluctance d'entrefer « globale » constante même si localement on a une variation de la distribution des lignes de champ. Il suffit pour cela de s'assurer que la surface totale radiale par rapport aux lignes de champ, qui correspond à l'entrefer minimal, soit invariante par rapport à la position du rotor. Cela enlèverait alors tout intérêt à la structure. Par conséquent, nous nous placerons, dans toute la suite de ce travail, dans le cas général où la réluctance est variable en fonction de la position rotorique.

Considérons maintenant le fonctionnement en générateur de la structure donnée à la figure (1.3.b). Si i_1 est continu, pour la même vitesse de rotation Ω , la *f.é.m.* induite dans le bobinage d'induit aura une fréquence qui peut être beaucoup plus élevée. Elle sera essentiellement fonction de la périodicité de la réluctance d'entrefer.

Si, par contre, i_1 est sinusoïdal de fréquence f_1 , alors la fréquence f_2 de la *f.é.m.* sera fonction de Ω , de la périodicité de la réluctance d'entrefer et de f_1 . Il est donc possible, pour une vitesse donnée et une fréquence f_2 désirée, de faire circuler un courant i_1 avec la fréquence f_1 adéquate.

Cette possibilité de démultiplier la fréquence de la *f.é.m.* induite est le résultat de la conjugaison de la variation de la réductance à l'effet Vernier.

Dans le tableau (1.1) nous récapitulons, pour la structure de la figure (1.3.b), les possibilités en fonction de la réductance totale d'entrefer et de la nature du courant d'excitation.

$R(\theta)$ courant i_1	constante	variable
continu	$fem = 0$	$fem \neq 0$ avec une fréquence f_2
alternatif à fréquence f_1	$fem \neq 0$ avec une fréquence f_1	$fem \neq 0$ avec une fréquence f'_2

Tableau 1.1

En utilisant une transformation géométrique au niveau du circuit magnétique de la figure (1.3.b), on aboutit à une structure cylindrique plus réaliste, présentée sur la figure (1.4).

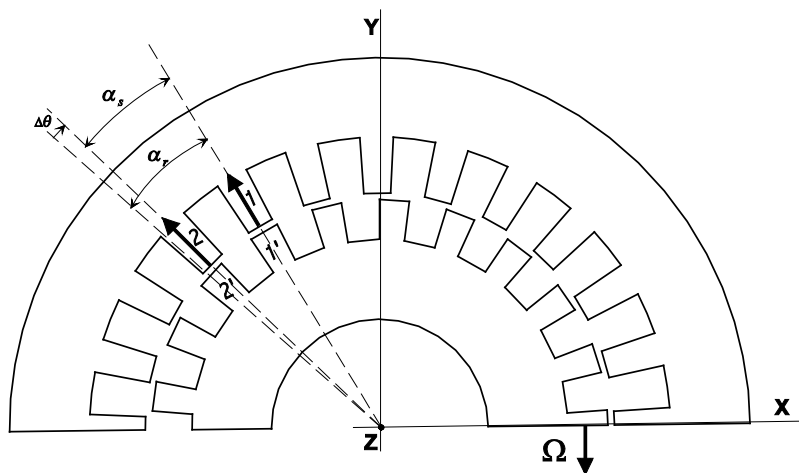


Figure 1.4 : MRV à double denture

Cette structure générique va nous permettre d'introduire plus explicitement l'effet Vernier dans le cas d'une machine cylindrique.

Définissons d'abord les pas dentaires statorique α_s et rotorique α_r :

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{N_s} \quad \text{et} \quad \alpha_r = \frac{2\pi}{N_r}$$

A l'instant t , la position du rotor est donnée par la figure (1.4). Les deux dents statorique et rotorique (1 et 1') se font face –position de conjonction pour ces deux dents–. Dans cette position, la perméance d'entrefer est plus élevée entre ces deux dents par rapport aux dents avoisinantes. A l'instant $t + \Delta t$, le rotor s'est déplacé d'un angle $\Delta\theta$. Le maximum de la perméance s'est déplacée, suite à la direction de la rotation indiquée sur la figure (1.4), de la dent statorique 1 à la dent 2, ce qui correspond à l'angle α_s . Pendant le même laps de temps Δt , le rotor, lui, s'est déplacé d'un angle $\Delta\theta = (\alpha_r - \alpha_s)$, nettement plus petit.

On peut alors introduire la notion de rapport Vernier [4-5] [83], qui est défini comme étant le quotient de la vitesse de déplacement de l'onde de la perméance d'entrefer sur la vitesse Ω du rotor. Il peut aussi se définir comme étant le quotient entre l'angle de déplacement du maximum de la perméance sur l'angle de déplacement mécanique. Ce rapport s'exprime par :

$$k_v = \frac{\alpha_s}{\alpha_r - \alpha_s} = \frac{N_r}{N_s - N_r} \quad (1.2)$$

Le type de structure utilisant ce principe est appelé machine à réluctance variable Vernier. Leur grande particularité réside dans la possibilité de fonctionner à basse vitesse et fort couple lorsqu'elles sont alimentées à des fréquences « classiques » [6-8]. Ceci convient donc aux applications à basse, et très basse, vitesse pour éviter l'utilisation des réducteurs mécaniques.

I.2. Type et principe de fonctionnement des machines à réluctance variable

I.2.1. Structure de base d'une M R V

Le principe de fonctionnement d'une machine à réluctance variable peut être décrit à partir d'une structure monophasée élémentaire identique à celle présentée ci-dessous figure (1.1) [2].

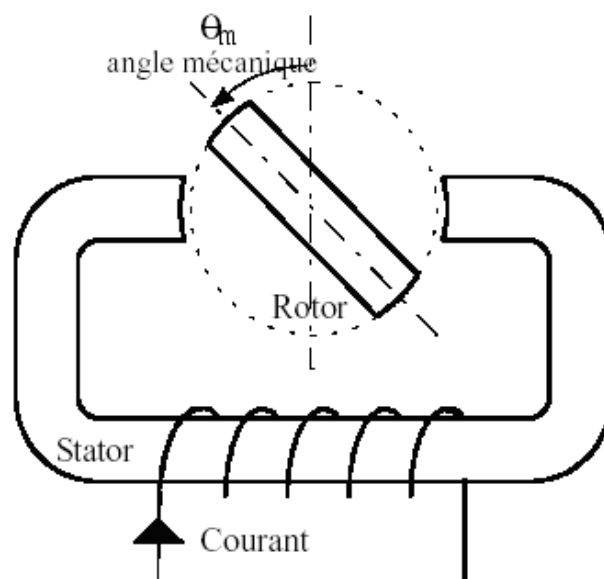


Figure (1.1) : Machine à réluctance variable ; structure élémentaire

Le mouvement de la machine est obtenu par la tendance du rotor à s'aligner avec l'axe magnétique de la phase statorique.

Cette structure possède deux positions rotoriques remarquables :

- Une position d'opposition pour laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale ou inductance minimale, figure (1.2.a)
- Une position de conjonction où la réluctance est minimale donc inductance maximale, figure (1.2.b).

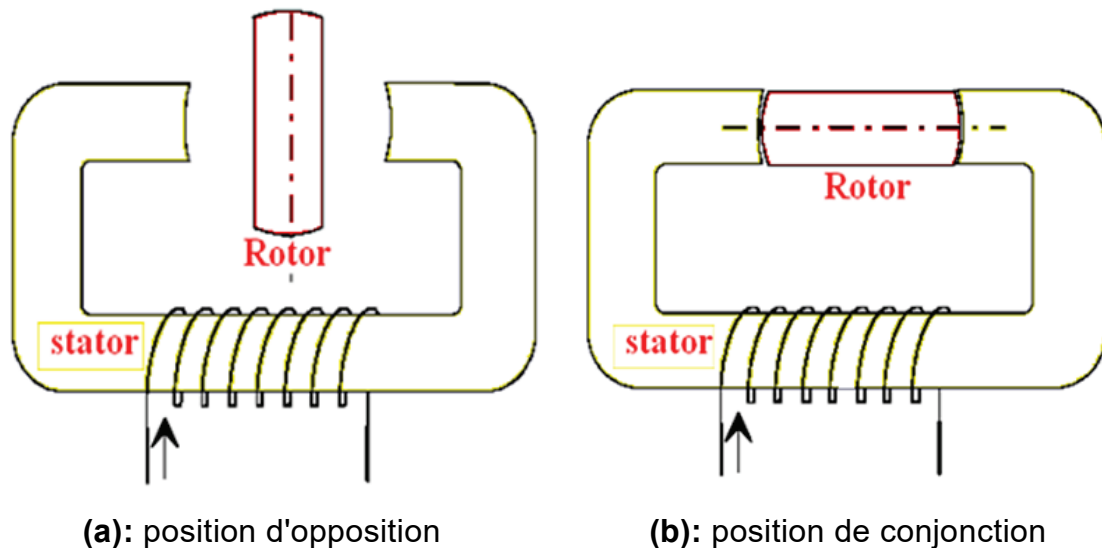


Figure 1. : Les différentes Positions du rotor relatives aux deux réluctances extrêmes

Si le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjunction et si on injecte un courant dans l'armature fixe, ce dernier modifie l'état du système qui tend alors à présenter une réluctance minimale, c'est-à-dire le passage du flux maximal entre les armatures.

Lorsque le courant est supprimé, si l'énergie cinétique emmagasinée durant la rotation est suffisante pour l'amener jusqu'à l'opposition, alors on pourra répéter le cycle et obtenir un mouvement continu de rotation.

I.2.3 Différents types des MRV

I.2.3.1 MRV à stator lisse

Les machines à réluctance variable à stator lisse conviennent aux entraînements à puissance élevée et à grande vitesse (plus que 10 000 tr/min) [11], leur bobinage d'induit est généralement triphasé. Ces machines peuvent être excitées ou non.

Les machines non excitées (figure 1.3) se comportent comme une machine synchrone classique à pôles saillants sans circuit d'excitation.

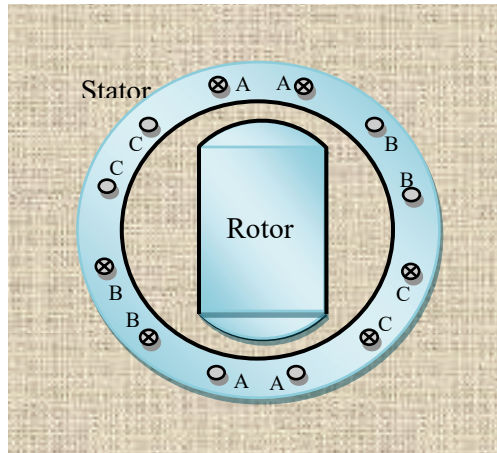


Figure 1.3 machine hétéropolaire non excitée

Lorsque le nombre de dents rotoriques vérifie la condition :

$$N_r = 2 \cdot P_e \quad (1.1)$$

La valeur moyenne du couple synchrone est non nulle. Alors la vitesse de rotation est :

$$\Omega = \frac{2\omega_a}{N_r} \quad (1.2)$$

I.2.3.2. MRV homopolaire

La machine homopolaire est généralement une machine excitée (figure 1.4), le stator comporte des enroulements hétéropolaires, plus un circuit d'excitation continu créant un flux homopolaire [6].

Le nombre de dents rotoriques doit vérifier :

$$N_r = P_e \quad (1.3)$$

La vitesse de rotation s'exprime par la relation :

$$\Omega = \frac{\omega_a}{N_r} \quad (1.4)$$

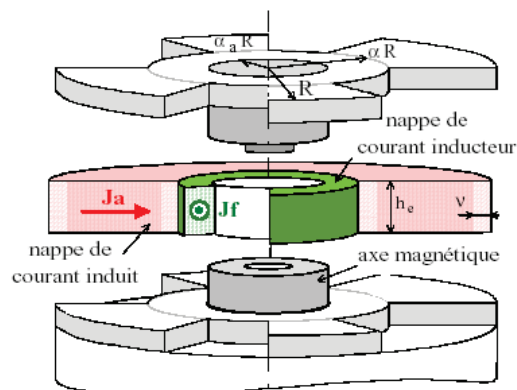


Figure 1.4 machine homopolaire excitée

I.2.3.3 MRV pas à pas

Le moteur pas à pas à réluctance variable, peut être considéré comme le type de base MRV. Les avantages de ce dernier type sont liés à la simplicité de sa réalisation et au nombre quasi-illimité de pas par tour qu'il autorise [3].

Il a par contre pour inconvénient le couple, qui est proportionnel en première approximation au carré du courant, et qui s'annule avec ce dernier, la position n'est donc pas conservée (absence de couple de maintien).

Le moteur pas à pas à réluctance variable est constitué d'un stator bobiné et d'un rotor cylindrique non excité, et comporte une denture dont le pas est différent au stator et au rotor.

Pour illustrer cette différence, nous allons prendre l'exemple d'un moteur dont le stator comporte 8 pôles et le rotor 6 pôles avec 4 phases d'alimentation (figure 1.5) [3].

Lorsqu'on alimente une bobine, elle devient un électroaimant et le barreau de fer cherche naturellement à s'orienter suivant le champ magnétique. On alimente la phase 1, puis la phase 2, puis la phase 3...

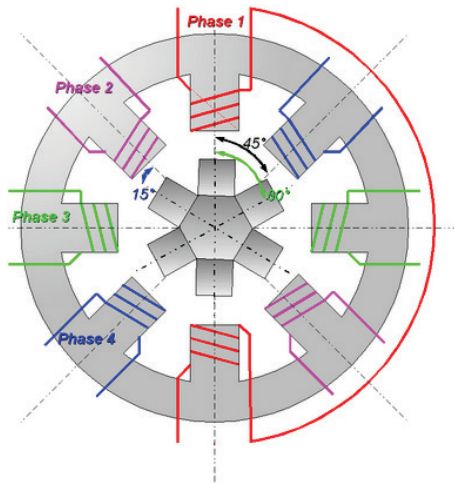


Figure 1.5 Moteur P.P à RV (stator 8 pôles, rotor 6 pôles) 24 pas / tour

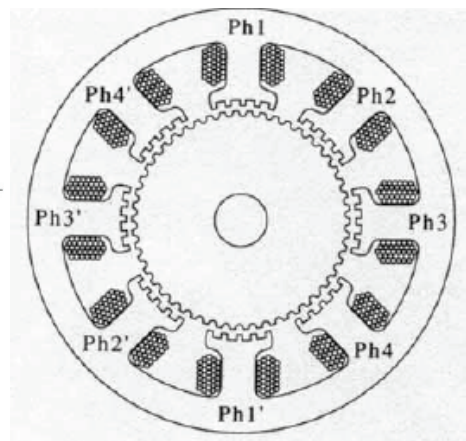


Figure 1.6 $q = 4$ (nombre des phases) et $Nr = 50200$ pas / tour.

Dans le cas d'un moteur pas à pas à réluctance variable, pour augmenter le nombre de position stable ou de pas, ainsi que le couple de rappel du rotor, on agit sur le nombre et la forme des dents [4].

Pour l'obtention d'un grand nombre de pas par tour, on utilise la structure à pôles statoriques dentés (petites dents) ; un bobinage excite plusieurs dents à la fois, on parle de bobinage global. La (figure 1.6) [4] montre une telle structure.

I.2.3.4 MRV linéaire à réluctance variable

Le concept de réluctance variable peut également être mis en œuvre pour la réalisation d'actionneurs linéaires (figure 1.7) [8]. On peut ainsi concevoir un actionneur comprenant une pièce statorique fixe avec une succession de pôles statoriques (S1, S2) comportant chacun un ensemble de petites dents statoriques et magnétisées par des bobinages globaux (B1, B2) entourant chacun un pôle statorique. La pièce mobile comprend un ensemble de pôles rotoriques (R1, R2) munis, également, d'un ensemble de petites dents rotoriques qui, en se déplaçant par rapport aux dents statoriques, contribuent à créer une variation de la réluctance globale du système. On peut concevoir des actionneurs polyphasés, éventuellement polyentrefers en assemblant plusieurs modules de réluctance variable [8].

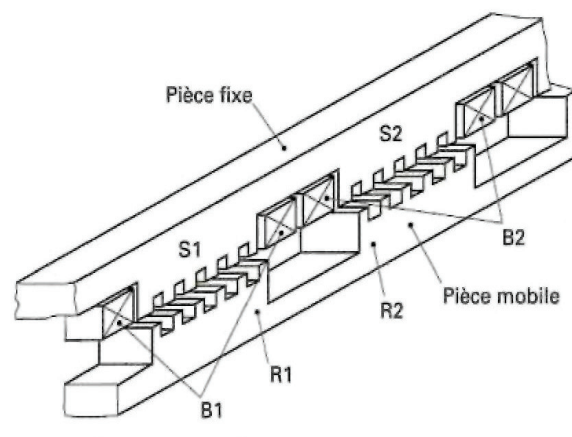


Figure 1.7 Structure d'un actionneur linéaire à réluctance variable

I.2.3.5 MRV à double denture (dites Vernier)

Dans ces machines le stator et le rotor présentent un grand nombre de dents. Et aussi sont destinées à produire un fort couple à faible vitesse.

On distingue deux types de machines :

- Les machines à denture répartie figure (1.8.a)
- Les machines dentées à plots figure (1.8.b)

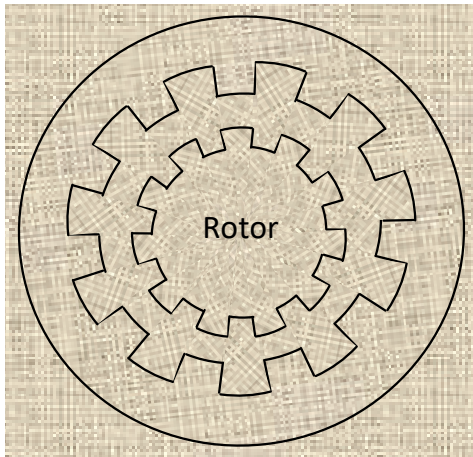


Figure 1.8.a MRV à denture répartie

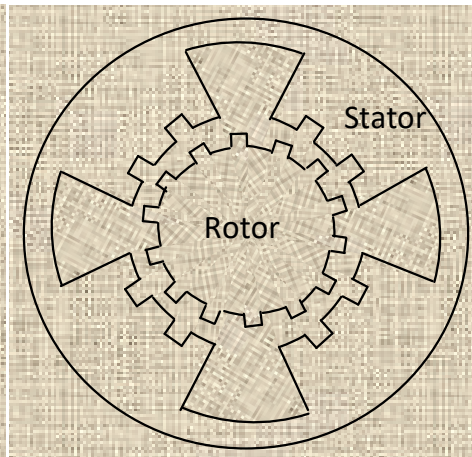


Figure 1.8.b MRV dentées à plots

Le rotor et le stator ont nécessairement un nombre de dents différent ($N_r \neq N_s$).

Dans le cas des machines non excitées, la condition à satisfaire permettant l'obtention d'un couple moyen non nul se traduit par la relation suivante [6]:

$$| N_r \pm N_s | = 2P \quad (1.5)$$

La vitesse de rotation s'exprime par :

$$\Omega = \frac{2\omega_a}{\pm N_r} \quad (1.6)$$

Lorsque le nombre de dents devient important, il est préférable d'utiliser les machines dentées à plot (figure 1.8.b).

Les machines à double denture produisent un couple élevé avec un facteur de puissance faible (0.3 à 0.4) [11]. Elles sont utilisées soit comme des machines à faible vitesse, soit comme des machines pas à pas [6].

Pour les MRV Vernier excitées au stator, les conditions nécessaires à satisfaire pour assurer un fonctionnement synchrone se résument en [2] :

$$\pm N_r \pm N_s = \pm P_a \pm P_e \quad (1.7)$$

$$\pm N_r \pm N_s \neq 2P_a \quad (1.8)$$

$$\pm N_r \pm N_s \neq 2P_e \quad (1.9)$$

$$\begin{cases} N_r \neq 2P_a \\ N_r \neq 2P_e \end{cases} \quad (1.10)$$

$$\pm N_r \neq \pm P_a \pm P_e \quad (1.11)$$

Si l'excitation est au rotor nous devons rajouter aux conditions précédentes les conditions suivantes :

$$N_s \neq \pm P_a \pm P_e \quad (1.12)$$

$$N_s \neq 2P_e \quad (1.13)$$

Pour minimiser l'énergie emmagasinée, non convertible en couple, la structure devra respecter les conditions supplémentaires suivantes lorsque le circuit d'excitation est au stator [2] :

$$\begin{aligned} N_s &\neq \pm P_a \pm P_e \\ P_a &\neq P_e \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$N_s \neq 2P_e \neq 2P_a$$

Ou celles données ci-dessous lorsque le bobinage de l'inducteur se situe au rotor :

$$\begin{aligned} N_s &\neq 2P_a \\ P_a &\neq P_e \end{aligned} \quad (1.15)$$

I.3. L'effet Vernier

On va essayer dans la deuxième partie de ce travail, de dimensionner un prototype d'une machine à réluctance variable vernier. Pour cette raison, il faut comprendre l'intérêt de l'effet vernier en utilisant comme exemple, les deux structures suivantes [2] :

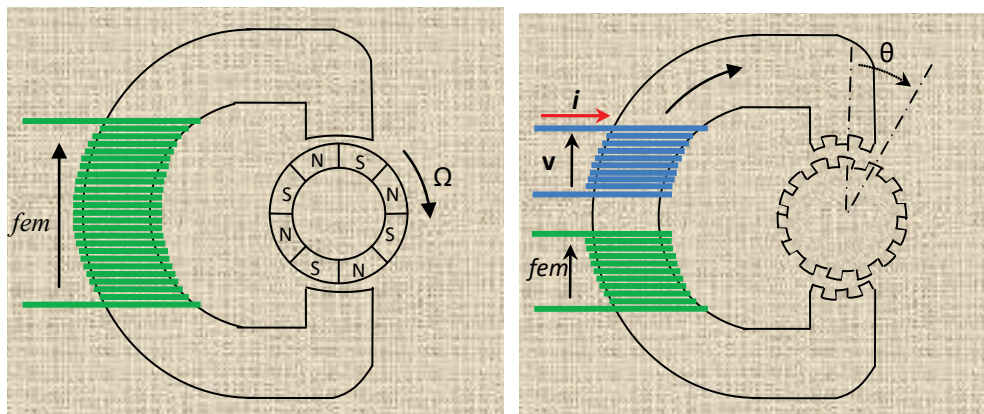


Figure 1.9.a structure classique

Figure 1.9.b structure à effet vernier

Lorsque la roue dans la figure (1.9.a), est entraînée à une vitesse de rotation constante Ω , une f.é.m. de pulsation ω qui est proportionnelle au produit $p.\Omega$, est induite dans le bobinage entourant la culasse. Alors, pour une vitesse faible l'obtention d'une fréquence -significative- voulue il faut augmenter le nombre de paires de pôles.

Pour figure (1.9.b), les dents de la culasse ferromagnétique et les dents de la roue peuvent prendre des formes géométriques différentes, on les suppose droites afin de simplifier le raisonnement ; et en définissant θ comme étant la position de l'axe de référence du rotor (la roue) par rapport à celui du stator (culasse), la réluctance de l'entrefer $R(\theta)$ peut être constante ou variable, et pour l'obtenir variable, il faut s'assurer que la surface totale radiale par rapport aux lignes de champs, qui correspond à l'entrefer minimal, soit variée par rapport à la position de rotor.

On considère le fonctionnement de la structure dans la figure (1.9.b). Si i est continu (dans le circuit d'excitation en bleu), pour la même vitesse de rotation Ω , la **f.é.m.** induite dans le bobinage d'induit (en vert) aura une fréquence qui peut être beaucoup plus élevée. Elle sera essentiellement en fonction de la périodicité de la réluctance d'entrefer. Si par contre, i est sinusoïdal de fréquence f_1 , alors la fréquence f_2 de la **f.é.m.** sera fonction de Ω , de la périodicité de la réluctance d'entrefer et de f_1 , donc il est possible, pour une vitesse donnée et une fréquence f_2 désirée, de faire circuler un courant i avec la fréquence f_1 adéquate. [2]

Cette possibilité de variation de la fréquence de la **f.é.m.** induite est le résultat de la conjugaison de la variation de la réluctance et l'effet vernier.

Dans le tableau qui suit on présente les différentes possibilités qui peuvent exister, pour la structure de la figure (1.9.b), du point de vue nature du courant d'alimentation et réluctance totale.

R (θ) Courant i	Constante	Variable
continu	$f_e m = 0$	$f_e m \neq 0$ avec une fréquence f_2
Alternatif à fréquence f_1	$f_e m \neq 0$ avec une fréquence f_1	$f_e m \neq 0$ avec une fréquence f'_2

Tableau (1.1) : différentes possibilités de la f é m pour la structure à effet vernier

On peut transformer la structure de la figure (1.9.b), pour construire une structure cylindrique « classique » plus réaliste. On aboutit alors à la structure présentée par la figure (1.10) qui suit :

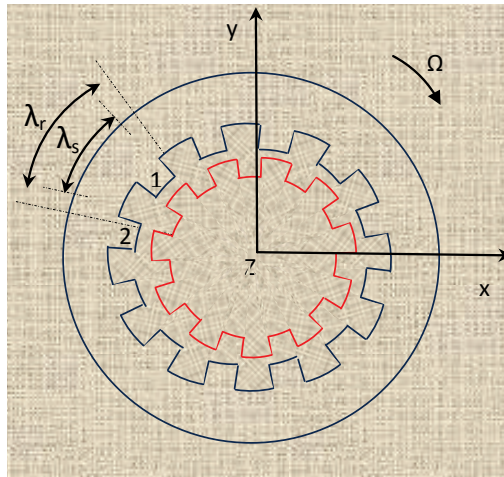


Figure 1.10 MRV à double denture

λ_r : le pas dentaire rotorique

$$\lambda_r = \frac{2\pi}{N_r} \quad (1.16)$$

λ_s : le pas dentaire statorique

$$\lambda_s = \frac{2\pi}{N_s} \quad (1.17)$$

A l'instant t , les deux dents 1 et 1' sont en position de conjonction. Dans cette position, la perméance d'entrefer est plus élevée, par rapport aux autres positions entre les dents des deux armatures. A l'instant $t + \Delta t$, le rotor s'est déplacé d'un angle $\Delta\theta = (\lambda_r - \lambda_s)$, la position de conjonction alors, s'est déplacée aussi cette fois entre les dents, 2 et 2' (ce qui correspond à l'angle λ_s), donc le maximum de perméance est entre ces dents.

On peut comptabiliser ici deux angles de déplacement. Le premier angle correspond au déplacement de maximum de la perméance d'entrefer, et le second angle correspond au déplacement mécanique. On peut alors introduire la notion du rapport vernier [12]. Ce rapport s'exprime par :

$$k_v = \frac{\alpha_s}{\alpha_s - \alpha_r} = \frac{N_r}{N_r - N_s} \quad (1.18)$$

Le type de structures utilisant ce principe est appelé machine à réluctance variable vernier. Leur grand particularité réside dans la possibilité de fonctionner à basse vitesse et fort couple, avec une alimentation à des fréquences classiques [12], ce qui nous permet d'éviter l'utilisation des réducteurs mécaniques.