

## Chapitre 2

### Machine à reluctance variable (MRV)

#### Switched reluctance motor (SRM)

## INTRODUCTION

Ce cours est consacré à la présentation de la machine à reluctance variable (MRV) considérée comme une machine spéciale.

Contrairement aux autres types de machines, le couple dans une MRV est créé à partir d'un seul champ magnétique par le principe de l'action de ce dernier sur une pièce ferromagnétique.

Le développement de cette machine a connu un grand essor grâce au progrès réalisé dans le domaine de l'électronique puissance.

Nous présentons dans ce cours, une description de la machine, son principe de fonctionnement, son alimentation et ses avantages et ses inconvénients.

### 1-Description de la machine à reluctance variable

La MRV possède des pôles saillants sur le stator et le rotor. Chaque pôle du stator porte un bobinage concentrique. Le rotor ne porte aucun bobinage (voir figure (1)).

Pour le circuit électrique et au stator, chaque deux pôles diamétralement opposés porte un bobinage relié soit en paire soit en groupes pour former des phases statiques. Pour chaque phase, un circuit avec un seul commutateur contrôlé est suffisant pour fournir un courant unidirectionnel pendant les intervalles appropriés de rotation du rotor. Pour la conduite à

l'avant, l'enroulement de phase statique approprié doit rester excité seulement pendant la période où le taux de changement de l'inductance de phase est positif.

Le circuit magnétique d'un moteur à réluctance variable est constitué d'un stator et d'un rotor

**Le stator** : est un empilage de tôles découpées, encochées supportant les bobinages ou les phases.

**Le rotor** : étant la partie passive de la machine, il ne comporte ni conducteur ni aimant permanent. C'est une masse de tôles d'acier laminé et empilé formant ainsi un nombre de pôles égale à  $N_r$

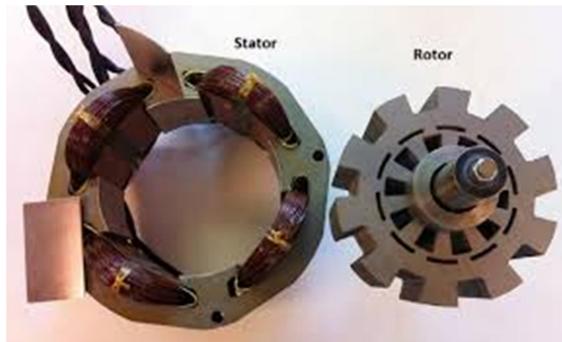


Figure (2-1) Stator et e rotor d'une MRV

Le nombre des pôles du stator est souvent différent du nombre des pôles rotoriques, pour éviter ainsi que le rotor reste immobile avec un couple de démarrage nul, lorsque les pôles rotoriques se trouvent coincés avec ceux du stator.

## 2-Principe de fonctionnement des MRV

Le principe de fonctionnement de la MRV peut être expliqué en se basant sur la figure (2). Quel que soit le type de la machine à réluctance variable étudié (cylindrique, linéaire, vernier à grosses dents ...) le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables [10]. Il peut être décrit à partir de l'étude d'une structure monophasée élémentaire identique à celle présentée ci-dessous

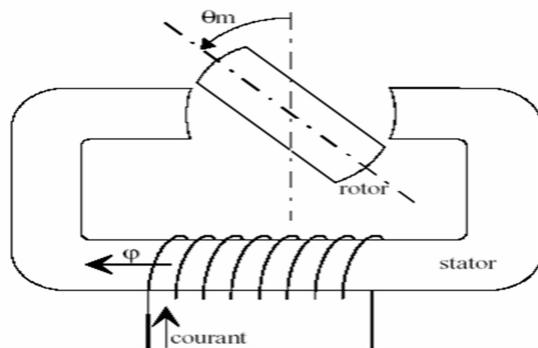


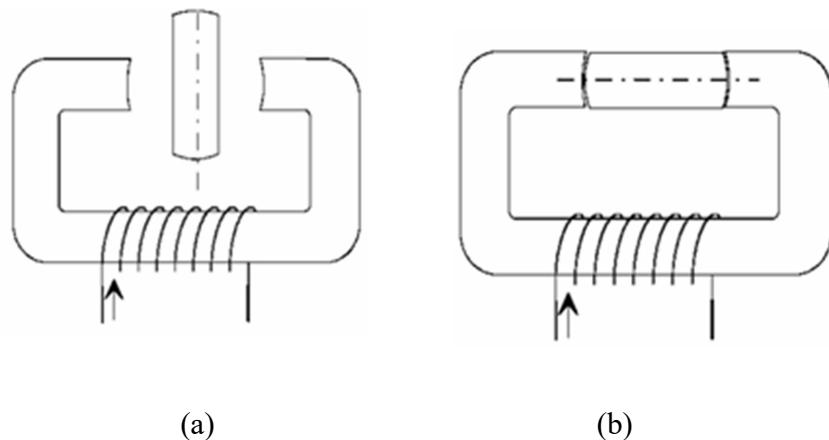
Figure (2) Machine à réluctance variable : structure élémentaire

Considérons le circuit magnétique de la figure (2), comprenant une culasse ferromagnétique fixe et une pièce ferromagnétique mobile autour d'un axe perpendiculaire au plan de la figure. La pièce mobile possède un plan de symétrie repéré par l'angle  $\theta_m$ , le circuit magnétique est embarrassé par un bobinage fixe. Il s'agit là de la structure de base d'une MRV, dont laquelle la rotation de la pièce mobile produit une variation de l'inductance du bobinage (induit). Sous certaines conditions, la conversion électromécanique de l'énergie est possible.

Cette structure de base est caractérisée par deux positions de rotor :

-Une position d'opposition (unaligned position) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale figure (3-a).

Une position illustrée par la figure (3-b) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale appelée position de conjonction



*Figure (3) Position d'opposition (a) et position de conjonction (b)*

Si le système se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction, et que l'on impose un courant dans l'enroulement d'excitation, le système évolue de façon à présenter une réluctance minimale (un flux maximal) entraînant le rotor vers une position (stable) de conjonction. Si l'énergie cinétique emmagasinée durant cette phase est suffisante, une fois le courant est coupé, pour assurer la rotation du rotor jusqu'à une position d'opposition, il est alors possible de répéter le cycle afin d'obtenir un mouvement de rotation continu. En alimentant le bobinage relativement à la position, on obtient alors un fonctionnement autopiloté synchrone. Dans l'exemple utilisé pour la description du principe, il apparaît que le système présente, pour un tour mécanique deux fois la même géométrie, on peut donc définir, pour une machine possédant deux dents rotoriques, l'angle électrique  $\theta_e$  :

En générale

$$\theta_e = 2\theta_m \quad (1)$$

$$\theta_e = Nr\theta_m \quad (2)$$

Avec  $\theta_m$  : l'angle mécanique

Le moteur à réluctance variable est un moteur électrique à double saillance ; le stator et le rotor sont à pôles saillants. Son principe de fonctionnement se base sur le phénomène de l'attraction du fer par les électroaimants. En effet, lorsque deux pôles opposés du stator sont excités, deux pôles du rotor s'alignent avec eux, mais un autre ensemble de pôles est hors alignement. L'alimentation d'une autre paire de pôles du stator amène encore une fois les pôles du rotor à l'alignement. De la même façon, et en commutant séquentiellement le courant dans les enroulements du stator, le rotor tourne.

### 3- Différentes topologies des MRV

#### 3-1 MRV Pures

La MRV dite "pure" a 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) qui la

distingue des machines synchrones et asynchrones. Une autre particularité est qu'elle n'est pas à champ tournant mais à champ « pulsé ».

On peut citer divers types de structures à réluctance pure

- Structures à double denture « simple » (« grosses dents ») et à 2 dents par phase.
- Structures à double denture « simple » (« grosses dents ») et 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 ».

Les différentes structures des MRV sont liées à leur utilisation dans des applications pas à pas. La différence entre les structures permet d'avoir des solutions au niveau de la résolution en position et le nombre de pas.



Figure (4) MRV pure à grosses dents

### 3-2 MRV Hybrides

Par rapport aux précédentes structures, la particularité des MRV hybrides réside dans l'intégration d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances. La figure (5) présente une MRV hybride. La présence d'aimants permanent permet d'augmenter le couple et réduire les ondulations du couple.

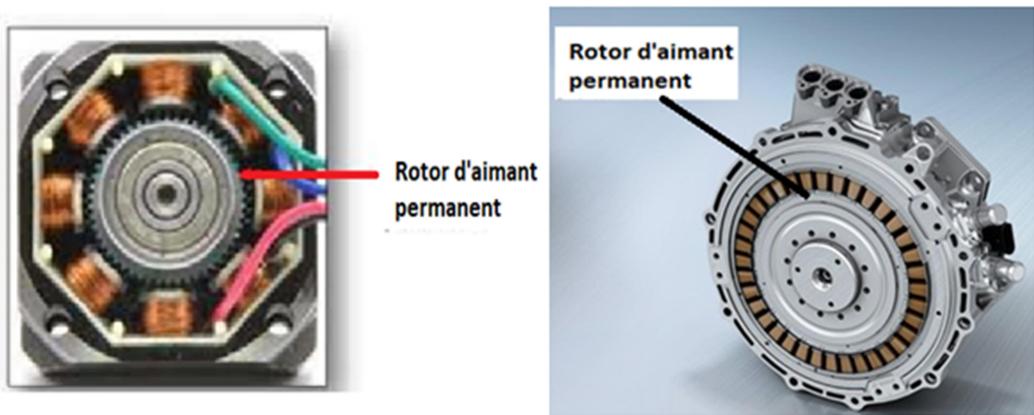


Figure (5) MRV hybride.

#### 4-Profile de l'inductance et expression du couple

L'expression du couple d'une MRV peut être développée en se basant sur le dispositif de la figure (2-6).

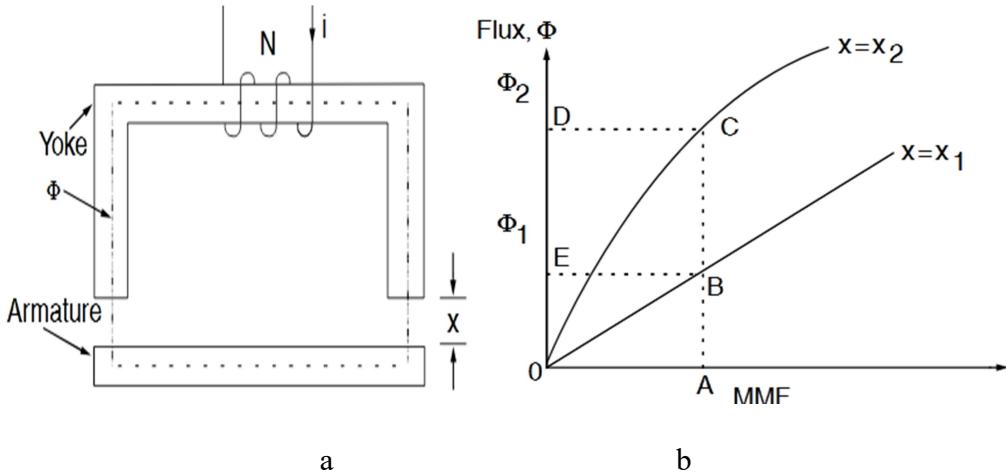
L'énergie électrique fournie au système est donné par :

$$w_e = \int e idt = \int idt \frac{dN\Phi}{dt} = \int Nid\Phi = \int FMMd\Phi \quad (3)$$

Où :

$e$  est la tension induite,  $FMM$  la force magnétomotrice.

Cette énergie électrique  $w_e$  est égale à la somme de l'énergie magnétique  $w_f$  stockée dans la bobine et l'énergie mécanique ( $w_m$ ) convertie en travail.



Figure(6) solénoïde (a), caractéristique flux-courant (b)

$$w_e = w_f + w_m \quad (2.4)$$

Si la partie mobile est fixe, l'énergie électrique égale dans ce cas l'énergie magnétique.

L'énergie magnétique est représentée par la surface OBEO (voir figure (2-6)).

Le complément de l'énergie magnétique appelé co-énergie est représentée par la surface OBAO.

De manière similaire dans la position 2. L'énergie magnétique correspond à la surface OCDO et la co-énergie à la surface OCAO.

La variation de l'énergie électrique est exprimée par :

Pour une FMM constante (point A), les différentes énergies sont dérivées comme suit :

$$\delta w_e = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} F_1 d\Phi = F_1(\Phi_2 - \Phi_1) = \text{surface (BCDEB)} \quad (5)$$

$$\delta w_f = \delta w_f|_{x=x_2} - \delta w_f|_{x=x_1} = \text{surface(OCDO)-surface(OBEO)} \quad (6)$$

Utilisant (2.2) à (2.4), l'incrément de l'énergie mécanique est donnée par :

$$\delta w_m = \delta w_e - \delta w_f = \text{surface (OBCO)} \quad (7)$$

Pour les machines tournantes, l'incrément de l'énergie mécanique en terme du couple électromagnétique et la variation de position du rotor est exprimé par :

$$\delta w_m = T_e \delta \theta \quad (8)$$

Avec  $T_e$  : couple électromagnétique et  $\delta \theta$  l'incrément de la position du rotor.

$$T_e = \frac{\delta w_m}{\delta \theta} \quad (9)$$

Le travail effectué par la pièce mobile est égal à taux de variation de la Co-énergie, il est donné par cette expression

$$\delta w_m = \delta w'_f \quad (10)$$

Avec

$$w'_f = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int (N \Phi) di = \int \lambda(\theta, i) di \quad (11)$$

Où

$L$  : inductance

$\lambda$  : le Flux (flux linkage) qui est fonction de la position et le courant.

Cette variation de la Co-énergie est effectuée entre deux positions  $\theta_1$  et  $\theta_2$ .

Le couple électromagnétique développé est exprimé comme suit :

$$T_e = \frac{\delta w_m}{\delta \theta} = \frac{\delta w'_f}{\delta \theta} = \frac{\delta w'_f}{\delta \theta} \Big|_{i \text{ constant}} \quad (12)$$

Si l'inductance varie linéairement avec la position du rotor pour un courant donné, ce qui est n'est pas le cas de façon générale, donc le couple est donné par cette expression

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{i^2}{2} \quad (13)$$

Où

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \Big|_{i \text{ constant}} \quad (14)$$

A partir de l'expression du couple, on peut tirer les conclusions suivantes

- 1- Le couple dépend du carré du courant, donc le signe de ce dernier n'a pas d'important. L'alimentation par un courant unidirectionnel est possible.

- 2- Le couple est proportionnel au carré de l'induction, cette machine ressemble à la machine à courant continu à excitation série, donc elle possède un bon couple de démarrage.
- 3- Le changement de sens de rotation est possible en inversant les séquences des phases du stator.
- 4- L'inductance mutuelle entre phase est faible et par conséquence elle est généralement négligée.[12]

## 5-Alimentation et commande

La commande, l'alimentation et la machine étant considérées comme trois **blocks** distincts en cascade. Le moteur (SRM), le convertisseur et le contrôleur.

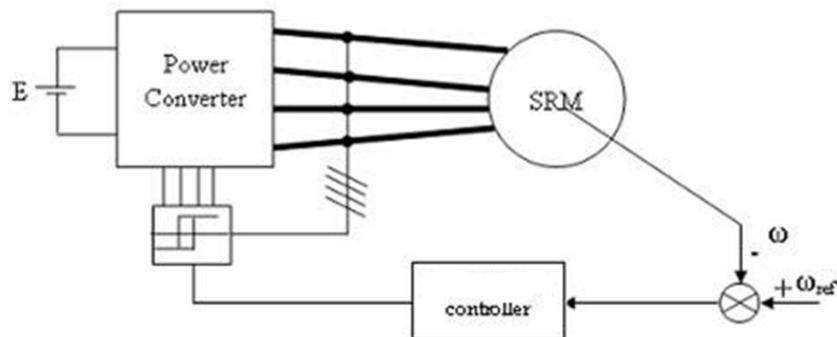


Figure (7) Eléments intervenant dans l'entraînement de la MRV

Le convertisseur statique permet d'imposer à la machine des tensions à amplitude et fréquence variable. Il existe essentiellement deux sortes (types) de convertisseur statique permettant d'imposer des tensions ou des Courants variable en amplitude et en phase : Cyclo-convertisseur et les Onduleurs. Le contrôleur permet la commande en vitesse du moteur.

### 5-1 Circuit de puissance

Le moteur à réductance variable se contente d'une alimentation unidirectionnelle pour chaque phase puisque le sens du courant n'a aucune importance pour les phénomènes de réductance variable. Ce courant, en forme de crêteau, doit s'établir

rapidement, être maintenu à peu près constant, puis décroître rapidement. Plusieurs solutions existent pour réaliser le circuit de puissance de l'alimentation du moteur. La complexité du convertisseur dépend bien sûre de nombre de phases de la machine, mais aussi des exigences sur les performances et la souplesse d'emploi du montage.

Plusieurs solutions existent pour réaliser le circuit de puissance. La plus importante est le convertisseur en demi-pont (Half Bridge Converter).

### 5-2 Convertisseur en demi-pont(Half Bridge Converter)

Le montage en demi-pont est le plus utilisé pour la commande d'une MRV. Ce montage nécessite deux interrupteurs de puissance (transistor, IGPT) et deux diodes par phase. Ce montage pour une phase est montré sur la figure (8).

Pour faire croître le courant dans la phase A, il faut fermer l'interrupteur S1 et S2 dans ce cas les diodes D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> sont restées bloquées. Si le courant dépasse la valeur de commande (courant de référence), les deux interrupteurs S1 et S2 s'ouvrent et les diodes D<sub>1</sub> et D<sub>2</sub> deviennent passantes. Le courant de référence I<sub>p</sub> est imposé pendant la pente positive de l'inductance. Pour imposer ce courant on le compare avec le courant de phase puis l'erreur est fournie à un contrôleur à hystérésis avec fenêtre  $\Delta i$ . Lorsque l'erreur de contrôleur est supérieure à  $\Delta i$  on ouvre les interrupteurs S1 et S2. Lorsque l'erreur de décontrôleur est inférieure à  $\Delta i$ , on ferme les interrupteurs. Voir figure (9)[13]

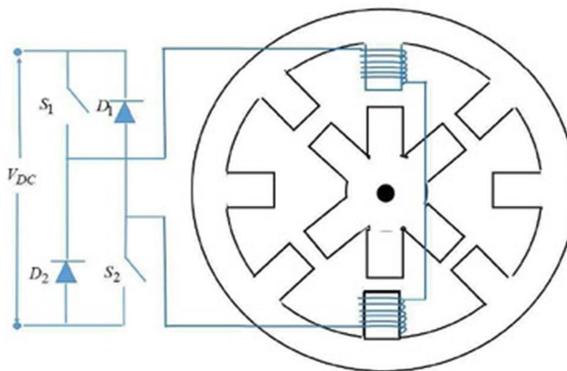


Figure (8) Convertisseur demi-pont pour une phase de la MRV

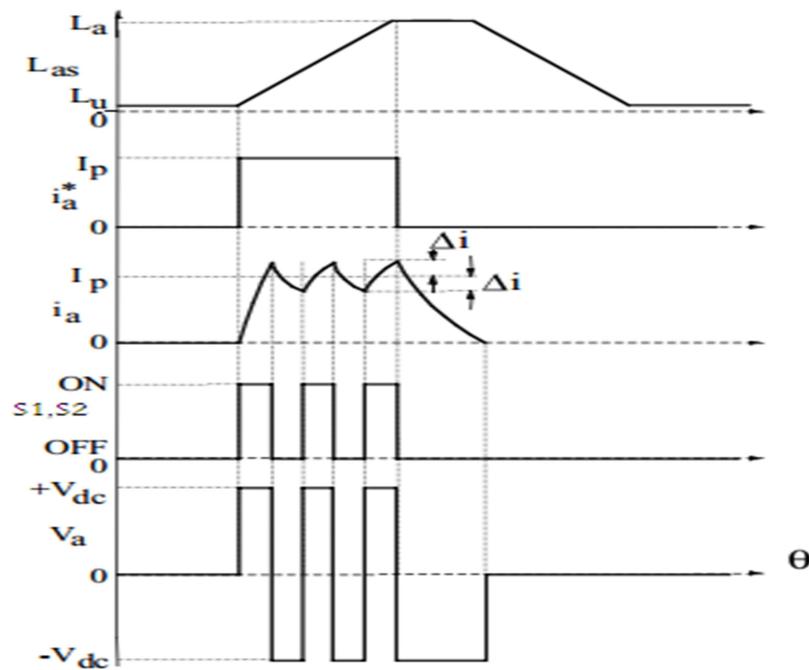


Figure (9) Inductance de phase, tension et courant pour un fonctionnement à faible vitesse avec contrôleur à hystérésis

La tension appliquée aux bornes d'une phase change en fonction de l'état des interrupteurs (figure (10))

$$S_1 \text{ et } S_2 \text{ ON } D_1 \text{ et } D_2 \text{ OFF } V_{dc} = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (15)$$

$$S_1 \text{ et } S_2 \text{ OFF } D_1 \text{ et } D_2 \text{ ON } -V_{dc} = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (16)$$

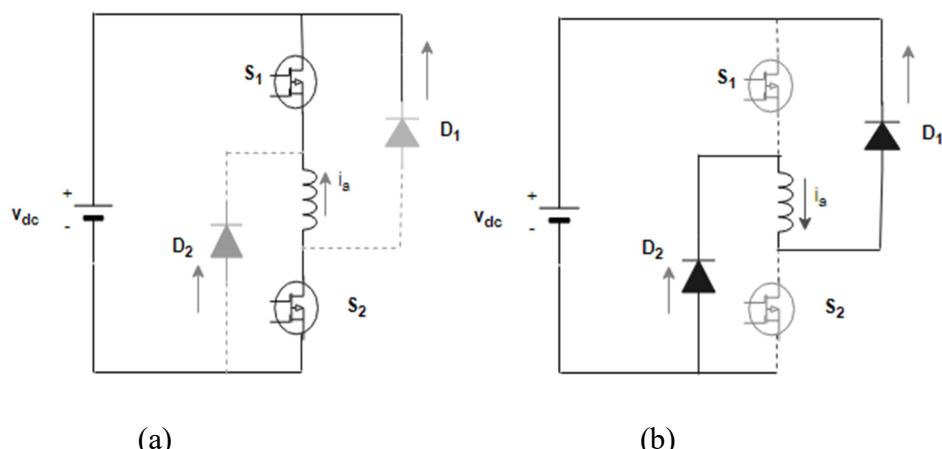


Figure (10) Etats des interrupteurs (a) ( $S_1, S_2$ ) ON ( $D_1, D_2$ ) OFF

(b) (S1,S2) OFF (D1,D2) ON

### 5-3 Commande en vitesse

L'utilisation de la MRV dans des véhicules électriques nécessite une souplesse dans la variation de vitesse. Car les VE sont toujours soumis à des variations de vitesse.

L'avantage principal de la MRV réside dans sa commande qui est relativement simple par rapport à une machine synchrone à aimants permanents.

Le contrôleur de vitesse permet de minimiser l'erreur entre la vitesse de référence (la vitesse désirée) et la vitesse mesurée (voir figure(7)). Le contrôleur donne la valeur du courant de référence qu'il faut imposer aux phases du stator. Cette expression est donnée par :

$$i_{ref} = \kappa_p (w_{ref} - w) + \kappa_i \int (w_{ref} - w) dt \quad (17)$$

Ce courant est imposé à l'aide d'un contrôleur à hystérésis.

### 6- Modèle mathématique de la MRV

Le circuit équivalent de la MRV est composé d'une résistance et une inductance en série, voir figure (12). Les effets de saturation magnétique, flux de fuite et couplage entre phases ne sont pas considérée.

La loi de Kirchhoff des tensions (LKT) appliquée sur le circuit équivalent donne :

$$u = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (18)$$

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i)i \quad (19)$$

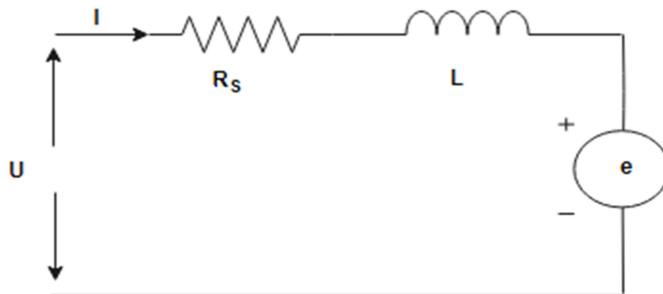


Figure (12) Circuit équivalent d'une phase de la MRV

$$u = R_s i + L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot w_r \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (20)$$

$R_s$  : est la résistance d'une seule phase.

$w_r$  : Vitesse de rotation

$L(\theta, i)$  : Inductance d'une phase

Pour une machine avec  $m$  phase, le système d'équations de la machine peut être résumé comme suit

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{L_k(\theta, i)} \left[ V_{dc} - R_s i_k - i_k w_r \frac{dL_k(\theta, i)}{d\theta} \right] \quad k=1,2,\dots,m \quad (21)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w_r \quad (2.22)$$

$$\frac{dw_r}{d\theta} = \frac{1}{J} \left[ \sum_{k=1}^m \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k(\theta, i)}{d\theta} - \beta w_r - T_{charge} \right] \quad (23)$$

Où :

$J$ : l'inertie de machine

$\beta$  : le coefficient de frottement

$T_{charge}$ : couple résistant qui représente l'effet de la charge.

## 7-Avantages et inconvénients des MRV

### Avantages

- Structure électromagnétique simple
- Robustesse
- Bonne tenue mécanique ce qui permet à la machine de tourner à des vitesses élevées.
- Possibilité de fonctionner dans des environnements sévères
- Tolérance aux défauts
- Pas de bobinage ni aimant sur le rotor, donc faible coût de fabrication [14]

### Inconvénients

- Ondulations de couple importantes à haute vitesse
- Vibrations du circuit magnétique et bruit acoustique