

MOTOR SÍNCRONO DE RELUTÂNCIA

Este artigo faz uma pequena contextualização histórica sobre o desenvolvimento do motor síncrono de relutância, descreve a sua constituição, aborda o seu princípio de funcionamento e descreve o seu modelo matemático e principais características.

1. Introdução

Atualmente, as máquinas elétricas estão presentes na maioria das aplicações industriais, em algumas aplicações domésticas, aerospaciais e mesmo na indústria automóvel. Sabe-se que no setor industrial são responsáveis pelo consumo da maior parte da energia elétrica [1].

A máquina de indução, nomeadamente no seu funcionamento como motor (MI) continua a ser a máquina mais utilizada a nível mundial nas diversas aplicações industriais devido a ter um custo inferior relativamente a outras alternativas, à sua robustez e também à possibilidade de funcionamento sem recurso a conversores de potência, ou seja, ligado diretamente à rede elétrica. No entanto, com a necessidade de sistemas cada vez mais eficientes do ponto de vista energético, quer seja nas aplicações industriais, no setor residencial ou mesmo na indústria automóvel, o motor de indução fica um pouco em desvantagem devido essencialmente à existência de perdas nos seus enrolamentos rotóricos, que fazem com que o seu rendimento seja inferior ao de outras máquinas elétricas [2]. Consequentemente, as máquinas síncronas surgem como principal alternativa à de indução, não só devido ao seu superior rendimento, mas também devido à maior facilidade de controlo face à de indução.

Com o recurso a este tipo de máquinas, encontram-se aplicações que utilizam as máquinas síncronas de ímanes permanentes (MSIP) ou na literatura inglesa (PMSM – permanente *magnet synchronous machine*) e, mais recentemente, as máquinas síncronas de relutância (MSR) ou na literatura inglesa (SynRM – *Synchronous reluctance machine*).

As primeiras, por usarem ímanes permanentes, tornam o seu custo mais elevado e, por outro lado, quando sujeitos a elevadas temperaturas tendem a desmagnetizar com o passar do tempo. As últimas, têm sido foco de investigação na última década, devido a apresentarem alguns benefícios face ao convencional motor de indução trifásico (MIT) em aplicações onde é requerido baixo custo inicial, elevada fiabilidade e robustez. Assim, o MSR apresenta vantagens face às principais alternativas que são o MIT e a MSIP [3].

Embora também se produzam motores síncronos de relutância com ímanes permanentes, como o utilizado no automóvel da marca Tesla, modelo 3 (IPM-SynRM)¹, neste documento o foco será para os tipos de rotor que não utilizam estes materiais obtidos a partir de terras raras.

A Figura 1 mostra a imagem de um motor síncrono de relutância desenvolvido pela ABB² denominado de SynRM. O seu projeto inovador confere-lhe um elevado rendimento assim como uma elevada densidade de binário.



Figura 1 – Imagem do motor síncrono de relutância (SynRM ABB)

¹ <https://www.tesmanian.com/blogs/tesmanian-blog/model-3-motor>

² <https://new.abb.com/motors-generators/pt/>

Os primeiros artigos sobre o MSR surgiram no início do século XX, quando, em 1920, Kostko desenvolveu um modelo para atender a solicitações da indústria, que necessitavam de máquinas que funcionassem com velocidade constante. Nos modelos iniciais, este motor possuía uma gaiola no rotor para permitir o seu arranque direto, funcionando como um motor assíncrono, e também prevenir oscilações de velocidade do rotor em torno da velocidade de sincronismo. A Figura 2 ilustra alguns tipos de estruturas de rotor com gaiola utilizados atualmente em alguns MSR.

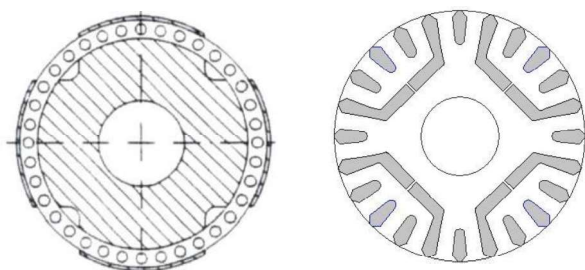


Figura 2 – Estruturas de rotor com gaiola

A utilização de um rotor com gaiola comprometia o desempenho deste tipo de motor, levando à diminuição do fator de potência e das densidades de potência e binário, pelo que estes motores foram pouco utilizados até há poucos anos. Outro fator bastante importante que levou à baixa utilização do MSR foi o seu baixo rendimento, que está relacionado com o baixo índice de saliência³ do rotor (ξ).

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (1)$$

O problema da baixa saliência foi ultrapassado com o desenvolvimento de novas estruturas do rotor, levando à obtenção de rendimentos mais elevados. Este assunto será abordado mais à frente neste documento. Nos modelos mais atuais, como a ligação à rede é feita através de conversores eletrónicos de potência, as estruturas do rotor não necessitam de enrolamentos amortecedores como tinham inicialmente.

³ Razão das indutâncias dos enrolamentos estáticos segundo os eixos direto (d) e de quadratura (q).

O conversor eletrónico de potência para ligação do MSR é semelhante aos utilizados para acionamentos de motores de indução trifásicos (MIT), como ilustrado na Figura 3.



Figura 3 – MSR moderno com conversor de potência (ABB)

2. Constituição

O MSR, na sua constituição, não tem qualquer tipo de contato entre o estator e o rotor como acontece por exemplo nas convencionais máquinas síncronas ou no MIT. Este facto reflete-se numa elevada fiabilidade destas máquinas. Por outro lado, o estator do MSR é semelhante ao de outras máquinas de corrente alternada (CA), como é o caso do MIT, onde os enrolamentos estão distribuídos ao longo da sua periferia. De facto, a carcaça, a caixa de ligações, o estator, os enrolamentos do estator e as chumaceiras são idênticas a qualquer motor de corrente alternada convencional.

A estrutura estática é basicamente composta por um núcleo laminado de chapas de material ferromagnético tratado termicamente, com a finalidade de reduzir quer as perdas histeréticas quer as perdas por correntes de Foucault. Estas chapas têm ranhuras distribuídas ao longo da periferia interior onde estão alojados os enrolamentos trifásicos, normalmente distribuídos.

A Figura 4 ilustra um estator de uma máquina CA que pode ser utilizado num MSR considerando que, para a mesma carcaça, o MSR tenha potência superior [3].



Figura 4 – Estátor de uma máquina de CA

Em comparação com as máquinas CA tradicionais, o rotor é o elemento diferenciador. Este caracteriza-se por ser constituído por um núcleo de material ferromagnético de geometria anisotrópica que faz com que a relutância magnética seja variável em função do ângulo de rotação. A anisotropia é conseguida com diferentes topologias construtivas da estrutura do rotor, como se mostrará adiante. Assim, o rotor é construído de forma que, quando magnetizado pelo campo magnético girante, produzido pelas correntes que circulam nos enrolamentos do estátor, apresente pólos magnéticos temporários que são responsáveis pela sua rotação. Este fenómeno baseia-se no princípio da relutância magnética que tende a manter o fluxo magnético a percorrer sempre o mesmo caminho, o de menor relutância [4].

Desta foram, o rotor é construído de modo a conseguir-se uma maior diferença entre as indutâncias segundo o eixo direto (L_d) e o eixo transversal ou quadratura (L_q). De facto, neste motor, o binário desenvolvido depende diretamente desta diferença ($L_d - L_q$). A Figura 5 ilustra um rotor de um MSR com indicação dos eixos direto (d) e transversal ou quadratura (q), mostrando também os caminhos de alta e baixa permeabilidade magnética.

A Figura 6 mostra a evolução do MSR desde a sua criação em 1920, relativamente ao desenvolvimento de diferentes estruturas de rotor.

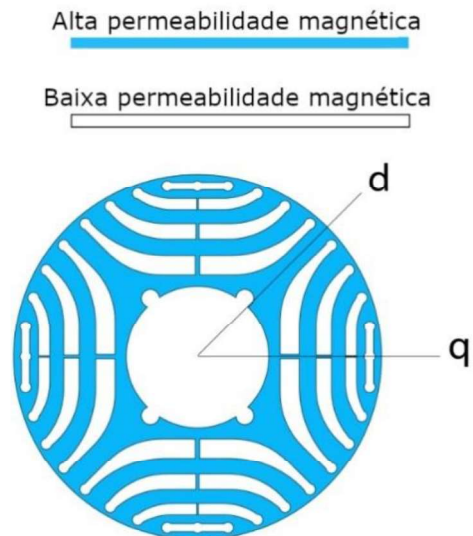


Figura 5 – Rotor de um MSR, com indicação dos eixos direto (d) e transversal (q)

Como é visível na figura, o MSR sofreu uma considerável evolução das estruturas do rotor até aos dias de hoje. Inicialmente eram utilizados rtores de máquinas existentes na altura, como o do MIT ou de máquinas síncronas tradicionais, que eram adaptados para funcionarem pelo princípio da relutância magnética. A utilização destes tipos de rtores modificados não era satisfatória, pelo que estas máquinas não foram muito utilizadas com essas adaptações.

Para se conseguir um motor que fosse competitivo era necessário desenvolver uma estrutura de rotor com um maior índice de saliência (ξ). Esse passo foi dado por Kostko, que adicionou barreiras de fluxo ao rotor, Figura 6 (a), obtendo um índice de saliência mais elevado do que os projetos existentes até então. De qualquer forma, as estruturas de rotor ilustradas na Figura 5 (a), (b), (c), apresentavam alguns problemas devido ao baixo índice de saliência $\xi = \frac{L_d}{L_q} < 4$.

Por outro lado, com as estruturas (d) e (e), conseguiram-se índices de saliência $\xi > 4$, que permitiu obter motores com o mesmo tamanho do MIT para a mesma potência. O problema que persistia era o elevado custo de fabrico e o motor ainda apresentava baixos valores de fator de potência [5].

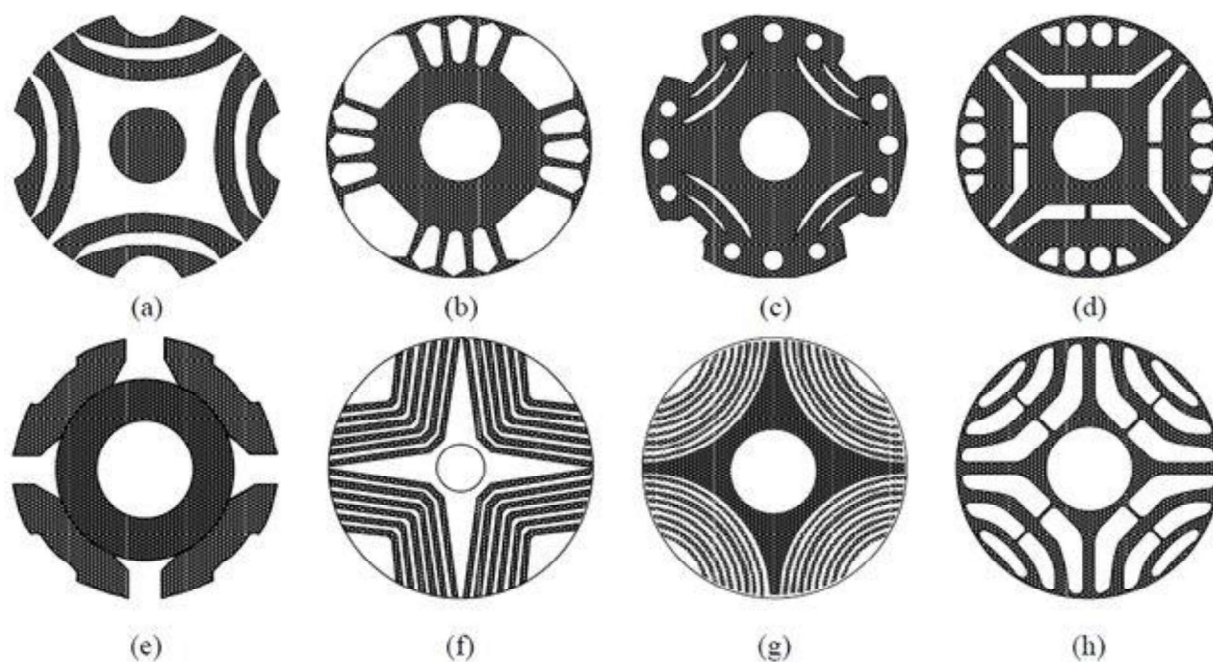


Figura 6 – Evolução do MSR no desenvolvimento de diferentes estruturas de rotor. (a) rotor Kostko original; (b) rotor adaptado de um motor de indução; (c) rotor com múltiplas barreiras; (d) rotor com segmentos saturáveis; (e) rotor segmentado; (f) rotor laminado axialmente em 'V'; (g) rotor laminado axialmente em 'U'; (h) rotor moderno laminado transversalmente. (adaptado [7])

Mais recentemente, foram desenvolvidas as estruturas de rotor axialmente laminadas em 'V' ou em 'U', onde se conseguem obter índices de saliência na ordem de 7 ou superiores, o que melhora significativamente o desempenho deste tipo de motores relativamente ao binário e fator de potência, mas ainda com custos de produção a ter em conta. Já nos modelos mais atuais, (h), é possível obter índices de saliência em torno de 10 [6].

Os principais tipos de rotor de um MSR são o rotor de pólos salientes, o rotor axialmente laminado e o rotor transversalmente laminado, como ilustra a Figura 7.

Como referido anteriormente, as estruturas de rotor com melhores resultados em termos do índice de saliência são as laminadas axialmente (ALA) e as laminadas transversalmente (TLA). Nas últimas, é mais prático a conceção das barreiras de fluxo e a sua colocação numa posição ótima. No caso das estruturas de rotor ALA, como é necessário retirar ferro do núcleo rotórico, leva a uma maior saturação dos caminhos de fluxo segundo o eixo direto, havendo um aumento considerável das perdas no ferro neste tipo de estrutura de rotor [8].

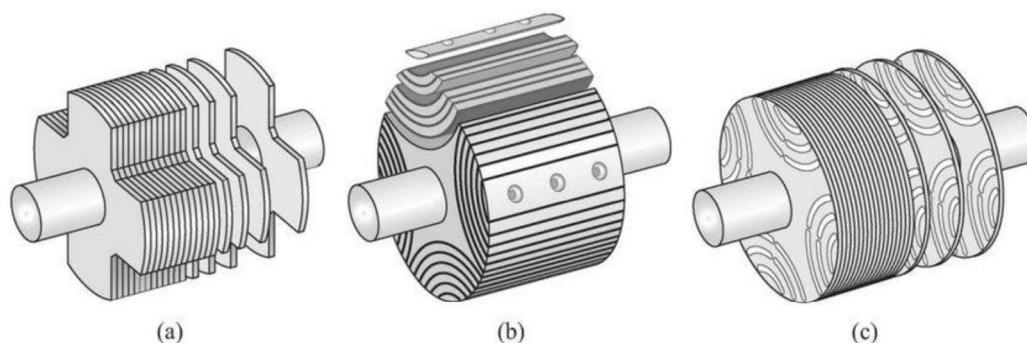


Figura 7 – Tipos de rotor do MSR. (a) rotor de pólos salientes simples; (b) rotor laminado axialmente; (c) rotor laminado transversalmente [9].

Como já referido, a utilização do MSR era residual pelo facto do seu rendimento ser baixo e, como a estrutura do rotor tinha gaiola para permitir o arranque direto da rede, causava problemas de estabilidade também não se conseguiam grandes binários de arranque. Este problema foi mitigado pelo desenvolvimento de novas estruturas de rotor e também com o desenvolvimento de conversores eletrónicos de potência. Além disso, é possível construir o MSR a partir de um MIT, utilizando o mesmo estator, conforme comparação representada na vista em corte da Figura 8, apenas alterando o rotor.

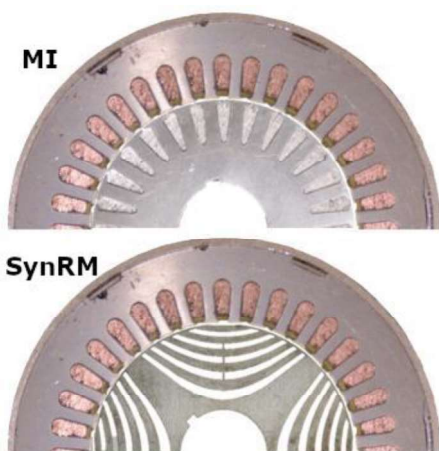


Figura 8 – Vista em corte de um MI e de um MSR (SynRM)
(adaptado de [10]).

3. Princípio de funcionamento

Contrariamente a outros motores cujo funcionamento se baseia no princípio de reação ou interação entre dois campos magnéticos produzidos por correntes ou ímanes permanentes, o princípio de funcionamento do MSR assenta na relutância magnética.

Como noutra máquina CA trifásica, quando se alimenta o estator com um sistema trifásico e equilibrado de correntes sinusoidais, é criado um campo magnético girante no entreferro com velocidade que depende diretamente da frequência e inversamente do número de pólos do motor. Na presença deste campo magnético, o rotor fica magnetizado de forma não permanente, pois é constituído por material ferromagnético.

Nesta situação, o sentido de menor relutância do rotor, ou eixo direto, tende a alinhar-se e a acompanhar esse campo girante de modo a minimizar a relutância do circuito.

Esta ideia está ilustrada na Figura 9. Na presença de um fluxo magnético (ψ), o rotor anisotrópico vai tender a alinhar-se de modo que o ângulo (δ) entre o eixo direto e o fluxo magnético seja nulo.

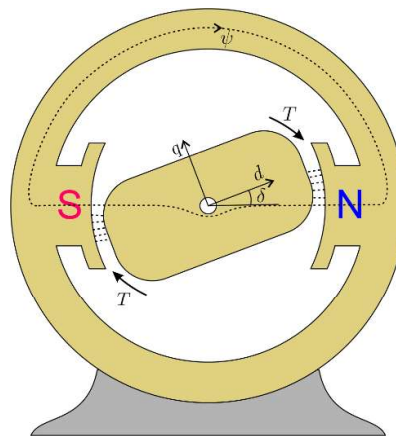


Figura 9 – Motor de relutância elementar

Nesta situação, o rotor vai sofrer a ação de um binário (T) que vai atuar de modo a diminuir a energia potencial do sistema ($\delta \rightarrow 0$). Se o ângulo de carga (δ) for mantido constante, devido, por exemplo, a uma carga acoplada ao veio, então a energia eletromagnética vai ser continuamente convertida em energia mecânica. A corrente que circula pelos enrolamentos do estator é a responsável quer pela produção do campo girante quer pela produção de binário, que pode ser feito controlando o ângulo de corrente da máquina (θ), que é o ângulo entre o fasor da corrente de magnetização \underline{I}_m e o eixo direto do rotor no referencial síncrono [11].

Por outras palavras, o binário é produzido no entreferro se o vetor campo magnético e o sentido de maior permeabilidade magnética não estejam alinhados, como ilustrado na Figura 10. Este desfasamento é normalmente denominado de ângulo de carga e depende tanto da inércia mecânica do motor como do binário de carga aplicado ao veio. A figura ilustra também as densidade de fluxo magnético num MSR moderno de 4 pólos.

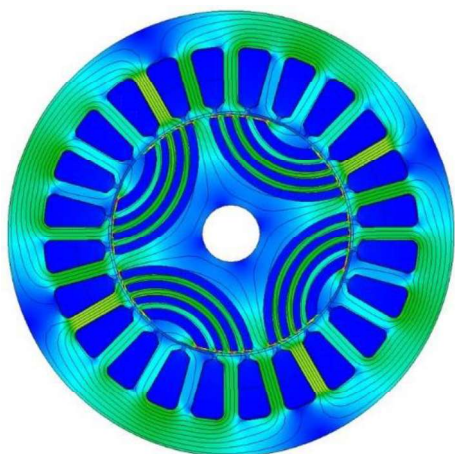


Figura 10 – Densidades de fluxo num MSR moderno de 4 pólos [12]

Pelo que foi referido, percebe-se que o binário produzido depende em grande escala das relutâncias segundo os eixos direto e transversal. Desta forma, quanto maior a diferença entre as reatâncias dos eixos direto (X_d) e transversal (X_q), maior será o binário produzido. Esta análise pode ser igualmente feita sob o ponto de vista das indutâncias, pelo facto do circuito ser praticamente indutivo. De facto, como o campo magnético no entreferro é produzido exclusivamente pelo fluxo magnético do estátor, a corrente absorvida pelo motor será maioritariamente reativa. Esta situação leva a que o fator de potência seja muito baixo. Como este depende do índice de saliência, quanto mais elevado for este índice menores serão as dificuldades causadas pelo baixo fator de potência [13].

Nestas máquinas a inexistência de enrolamentos no rotor leva a que apenas existam perdas de joule no estátor. Este aspeto resulta numa menor temperatura no interior do motor e, conseqüentemente, num aumento da durabilidade dos diversos componentes mecânicos que o constituem. Por outro lado, a magnetização do rotor através da corrente que circula no estátor, leva a um aumento destas perdas do lado do estátor. De qualquer forma, verifica-se um aumento do rendimento do MSR comparativamente ao de outras máquinas.

A Figura 11 mostra um comparativo das perdas existentes num motor de indução trifásico convencional e um motor síncrono de relutância classe IE5. Este último não tem perdas de joule no rotor, pelo que terá rendimentos superiores.



Motor de indução convencional



Motor Síncrono de Relutância (SynRM) IE5

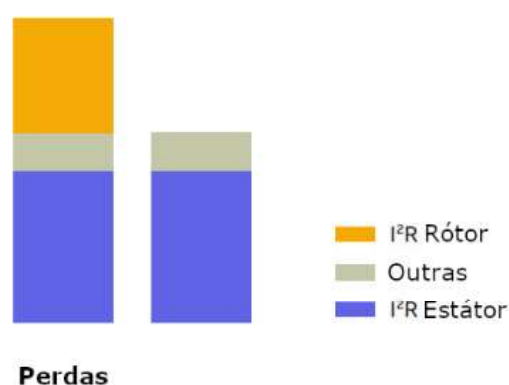


Figura 11 – Comparação entre MIT e MSR no que se refere às perdas⁴

⁴ Imagem adaptada de: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107743&LanguageCode=en&DocumentPartId=IE5&Action=Launch>

4. Modelo do MSR

Como já referido, a produção de binário no MSR é explicada pelos conceitos da relutância magnética e do campo magnético girante produzido pela passagem de corrente nos enrolamentos que estão distribuídos pelas ranhuras do estátor. Desta forma, a única ligação entre o estátor e o rótor é o campo magnético que passa pelo estreito entreferro. As linhas de fluxo do estátor rodam à velocidade de sincronismo e o rótor deve manter-se alinhado com elas de forma contínua. Assim, também o rótor roda à velocidade de sincronismo logo que fique alinhado com o campo magnético girante do estátor (regime permanente).

Na obtenção do modelo aqui apresentado para o MSR, foi considerado o seguinte: o rótor do MSR não contém enrolamentos, gaiola ou ímãs permanentes na sua estrutura. Além disso, como os enrolamentos do estátor têm distribuição sinusoidal, a presença de harmónicos no fluxo de ligação no entreferro contribuem para um termo adicional na indutância de fugas do estátor [14]. Assim, as equações de Park usadas para modelar a máquina síncrona convencional serão usadas para obtenção o modelo do MSR [2], [14], [15].

O circuito equivalente do MSR encontra-se ilustrado na Figura 12. Todas as perdas do ferro no circuito equivalente foram transferidas para o estátor (R_{cs}), sendo a resistência equivalente às perdas no ferro do rótor (R_{cr}) desconsiderada, por simplicidade.

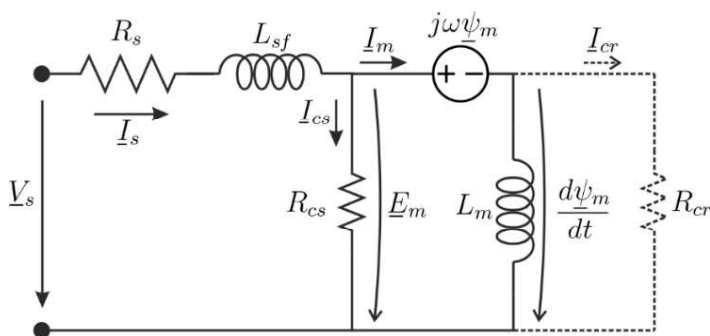


Figura 12 – Circuito equivalente do MSR, incluindo as perdas totais no ferro (adaptado de [15])

Assim, de acordo com as equações de Park, as equações fasoriais do MSR segundo os eixos direto e transversal, no referencial síncrono para a velocidade de base, podem ser escritas da seguinte forma:

$$\underline{V}_s = \underline{E}_m + R_s \underline{I}_s + j\omega L_{sf} \underline{I}_s \quad (2)$$

$$\underline{E}_m = \frac{d\psi_m}{dt} + j\omega \underline{\psi}_m \quad (3)$$

onde $\underline{V}_s = V_d + jV_q$ é o fasor da tensão de alimentação por fase, $\underline{I}_s = I_{sd} + jI_{sq} = \underline{I}_m + \underline{I}_{cs}$ é o fasor da corrente por fase do estátor, \underline{E}_m é a f.c.e.m. por fase do estátor, R_s é a resistência por fase do estátor, L_{sf} é a indutância de fugas por fase do estátor, ψ_m é o fluxo de ligação no entreferro e ω é a velocidade angular elétrica do referencial síncrono.

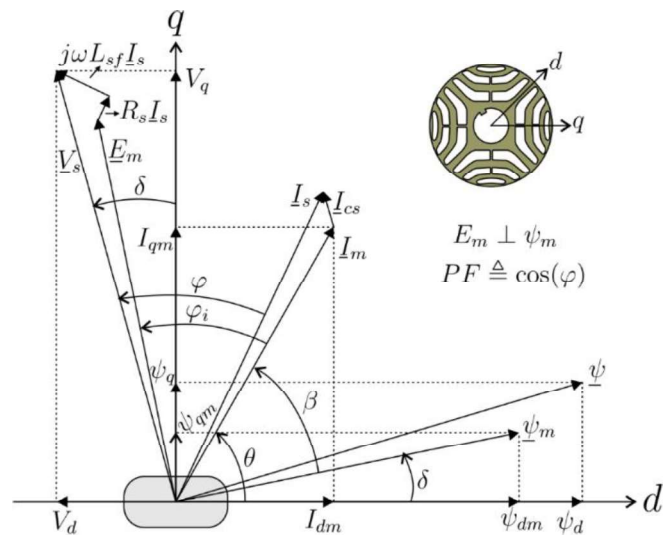


Figura 13 – Diagrama fasorial do MSR no referencial síncrono (adaptado de [15])

A Figura 13 ilustra o diagrama fasorial do MSR incluindo as perdas no ferro. Como os fluxos de magnetização ψ_{dm} e ψ_{qm} são altamente não lineares, são geralmente expressos por:

$$\psi_{dm} = \psi_{dm}(I_{dm}, I_{qm}, \theta_r) = L_{dm}(I_{dm}, I_{qm}, \theta_r) I_{dm} \quad (4)$$

$$\psi_{qm} = \psi_{qm}(I_{dm}, I_{qm}, \theta_r) = L_{qm}(I_{dm}, I_{qm}, \theta_r) I_{qm} \quad (5)$$

onde θ_r é o ângulo do rótor em relação ao referencial do estátor.

O efeito típico da saturação segundo os eixos direto e transversal está ilustrado na Figura 14. Como se pode verificar, as indutâncias de magnetização estão afetadas pela saturação e saturação magnética cruzada, mas o efeito da saturação no eixo transversal é muito inferior que no eixo direto, devido à presença das barreiras de fluxo na estrutura do rotor (eixo q).

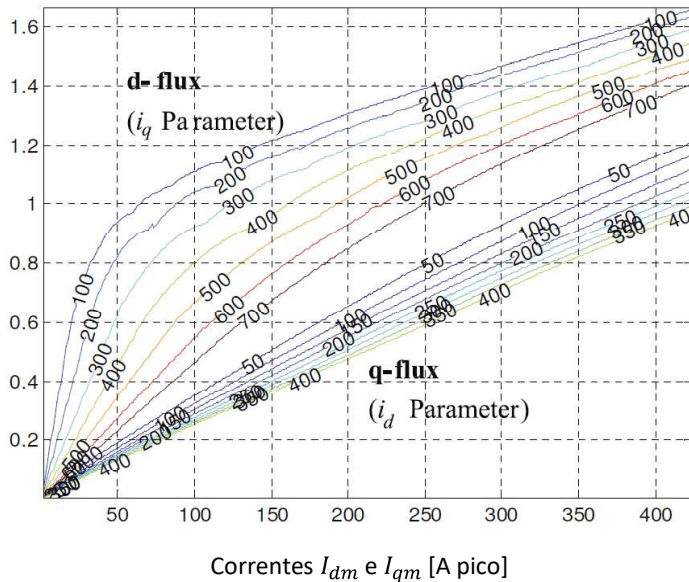


Figura 14 – Fluxos no estator segundo eixos d e q, com saturação (simulação) (adaptado de [11])

Desta forma, como referido, as maiores fontes de não linearidade são a saturação, os efeitos das ranhuras e a saturação magnética cruzada. O fenómeno de saturação cruzada ocorre quando a corrente elétrica que percorre o enrolamento estatórico segundo um eixo interfere no valor da indutância do enrolamento estatórico segundo o outro eixo (curvas com correntes superiores na Figura 14). Na realidade, o fluxo segundo o eixo direto será mais influenciado pela corrente segundo o eixo transversal, provocando uma desmagnetização do eixo direto. Estes efeitos traduzem-se inevitavelmente por uma redução do binário.

Como visível pela figura, o fluxo segundo o eixo direto não pode ser considerado ter variação linear com a corrente, ao contrário do fluxo segundo o eixo transversal. Assim, é aceitável considerar a indutância segundo o eixo transversal constante, ao contrário da indutância segundo o eixo direto [14].

Os efeitos destas não linearidades no fluxo do estator $\underline{\psi} = \psi_d + j\psi_q$ são modelados pela utilização do fluxo de ligação no entreferro $\underline{\psi}_m = \psi_{dm} + j\psi_{qm}$, também incluído na Figura 13. Desprezando os efeitos da saturação magnética cruzada, o fluxo de magnetização pode ser escrito da seguinte forma:

$$\underline{\psi}_m = L_{dm}I_{dm} + jL_{qm}I_{qm} \quad (6)$$

onde I_{dm} , I_{qm} e L_{dm} , L_{qm} são respetivamente as correntes de magnetização e indutâncias de magnetização segundo os eixos direto e transversal no referencial síncrono. Desta forma, em regime permanente, sendo $\frac{d\psi_m}{dt} \cong 0$, substituindo (3) e (6) em (2), pode obter-se a tensão da máquina nas suas componentes direta e quadratura como se mostra a seguir:

$$\underline{V} = (-\omega L_{qm}I_{qm} + R_s I_{dm}) + j(\omega L_{dm}I_{dm} + R_s I_{qm}) \quad (7)$$

$$\underline{V}_d = -\omega L_{qm}I_{qm} + R_s I_{dm} \quad (8)$$

$$\underline{V}_q = \omega L_{dm}I_{dm} + R_s I_{qm} \quad (9)$$

Com base nas equações e diagramas anteriores, o modelo matemático do MSR fica definido, sendo agora possível analisar o desempenho do motor. De qualquer forma, para avaliar o desempenho do MSR é interessante conhecer outras características e parâmetros também importantes, como o binário, o fator de potência, o rendimento, as perdas, etc. O binário do MSR é produzido pela interação do fluxo no entreferro com a correspondente corrente de magnetização. A partir da Figura 13 e das equações (1), (3) e (6), diferentes expressões para o binário podem ser obtidas [15]:

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_m I_m \sin(\beta) \quad (10)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (L_{dm} - L_{qm}) I_{dm} I_{qm} \quad (11)$$

$$T_e = \frac{3}{2}p(L_{dm} - L_{qm})I_m^2 \sin(2\theta) \quad (12)$$

$$T_e = \frac{3}{2}p(\xi - 1) \left(\frac{E_m}{\omega L_{dm}} \right)^2 \sin(2\delta) \quad (13)$$

onde p é o número de pares de pólos do MSR.

Pelas equações anteriores conclui-se que, para uma determinada tensão e velocidade de funcionamento, o binário desenvolvido depende do índice de saliência ($\xi = \frac{L_{dm}(l_{dm})}{L_{qm}}$) e tem um valor máximo para um determinado valor de ângulo de carga (δ) ou ângulo de corrente (θ).

Uma vez que, em funcionamento normal, o controlo direto do ângulo de carga não é viável, o ângulo de corrente é o parâmetro selecionado para controlar a posição do rotor.

A relação entre o ângulo de carga e o ângulo de corrente podem ser obtidas utilizando (1), (6) e (14), (15) a partir do diagrama vetorial da Figura 13.

$$\tan \delta = \frac{\psi_{qm}}{\psi_{dm}} \quad (14)$$

$$\tan \theta = \frac{I_{qm}}{I_{dm}} \quad (15)$$

$$\theta = \tan^{-1}(\xi \tan \delta) \quad (16)$$

Como ilustrado no diagrama fasorial, δ é o ângulo de carga, θ o ângulo de corrente, β o ângulo de binário e φ_i o ângulo do fator de potência interno. Em relação ao fator de potência interno, este é dado por:

$$IPF = \cos \varphi_i = \sin \beta = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \delta - \theta\right) \quad (17)$$

$$IPF = (\xi - 1) \sqrt{\frac{\sin(2\theta)}{2(\tan \theta + \xi^2 \cot \theta)}} \quad (18)$$

Que mostra que o fator de potência interno é função do ângulo de corrente que por sua vez depende do índice de saliência, atingindo o valor máximo para ($\theta = \tan^{-1}(\sqrt{\xi})$). Consequentemente, o valor máximo do fator de potência interno é dado por:

$$IPF_{max} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \quad (19)$$

O rendimento é uma característica importante de qualquer máquina e está relacionado com as perdas existentes. Como já referido, é necessário considerar as perdas no ferro e as perdas de joule nos enrolamentos estáticos. Assim, o rendimento é dado por:

$$\eta = \left(1 + \frac{p_{totais}}{T_e \omega}\right)^{-1} \quad (20)$$

Onde p_{totais} corresponde à soma de todas as perdas do motor, $\omega = \frac{2\pi n_s}{60}$ à velocidade angular elétrica, n_s à velocidade de sincronismo e T_e ao binário desenvolvido. Para baixas velocidades, sendo as perdas no ferro desprezáveis face às perdas no cobre, o rendimento pode ser obtido de forma aproximada por:

$$\eta \approx \left(1 + \frac{1}{\frac{\omega}{3R_s} \left(\frac{T_e}{I_s^2}\right)}\right)^{-1} \quad (21)$$

Para velocidades elevadas já não se aplica esta expressão, sendo que as perdas no ferro associadas às oscilações na densidade de fluxo no ferro têm que ser consideradas.

6. Aplicações

Pelo que foi referido, como se trata de um motor robusto e com elevado rendimento, potenciando grandes poupanças energéticas, o MSR pode ser considerado apropriado para as mais diversas aplicações. O MSR pode ser aplicado em sistemas de conversão de energia e em diversas indústrias, como é o caso da química, alimentar, têxtil, papel, entre outras [13].

Devido à sua característica de velocidade constante é também adequado para aplicações que necessitem de fluxo ou transporte constante em processos automatizados de baixa velocidade e que necessitem de sincronização precisa como outros motores [16].

Esta solução é mais simples e confiável que outras que utilizam motores de corrente contínua ou máquinas assíncronas. Por outro lado, a utilização de motores de relutância dispensa o uso de transdutores de posição ou velocidade e outros componentes auxiliares de sincronização. Estes motores também podem ser operados através de um controlador eletrônico que permite variar a sua velocidade.

Algumas aplicações deste tipo são as indústrias de plásticos, pastas e papel, borracha, vidro e metais. Estas aplicações necessitam de controlo de velocidade preciso e ajustável de acordo com o processo.

O MSR pode também ser aplicado em acionamentos de sistemas de impressão, máquinas ferramentas, empacotadoras, dobradeiras e em posicionamento de hastes de controlo em reatores nucleares [16].

Referências bibliográficas

- [1] Inovenergy, "EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 1.1. DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA." Accessed: Dec. 28, 2021. [Online]. Available: https://inovenergy.inovcluster.pt/media/28452/Estado_da_arte_do_setor_do_frio_por_fileira.pdf.
- [2] D. Cavaleiro, "Motor síncrono de relutância para sistemas de tração de veículos elétricos. Membros do júri," UC, Coimbra, 2015.
- [3] R. Branco, "Modelação e Simulação de Motores Síncronos de Relutância," 2015.
- [4] J. A. dos Santos Júnior, "Construção, acionamento, controle e análise de desempenho dinâmico de um motor síncrono a relutância," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- [5] A. A. Tavares, "Otimização de um motor de relutância síncrono com barreiras de fluxo," Florianópolis, SC, 2005.
- [6] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 2, pp. 359–365, 1994, doi: 10.1109/60.300136.
- [7] E. Agamloh, A. von Jouanne, and A. Yokochi, "An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles," *Mach. 2020*, Vol. 8, Page 20, vol. 8, no. 2, p. 20, Apr. 2020, doi: 10.3390/MACHINES8020020.
- [8] R. Santos, "Projecto e análise de funcionamento de um motor síncrono de relutância através de elementos finitos," UC, Coimbra, 2019.
- [9] J. Kolehmainen, "Synchronous reluctance motor with form blocked rotor," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 2, pp. 450–456, Jun. 2010, doi: 10.1109/TEC.2009.2038579.
- [10] C. Donaghy-Spargo, "Synchronous reluctance motor technology: industrial opportunities, challenges and future direction," *Eng. Technol. Ref.*, May 2016, doi: 10.1049/ETR.2015.0044.
- [11] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications," KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [12] M. H. Mohammadi, "A data-driven design process including multiphysics for synchronous AC machines using high-performance computing," McGill University, 2019.
- [13] D. M. B. de Matos, "Controlo vetorial de motores síncronos de relutância," Universidade da Beira Interior, 2014.
- [14] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design," KTH, School of Electrical Engineering (EES), 2007.
- [15] S. Taghavi, "Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications," Concordia University, 2015.
- [16] C. E. G. Martins, "Motores síncronos de relutância com barreiras de fluxo e partida assíncrona," Florianópolis, SC, 2003.