

Teoria e Cálculo do Motor de Histerese

A. Leão Rodrigues

Departamento de Engenharia Electrotécnica
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
2825 - 114 Caparica

Abstract

The paper describes the working principle of the hysteresis motor taking into account the hysteresis phenomenon and the torque due to the eddy currents induced on the rotor material during the motor starting. It also presents an original derivation for the optimal design of the rotor sleeve width.

Experimental results obtained from a 0.1 kW hysteresis motor prototype show good agreement with theory.

Resumo

O artigo descreve o princípio de funcionamento do motor de histerese tendo em conta não só o fenómeno de histerese, como também o binário devido às correntes de Foucault induzidas no rotor durante o arranque do motor. Apresenta a dedução original para a concepção optimizada da espessura da manga rotórica.

Os resultados experimentais obtidos no ensaio de um protótipo de um motor de histerese de 100 W comprovam a teoria exposta.

1. Introdução

O motor de histerese é um exemplo interessante da aplicação de um fenómeno electromagnético que normalmente é indesejável noutros tipos de máquinas eléctricas. Charles P. Steinmetz (1865-1923) investigou nos laboratórios da Westinghouse, com profundidade, o fenómeno da energia dissipada por histerese em materiais ferromagnéticos [1]. Steinmetz mostrou que era possível produzir binário por reacção com o campo girante que dá origem à energia dissipada por histerese num rotor de material de largo ciclo de histerese e de condutividade eléctrica nula.

Actualmente, os motores de histerese comerciais são normalmente construídos com potências inferiores a 1 kW. Embora estas máquinas eléctricas possuam baixo rendimento, reduzido factor de potência e baixa razão binário/volume quando comparadas com os motores de indução de rotor em gaiola, o seu binário motor é essencialmente constante durante o arranque até ao sincronismo. Depois de atingido o sincronismo, o motor

de histerese mantém a velocidade constante até ao ponto em que o binário de carga, ou resistente, seja inferior ao binário motor desenvolvido no veio. Pelo facto do rotor ser liso o motor é bastante silencioso e tem um arranque muito suave. Estas características tornam este dispositivo muito útil em certas aplicações, tais como no accionamento de girobússolas, de fitas magnéticas em gravadores, de discos rígidos em computadores, relógios e outros equipamentos de precisão [2].

Com vista à preparação de um doutoramento na Secção de Máquinas Eléctricas do DEE da FCT/UNL foram produzidos e publicados alguns resultados sobre o motor de histerese [3,4,5,6,7].

2. Perdas magnéticas no ferro

Considere-se uma bobina de resistência óhmica r e coeficiente de auto-indução L tendo uma tensão variável no tempo $u(t)$ aplicada aos terminais, como mostra a figura 1.

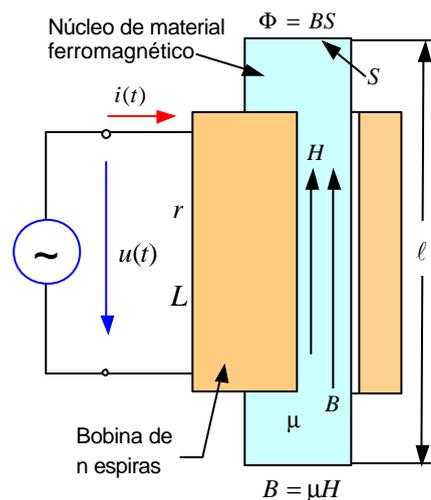


Fig. 1 - Bobina com núcleo de ferro

A potência instantânea $p(t)$ posta em jogo entre a fonte e a bobina é dada pela relação

$$\begin{aligned}
p(t) &= u(t)i(t) = \left(ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \right) i(t) \\
&= ri^2(t) + Li(t) \frac{di(t)}{dt}
\end{aligned} \quad (1)$$

onde $i(t)$ é a corrente instantânea que percorre o enrolamento da bobina. O termo $ri^2(t)$ em (1) determina as perdas por efeito de Joule e portanto o termo

$$p_{mag} = Li(t) \frac{di(t)}{dt} = n\Phi(t) \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

corresponde à potência magnetizante para produzir o fluxo magnético ligado $Li(t) = n\Phi(t)$ com as n espiras da bobina. Esta potência magnetizante dá origem a perdas magnéticas no núcleo de ferro que se dividem em perdas por histerese P_{hist} e perdas por correntes de Foucault P_{Fouc} . Estas duas componentes de perdas dependem das propriedades eléctricas e magnéticas do material do núcleo e serão descritas em seguida.

2.1 - Perdas por histerese

Admitindo que o núcleo tem uma condutividade eléctrica $\sigma = 0$ (não condutor eléctrico) e que o seu ciclo de histerese engloba uma área não nula, só poderá, neste caso, existir a componente de perdas por histerese.

O fluxo simples $\Phi(t) = B(t) \cdot S$ no núcleo ferromagnético de secção S cria uma densidade de fluxo $B = \Phi(t) / S$ responsável pela magnetização do ferro.

A energia magnetizante elementar dW_{mag} posta em jogo durante o tempo elementar dt é, de acordo com (2), dada por

$$dW_{mag} = p_{mag} dt = nB(t)S di(t) \quad (3)$$

O campo magnético $H(t)$ no núcleo de ferro de comprimento ℓ criado pela força magnetomotriz ni é dado aproximadamente, de acordo com a lei de Ampère, por $H \cong ni / \ell$ e portanto $di = (\ell / n) dH$. Deste modo (3) escrever

$$dW_{mag} = Vol B dH \quad (4)$$

onde $Vol = S\ell$ é o volume do núcleo de ferro.

Quando o campo magnético H varia durante um ciclo completo da corrente desde $-H_{max}$ a $+H_{max}$ a densidade de fluxo magnético, ou campo de indução magnética, $B = \mu H$ descreve uma curva fechada conhecida por ciclo de histerese. Os ramos ascendente e descendente num material ferromagnético em geral não coincidem devido ao "atrito" magnético entre os domínios magnéticos do material, resultando num atraso (ou

histerese, vocábulo de raiz grega) de B em relação a H . Desta forma, o ciclo de histerese engloba uma área A , como mostra a figura 2, o qual depende das propriedades magnéticas do material do núcleo.

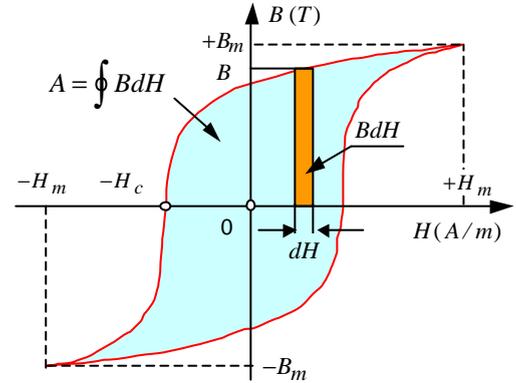


Fig. 2 - Ciclo de histerese

A energia magnética necessária para orientar os domínios magnéticos durante um ciclo de histerese é, de acordo com (4), dada por

$$W_{mag} = Vol \oint (B \cdot dH) = Vol \cdot A \quad (5)$$

onde

$$A = \oint (B \cdot dH) \quad (6)$$

é a área do ciclo de histerese medida em $\text{joule} / \text{m}^3$. Logo, a área do ciclo representa numericamente a energia necessária para magnetizar durante um período $T = 1/f$ da corrente a unidade de volume do material ferromagnético. Esta energia dissipa-se em calor no seio do material tendo como consequência perdas (em *Watt*) por histerese P_{hist} dadas por

$$P_{hist} = \frac{W_{mag}}{T} = Vol A f \quad (7)$$

Steinmetz estabeleceu uma expressão empírica para medir a área do ciclo de histerese, em função do valor máximo B_m da indução magnética, que tem a forma

$$A = \oint (B \cdot dH) = K_h \cdot B_m^v \quad (8)$$

onde v é um expoente que varia tipicamente entre 1.2 a 2.6 que reflecte a forma do ciclo e K_h é uma constante que depende das propriedades magnéticas do material. A substituição de (8) em (7) resulta

$$P_{hist} = Vol K_h B_{max}^v f \quad (9)$$

Logo, (9) mostra que as perdas por histerese no material ferromagnético são directamente proporcionais ao volume

do material, ao valor máximo da densidade de fluxo e à frequência da corrente de excitação e dependem ainda das propriedades magnéticas do material.

2.1 - Perdas por correntes de Foucault

Se o núcleo da bobina for atravessado por um fluxo magnético de densidade $B(t)$ variável no tempo e tiver uma condutividade eléctrica σ finita, além de perdas por histerese dadas por (9), ele é também sede de correntes induzidas, que dão origem a perdas por efeito de Joule, ou perdas por correntes de Foucault P_{Fouc} , que se degradam em calor na massa do ferro.

Para o cálculo de P_{Fouc} , admita-se que o núcleo tem uma secção $a \times b$ e um comprimento ℓ e que a bobina produz uma densidade de fluxo sinusoidal $B(t) = B_m \cos \omega t$ uniforme de frequência $f = \omega / 2\pi$ e cujas linhas de força são perpendiculares à secção. Sendo, por hipótese, a condutividade do ferro finita, a variação do fluxo induz nele *f.e.m.s* que dão origem a correntes eléctricas no ferro, conhecidas por correntes de Foucault, cujo andamento aproximado está representado na figura 3.

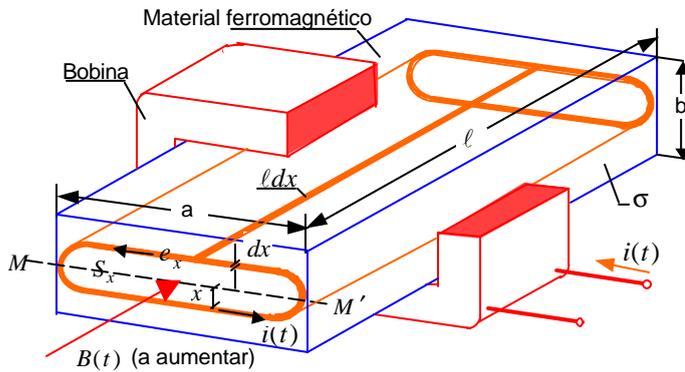


Fig. 3 - Perdas por correntes de Foucault

A *f.e.m.* induzida e_x ao longo de um filamento de corrente i_x à distância x do plano médio MM' é dada, segundo a lei de Faraday, por $e_x = -d(B(t)S_x)/dt$ onde S_x é a área envolvida pela trajectória da corrente. Admitindo $a \gg b$, será $S_x \approx 2xa$ e portanto

$$e_x = 2xa.B_m \omega \cdot \text{sen} \omega t = \sqrt{2} E_{x\text{ef}} \text{sen} \omega t$$

onde $E_{x\text{ef}} = \sqrt{2} a B_m \omega \cdot x$ é o valor eficaz da *f.e.m.* induzida. A condutância elementar dG_x encontrada ao longo do filete de corrente de comprimento $2a$ e área ℓdx é dada por $dG_x \equiv \sigma \ell dx / 2a$. Logo, as perdas por efeito de Joule na massa do ferro, ou perdas por correntes de Foucault, provocadas pelo filete de corrente à distância x , são

$$\begin{aligned} dP_{x\text{Fouc}} &= E_{x\text{ef}}^2 dG_x \\ &= \sigma a \ell \omega^2 B_m^2 x^2 dx \end{aligned} \quad (10)$$

Consequentemente, atendendo a (10), as perdas por correntes de Foucault em toda a massa do núcleo, resultam,

$$P_{\text{Fouc}} = \int_{-b/2}^{+b/2} dP_{x\text{F}} = K_F \cdot \text{Vol} B_m^2 f^2 \quad (11)$$

onde $K_F = (\pi^2/3)\sigma b^2$ é uma constante que depende das propriedades eléctricas do material e do quadrado do maior comprimento b do núcleo.

É interessante notar que se o núcleo for laminado perpendicularmente à dimensão b com N chapas de espessura N/b , as perdas de Foucault do núcleo laminado passarão a ser $P'_F = (1/N^2)P_F$, isto é, serão N^2 vezes menores do que as perdas no núcleo não laminado. Esta é a razão porque se lamina o núcleo quando $f \neq 0$. Em dispositivos de alta-frequência é costume construir o núcleo com ferrite de alta permeabilidade magnética, mas com condutividade $\sigma \approx 0$ a fim de evitar as elevadas perdas por correntes de Foucault nele induzidas.

3. Constituição do motor de histerese

O motor de histerese pode ser considerado como uma máquina síncrona dotada de binário de arranque. O estator tanto pode ser monofásico como polifásico desde que produza um campo girante de velocidade $N_s = f/p$ onde f é a frequência da tensão aplicada e p o número de pares de pólos gerados pelo enrolamento do estator. No caso do motor mfásico, o campo girante é obtido por meio da injeção de um sistema mfásico equilibrado de correntes num conjunto de m bobinas desfasadas no espaço de um ângulo eléctrico $m/2\pi$. No caso do motor monofásico, como normalmente acontece em motores de histerese de potência fraccionada, o campo girante pode ser obtido por meio de pólos sombreados, como mostra a figura 4a, ou por meio de um enrolamento colocado a 90° eléctricos com o enrolamento principal auxiliar em série com um condensador, como mostra a figura 4b.

A fim de minimizar as perdas magnéticas no estator é desejável que o núcleo seja laminado e que a distribuição espacial da densidade de fluxo ao longo da periferia x do estator seja sinusoidal, da forma

$$B(x,t) = B_m \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x) \quad (12)$$

onde $\tau = \pi D_e / 2p$ é o passo polar e D_e o diâmetro interior do estator. Para reduzir as harmónicas de dentadura que se

sobrepõem a (12) é conveniente desenhar o estator com cavas semi-fechadas.

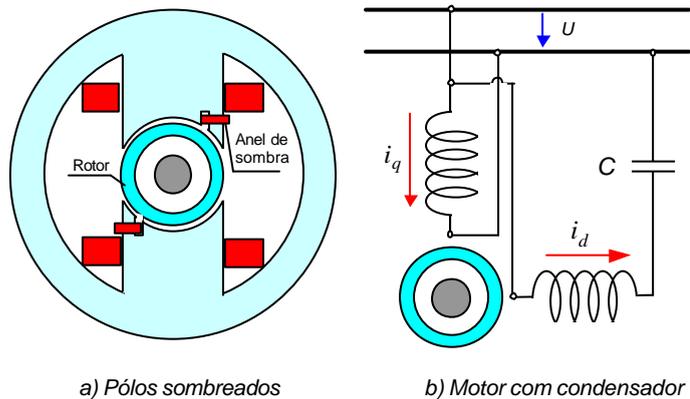


Fig. 4 - Métodos para obter o campo girante no motor monofásico

O rotor do motor de histerese é construído com material ferromagnético "duro", com elevada coercividade e largo ciclo de histerese. Os materiais normalmente usados na construção do rotor são o crómio, níquel, cobalto e ferro duro cujas coercividades variam entre 8 a 16 kA/m. A sua estrutura tem a forma de um anel com um diâmetro exterior $D_o = D_e - 2g$ onde g é o comprimento radial do entreferro e de diâmetro interior $D_x = D_o - 2h$. A espessura h do anel é, na prática, da ordem de $h = 0.1D_o$ consoante as propriedades magnéticas do material ferromagnético. O rotor não tem cavas nem enrolamentos, apresentando portanto uma estrutura lisa e de simples construção. No interior desta manga rotórica está inserido um material não-magnético que serve para fixar o anel ao veio do motor. Com vista a uma diminuição do momento polar de inércia do rotor este material, normalmente de alumínio, tem um peso específico inferior ao da manga rotórica.

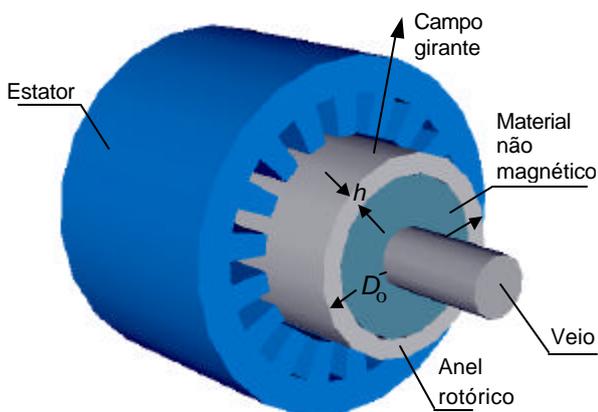


Fig. 5 - Vista explodida do motor de histerese

A figura 5 mostra uma vista explodida do motor de histerese.

4. Princípio de funcionamento do motor de histerese

Para o estudo do motor de histerese ideal, considera-se que o material que constitui a manga rotórica tem um largo ciclo de histerese e condutividade eléctrica nula. Consequentemente, quando o rotor for submetido a uma variação de fluxo magnético é sede de perdas por histerese mas não é possível circular nele correntes de Foucault.

Ao ligar-se o estator à rede, com o rotor em repouso, surge instantaneamente um campo girante $B(x, t)$, que se admite com uma distribuição sinusoidal ao longo do entreferro, propagando-se com uma velocidade angular síncrona $\omega_s = 2\pi f / p$. Para o caso particular de um motor bipolar, a figura 6 ilustra a distribuição do fluxo produzido pelo estator através da manga rotórica no instante de ligação.

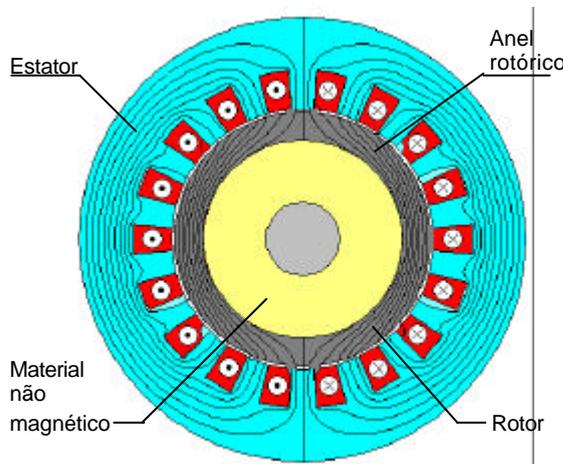


Fig. 6 - Distribuição da densidade de fluxo magnética no instante de arranque

Cada ponto do material da manga rotórica fica então sujeito a uma magnetização devido à variação do fluxo através do anel. A relação entre a densidade de fluxo $B(x, t)$ criada pelos enrolamentos do estator e a intensi-

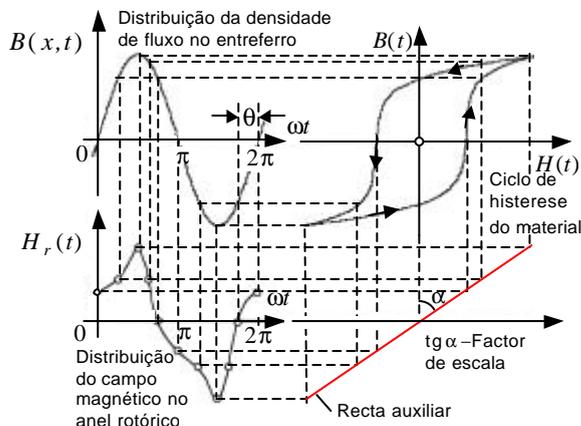


Fig. 7 - Construção gráfica para obtenção do ângulo q

dade do campo magnético $H_r(t)$ no material da manga rotórica, e a correspondente excursão ao longo do ciclo de histerese, está representada na figura 7. Do diagrama conclui-se que $H_r(t)$ está em atraso de um ângulo θ em relação $B(x,t)$.

Ao fim da primeira rotação do campo girante, o anel rotórico fica inteiramente magnetizado e a distribuição do fluxo resultante para o caso do motor bipolar passa a ser o indicado na figura 8.

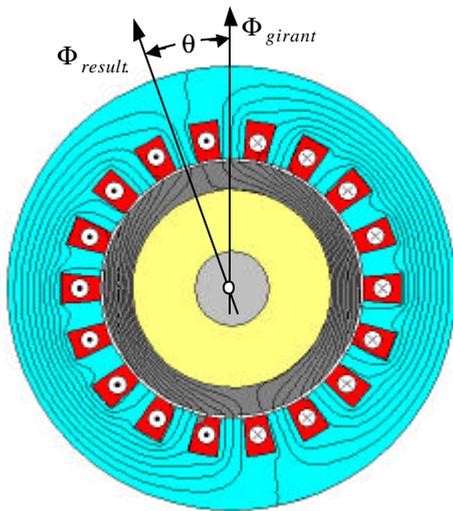


Fig. 8 - Densidade de fluxo depois da magnetização do anel

Tal como no motor síncrono existirá então binário motor graças à desfasagem θ entre o fluxo do estator e o fluxo devido à magnetização do rotor. Este ângulo θ depende, obviamente, da área e forma do ciclo de histerese do material da manga rotórica (seria nulo se o ciclo de histerese se reduzisse a uma linha) e portanto mantém-se constante durante todo o tempo de arranque do motor.

4.1 - Potência mecânica desenvolvida no veio.

Considere-se o caso ideal de o estator não ter perdas de Joule ($r=0$), nem perdas magnéticas e que se desprezam as perdas mecânicas por atrito no rotor. Nestas condições, toda a potência eléctrica P_{elect} absorvida pelo estator à fonte de alimentação é transferida para o rotor, dando lugar a perdas por histerese P_{hist} na manga rotórica e a potência mecânica P_{mec} que surge no veio. Pelo princípio da conservação da energia será então

$$P_{elect} = P_{hist} + P_{mec} \quad (13)$$

Admitindo que o binário resistente pedido ao veio é inferior ao binário motor desenvolvido, o rotor acelera até atingir a velocidade N_s de sincronismo. Como durante o regime subsíncrono o rotor roda a uma velocidade

$N_r < N_s$, a frequência de magnetização da manga rotórica será $f_r = p(N_s - N_r)$. De acordo com (7) as perdas por histerese na manga virão

$$P_{hist} = Vol.A.pN_s(1 - \frac{N_r}{N_s}) \quad (14)$$

isto é, variam linearmente com a velocidade do rotor, sendo máximas no arranque, onde atingem o valor $Vol.A.pN_s$ e nulas no sincronismo ($N_r = N_s$).

Atendendo a (13) e a (14) a potência mecânica desenvolvida no veio, à velocidade N_r , escreve-se

$$P_{mec} = P_{elect} - Vol.A.pN_s(1 - \frac{N_r}{N_s}) \quad (15)$$

Consequentemente, o binário de histerese resulta

$$T_{hist} = \frac{P_{mec}}{2\pi N_r} \quad (16)$$

Notando que a potência mecânica é nula no arranque por ser finito o binário de arranque, fazendo $N_r = 0$ em (15), vem

$$P_{elect} = Vol.A.pN_s \quad (17)$$

e portanto a substituição de (17) em (15) resulta finalmente

$$P_{mec} = P_{elect} \frac{N_r}{N_s} \quad (18)$$

Na figura 9 estão representadas graficamente as relações P_{hist} , P_{elect} e P_{mec} dadas respectivamente por (14), (17) e (18) em função da velocidade normalizada N_r/N_s do rotor. Observa-se então que à medida que o rotor acelera desde o arranque até ao sincronismo, as perdas por histerese decrescem e cresce a potência mecânica disponível no veio, mantendo-se constante a potência eléctrica absorvida à fonte de alimentação do motor.

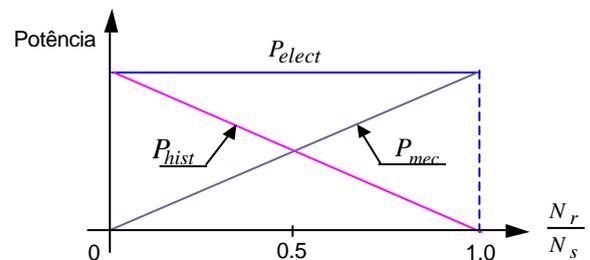


Fig. 9 - Potência de histerese, mecânica e eléctrica

Depois de atingido o sincronismo toda a potência eléctrica é convertida em potência mecânica no veio, mantendo-se

nulas as perdas por histerese no rotor que se encontra magnetizado.

4.2 - Binário de histerese

A substituição de (8), (17) e (18) em (16) resulta

$$T_{hist} = \frac{K_h}{2\pi} p Vol. B_m^v \quad (19)$$

Idealmente, num motor de histerese, é só a energia de histerese $Vol.K_h B_m^v$ transferida do estator para o rotor que contribui para o binário motor. Na maior parte das máquinas eléctricas, tenta-se reduzir ao máximo esta energia de histerese a fim de aumentar o seu rendimento. No caso do motor de histerese é exactamente esta energia que contribui para o binário motor.

Para um valor eficaz constante da tensão aplicada ao estator, (19) mostra que o binário de histerese não depende da velocidade do rotor, mantendo-se constante desde o arranque até à velocidade de sincronismo N_s .

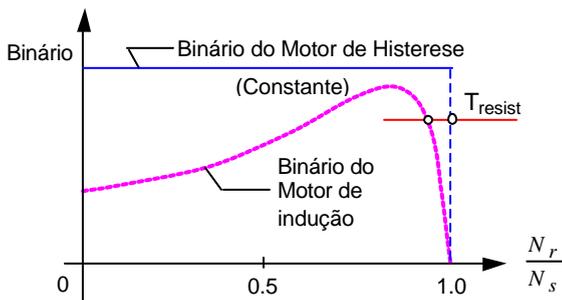


Fig. 10 - Binário de histerese e comparação com o binário do motor de indução

Este interessante comportamento do motor de histerese é inteiramente diferente do observado no motor de indução, cuja característica binário/velocidade se anula no sincronismo, como se indica na figura 10.

5. Característica electromecânica resultante

Deve notar-se que a teoria anteriormente exposta supõe que a resistência do rotor é infinita e portanto ignora o efeito das correntes de Foucault nele induzidas. No caso real em que o material da manga rotórica tem uma condutividade $\sigma \neq 0$, durante a velocidade subsíncrona induzem-se correntes de Foucault na massa da manga rotórica as quais produzem um fluxo magnético que reage com o fluxo do estator produzindo um binário motor T_{Fouc} adicional [8].

Se forem P_{Fouc} as perdas de Foucault na manga rotórica, o binário adicional quando o rotor roda à velocidade subsíncrona N_r será

$$T_{Fouc} = \frac{P_{Fouc}}{2\pi p(N_s - N_r)} \quad (20)$$

À velocidade subsíncrona, as perdas por correntes de Foucault quando a frequência das correntes têm a frequência $f_r = p(N_s - N_r)$ são, de acordo com (11), dadas por

$$P_{Fouc} = K_F Vol. B_m^2 \left\{ p N_s \left(1 - \frac{N_r}{N_s} \right) \right\}^2 \quad (21)$$

Substituindo (21) em (20) vem para a componente do binário de Foucault

$$T_{Fouc} = \frac{K_F}{2\pi} p Vol B_m^2 N_s \left(1 - \frac{N_r}{N_s} \right) \quad (22)$$

O binário devido às correntes de Foucault dado por (22) é do mesmo tipo do binário desenvolvido por um motor de indução, e é máximo no arranque e nulo no sincronismo. Esta componente do binário sobrepõe-se ao binário de histerese dado por (19), de forma que o binário resultante do motor de histerese em que a manga rotórica tem $\sigma \neq 0$, vem

$$T_{res} = T_{hist} + T_{Fouc} \quad (23)$$

ou, normalizando,

$$\frac{T_{res}}{T_{hist}} = 1 + \frac{K_F}{K_h} B_m^{2-v} N_s \left(1 - \frac{N_r}{N_s} \right) \quad (24)$$

cujos andamentos estão representados na figura 11.

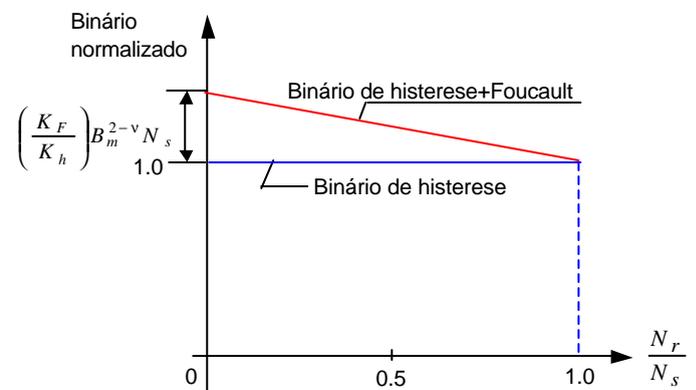


Fig. 11 - Binário resultante do motor de histerese com $\sigma \neq 0$

Notando que $N_s = f/p$, verifica-se então que a componente do binário devido às correntes de Foucault auxilia o binário de arranque do motor de histerese pela quantidade $(K_F/K_h)B_m^{2-v} \cdot f/p$ desaparecendo no sincronismo onde apenas subsiste o binário de histerese o qual é, como se mostrou, independente da velocidade do rotor.

6. Otimização da espessura da manga rotórica

De acordo com (19), o binário de histerese é proporcional ao produto do volume Vol do anel rotórico e da densidade B_m através da área $(D_o - D_x)\ell/2$. Como as variações de B_m e Vol são antagónicas, quando o diâmetro interior D_x do anel decresce, o volume do anel aumenta e B_m decresce. Logo, haverá uma relação D_x/D_o óptima que leva o binário de histerese a atingir o máximo valor.

Para determinar esta relação D_x/D_o óptima, admita-se que a distribuição da densidade de fluxo ao longo do entreferro é sinusoidal com uma amplitude \hat{B} . O fluxo por pólo será então $\Phi_p = (2/\pi)\hat{B}\tau\ell$ onde $\tau = \pi D_o/2p$ é o passo polar. A máxima densidade de fluxo B_m através da área $(D_o - D_x)\ell/2$ da manga rotórica é

$$B_m = \frac{\Phi_p/2}{(D_o - D_x)\ell/2} = \hat{B} \frac{1}{p \left(1 - \frac{D_x}{D_o}\right)} \quad (25)$$

Como o volume da manga rotórica Vol é dado pela expressão

$$Vol = \frac{\pi}{4} D_o^2 \ell \cdot \left[1 - \left(\frac{D_x}{D_o}\right)^2\right] \quad (26)$$

a substituição de (25) e (26) em (19) conduz à seguinte expressão para o binário do motor de histerese com uma manga de diâmetro interior D_x

$$T_x = T_o \frac{1 - \left(\frac{D_x}{D_o}\right)^2}{\left(1 - \frac{D_x}{D_o}\right)^v} \quad (27)$$

onde

$$T_o = K_h \cdot p^{(1-v)} \hat{B}^v D_o^2 \ell \quad (28)$$

é o binário de histerese correspondente ao rotor sólido ($D_x = 0$) de volume prismático $D_o^2 \ell$. Para um motor de histerese com uma manga rotórica de material ferromagnético, (27) mostra que o binário de histerese

depende da razão D_x/D_o . Se o material do anel rotórico tiver um factor $v=1,2$ (usual na prática), o binário normalizado T_x/T_o atinge o valor máximo para $D_x=0,8D_o$ para o qual $T_{max}=1,5T_o$, como se indica na figura 12.

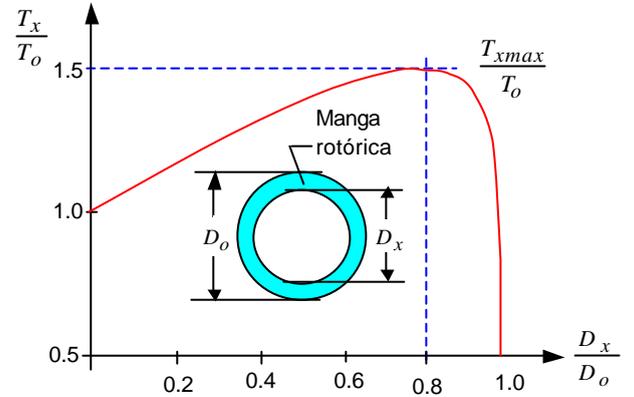


Fig. 12 - Andamento do binário em função da razão dos diâmetros do anel rotórico

De acordo com este resultado é vulgar, na prática, construir a manga rotórica com uma espessura $h = 0,1D_o$. Com esta espessura, e atendendo a (2.8), o máximo binário de histerese por volume prismático, vem

$$T_u = \frac{1,5T_o}{D_o^2 \ell} = \frac{3}{2} K_h \cdot p^{0,2} \hat{B}^{1,2} \quad (29)$$

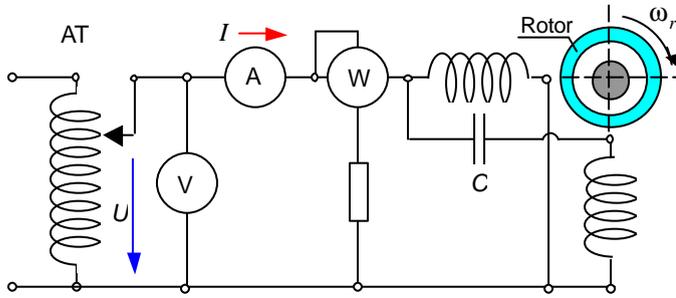
que depende apenas das propriedades magnéticas do material e da amplitude da densidade do fluxo do campo girante [9].

7. Resultados experimentais

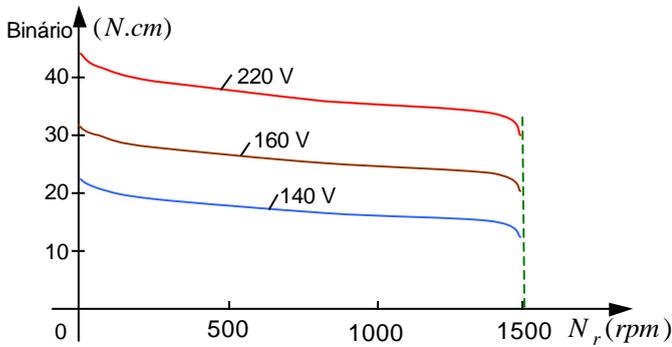
Adaptando um estator de 18 cavas de um motor de indução monofásico tetrapolar, com desfasagem de correntes por meio de condensador (ver figura 4b), com um diâmetro interno de 50,50 mm e uma potência nominal no veio de 100 W, para uma tensão nominal de 220 V, 50 Hz, J. E. Martins construiu nas ex-Oficinas de Material de Engenharia Militar, em Belém, um motor de histerese. O rotor era constituído por um anel de material ferromagnético com 0,5 % em peso de crómio (Simonds 83), tendo uma espessura de $h = 5$ mm e um diâmetro exterior de 50 mm. Logo, uma vez inserido o rotor concentricamente no estator, apresentava um entreferro de 0,25 mm. A coercividade do material do anel foi medida num histeresígrafo que deu um valor de 8,5 kA/m. O anel foi fixado ao veio por intermédio de um cilindro de alumínio (material não magnético).

O binário motor durante o arranque foi medido através de

um freio electrodinâmico cujo valor foi registado em função da velocidade do rotor num oscilógrafo de raios catódicos. A figura 13a ilustra o esquema de ligações do ensaio. Foram feitos três ensaios com tensões U aplicadas ao estator de 140 V, 180 V e 220 V com a frequência de 50 Hz e os respectivos resultados estão representados na figura 13b.



a) Esquema de ligações



b) Característica binário/velocidade

Fig. 13 - Ensaio do motor de histerese

Para a tensão nominal de 220 V, 50 Hz, mediu-se no amperímetro electrodinâmico A o valor da corrente eficaz na linha, no wattímetro W a potência activa P_{elect} de entrada e no taquímetro electrónico a velocidade N_r do rotor em função do binário resistente T_{res} pedido ao veio

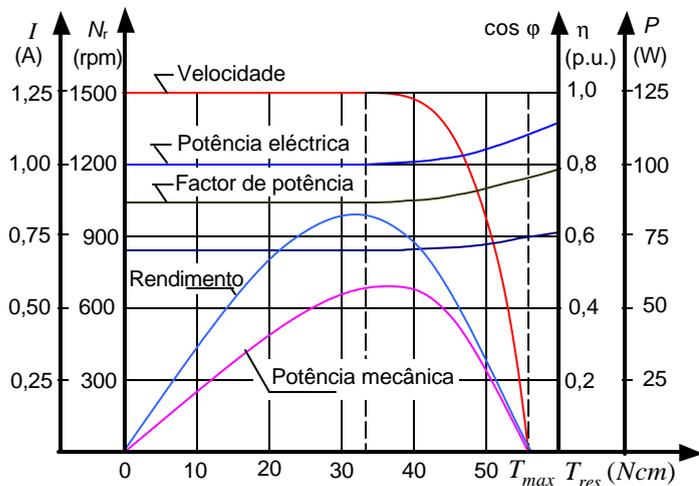


Figura 14 - Características do motor de histerese em carga.

medido no freio. Estes valores foram medidos à temperatura de 55 °C. A partir destes valores calculou-se a potência mecânica $P_{mec} = T \cdot 2\pi N_r$ no veio e o rendimento $\eta = P_{mec} / P_{elect}$ do motor. Os valores medidos e calculados estão representados na figura 14 em função do binário de carga T_{res} .

Destes resultados verifica-se que o rendimento máximo do protótipo é de $\eta_{max} = 65\%$, o binário motor nominal é de $T_{nom} = 32 Ncm$ e o binário máximo para o qual o motor perde o sincronismo e pára é de $T_{max} = 53 Ncm$.

8. Conclusões

O motor de histerese é uma máquina de construção muito simples. Sendo o rotor liso (sem cavas e dentes), o fluxo no entreferro é praticamente isento de harmónicas de dentadura e consequentemente o motor fica livre de binários parasitas. Além disso nunca apresenta forças magnéticas de relutância capazes de anular o binário de arranque. Este efeito pode ainda ser minimizado usando cavas semi-fechadas no estator.

Comparativamente a outros tipos de máquinas eléctricas o motor de histerese é a única máquina capaz de arrancar com cargas de momento de inércia apreciável a binário constante. Neste motor observou-se que o arranque é suave até ao sincronismo.

Embora existam actualmente materiais magnéticos de largo ciclo de histerese, verifica-se que o seu emprego na construção do rotor aumenta o binário motor mas não eleva substancialmente o rendimento, inerentemente baixo neste tipo de motor. No entanto, a utilização de materiais magnéticos com melhores características fazem do motor síncrono de histerese uma máquina quase comparável, em termos de binário/volume, ao motor de indução de rotor em gaiola.

Homenagem



José Estêvão Martins (1939-2000)

O estudo do motor de histerese foi proposto ao licenciado José Estêvão Martins como tema para a sua dissertação de doutoramento, a preparar no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Malgradamente, o Estêvão Martins deixou de estar fisicamente entre nós desde 30 de Abril de 2000, dia em que cumpria precisamente o seu sexagésimo primeiro anivers-

sário. Durante os anos que trabalhamos juntos, habituei-me a admirar a sua determinação obstinada, apesar da doença que o minava, em querer firmemente levar a cabo o seu doutoramento. O Martins desejava-o profundamente mas apenas por pura satisfação pessoal, já que, profissionalmente, se sentia realizado.

Como seu orientador e amigo sinto uma profunda angústia por ver o seu sonho irrealizado. Com este modesto artigo pretendo apenas recordar as longas discussões científicas que tivemos sobre este assunto e referir parte do seu trabalho realizado, bem como prestar uma singela homenagem à sua memória. Que o Zé Martins repouse em paz ...

Referências

- [1] - C. P. Steinmetz: *Theory and Calculations of Electrical Apparatus*, McGraw-Hill Book Company, New York N.Y. 1917.
- [2] - G. McPherson, R. D. Larmore: *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1990.
- [3] - E. Martins, L. Rodrigues: *Alguns Aspectos do Funcionamento do Motor de Histerese*, Revista Electricidade, nº 321, Abril 1995.
- [4] - E. Martins, L. Rodrigues: *Influência da Coercividade e Espessura da Manga Rotórica no Valor do Binário do Motor de Histerese*, 4as Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Porto, Julho, 1995.
- [5] - E. Martins, L. Rodrigues: *The Hysteresis Motor as a Drive in Mechatronics*, International Conference on Recent Advances in Mechatronics, Istanbul, 1995.
- [6] - E. Martins, L. Rodrigues: *Design and Construction of the Hysteresis Motor*, Mechatronics Conference, Guimarães, 1996.
- [7] - E. Martins, L. Rodrigues: *Conversão de Energia Electromecânica em Motores de Histerese e Piezoeléctricos*, 5as Jornadas Hispano-Lusas de Engenharia Electrica, Salamanca, Julho, 1997.
- [8] - T. Kenjo: *Power Electronics for the Microprocessor Age*, Oxford Science Publications, 1995.
- [9] - L. Rodrigues: *Hysteresis motor with conventional and superconductor rotors*, International Conference on Electrical Machines, ICEM 2000, Helsínquia, Agosto 2000, pp 802-806.

* * *