

O Actuador Linear de Relutância Variável Comutado

Maria do Rosário Calado

C. Pereira Cabrita

Departamento de Engenharia Electromecânica

Universidade da Beira Interior

Abstract

On basis the rotary switched reluctance motor, this paper presents the design methodology concerning the linear switched reluctance actuator.

Resumo

Tendo como base o motor rotativo de relutância comutado, apresenta-se neste artigo a metodologia a seguir no dimensionamento do actuador linear de relutância comutado.

1. Introdução

Como se salientou na ref. [1], o motor rotativo variável comutado deriva directamente do motor passo a passo de relutância variável, sendo o binário obtido pelo movimento do rotor para uma posição onde a indutância do enrolamento de excitação seja máxima. Ou seja, como a indutância é inversamente proporcional à relutância do circuito magnético, e esta, por sua vez, é directamente proporcional ao entreferro, aquela posição corresponde ao alinhamento polar estator-rotor, em que o entreferro é o menor possível. A teoria desenvolvida para este tipo de motor eléctrico rotativo [1, 2], aplica-se inteiramente ao estudo do actuador linear de relutância variável comutado (ALRC). Tal como o seu homólogo rotativo, o ALRC produz uma força de tracção, sendo o movimento linear obtido pela tendência do secundário em ocupar as sucessivas posições de relutância mínima, onde a indutância do enrolamento primário é máxima. Consequentemente, este actuador linear é uma máquina eléctrica polifásica, sendo as fases excitadas uma por uma, e o seu objectivo é desenvolver movimento linear com forças de tracção elevadas.

2. Estruturas práticas

A figura 1 esquematiza a estrutura de um ALRC, em que a parte móvel tanto poderá ser o primário como o secundário [3]. Note-se que, tanto o primário como o secundário possuem cavas e dentes, devendo ser dimensionados com chapas magnéticas empilhadas, de

preferência de silício com cristais orientados, por forma a reduzir ao mínimo a relutância dos circuitos magnéticos.

Relativamente à figura 1, note-se que, para as posições relativas entre o primário e secundário que se esquematizam, é a fase 1 a única fase que se encontra excitada. Para o secundário se deslocar para a esquerda ou para a direita, e após a desligação da fase 1, deverá a fase 2 ou a fase 3 ser excitada logo de seguida, respectivamente.

Por sua vez, a figura 2 mostra as dimensões características do ALRC. Os dentes do primário e do secundário têm praticamente a mesma largura, isto é $b_p \approx b_s$, mas os respectivos passos de cava devem obedecer à seguinte relação [3]

$$m \tau_p = 2\tau_s \quad (1)$$

sendo m o número de fases. Por outro lado, a largura das cavas do primário c , deverá ser ligeiramente superior à largura dos dentes do secundário b_s , de maneira a que a indutância mínima das fases do enrolamento de excitação seja a menor possível [1, 2, 3].

Considerando o circuito magnético não saturado, a energia magnética W e a co-energia magnética W' armazenadas no entreferro, quando uma fase se encontra excitada com corrente constante, são iguais, sendo dada pela expressão [1].

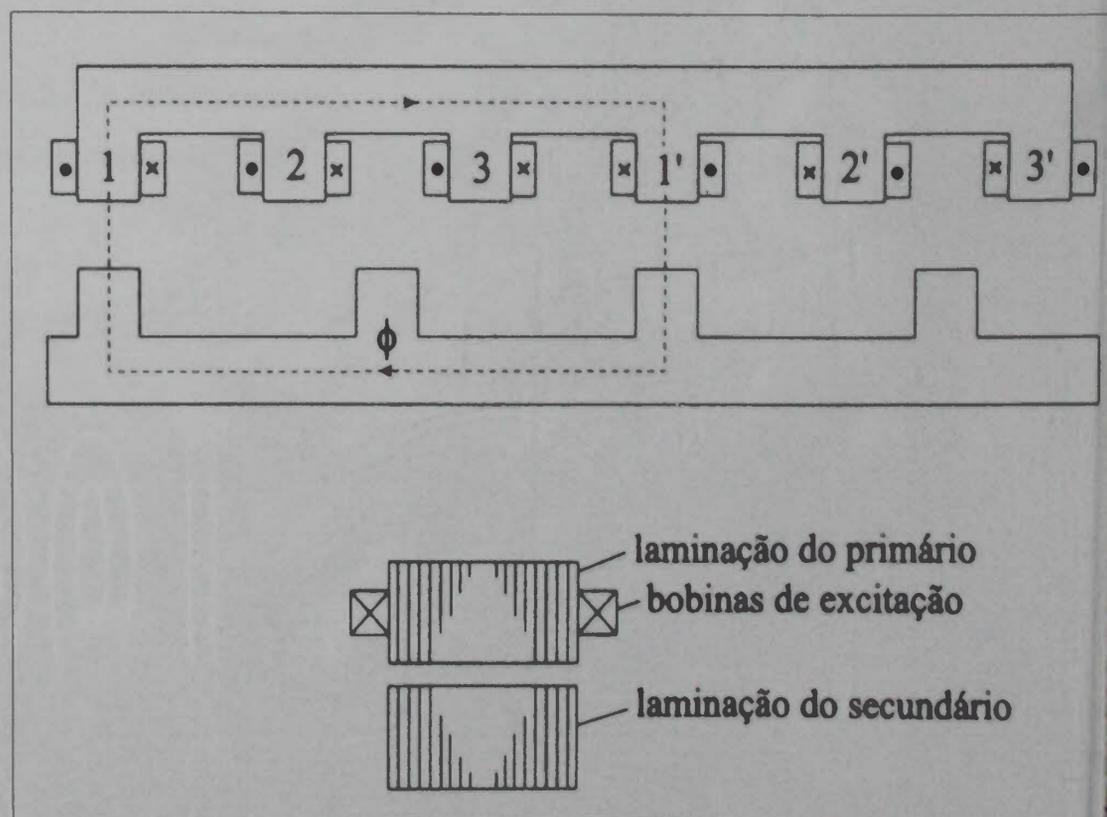


Fig. 1 - Estrutura prática de um ALRC plano.

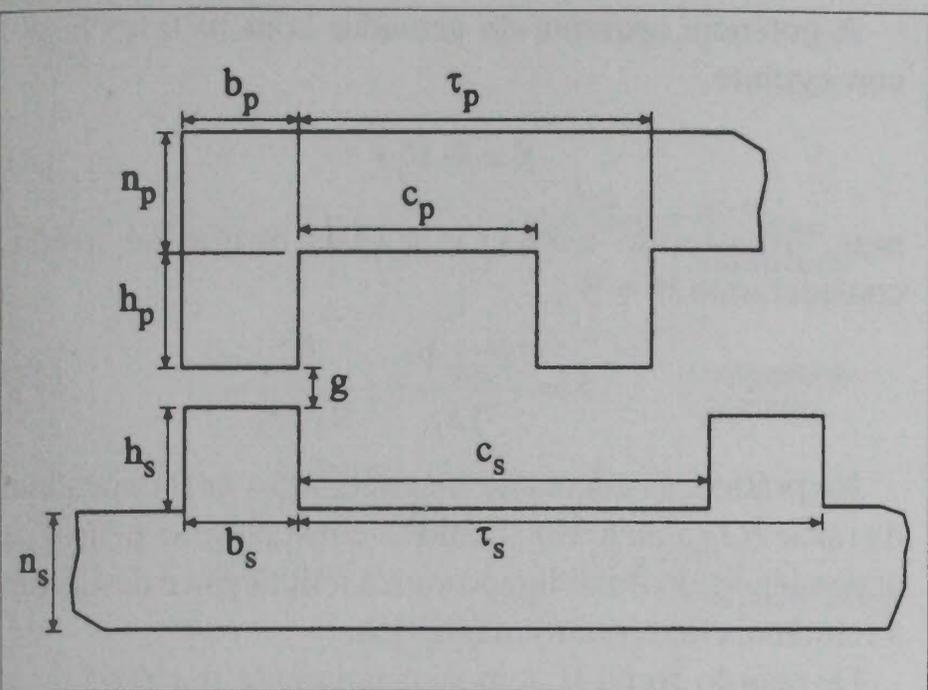


Fig. 2 - Dimensões características do ALRC.

$$W = W_c = \frac{1}{2} \psi(x)i \quad (2)$$

em que $\psi(x)$ é o fluxo ligado com a fase que se encontra excitada pela corrente i , mas como

$$\psi(x) = L(x)i \quad (3)$$

uma vez que a indutância L depende da coordenada de posição x da parte móvel do actuador, então

$$W = W_c = \frac{1}{2} L(x)i^2 \quad (4)$$

Por conseguinte, a força de tracção instantânea será, por definição,

$$F_i = \left[\frac{\delta W_c}{\delta x} \right]_{i \text{ constante}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\delta L(x)}{\delta x} \quad (5)$$

Quando se excita cada fase do primário, o movimento de passo da parte móvel é praticamente igual a b_s . Tal como sucede no motor rotativo homólogo [1, 2], a força de tracção apresenta um "ripple" importante, que origina ruído acústico. Além disso, o ALRC não arranca directamente e é necessária uma unidade de comando para cada actuador.

Para distâncias de trabalho relativamente curtas, da ordem de 0,4 m a 0,5 m, e onde sejam necessárias forças de tracção elevadas, pode-se utilizar o ALRC com uma configuração tubular. O corte das chapas magnéticas do primário e do secundário é idêntico ao do actuador plano (Fig. 1), esquematizando-se na figura 3 as respectivas laminações [3].

No ALRC tubular, apesar da sua construção ser bastante mais complexa quando comparada com a do actuador plano, as densidades de força são elevadas, uma vez que as bobinas, de forma circular, são integralmente aproveitadas para a geração de força. Ou seja, no ALRC tubular, todo o cobre é activo, enquanto que no ALRC plano o cobre correspondente às cabeças das bobinas é inactivo.

3. Força de Tracção

Para o controlo do ALRC é necessário um talhador ("chopper") de dois quadrantes, a transistores, para alimentar cada fase do enrolamento de excitação primário. Deste modo, quando uma fase é alimentada verifica-se

$$E = V_0 - R_1 I_b \quad (6)$$

sendo E a f.e.m. induzida, V_0 a tensão, constante, da fonte de tensão contínua à entrada do talhador, R_1 a resistência de cada fase, e I_b a corrente de excitação. A f.e.m., por seu turno, é dada por

$$E = \frac{d\psi(x)}{dt} = \frac{d\psi(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{d\psi(x)}{dx} V_b \quad (7)$$

onde V_b representa a velocidade do actuador. Se o fluxo ligado variar linearmente com a coordenada de posição, então pode-se escrever

$$\frac{d\psi(x)}{dx} = k(i) \quad (8)$$

ou seja, (9)

$$E = k(i) V_b$$

No caso da função $k(i)$ não ser linear, pode-se obter a velocidade V_b para uma determinada corrente I_b através de um método iterativo a partir das expressões (6), (8) e (9).

Para se determinar a força de tracção em presença da saturação, é necessário conhecer as curvas $\psi(i)$ para o intervalo $x = x_1$ (ligação da fase, não alinhamento) até $x = x_2$ (desligação da fase, alinhamento), como se ilustra qualitativamente na figura 4.

Por conseguinte, a co-energia magnética será

$$W_c = \int \psi(i) di \quad (10)$$

sendo a força determinada através de

$$F_i = \left[\frac{\delta W_c}{\delta x} \right]_{i \text{ constante}} \quad (11)$$

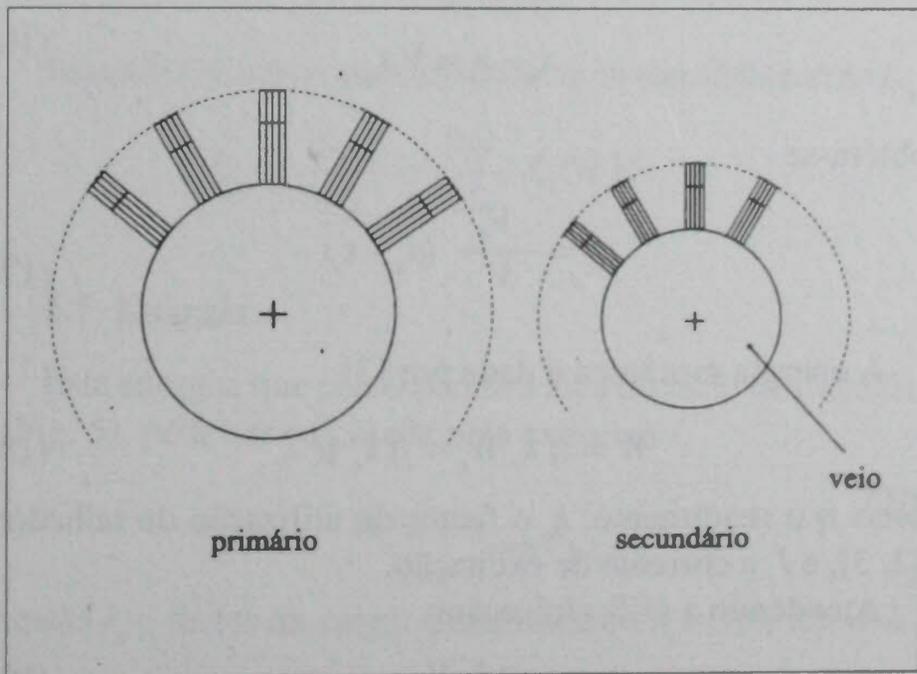


Fig. 3 - Laminações de um ALRC linear.

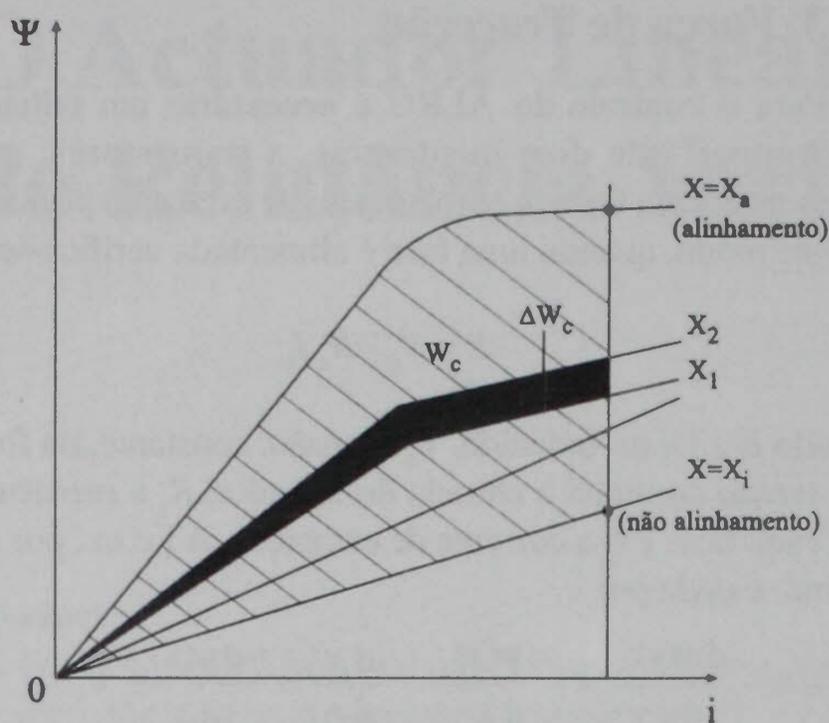


Fig. 4 - Características $\psi(i)$ para diferentes posições de x .

Por exemplo, para duas posições x_1 e x_2 muito próximas uma da outra, obtém-se, de (11),

$$F_i = \frac{\Delta W_c}{x_2 - x_1} \quad (12)$$

Por sua vez, a força média correspondente às m fases, sendo a velocidade constante, é dada pela expressão [1, 2, 3]

$$F_{med} = \frac{m}{b_p} W_c \quad (13)$$

uma vez que $x_{passo} = b_p$.

4. Equações de funcionamento

Considerando $R_1 \approx 0$, tem-se

$$E_c \approx V_0 \quad (14)$$

sendo E_c a f.e.m. induzida na fase durante um período de condução t_c , a velocidade V . Como

$$E_c = \frac{d\psi(x)}{dt} \approx \frac{\psi_c}{t_c} \quad (15)$$

e

$$x_a - x_i = V t_c \quad (16)$$

obtém-se

$$\psi_c = \frac{V_0}{V} (x_a - x_i) \quad (17)$$

A energia mecânica é dada por [3]

$$W = \eta k_c W_c = \eta k_c \psi_c I_c \quad (18)$$

sendo η o rendimento, k_c o factor de utilização do talhador [2, 3], e I_c a corrente de excitação.

Atendendo a (17) virá assim

$$W = \frac{\eta k_c V_0}{V} (x_a - x_i) I_c \quad (19)$$

A potência aparente do actuador com m fases é, por conseguinte,

$$S = m V_0 I_c \quad (20)$$

mas, atendendo a (13) e a (19) obtém-se ainda, considerando $W \approx W_c$,

$$S = \frac{F_{med} V}{\eta k_c} \frac{b_p}{x_a - x_i} \quad (21)$$

Na prática, as curvas de magnetização $\psi(i)$ dependem da razão b_p/g e de h_p e h_s , como se constata se se pensar na dependência do fluxo ligado com a indutância e desta com a relutância do circuito magnético.

De acordo com [3], tem-se usualmente $\eta < 0,65$, $k_c < 0,7$ a $0,8$ e $(x_a - x_i)/b_p \approx 0,8$.

5. Dimensionamento

5.1. Especificações

No caso dos ALRC, as especificações básicas a definir como ponto de partida para o seu dimensionamento, na ausência de um procedimento normalizado universalmente aceite, são a força de tracção, a velocidade de base, a tensão de alimentação à entrada do conversor, e o número de fases. Contudo, poderiam ainda especificar-se outros dados, como a temperatura de funcionamento, as dimensões exteriores limite, o modo de fixação, a parte móvel, a capacidade de sobrecarga, o tipo de ambiente e o nível máximo de ruído. A metodologia de cálculo que se apresenta é baseada em Boldea e Nasar [3], e é acompanhada numericamente pelo dimensionamento de um ALRC 7/5 com as seguintes especificações de partida:

- Força de tracção: 300 N
- Velocidade: 1,5 m/s
- Tensão à entrada do conversor: 200 V
- Número de fases: 3
- Estrutura: tubular

5.2. Dados complementares

De acordo com [2, 3] considera-se para a força tangencial por unidade de superfície (densidade de força) o valor

$$F_x = 20 \text{ kN/m}^2 = 2 \text{ N/cm}^2$$

e escolhe-se as características $\psi(i)$ como as que se representam na figura 5, sendo assinalados os coeficientes de indução relativos aos diversos troços dessas características [3].

Note-se que, na prática, a desligação do conversor que alimenta cada fase dá-se para uma posição $x = x_a$ próxima do alinhamento, enquanto que o alinhamento se verifica apenas para $x = x_i + x_{passo}$, sendo, obviamente, $x_{passo} = b_p$.

Considera-se ainda

$$x_a - x_i \approx 0,8 b_p$$

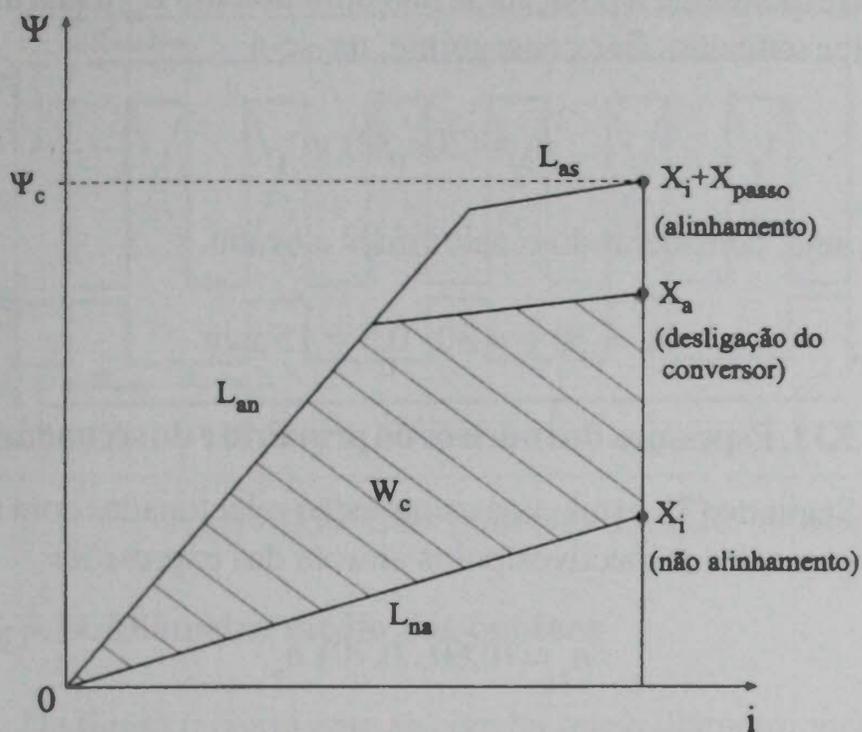


Fig. 5 - Características simplificadas $\psi(i)$.

Como as bobinas são circulares, ocupando cada bobina uma única cava, impõe-se

$$\begin{aligned} b_p &= c_p = 15 \text{ mm} \\ b_s &= b_p = 15 \text{ mm} \end{aligned}$$

donde

$$x_a - x_i \approx 12 \text{ mm}$$

Quanto ao entreferro, terá o valor $g = 0,5 \text{ mm}$.

5.3. Passos de cava

Tem-se assim para o primário e para o secundário, respectivamente,

$$\begin{aligned} \tau_p &= b_p + c_p = 15 + 15 = 30 \text{ mm} \\ \tau_s &= b_s + c_s = b_s + 2 b_s = 15 + 2 \cdot 15 = 45 \text{ mm} \end{aligned}$$

Estes valores satisfazem a relação expressa por (1),

$$3 \cdot 30 = 2 \cdot 45$$

5.4 Diâmetro interior do primário

Anteriormente, assumiu-se uma densidade de força com o valor de 2 N/cm^2 . No entanto, sendo o primário constituído por cavas e dentes, com a mesma largura, e como a força se exerce apenas no ferro, ou seja, nos dentes, o valor efectivo daquela densidade de força será $2 \cdot 2 \text{ N/cm}^2 = 4 \text{ N/cm}^2$.

Deste modo, como a força total de 300 N é produzida apenas por dois dentes do primário, uma vez que as três fases são ligadas uma de cada vez, resulta

$$\begin{aligned} F &= (\text{área de dois dentes do primário}) \cdot (\text{densidade de força}) = \\ &= (\pi D_{ip} \cdot 2 b_p) \cdot (F_x) = 2 \pi b_p D_{ip} F_x \end{aligned} \quad (22)$$

sendo D_{ip} o diâmetro da periferia interior do primário.

Assim, vem

$$D_{ip} = \frac{F}{2 \pi b_p F_x} = \frac{300}{2 \pi \cdot 1,5 \cdot 4} = 8 \text{ cm}$$

5.5. Número de espiras por bobina

Viu-se anteriormente que

$$\psi_c = \frac{V_0}{V} (x_a - x_i) \quad (23)$$

mas como, por outro lado, se tem

$$\psi_c = (\text{número de espiras por fase}) \cdot (\text{fluxo no entreferro}) = \quad (24)$$

$$\begin{aligned} &= (2 \cdot \text{número de espiras por bobina}) \cdot (\text{indução no} \\ &\quad \text{entreferro} \cdot \text{área de cada dente}) = \\ &= (2 N_1) \cdot (B_g \cdot \pi D_{ip} b_p) = 2 \pi b_p B_g D_{ip} N_1 \end{aligned}$$

igualando (23) e (24) obtém-se

$$N_1 = \frac{V_0}{V} \cdot \frac{x_a - x_i}{2 \pi} \cdot \frac{1}{b_p B_g D_{ip}} \quad (25)$$

impondo $B_g = 1,5 \text{ T}$, ter-se-á

$$N_1 = \frac{200}{1,5} \cdot \frac{0,012}{2 \pi} \cdot \frac{1}{0,015 \cdot 1,5 \cdot 0,08} = 140 \text{ espiras}$$

5.6. Indutâncias

No alinhamento, a indutância não saturada L_{an} é dada por

$$L_{an} = \frac{4 N_1^2}{R_{an}} \quad (26)$$

sendo R_{an} a relutância magnética na posição de alinhamento. Como se considera toda esta relutância concentrada no ferro, será

$$R_{an} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{2 g}{\pi D_{ip} b_p} \quad (27)$$

ou seja,

$$L_{an} = 2 \pi \mu_0 \frac{D_{ip} b_p}{g} N_1^2 \quad (28)$$

Substituindo valores,

$$L_{na} = 2 \pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{0,08 \cdot 0,015}{0,0005} 140^2 = 0,4 \text{ H}$$

Segundo [3], tem-se para a indutância de não alinhamento L_{na}

$$L_{na} = \frac{L_{na}}{10} = \frac{0,4}{10} = 0,04 \text{ H}$$

5.7. Energia

Esta energia, que corresponde à área do ciclo de trabalho (Fig. 5), pode ser calculada pela expressão

$$W_c = F x_{passo} k_t \quad (29)$$

sendo k_t o factor de carga. Considerando $k_t = 1,0$, ter-se-á

$$W_c = 300 \cdot 0,015 \cdot 1,0 = 4,5 \text{ J}$$

5.8. Corrente por fase

Tendo em atenção a figura 5, a área do ciclo de trabalho é dada pela expressão [3]

$$W_c = k_c \left[(\psi_c - L_{na} I_c) k_t I_c - \frac{(\psi_c - L_{na} I_c)^2 k_t^2}{2 L_{an}} \right] \quad (30)$$

sendo k_c um coeficiente menor que a unidade, para se considerar a situação $L_{as} \neq L_{na}$, sendo L_{as} a indutância do troço da saturação da característica $\psi(i)$ no alinhamento. Saliente-se que a força por unidade de corrente é máxima quando $L_{as} = L_{na}$ [3, 4].

Considerando $k_c = 0,7$, como, de (23), se tem

$$\psi_c = \frac{200}{1,5} \cdot 0,012 = 1,6 \text{ Wb}$$

ao substituir os restantes valores em (30), obtém-se

$$I_c = 6,5 \text{ A}$$

5.9. Altura das cavas do primário

Sendo k_e o factor de enchimento das cavas do primário,

$$k_e = \frac{A_{Cu}}{A_p} \quad (31)$$

em que A_{Cu} representa a área da cava correspondente ao cobre, e A_p a área total da cava, como

$$A_p = c_p h_p \quad (32)$$

virá

$$h_p = \frac{A_{Cu}}{c_p k_e} \quad (33)$$

Por outro lado, como em cada cava se tem N_1 condutores, e sendo J a densidade de corrente no cobre, pode-se escrever

$$A_{Cu} = N_1 S_{Cu} \quad (34)$$

$$J = \frac{I_c}{S_{Cu}} \quad (35)$$

em que S_{Cu} representa a secção do condutor.

Conjugando (33), (34) e (35) obtém-se

$$h_p = \frac{N_1 I_c}{c_p k_e J} \quad (36)$$

Impondo $k_e = 0,40$ e $J = 3,5 \text{ A/mm}^2$, obtém-se

$$h_p = \frac{140 \cdot 6,5}{15 \cdot 0,40 \cdot 3,5} = 43 \text{ mm (45 mm)}$$

5.10. Altura das cavas do secundário

De acordo com [2], esta altura deverá ser 20 a 30 vezes superior ao entreferro, para que a indutância mínima,

correspondente à posição de não alinhamento L_{na} tenha um valor reduzido. Por conseguinte, ter-se-á

$$h_s = (20 \dots 30) g \quad (37)$$

ou seja, considerando o valor mais elevado,

$$h_s = 30 g = 30 \cdot 0,5 = 15 \text{ mm}$$

5.11. Espessura dos núcleos do primário e do secundário

Segundo [2], estas espessuras estão relacionadas com as larguras dos respectivos polos através das expressões

$$n_p = (0,60 \dots 0,70) b_p \quad (38)$$

$$n_s = (0,60 \dots 0,70) b_s \quad (39)$$

Escolhendo o valor médio, e como $b_p = b_s$, virá

$$n_p = n_s = 0,65 \cdot 15 = 9,75 \text{ mm (10 mm)}$$

5.12. Dimensões exteriores

Como se conhece as dimensões dos dentes e das cavas, os diâmetros exteriores do primário e do secundário, bem como do veio, serão calculados, respectivamente, pelas seguintes expressões:

$$D_{ep} = D_{ip} + 2(h_p + n_p) \quad (40)$$

$$D_{es} = D_{is} - 2g \quad (41)$$

$$D_{is} = D_{es} - 2(h_s + n_s) \quad (42)$$

Deste modo, calcula-se (Fig. 6)

$$D_{ep} = 80 + 2(45 + 10) = 190 \text{ mm}$$

$$D_{es} = 80 - 2 \cdot 0,5 = 79 \text{ mm}$$

$$D_{is} = 79 - 2(15 + 10) = 29 \text{ mm}$$

5.13. Diâmetro do condutor

Sendo

$$S_{Cu} = \frac{\pi d_{Cu}^2}{4} \quad (43)$$

atendendo a (33) e a (34) obtém-se o diâmetro do condutor

$$d_{Cu} = 2 \sqrt{\frac{k_e c_p h_p}{\pi N_1}} \quad (44)$$

ou seja,

$$d_{Cu} = 2 \sqrt{\frac{0,40 \cdot 15 \cdot 45}{\pi \cdot 140}} = 1,56 \text{ mm (1,5 mm)}$$

Para o diâmetro normalizado de 1,5 mm, o factor de enchimento das cavas passaria a ser $k_e = 0,37$, e a densidade de corrente $J = 3,7 \text{ A/mm}^2$.

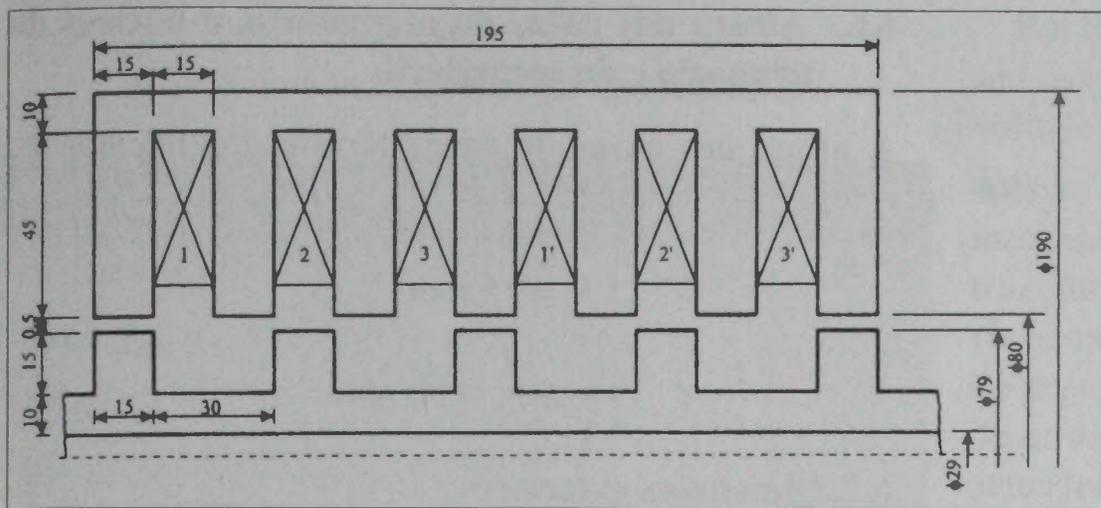


Fig. 6 - Dimensões principais do ALRC tubular.

$$\eta = \frac{450}{450 + 145} = 0,76 \text{ (76\%)}$$

6. Dimensionamento de um ALRC Plano

Na secção anterior dimensionou-se um ALRC com estrutura tubular, propondo-se uma determinada metodologia de cálculo. Para que se possa comparar o seu desempenho, apresenta-se seguidamente o dimensionamento de um ALRC com estrutura plana (Fig. 7), com as mesmas especificações expostas em 5.1 para o ALRC tubular. A metodologia a seguir é a mesma, havendo alteração de algumas equações, devido à estrutura ser plana. Além disso, este ALRC plano é um actuador 6/4, isto é, com 6 polos no primário e 4 polos no secundário, na medida em que cada dente do primário é abraçado por uma bobina e cada cava comporta duas bobinas.

Por conseguinte, tem-se assim,

$$F_x = 2 \text{ N/cm}^2$$

$$b_p = c_p = 15 \text{ mm}$$

$$b_s = b_p = 15 \text{ mm}$$

$$x_a - x_i \approx 12 \text{ mm}$$

$$g = 0,5 \text{ mm}$$

$$\tau_p = 30 \text{ mm}$$

$$\tau_s = 45 \text{ mm}$$

5.14. Diâmetro médio das bobinas

Da figura 6 facilmente se conclui que o diâmetro médio das bobinas é

$$D_1 = D_{ip} + h_p \quad (45)$$

tendo o valor

$$D_1 = 190 + 45 = 135 \text{ mm}$$

5.15. Perdas no cobre

As perdas no cobre são calculadas através da expressão

$$P_{Cu} = B_1 R_b I_c^2 \quad (46)$$

sendo B_1 o número de bobinas do primário e R_b a resistência de cada bobina. Como

$$R_b = \rho_{Cu} \frac{\pi D_1}{S_{Cu}} N_1 \quad (47)$$

ter-se-á

$$P_{Cu} = \rho_{Cu} \frac{\pi D_1}{S_{Cu}} B_1 N_1 I_c^2 \quad (48)$$

ou seja,

$$P_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8} \frac{\pi \cdot 0,135}{\pi \frac{0,0015^2}{4}} 6.140 \cdot 6,52 = 145 \text{ W}$$

5.16. Potência mecânica

A potência mecânica é dada pela expressão

$$P_{mec} = F V$$

e tem o valor

$$P_{mec} = 300 \cdot 1,5 = 450 \text{ W}$$

5.17. Rendimento

Desprezando as perdas no ferro, o valor do rendimento é

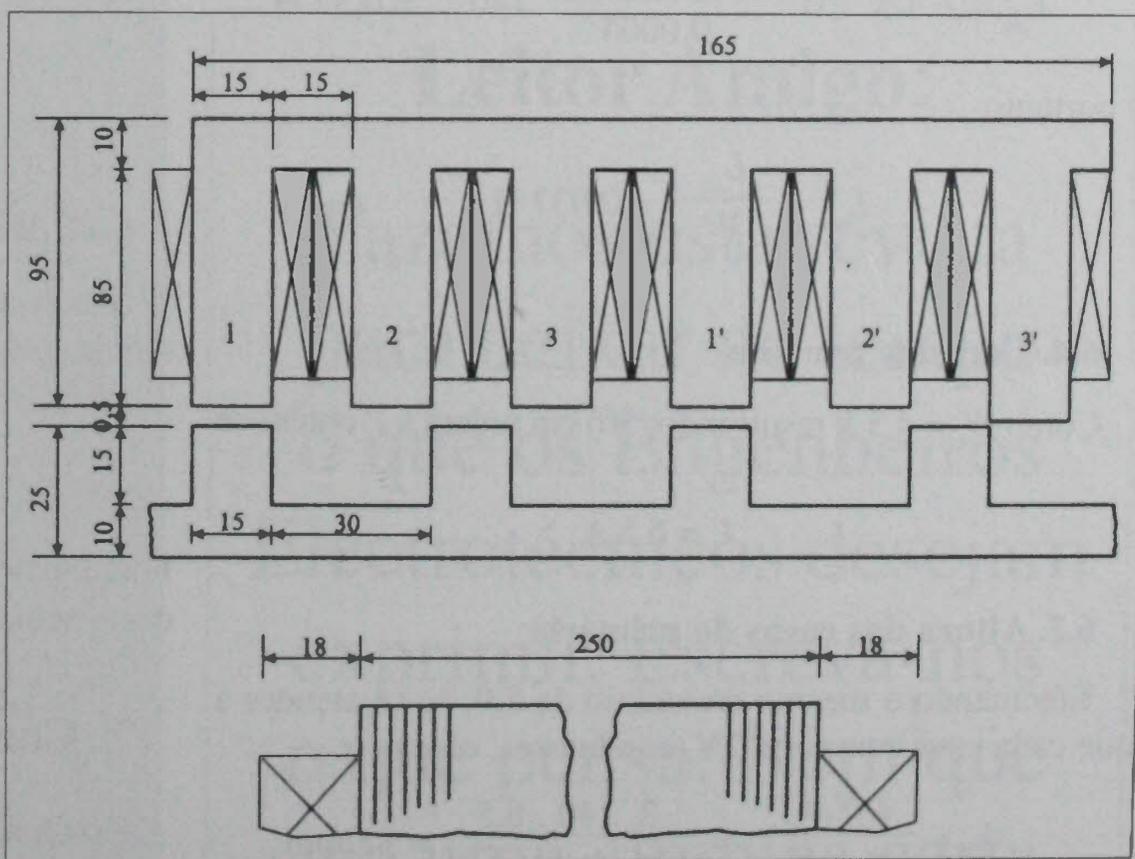


Fig. 7 - Dimensões principais do ALRC plano.

6.1. Largura das laminações

Seguindo o mesmo raciocínio de 5.4, obtém-se

$$F = (w \cdot 2b_p) \cdot (F_x) = 2b_p w F_x \quad (50)$$

ou seja,

$$w = \frac{F}{2b_p F_x} = \frac{300}{2 \cdot 1,5 \cdot 4} = 25 \text{ cm}$$

6.2. Número de espiras por bobina

Como em 5.5, tem-se

$$\psi_c = (2 N_1) \cdot (B_g \cdot w b_p) = 2 b_p w B_g N_1 \quad (51)$$

e, atendendo a (23), virá

$$N_1 = \frac{V_0}{V} \cdot \frac{x_a - x_i}{2} \cdot \frac{1}{b_p w B_g} \quad (52)$$

donde

$$N_1 = \frac{200}{1,5} \cdot \frac{0,012}{2} \cdot \frac{1}{0,015 \cdot 0,025 \cdot 1,5} = 140 \text{ espiras}$$

6.3. Indutâncias

Como

$$R_{an} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{2g}{w b_p} \quad (53)$$

virá

$$L_{an} = \frac{4 N_1^2}{R_{an}} = 2 \mu_0 \frac{w b_p}{g} N_1^2$$

ou seja,

$$L_{an} = 2 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,25 \cdot 0,015}{0,0005} \cdot 140^2 = 0,37 \text{ H}$$

e portanto

$$L_{na} = \frac{L_{an}}{10} = 0,037 \text{ H}$$

6.4. Corrente por fase

Como $W_c = 4,5 \text{ J}$, resolvendo (30) em ordem a I_c obtém-se

$$I_c = 6,5 \text{ A}$$

6.5. Altura das cavas do primário

Efectuando o mesmo raciocínio de 5.9, se se atender a que cada cava comporta $2N_1$ condutores, obtém-se

$$h_p = \frac{2 N_1 I_c}{c_p k_c J} = \frac{2 \cdot 140 \cdot 6,5}{15 \cdot 0,40 \cdot 3,5} = 85 \text{ mm}$$

6.6. Altura das cavas do secundário, e núcleos do primário e do secundário

A altura das cavas do secundário e dos núcleos do primário e do secundário são

$$h_s = 15 \text{ mm}$$

$$n_p = n_s = 10 \text{ mm}$$

6.7. Dimensões exteriores

As alturas do primário e do secundário serão, respectivamente,

$$H_p = h_p + n_p = 85 + 10 = 95 \text{ mm}$$

$$H_s = h_s + n_s = 15 + 10 = 25 \text{ mm}$$

6.8. Diâmetro do condutor

De acordo com [2], pode-se considerar

$$d_{Cu} = 2 \sqrt{\frac{k_c c_p h_p}{2 \pi N_1}} = 2 \sqrt{\frac{0,40 \cdot 15 \cdot 85}{2 \pi \cdot 140}} = 1,5 \text{ mm}$$

6.9. Comprimento médio das bobinas

De acordo com [2], pode-se considerar

$$L_1 = 2 w + 1,2 \pi b_p = 2 \cdot 250 + 1,3 \pi \cdot 15 = 560 \text{ mm}$$

6.10. Perdas no cobre

Como se tem

$$R_b = \rho_{Cu} \frac{L_1}{S_{Cu}} N_1$$

obtém-se as perdas no cobre

$$\begin{aligned} P_{Cu} &= \rho_{Cu} \frac{L_1}{S_{Cu}} B N_1 I_c^2 = \\ &= 1,7 \cdot 10^{-8} \frac{0,560}{\pi \cdot 0,0015^2} \cdot 6.140 \cdot 6,5^2 = 190 \text{ W} \end{aligned}$$

6.11. Rendimento

Sendo a potência mecânica igual a 450 W, tem-se o rendimento

$$\eta = \frac{450}{450 + 190} = 0,70 \text{ (70\%)}$$

Finalmente, na figura 7 mostram-se as dimensões principais deste actuador.

7. Conclusões

No Quadro 1 encontram-se expostos os valores obtidos no dimensionamento dos ALRC's tubular e plano, para melhor comparação.

Quadro 1

Valores de dimensionamento dos ALRC's.

Parâmetro	Símbolo	Tubular	Plano	Unidades
Força de tracção	F	300	300	N
Velocidade	V	1,5	1,5	m/s
Tensão	V_0	200	200	V
Número de fases	m	3	3	--
Número de polos do primário	--	7	6	--
Número de polos do secundário	--	5	4	--
Potência mecânica	P_{mec}	450	450	W
Largura dos polos do primário	b_p	15	15	mm
Largura dos polos do secundário	b_s	15	15	mm
Largura das cavas do primário	c_p	15	15	mm
Largura das cavas do secundário	c_s	30	30	mm
Comprimento total do primário	--	195	165	mm
Entreferro	g	0,5	0,5	mm
Diâmetro exterior do primário	D_{ep}	190	--	mm
Diâmetro interior do primário	D_{ip}	80	--	mm
Diâmetro exterior do secundário	D_{es}	79	--	mm
Largura das laminações	w	--	250	mm
Altura das cavas do primário	h_p	45	85	mm
Altura das cavas do secundário	h_s	15	15	mm
Altura do primário	H_p	55	95	mm
Altura do secundário	H_s	25	25	mm
Número de espiras por bobina	N_1	140	140	--
Diâmetro do fio de bobinagem	d_{cu}	1,5	1,5	mm
Diâmetro médio das bobinas	D_1	135	--	mm
Comprimento médio das bobinas	L_1	--	560	mm
Corrente	I_c	6,5	6,5	A
Rendimento	η	76	70	%
Força por unidade de volume	f_v	$54 \cdot 10^3$	$49 \cdot 10^3$	N/m ³

Em linhas gerais, estes dois actuadores são similares no seu desempenho. O rendimento e a força por unidade de volume são ligeiramente inferiores no actuador plano, devido às cabeças das bobinas que, como se sabe, são inactivas no que respeita ao desenvolvimento da força de tracção. Os ALRC's são actuadores especialmente vocacionados para accionamentos de força com controlo de posição, sendo de salientar que a força específica que desenvolvem é significativamente superior à dos outros actuadores lineares. Uma vez que a corrente em cada fase deve ser interrompida um pouco antes da posição do alinhamento, para que esse alinhamento se processe da melhor maneira possível, o sistema de controlo, em cadeia fechada, deverá permitir que tal aconteça, devendo a intensidade da corrente ser igualmente variável durante o período de condução, de modo a limitar as oscilações da força. Daí que se deva utilizar, por exemplo, controladores por modo de deslizamento. Presentemente, estes actuadores bem como a sua alimentação e o seu controlo, encontram-se em investigação no Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, pelos autores deste artigo. **E**

Referências Bibliográficas

- [1] P. Gonçalves Baiona, C. Pereira Cabrita, *Dimensionamento de motores de relutância variável comutados*, Electricidade, n.º 343, Abril 1997, p. 96-105.
- [2] T. Miller, *Switched reluctance motors and their control*, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [3] I. Boldea, S. A. Nasar, *Linear electric actuators and generators*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [4] R. Krishnan e outros, *Design procedure for switched-reluctance motors*, Transactions of IEEE, Industrial Applications, Vol. 24, 1998, p. 456-461.

Leitor Amigo:

Fazemos esta revista para deixar no tempo o que os Engenheiros Electrotécnicos desejam exprimir. Escreva-nos o que pensa. Nem que seja uma simples carta.