

Manuel Jazelino Costa

Maria Eduarda Vieira da Costa

Departamento de Engenharia ELectrónica e de Computadores

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Contribuições para a Concepção de um Forno de Indução sem Núcleo Magnético

1. Introdução

Os fornos de indução sem núcleo magnético, de média ou alta frequência, geralmente são constituídos por uma cuba, contendo a matéria a tratar (secundário) e um enrolamento indutor (primário), que envolve essa cuba.

No que se refere às grandezas eléctricas em jogo, o estudo de qualquer tipo de forno de indução pode ser feito de forma idêntica ao de um transformador, com o secundário (matéria a tratar) em curto-circuito (Fig. 1). No caso de um forno de indução sem núcleo magnético, essa semelhança será considerada em relação a um transformador com núcleo de ar.

Se se designar por

r_1 - a resistência do enrolamento primário;

r_2 - a resistência do secundário;

L_1 - o coeficiente de auto-indução do enrolamento primário;

L_2 - o coeficiente de auto-indução do secundário;

M_{12} - o coeficiente de indução mútua do enrolamento primário para o secundário;

M_{21} - o coeficiente de indução mútua do secundário para o enrolamento primário;

U_1 - o valor eficaz da tensão aplicada ao primário;

I_1 - o valor eficaz da intensidade de corrente que atravessa o enrolamento primário; e

I_2 - o valor eficaz da intensidade de corrente que atravessa o secundário,

pode-se escrever as seguintes equações de funcionamento de um forno de indução sem núcleo magnético, referentes ao primário e ao secundário:

$$\dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M_{21} \dot{I}_2$$

$$0 = r_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M_{12} \dot{I}_1$$

Nos circuitos considerados, pode-se escrever

$$M_{12} = M_{21} = M$$

A partir das equações atrás referidas, obtém-se

$$\dot{I}_2 = - \frac{j\omega M r_2 \dot{I}_1 + \omega^2 L_2 M \dot{I}_1}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2}$$

$$\dot{U}_1 = \left(r_1 + \frac{\omega^2 M^2 r_2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) \dot{I}_1 + j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) \dot{I}_1$$

Se se fizer

$$R_1 = r_1 + \frac{\omega^2 M^2 r_2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2}$$

$$X_1 = \omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right)$$

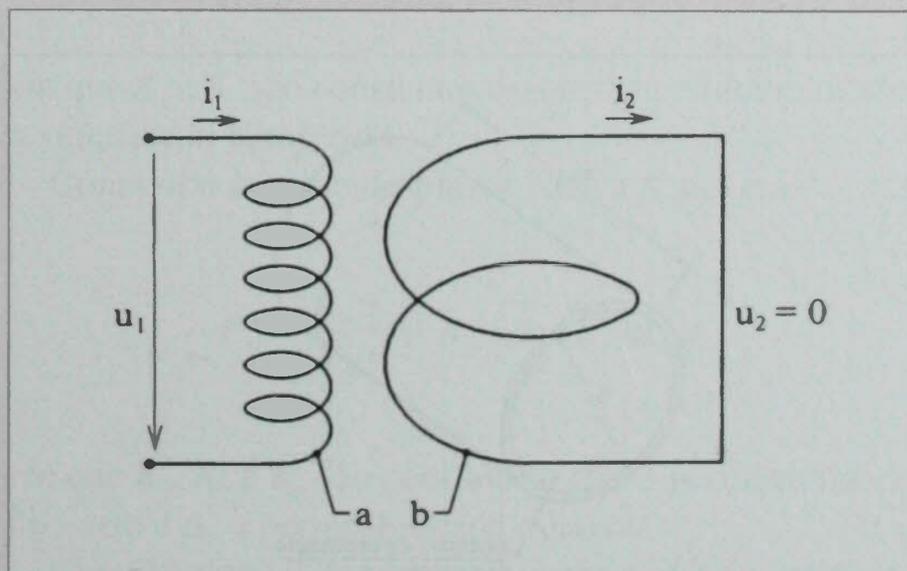


Fig. 1 - Esquema eléctrico de um forno de indução.

a - enrolamento primário

b - enrolamento secundário (matéria a aquecer)

respectivamente a resistência e a reactância equivalentes do forno de indução, referidas ao circuitos primário, resulta simplesmente

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1$$

2. Referência à substância a tratar

Vamos considerar que a substância a tratar é um bloco cilíndrico (Fig. 2).

Se se representar por

- ρ - a resistividade da substância a tratar;
- μ - a permeabilidade magnética do meio;
- ω a pulsação da corrente;
- h - a altura do bloco cilíndrico;
- d - o diâmetro do cilindro;
- n - o número de espiras do enrolamento primário;
- I_1 - a intensidade de corrente que percorre o enrolamento indutor (primário); e

$e = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$, a espessura de penetração da corrente ou espessura do efeito pelicular,

a resistência r_2 deste bloco cilíndrico será dada por

$$r_2 = \rho \frac{\pi d}{he}$$

ou

$$r_2 = \frac{\pi d \sqrt{\mu\omega\rho}}{\sqrt{2} h}$$

O coeficiente de auto-indução do secundário L_2 é dado por $L_2 = 1/R$ em que R é a relutância do circuito magnético. Como

$$R = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{4h}{\pi d^2}$$

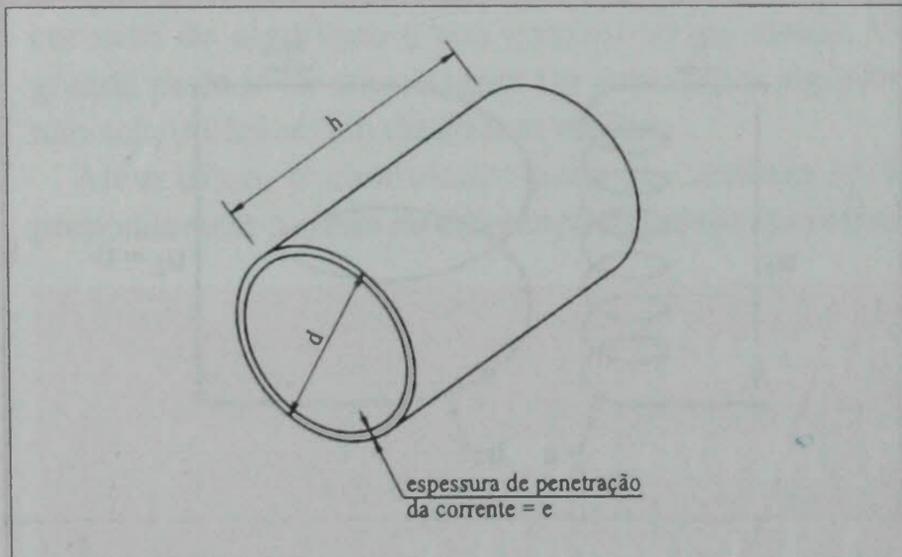


Fig. 2 - Cilindro condutor (secundário), mostrando a espessura de penetração da corrente.

o coeficiente de auto-indução L_2 será

$$L_2 = \mu \frac{\pi d^2}{4h}$$

3. Potência absorvida no secundário do forno considerado

Começamos por calcular o volume V do metal a tratar por minuto

$$V = \frac{\pi \frac{d^2}{4} h}{t}$$

supondo que o metal a tratar é o cilindro atrás considerado e t o tempo que demora o tratamento.

Conhecida a densidade δ do metal líquido, o peso p do metal a tratar por minuto será $p = V\delta$ e a quantidade de calor Q necessária para tratar essa porção de metal, durante o mesmo tempo, vem

$$Q = pc\Delta\theta,$$

em que c é o calor específico do metal e $\Delta\theta$ a diferença entre a temperatura a atingir no forno e o ambiente.

A potência P_2 absorvida no secundário será dada por

$$P_2 = \frac{4,18}{60} Q \approx 0,07 Q$$

4. Intensidade de corrente e tensão primárias necessárias para o tratamento do metal

A potência P_2 absorvida no secundário é dada por

$$P_2 = \frac{M^2 \omega^2 r_2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2} I_1^2$$

Dada a relação entre o coeficiente de indução mútua M e o coeficiente de auto-indução L_2

$$M = KnL_2$$

onde K é o coeficiente de acoplamento entre o primário e o secundário e n o número de espiras do enrolamento primário, então P_2 será dado por

$$P_2 = \frac{K^2 n^2 L_2^2 \omega^2 r_2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2} I_1^2$$

Esta expressão pode tomar a forma

$$P_2 = \frac{K^2 n^2 \mu \pi d^3 \omega \sqrt{\mu \omega \rho}}{\sqrt{2(8\rho h + \omega \mu d^2 h)}} I_1^2$$

ou

$$P_2 = \frac{K^2 \sqrt[5]{8} \pi^2 \mu^{\frac{3}{2}} n^2 f^2 \rho^{\frac{3}{2}} d^3}{8 \rho \sqrt{2 h + 2 \sqrt{2} \pi f \mu d^2 h}} I_1^2$$

donde

$$P_2 = K^2 \frac{\pi^{\frac{5}{2}} n^2 f^2 \mu^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{3}{2}} d^3}{4 \rho h + \pi f \mu d^2 h} I_1^2$$

A intensidade de corrente I_1 que deve percorrer o enrolamento primário é

$$I_1 = \frac{\sqrt{0,07 Q}}{K} \cdot \frac{(4\rho h + \pi f \mu d^2 h)^{\frac{1}{2}}}{\pi^{\frac{5}{4}} n f^{\frac{3}{4}} \rho^{\frac{1}{4}} d^{\frac{1}{2}} \mu^{\frac{3}{4}}}$$

Do conhecimento da lei de magnetização, o valor do campo magnético ou excitação magnética será

$$H = \frac{n I_1}{h}$$

em que os símbolos têm os significados já atrás mencionados.

A partir dos valores da excitação e da permeabilidade magnéticas pode-se calcular a indução magnética

$$B = \mu H$$

Por outro lado, a tensão U_1 que deve ser aplicada ao primário para efectuar o tratamento do metal vem

$$U_1 = 4,44 f n A B_m$$

em que $A = \pi d^2/4$, sendo B_m a indução magnética máxima e tendo os restantes símbolos os significados já considerados.

5. Intensidade de corrente e tensão primárias no caso da têmpera superficial

No caso da têmpera superficial procura-se reduzir ao mínimo o tempo de operação, para evitar o sobreaquecimento, impedindo que, por condutibilidade, o calor se transmita ao interior da peça a temperar. Quando esta

atinge o ponto de Curie, a sua permeabilidade magnética baixa e então as correntes induzidas deixam de se concentrar   superfície, o que significa que a espessura do efeito pelicular aumenta.

Para que a têmpera superficial satisfaça do ponto de vista técnico, admite-se, aproximadamente, que a espessura do efeito pelicular não ultrapassa metade da espessura do metal a temperar.

A energia total aplicada W para temperar a peça decompõe-se em duas parcelas: uma W' que é absorvida durante o tempo em que o metal é ainda ferromagnético, isto é, antes de se atingir o ponto de Curie, e outra W'' que é absorvida durante o tempo em que a peça a tratar deixa de ser ferromagnética, até se atingir a temperatura da têmpera.

Considera-se, aproximadamente,

$$W' = 0,88 W$$

$$W'' = 0,12 W$$

Por outro lado, a potência absorvida P_2 , como se viu, pode-se escrever sob a forma

$$P_2 = K^2 \frac{\pi^{\frac{5}{2}} n^2 f^2 \mu^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{3}{2}} d^3}{4 \rho h + \pi f \mu d^2 h} I_1^2$$

Durante a primeira e segunda parte da operação de têmpera superficial, a única diferença a notar, no que respeita à potência absorvida P_2 , é a permeabilidade magnética μ . De início, o material   ferromagnético e, portanto, a permeabilidade   elevada; depois, quando se atinge o ponto de Curie, a permeabilidade baixa significativamente.

Enquanto o metal   ferromagnético, teremos então

$$P_2 = \frac{K_1 \mu^{\frac{3}{2}}}{4\rho h + K_2 \mu}$$

em que K_1 e K_2 são constantes e os restantes símbolos têm o significado já referido.

Como $4\rho h$ se pode desprezar, face a $K_2 \mu$, vem

$$P_2 = \frac{K_1 \mu^{\frac{3}{2}}}{K_2 \mu} \approx K_3 \sqrt{\mu} = K_3 \sqrt{\mu_0 \mu_r}$$

em que K_1 , K_2 e K_3 são constantes, μ_0   a permeabilidade do vazio e μ_r , a permeabilidade relativa.

Quando o metal atinge o seu ponto de Curie, verifica-se que o metal deixa de ser ferromagnético, ou seja,

$$P_2' \approx K_3 \sqrt{\mu_0}$$

Comparando as duas últimas expressões conclui-se

$$\frac{P_2}{P'_2} \approx \sqrt{\mu_r}$$

Se T for a taxa de aquecimento (em W/m^2) e t e t' , respectivamente, os tempos de aquecimento, antes e depois de se atingir o ponto de Curie, até ao final do processo de têmpera, a energia total aplicada W será

$$W = T(t + t') \pi dh,$$

tendo os símbolos o significado atrás atribuído.
Como

$$W' = P_2 t = 0,88 T(t + t') \pi dh$$

e

$$W'' = P'_2 t' = 0,12 T(t + t') \pi dh$$

e ainda

$$\frac{t'}{t} = 0,13 \sqrt{\mu_r}$$

deduz-se

$$P_2 = \frac{T}{1,13} (0,13 \sqrt{\mu_r} + 1) \pi dh$$

É possível agora determinar a intensidade de corrente que percorre o primário I_1 , através da expressão

$$I_1 = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{T}{1,13} (0,13 \mu_r^{\frac{1}{2}} + 1) \pi dh \frac{4 \rho h + \pi f^{\frac{3}{2}} \mu d^2 h}{\pi^{\frac{5}{2}} n^2 f^{\frac{3}{2}} \mu^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{1}{2}} d^3}}$$

Conhecido I_1 , pode-se calcular a excitação magnética ou campo magnético H e a indução magnética B , pelas expressões

$$H = \frac{n I_1}{h}$$

e

$$B = \mu H$$

A tensão U_1 que se deve aplicar ao primário para executar a têmpera superficial da peça pode, por sua vez, ser determinada por

$$U_1 = 4,44 f n \frac{\pi d^2}{4} B_{\max}$$

fórmula básica a usar no projecto de um forno de indução sem núcleo magnético. **E**

Referências Bibliográficas

- [1] M. Orfeuil, *Electrothermie Industrielle: Fours et Equipements Termiques Électriques Industriels*, Dunod.
- [2] V. Paschkis, *Les Fours Électriques Industriels*, Vol. 2, Dunod.
- [3] F. Lauster, *Manuel d'Électrothermie Industrielle*, Dunod.

Em Janeiro 2001
com a entrada no Novo Século
a revista *ELECTRICIDADE*
será uma Nova Revista
FINALMENTE A GRANDE MUDANÇA