



kroton
paixão por educar

GRADUAÇÃO PRESENCIAL
2º semestre- 2016

Conversão
Eletromecânica de Energia
Eng^a Elétrica– 5º/ 6º semestres

Prof. Ms. Cristiano Malheiro

cmalheiro@anhanguera.com
cmalheiro@aedu.com

<http://cristiano1tm.wix.com/aulas>

1



Aula 10

Bibliografia Básica



1. DEL TORO, V.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009. No **Acervo: 621.31042 D439f (5 exemplares)**

2. SOARES, Ronaldo Alves. **Conversão Eletromecânica de Energia**. 1ª edição. São Paulo: Mc Editora Universitária Leopoldianum, 2008. *(alteração do PEA- exemplar do professor- disponibilidade de páginas aos alunos)*

3. SIMONE, Gilio Aluísio; CREPPE, Renato Crivellari. **Conversão Eletromecânica de Energia**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012, v. 1. **Acervo: 621.31 S618c (19 exemplares)**



Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

a) **Magnetização:** ocorre na mesma direção e sentido do campo magnético aplicado.

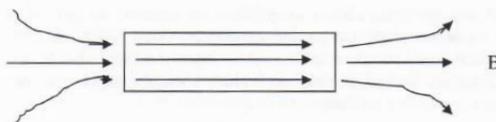
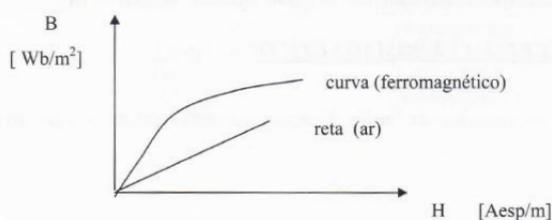


Figura 11 - distribuição das linhas de campo

b) **Permeabilidade:** a permeabilidade (μ) destes materiais não é constante como a do ar.



A permeabilidade do ar é um pouco superior a μ_0 , entretanto, nos cálculos usuais considera-se que são iguais: $\mu_{ar} = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]



Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

c) **Curva normal de magnetização:**

A curva normal de magnetização de um material, que pode ser observada na figura 13, relaciona a indução magnética (B) com a intensidade magnética do campo aplicado (H), para uma variação contínua e crescente da corrente de excitação.

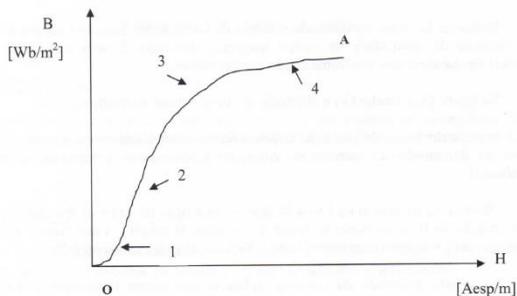


Figura 13 - Comportamento da curva de magnetização de material ferromagnético

4





Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

Nos materiais ferromagnéticos não existe uma relação linear de proporcionalidade entre B (indução magnética) e H (intensidade do campo magnético). Isso significa que, caso a corrente de magnetização seja senoidal, o fluxo (ϕ) ou a indução magnética (B) terão uma forma de onda diferente da senoidal.

Em função disto, os fornecedores desses materiais fornecem as curvas de magnetizações, para que se possam fazer previsões do comportamento do material sob influência do campo magnético.

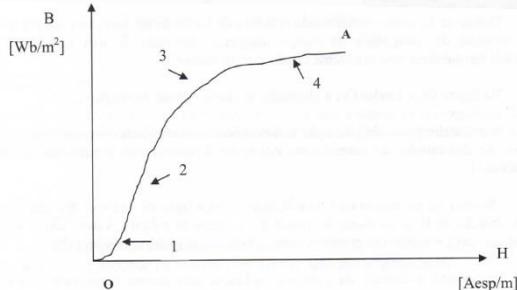


Figura 13 - Comportamento da curva de magnetização de material ferromagnético

5



Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

A obtenção da curva de magnetização é feita ensaiando-se um determinado material de um núcleo ferromagnético excitado com NI (ampère-espiras).

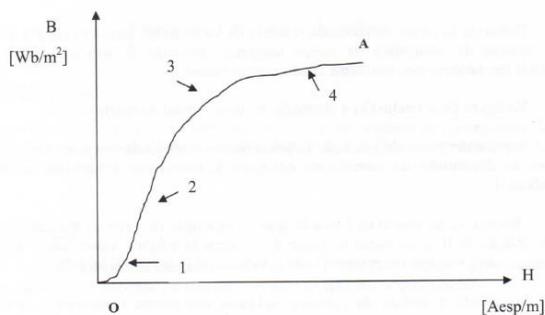


Figura 13 - Comportamento da curva de magnetização de material ferromagnético

6





Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

Eleva-se a corrente de excitação desde 0[A], obtendo-se o valor correspondente do fluxo magnético (ou indução magnética). Observando o comportamento dos pontos de $[B ; H]$ ou $[\phi ; I]$, nota-se que, a partir de um determinado valor de corrente (ou de intensidade de campo H), o fluxo magnético (ou indução magnética) não sofre variação considerável, mantendo-se praticamente constante. Essa região recebe o nome de “saturação”, sendo a principal causa da deformação entre as grandezas corrente e tensão, gerando nessas grandezas (corrente e tensão) as harmônicas superiores.

Na região 1, a variação de B é maior que a variação de H .

Na região 2, praticamente tem-se um comportamento retilíneo, com variação constante de B e de H .

Na região 3, a variação da densidade magnética B é menor que a variação de H .

Na região 4, temos praticamente uma reta, com variação muito discreta de B para grandes variações de H . Nessa região, chamada de saturação, praticamente todos os domínios magnéticos já estão paralelos ao campo aplicado.

7



Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

d) Histerese e ciclo de histerese:

Define-se histerese como sendo o atraso da variação da indução magnética B para uma variação da intensidade de campo magnético aplicado. É uma característica dos materiais ferromagnéticos, conforme citado anteriormente.

Na figura 14, o trecho O-I é chamado de curva normal de magnetização.

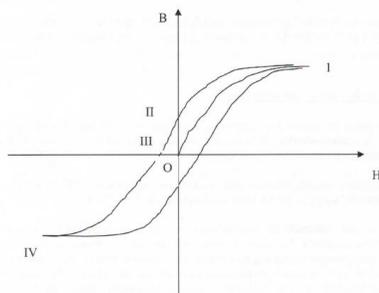


Figura 14 - Ciclo ou laço de histerese

8



Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

A partir do ponto de saturação I, diminuindo a intensidade do campo magnético H, através da diminuição da corrente de excitação I, observa-se a variação da indução magnética B.

Observa-se, no trajeto de I para II, que a diminuição do valor de B é mais lenta do que a variação de H, e, no ponto II, apesar de o campo H atingir o valor “zero”, a indução magnética ainda mantém um pequeno valor, chamado de indução residual (Br).

Invertendo o sentido da corrente, aplica-se um campo magnético contrário no material e, no ponto III, anula-se a indução remanescente ou residual. Esse campo magnético que anula o B residual é chamado de campo coercitivo.

Continuando a aumentar a corrente de excitação nesse sentido, atinge-se o ponto IV, representando a saturação magnética do material.

Reduzindo a corrente e invertendo-a novamente, fecha-se o laço do ponto IV ao ponto I, através do trajeto (IV-I), que pode ser observado na figura 14.

9



Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

e) Remanescência:

Após ser submetido a uma magnetização cíclica, um material ferromagnético fica com um “magnetismo residual”, chamado de indução residual (Br) ou densidade residual de fluxo magnético, mesmo quando a força magnetomotriz é nula.

f) Coercividade:

É a força magnetomotriz necessária para anular a indução residual (Br). É o campo magnético que deve ser aplicado no sentido contrário ao aplicado anteriormente.

g) Saturação:

Região da curva normal de magnetização ou do ciclo de histerese, caracterizada por uma variação desprezível da indução magnética B para variações significativas de campo magnético (ou de corrente de excitação).

10



Aula 10

Materiais Ferromagnéticos

e) Remanescência:

Após ser submetido a uma magnetização cíclica, um material ferromagnético fica com um "magnetismo residual", chamado de indução residual (B_r) ou densidade residual de fluxo magnético, mesmo quando a força magnetomotriz é nula.

f) Coercividade:

É a força magnetomotriz necessária para anular a indução residual (B_r). É o campo magnético que deve ser aplicado no sentido contrário ao aplicado anteriormente.

g) Saturação:

Região da curva normal de magnetização ou do ciclo de histerese, caracterizada por uma variação desprezível da indução magnética B para variações significativas de campo magnético (ou de corrente de excitação).

11



Aula 10

Excitação Alternada

Lei de Faraday

Faraday estabeleceu uma importante relação entre a variação de fluxo magnético e a tensão induzida. Segundo a lei de Faraday, se numa bobina de N espiras ocorrer uma variação de fluxo magnético em função do tempo, nos terminais da mesma bobina aparecerá uma força eletromotriz (f.e.m.) induzida.

Considere o fluxo concatenado (λ) numa bobina com N espiras como: $\lambda = N \cdot \phi$

Segundo a Lei de Faraday, a f.e.m. induzida nos terminais desta bobina será:

$$e(t) = - d\lambda / dt ; \text{ substituindo o fluxo concatenado, temos: } e(t) = - d(N \cdot \phi) / dt$$

$$e(t) = - (N \cdot d\phi / dt + \phi \cdot dN/dt) ; \text{ como } N = \text{constante} \rightarrow \boxed{e(t) = - N \cdot d\phi / dt} \quad (24)$$

12





Aula 10

Excitação Alternada

Lei de Faraday

Faraday estabeleceu uma importante relação entre a variação de fluxo magnético e a tensão induzida. Segundo a lei de Faraday, se numa bobina de N espiras ocorrer uma variação de fluxo magnético em função do tempo, nos terminais da mesma bobina aparecerá uma força eletromotriz (f.e.m.) induzida.

Considere o fluxo concatenado (λ) numa bobina com N espiras como: $\lambda = N \cdot \phi$

Segundo a Lei de Faraday, a f.e.m. induzida nos terminais desta bobina será:

$e(t) = - d\lambda / dt$; substituindo o fluxo concatenado, temos: $e(t) = - d(N \cdot \phi) / dt$

$e(t) = - (N \cdot d\phi / dt + \phi \cdot dN/dt)$; como $N = \text{constante} \rightarrow$ $e(t) = - N \cdot d\phi / dt$ (24)

13



Aula 10

Excitação Alternada

Lei de Faraday

No caso particular, ilustrado na figura 23, houve uma tensão induzida na própria bobina de excitação N_1 , que se chama tensão auto-induzida. Esse caso é muito comum em eletromecânica, pois a bobina que cria o fluxo magnético no núcleo é na maioria das vezes ligada a uma fonte de tensão alternada.

A tensão induzida estará sempre defasada da tensão de excitação. Veja a seguir:

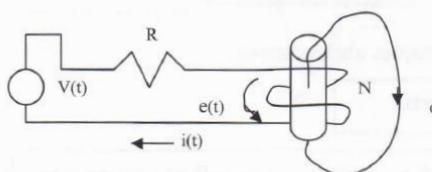


Figura 24 – tensão auto-induzida

14



Aula 10

Excitação Alternada

Lei de Faraday

No circuito da figura 24, sendo R a resistência da bobina, pode-se escrever:

$$v(t) = R \cdot i(t) - e(t) = R \cdot i(t) + N \, d\phi/dt$$

Supondo $R = 0$, temos: $v(t) = N \, d\phi/dt = v_\phi(t)$ = tensão induzida na bobina.

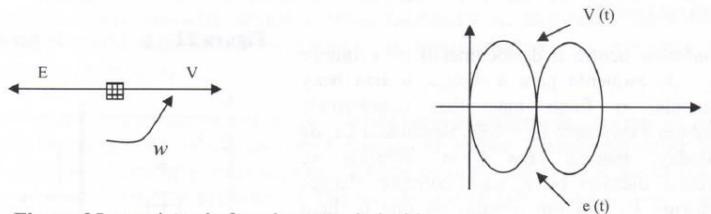


Figura 25: oposição de fase da tensão induzida

15

kroton
paixão por educar



Aula 10

Excitação Alternada

Relação Prática da Lei de Faraday

É importante para a eletromecânica a equação que relaciona o fluxo magnético com a tensão aplicada à bobina. Como vimos no parágrafo anterior:

$$v(t) = N \, d\phi/dt = v_\phi(t) \quad (25)$$

Segundo a equação (25) a tensão induzida $v_\phi(t)$ é a derivada 1ª; assim se o fluxo magnético for senoidal a tensão induzida será co-senoidal.

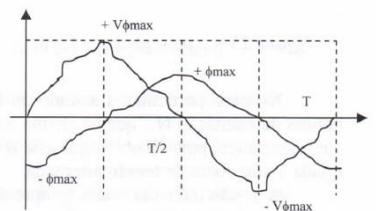
O fluxo está atrasado $T/4$ atrasado de v_ϕ no tempo ou $\pi/2$ atrasado na fase.

Desenvolvendo a equação acima, temos:

$$N \cdot \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} d\phi = \int_0^{T/2} v_\phi \, dt$$

o valor médio da tensão v_ϕ é:

$$v_{\phi_{\text{medio}}} = 1 / (T/2) \int_0^{T/2} v_\phi \, dt$$



16

kroton
paixão por educar



Aula 10

Excitação Alternada

Relação Prática da Lei de Faraday

Quando a tensão é senoidal no tempo, $v_{\phi}(t) = v_{\phi\max} \text{ sen } \omega t$ o fluxo magnético será : $\phi(t) = \phi_{\max} \cdot \cos \omega t$, ou seja, existe uma defasagem de 90° entre a tensão e o fluxo.

A equação (29) de Faraday relaciona a tensão eficaz com o fluxo magnético máximo, mas quem cria o fluxo é a corrente de magnetização, obedecendo à relação:

$$N \cdot i(t) = \phi(t) \cdot R(t) \quad (30)$$

A análise se processa da seguinte maneira:

se o meio é linear, a relutância é constante, não varia com o tempo. Assim, a corrente de magnetização $i(t)$ e $\phi(t)$ assumem a mesma forma de onda e fase no tempo.

17



Aula 10

Excitação Alternada

Relação Prática da Lei de Faraday

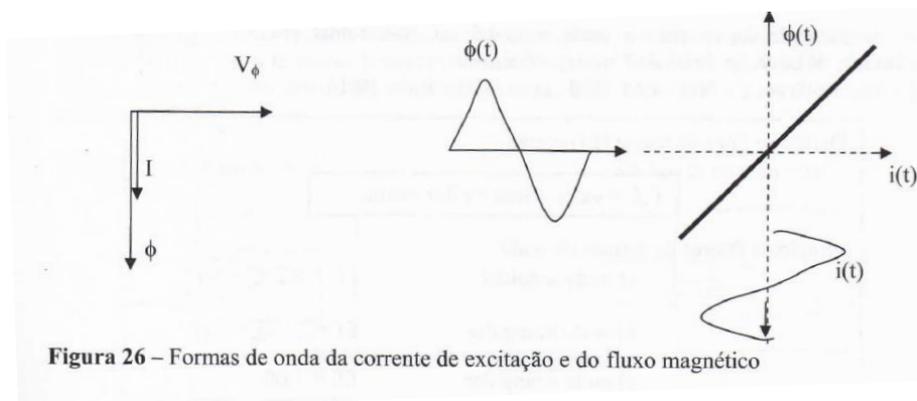


Figura 26 – Formas de onda da corrente de excitação e do fluxo magnético

18



Aula 10

Excitação Alternada

Relação Prática da Lei de Faraday

Quando o meio não é linear, a relutância não é constante, logo, a relação entre o fluxo e a corrente não é constante. As formas de onda e as fases não são as mesmas, aparecendo o fenômeno de histerese que estudamos no capítulo 1 (ver figura 27).

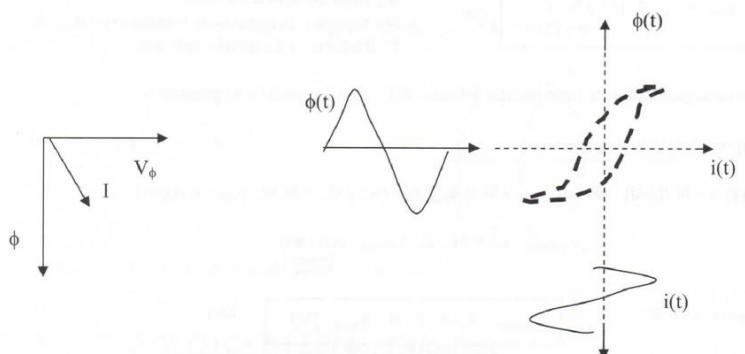


Figura 27 – Formas de onda da corrente de excitação e do fluxo magnético



Aula 10

Excitação Alternada

Exercício 2.10: Determinar o fator de forma e o fluxo máximo num núcleo que possui 200 espiras, quando uma tensão senoidal $v(t) = 200 \cdot \sqrt{2} \sin 377t$ [V].

$$V_{\text{médio}} = 2 V_{\text{max}}/\pi ; V_{\text{eficaz}} = V_{\text{max}}/\sqrt{2} \rightarrow f.f. = V_{\text{eficaz}} / V_{\text{médio}} = \pi/2\sqrt{2} = 1,11$$

O fator de forma para a onda senoidal ou co-senoidal é: $f.f. = 1,11$, assim, substituindo na equação da lei de Faraday, obtém-se:

$$\phi_{\text{max}} = V_{\text{ef}} / 4 (f.f) N \cdot f = 200 / 4,44 \cdot 200 \cdot 60 = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ [Wb]}$$

Define-se fator de forma (f.f) como:

$$f.f. = \text{valor eficaz} / \text{valor médio}$$

Principais fatores de formas de onda:

- | | |
|---|-------------------------------|
| a) onda senoidal | $f.f. = \pi/2\sqrt{2} = 1,11$ |
| b) onda triangular
(para uma determinada configuração) | $f.f. = 2 / \sqrt{3} = 1,15$ |
| c) onda retangular | $f.f. = 1,00$ |

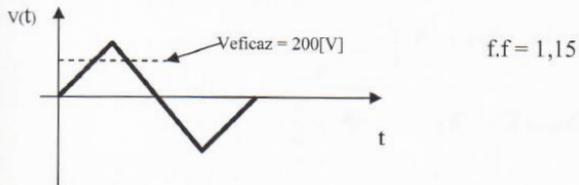




Aula 10

Excitação Alternada

Exercício 2.11: A forma de onda da tensão de excitação de um determinado núcleo é dada na figura abaixo. Sabendo que a frequência da excitação é de 50 ciclos/s, e que a bobina do núcleo possui 200 espiras, determine o fluxo máximo que circula pelo núcleo ferromagnético.



$$\phi_{\max} = V_{\text{ef}} / 4 (f.f) N \cdot f = 200 / 4 \cdot (1,15) \cdot 200 \cdot 50 = 4,34 \text{ m [Wb]}$$

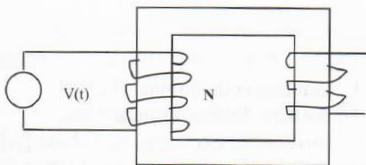
21



Aula 10

Excitação Alternada

Exercício 2.12: Um sinal senoidal de $V_{\max} = 200 \cdot \sqrt{2}$ e $f = 50$ [Hz] foi aplicado à bobina da figura abaixo. Quando se aplica uma tensão eficaz de 200[V], triangular, com o dobro da frequência, o que acontecerá com o fluxo magnético?



Senoidal:

$$v_{\phi} = 4 \cdot (f.f) N \cdot f \cdot \phi_{\max}$$

$$200 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{2} = 4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot N \cdot \phi_{\max 1} \quad (\text{A})$$

Triangular:

$$v_{\phi} = 4 \cdot (f.f) N \cdot f \cdot \phi_{\max}$$

$$200 = 4 \cdot 1,15 \cdot 100 \cdot N \cdot \phi_{\max 2} \quad (\text{B})$$

Igualando as equações (A) e (B):

$$4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot N \cdot \phi_{\max 1} = 4 \cdot 1,15 \cdot 100 \cdot N \cdot \phi_{\max 2}$$

$$\Rightarrow \phi_{\max 2} = 0,482 \cdot \phi_{\max 1}$$

22



Aula 10

Excitação Alternada

Energia Armazenada no Campo Magnético

2.5.1 Indutância própria de uma bobina

Trata-se de um parâmetro (L) que relaciona a intensidade de fluxo magnético (ϕ) para uma determinada corrente numa bobina.

$$L = N \cdot d\phi / dI \quad [\text{H}] \text{ ou } [\text{Wb}\cdot\text{esp}/\text{A}] \quad (31)$$

onde L : indutância da bobina [henry]
 N : número de espiras da bobina.
 I : corrente de excitação na bobina [A]
 ϕ : fluxo criado pela corrente I [Wb]

Num meio linear: $L = N \cdot \phi / I \quad [\text{H}]$

Substituindo pela lei de Faraday tem-se: $e(t) = N \cdot d\phi/dt = L \cdot di/dt \quad [\text{V}]$, que

mostra a tensão induzida nos terminais da bobina.

23



Aula 10

Excitação Alternada

Energia Armazenada no Campo Magnético

Substituindo pela lei de Faraday tem-se: $e(t) = N \cdot d\phi/dt = L \cdot di/dt \quad [\text{V}]$, que

mostra a tensão induzida nos terminais da bobina.

Analisando a energia na bobina, tem-se: $dW = P dt = e i \cdot dt \rightarrow W = \int L \cdot i di \rightarrow$

$$W = \frac{1}{2} \cdot L I^2 \quad [\text{Joules}] \quad (32)$$

que representa a energia armazenada no campo magnético do circuito, e que deve ser numericamente igual ao calculado quando se utiliza a densidade de energia magnética e a integração para todo o volume do circuito magnético.

24





Aula 10

Excitação Alternada

Energia Armazenada no Campo Magnético

2.5.2 Energia armazenada na bobina:

O cálculo visto no item 2.5.1 da energia armazenada pode ser feito utilizando a densidade magnética. Considere o núcleo da figura, excitado com uma fonte elétrica e que no instante $t=0$, antes de fechar a chave, a densidade de fluxo magnético residual seja nula.

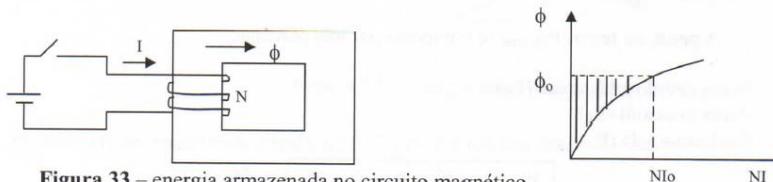


Figura 33 – energia armazenada no circuito magnético

Quando a chave é fechada, uma corrente $i(t)$ cresce desde $i=0$ [A] até certo valor $i = I_0$ [A], o que provoca também o crescimento do fluxo desde $\phi = 0$ até $\phi = \phi_0$, durante o mesmo tempo.

25



Aula 10

Excitação Alternada

Energia Armazenada no Campo Magnético

O crescimento do fluxo em função da fmm = NI, segue a curva da figura 33.

Durante o crescimento do fluxo magnético, induz-se uma tensão nos terminais da bobina igual a: $v_\phi(t) = N \cdot d\phi/dt$ (lei de Faraday).

A energia que a fonte elétrica fornece ao campo magnético é: $dW = v(t) \cdot i(t) \cdot dt$

$$dW = N \cdot d\phi/dt \cdot i(t) \cdot dt = N i d\phi \text{ [joules]}$$

Analisando geométrica e magneticamente o núcleo, tem-se:

$$N \cdot I = H \cdot l$$

$$d\phi = S \cdot dB$$

$$\text{Vol} = \text{volume do núcleo} = l \cdot S$$

que resulta na equação da energia armazenada na bobina:

$$W = \text{Vol} \cdot \int_0^B H \cdot dB \text{ [joules]} \quad (33)$$

26





Aula 10

Excitação Alternada

Energia Armazenada no Campo Magnético

$$W = \text{Vol} \cdot \int_0^B H \cdot dB \quad [\text{joules}] \quad (33)$$

Essa energia é numericamente igual à área hachurada no gráfico $\phi = f(NI)$, que volta à fonte quando se abre a chave ($i = 0$), obedecendo ao princípio de conservação de energia.

Pode-se aproveitar esta energia armazenada e transformá-la em outra modalidade de energia (por exemplo mecânica), utilizando arranjos nos núcleos através da utilização de entrefeiros.

No entanto, nem toda a energia, num sistema como o da figura, volta para a fonte elétrica integralmente. Uma parte da energia é perdida, e uma parcela que interessa à eletromecânica é a perda no ferro, que acaba se transformando em calor.

27



Aula 10

Excitação Alternada

Perdas no Ferro

2.6 PERDAS NO FERRO

A perda no ferro ($P_{FE \text{ total}}$) é composta por três parcelas:

1. Perda devido à histerese (P_H).
2. Perda Foucault (P_F)
3. Perda anômala (P_A).

$$P_{FE \text{ total}} = P_H + P_F + P_A \quad (34)$$

A perda total no ferro é obtida pelo ensaio em vazio do núcleo ferromagnético em excitação alternada, onde se coloca um wattímetro na entrada do circuito e este mede a potência ativa absorvida da fonte elétrica. Para determinar a perda total no ferro, basta deduzir da leitura do wattímetro a potência dissipada por efeito joule nos enrolamentos das bobinas do núcleo ferromagnético.

Quando checamos o valor da perda total obtida pelo método do wattímetro, este não é o mesmo da soma das perdas Foucault e histerese, obtidas de maneira individualizada. A esta diferença algébrica define-se a perda anômala: $P_A = P_{FE \text{ total}} - (P_H + P_F)$

28





Aula 10

Excitação Alternada

Perdas no Ferro

Quando checamos o valor da perda total obtida pelo método do wattímetro, este não é o mesmo da soma das perdas Foucault e histerese, obtidas de maneira individualizada. A esta diferença algébrica define-se a perda anômala: $P_A = P_{FE\ total} - (P_H + P_F)$

Pode-se obter os valores das parcelas das perdas histerese e Foucault, por exemplo, por meio através do método de separação de perdas (item 2.6.3), desprezando o valor das perdas anômalas.

Os aços para fins elétricos, usados principalmente em lâminas de motores e transformadores, são especificados pela de sua perda magnética = perda no ferro, dada por [W/kg].

29



Aula 10

Excitação Alternada

2.6.1 Perdas por histerese:

É a energia dissipada em calor devido à magnetização cíclica do material ferromagnético. Essa perda se deve ao fato de B não assumir os mesmos valores, quando $i(t)$ cresce de $-I_{máx}$ até $+I_{máx}$ e quando decresce de $+I_{máx}$ até $-I_{máx}$. Observe a análise dessas duas situações:

- a) Quando $i(t)$ cresce desde 0 até $+I_{máx}$; B assume valores desde $-B_r$ até $+B_{máx}$.

$$W_1 = \text{Vol} \cdot \int_{-B_r}^{+B_{máx}} H \cdot dB \quad [\text{joules}] \quad (35)$$

(parte hachurada – energia absorvida da fonte elétrica)

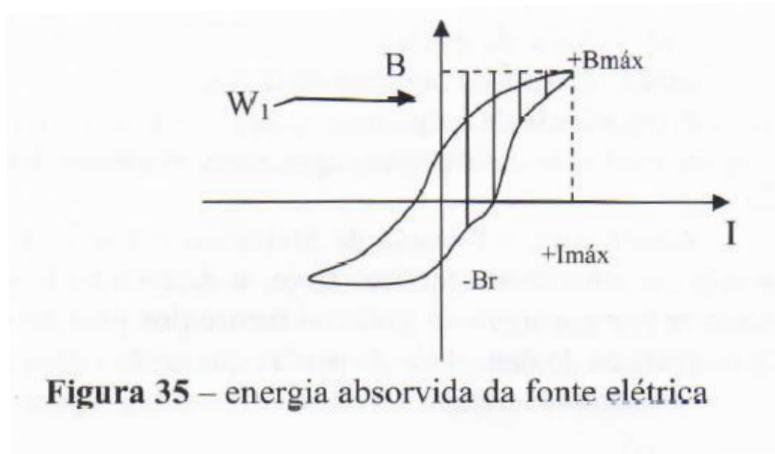
30





Aula 10

Excitação Alternada



31



Aula 10

Excitação Alternada

b) Quando $i(t)$ decresce desde $+Imáx$ até 0; B assume valores desde $+Bmáx$ até $+Br$:

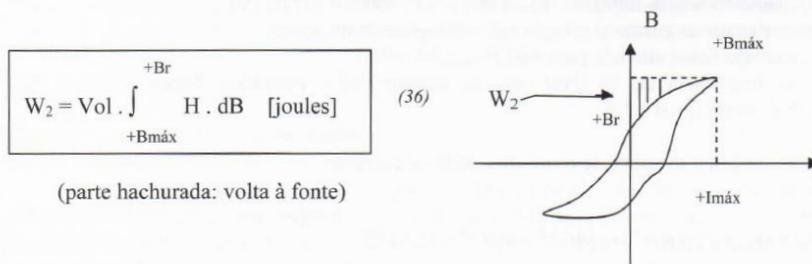


Figura 36 – energia retornada para a fonte elétrica

32



Aula 10

Excitação Alternada

A subtração de áreas W_1 (figura 35) – W_2 (figura 36) é a parcela de energia que não retorna à fonte e constitui na perda para $\frac{1}{2}$ ciclo da variação da corrente.

Usando o mesmo raciocínio para o meio ciclo seguinte da corrente, conclui-se que a quantidade de energia perdida por histerese é proporcional à área interna do ciclo de histerese.

$$W_h = \text{Vol} \cdot \text{área interna de 1 ciclo} \quad (37)$$

$$\text{Para uma excitação com } f \text{ ciclos/s} \rightarrow P_H = \text{Vol} \cdot \text{área interna de 1 ciclo} \cdot f \quad [\text{watts}] \quad (38)$$

A perda devido à histerese pode ser avaliada pela expressão de Steinmetz:

$$P_H = \eta \cdot \text{Vol} \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f = k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f \quad (39)$$

em que: $k = \eta \cdot \text{Vol}$

η : coeficiente que depende do material e das unidades.

33

paixão por educar


Aula 10

Excitação Alternada

Vol: volume do núcleo.

$B_{\text{máx}}$: densidade máxima de fluxo.

f : frequência da rede.

n : expoente de Steinmetz que, para a maioria dos materiais existentes, está entre 1,4 e 2,0.

Atualmente, a fórmula de Steinmetz é muito utilizada para comparar grandezas de um mesmo circuito magnético. Hoje, a determinação da perda para fins de análise e de projeto se faz por meio de gráficos fornecidos pelo fabricante do material ferromagnético. São os gráficos de densidade de perdas que serão vistos mais adiante.

Exercício 2.14: Um determinado núcleo ferromagnético apresentou perdas por histerese de 42 [W] quando a tensão induzida foi de $v(t) = \sqrt{2} \cdot 400 \text{ sen}(377t)$ [V].

Determinar as novas perdas por histerese nas seguintes situações:

- a) a tensão fosse alterada para 440 [V_{eficaz}]
- b) na frequência de 50 [Hz] com os demais dados mantidos. Supor expoente de Steinmetz igual a 1,6

34

paixão por educar



Aula 10

Excitação Alternada

Como o núcleo manteve-se o mesmo, pode-se escrever:

item a):

$$P'_H / P_H = (K \cdot V'^n) / (K \cdot V^n) = 440^{1,6} / 400^{1,6} = (1,1)^{1,6}$$

$$P'_H = (1,1)^{1,6} \cdot P_H \text{ (nova perda devido histerese).}$$

item b):

Nesse caso, a tensão manteve-se a mesma, porém $B_{\text{máx}}$ varia, pois é inversamente proporcional à frequência:

$$V = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot B_{\text{máx}} \cdot S \rightarrow V / (4,44 \cdot N \cdot S) = \text{cte} = f \cdot B_{\text{máx}} ;$$

$$\text{Portanto, se } f' = f/1,2 \rightarrow B'_{\text{máx}} = 1,2 B_{\text{máx}}$$

$$P'_H / P_H = (K \cdot B'_{\text{máx}}^n \cdot f') / (K \cdot B_{\text{máx}} \cdot f) = 1,2^{1,6} \cdot 50 / 60$$

$$P'_H = (1,2)^{1,6} \cdot 0,833 P_H \text{ (nova perda devido à histerese).}$$

35

kroton
paixão por educar

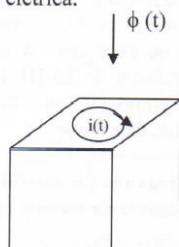


Aula 10

Excitação Alternada

2.6.2 Perdas Foucault:

É a energia dissipada por circulação de corrente elétrica na seção transversal do núcleo. A energia é do tipo $P = R \cdot I^2$, em que R seria a resistência elétrica oferecida pelo ferro à corrente elétrica.



Como a excitação é alternada, o fluxo magnético produzido também tem mesma forma de onda. Segundo Faraday, um fluxo variando no tempo induz uma tensão no material condutor.

Esta tensão induzida na seção transversal do núcleo encontra um caminho em forma de curto-circuito que faz aparecer as correntes induzidas (parasitas), cujo sentido é dado pela regra da mão direita.

Figura 37 – seção transversal do núcleo

36

kroton
paixão por educar



Aula 10

Excitação Alternada

A perda de energia pode ser reduzida se diminuirmos a tensão ou aumentarmos a resistência R . Usa-se, em substituição ao núcleo ferromagnético maciço, um núcleo laminado, constituído por chapas de 0,25mm à 1,00mm de espessuras, com elevado valor de resistividade, o que se consegue pela adição de silício ao ferro. As lâminas são separadas por uma película isolante de modo a não permitir a circulação de correntes entre as mesmas.

Para análises rápidas, a perda Foucault, ou por correntes parasitas, pode ser expressa por:

$$P_F = K \cdot \text{Vol} \cdot (f \cdot B_{\text{max}} \cdot e)^2 \quad [\text{watts}] \quad (40)$$

onde: P_F : perda por correntes parasitas (Foucault).⁴

K : constante que depende das características da chapa.

Vol : volume ativo do núcleo.

f : frequência da rede.

$B_{\text{máx}}$: densidade máxima de fluxo.

e : espessura da chapa.

⁴ Jean Bernard Léon Foucault (1819 –1868) físico e astrónomo francês. Deve-se a Foucault, a descoberta das correntes induzidas em um condutor quando em movimento na presença de um campo magnético intenso.

37



Aula 10

Excitação Alternada

Exercício 2.15: Certo núcleo apresentou perda Foucault de 55 [W] com certa tensão senoidal aplicada na bobina. Qual seria a nova perda Foucault se a única alteração fosse na espessura da chapa alterada para o dobro da espessura anterior? Os demais dados, bem como o volume e a seção útil são mantidos.

$$P'_F/P_F = K \cdot (2e)^2 / K \cdot e^2 = 4 \quad \rightarrow \quad P'_F = 4 \cdot 55 = 220 \text{ [W]}$$

Exercício 2.16: Um núcleo de transformador tem um volume de 1800 cm³. A perda por histerese neste núcleo é de 10 [W], quando funciona na frequência de 25 [Hz] e numa densidade máxima de fluxo de 1,1 [Wb/m²]. Pretende-se empregar este núcleo na frequência de 60 [Hz]. Considerando expoente de Steinmetz = 1,6, determine:

- a perda por histerese na nova frequência, se a densidade máxima for mantida.
- nova perda por histerese, se a densidade máxima for reduzida na mesma proporção em que é aumentada a frequência.

38



Aula 10

Excitação Alternada

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad P_H &= k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f \\
 10 &= k \cdot (1,1)^{1,6} \cdot 25 \\
 k &= 0,343
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 P'_H &= k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f \\
 P'_H &= k \cdot (1,1)^{1,6} \cdot 2,4 \cdot f = 2,4 \cdot P_H \\
 &\quad \underbrace{\hspace{10em}}_{60}
 \end{aligned}$$

$$P'_H = 24 \text{ [W]}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b)} \quad P_H &= k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f \\
 P''_H &= k \cdot 60 \cdot (1,1/2,4)^{1,6} = 0,343 \cdot 60 \cdot (1,1/2,4)^{1,6}
 \end{aligned}$$

$$P''_H = 5,9 \text{ [W]}$$

39



Aula 10

Excitação Alternada

2.6.3 Separação das perdas no ferro - histerese e Foucault:

Excita-se o núcleo ferromagnético em vazio, obtendo as medidas no amperímetro, voltímetro e wattímetro, conforme circuito abaixo:

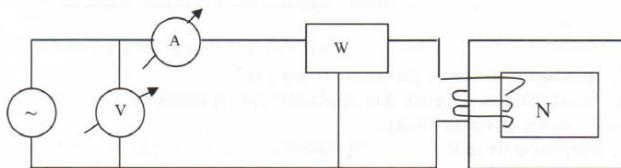


Figura 38 - circuito para obtenção das perdas no ferro

O ensaio dar-se-á com $B_{\text{máx}} = \text{constante}$. Isso se consegue fazendo $V/f = \text{constante}$.

$$\text{Como } \begin{cases} P_H = k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f = K_h \cdot f \text{ (visto que } B_{\text{máx}} = \text{cte).} \\ P_F = K \cdot \text{Vol} \cdot (f \cdot B_{\text{máx}} \cdot e)^2 = K_f \cdot f^2 \text{ (visto que } B_{\text{máx}} = \text{cte).} \end{cases}$$

$P_{FE} = P_H + P_F = K_h \cdot f + K_f \cdot f^2$, dividindo ambos os lados pela frequência, tem-se:

40



Aula 10

Excitação Alternada

$$P_{FE}/f = K_h + K_f \cdot f \quad (41)$$

Equação 41 é de uma reta : $y = ax + b$

Varia-se a frequência da tensão de excitação, sempre deixando $V/f = \text{constante}$, e determina-se para cada valor de frequência f o correspondente valor de P_{FE}/f . De posse desses pares de valores, constrói-se o gráfico $P_{FE}/f = f(f)$.

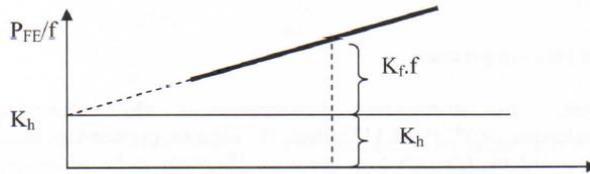


Figura 39 – gráfico utilizado para separação das perdas (Foucault e histerese)

41

kroton
paixão por educar



Aula 10

Excitação Alternada

Onde o gráfico cortar o eixo y tem-se o valor de K_h . Para uma frequência qualquer, basta traçar uma vertical e medir K_h e $K_f \cdot f$.

Multiplicando esses valores pela frequência desejada, temos as respectivas perdas:

$$P_H = K_h \cdot f \quad (42)$$

$$P_F = K_f \cdot f \cdot f \quad (43)$$

42

kroton
paixão por educar



Aula 10

Excitação Alternada

Exercício 13: Escreva a equação das perdas por histerese e faça uma definição.

Exercício 14: Escreva a equação das perdas por Foucault e faça uma definição.

Exercício 15: Um núcleo apresentou $P_H = 72$ [W] quando a tensão co-senoidal de excitação foi de $v(t) = 110 \cdot \sqrt{2} \cos(377t)$ [V]. Considere o coeficiente de Steimetz = 1,8.

- Calcule a nova perda de histerese quando alteramos a tensão para $V_{ef} = 440$ [V] na mesma frequência.
- Alterando apenas a frequência para 30 [Hz] e mantendo-se os dados iniciais, qual a nova perda por histerese?

Exercício 15: O wattímetro indicou 92 [W] ; o amperímetro 2 [A] e o voltímetro indicou 100 [V] para excitação co-senoidal. Sabendo que a perda por Foucault foi de 62 [W] e que $R_{ca} = 1[\Omega]$, considerando o coeficiente de Steimetz igual a 2, calcule:

- a perda por histerese nesta situação.
- alterando para 200 [V], onda triangular, e alterando-se a frequência para metade da inicial, quais os valores das perdas Foucault e histerese.

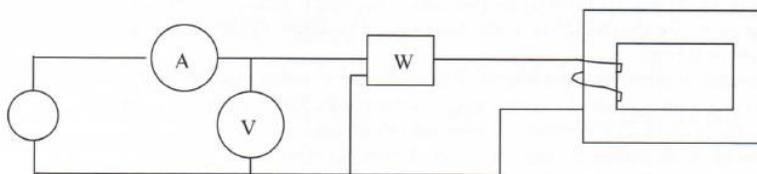
43

kroton
paixão por educar



Aula 10

Excitação Alternada



Exercício 16: Um núcleo apresentou perda Foucault iguais a 48[W], quando excitado em $v(t) = V_{m\acute{a}x} \cos(\omega t)$. Querendo reduzir a perda para 30 [W], na mesma tensão, mesma frequência, porém com onda quadrada, qual deve ser a alteração na espessura?

Exercício 17: Um reator foi submetido à tensão de $V = 80$ [V_{ef}], senoidal, $f = 60$ [Hz] e apresentou $P_H = 32$ [W] e $P_F = 58$ [W]. Alterando a tensão para 240 [V_{ef}], senoidal, em $f = 40$ [Hz], quais as novas perdas Foucault e histerese (considere coeficiente de Steinmetz = 2)?

44

kroton
paixão por educar



kroton 
paixão por educar

Bibliografia desta aula:

1.

SOARES, Ronaldo Alves.
**Conversão
Eletromecânica de
Energia**. 1ª edição. São
Paulo: Mc Editora
Universitária
Leopoldianum, 2008.

45



46