

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ELETROMECÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA

DISCIPLINA: TRANSFORMADORES

Fundamentos sobre Transformadores

Renan Birck Pinheiro <renan.ee.ufsm@gmail.com>.

Autores:

Santa Maria, 27 de Outubro de 2012.

Conteúdo

1	Lei de Faraday	3
2	Lei de Lenz	4
3	Lei de Ampère	5
4	Força eletro-motriz e força contra-eletro-motriz (FEM, FCEM)	6
5	Circuitos Magnéticos	7
6	Indutância Mútua e Auto-Indutância	8
7	Conclusão	9

Introdução

Transformadores são dispositivos constituídos por dois ou mais enrolamentos acoplados por um núcleo comum. São dispositivos empregados em fontes de alimentação e outros dispositivos nos quais se faça necessário reduzir ou elevar correntes alternadas; no sistema de potência, são usados tanto para elevação quanto redução de tensões, e em diversos fins na eletrônica: isolamento, casamento de impedâncias e remoção de componentes contínuas.

Para o entendimento do seu funcionamento são necessários conceitos fundamentais de eletromagnetismo, a serem revisados no presente trabalho.

Capítulo 1

Lei de Faraday

Michael Faraday constatou que a variação temporal do fluxo magnético Φ sobre um condutor induz o aparecimento de uma força eletromotriz entre os extremos desse condutor. Isso levou ao enunciado da lei de indução de Faraday:

Campos magnéticos podem produzir corrente elétrica em um laço fechado, porém apenas se o fluxo magnético na superfície deste for variante no tempo. [2]

o que matematicamente resulta na expressão

$$V_{fem} = -N \frac{d\Phi}{dt} = \oint_C \vec{E} dl \quad (1.1)$$

Equação 1.1: Formulação matemática da lei de Faraday.

Onde \vec{E} corresponde ao campo elétrico. A unidade de medida da V_{fem} é o volt. A mesma expressão 1.1 pode ser expressa na forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.2)$$

Equação 1.2: A lei de Faraday expressa na forma diferencial.

na qual \vec{B} representa o vetor densidade de fluxo magnético, expresso em tesla (T). Esta lei pode ser considerada a base do funcionamento dos transformadores e geradores.

Capítulo 2

Lei de Lenz

Em todos os casos de indução eletromagnética, uma FEM induzida fará com que a corrente circule em um circuito fechado, num sentido tal que seu efeito magnético se oponha à variação que a produziu. [3]

A lei descoberta pelo físico Heinrich Friedrich Emil Lenz, define que a corrente induzida i em um circuito ocorre numa direção oposta à variação do fluxo magnético $\Phi(t)$ que a produziu. [2] Esta justifica o sinal negativo encontrado nas 1.1 e 1.2. Esta conclusão não é mais do que um efeito da *ação e reação*, e dela resulta a indutância [3].

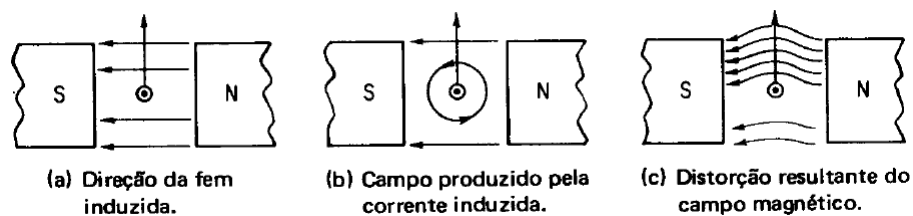


Figura 2.1: Ilustração da lei de Lenz. [3]

Capítulo 3

Lei de Ampère

André Marie Ampère estabeleceu uma relação matemática entre corrente elétrica e campo magnético, por meio de uma lei que leva seu nome. Tal pode ser expressada por

$$\oint_C \vec{B} dl = \mu_0 i \quad (3.1)$$

Equação 3.1: A lei de Ampère.

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre $= 4\pi \times 10^{-7} H/M$. Ela equivale a dizer que a integral de linha em um caminho fechado da densidade de fluxo, é proporcional à corrente que atravessa a superfície limitada pelo caminho de integração.

Capítulo 4

Força eletro-motriz e força contra-eletro-motriz (FEM, FCEM)

Seja um transformador com o secundário em aberto sendo alimentado por uma v_1 no primário, como visto na figura ??:

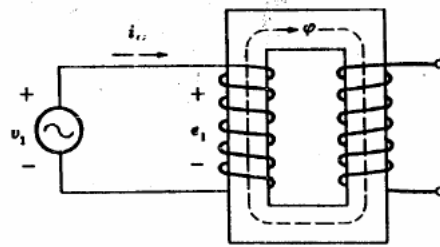


Figura 4.1: Transformador em aberto. [1]

Em regime permanente, fluirá a corrente de excitação, a qual provoca um fluxo magnético alternado ϕ_1 no núcleo. Por consequência da lei de Faraday expressa em 1.1, será induzida uma força magnetomotriz nos terminais do secundário, igual a

$$FEM_2 = N_2 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (4.1)$$

Mas o primário estará sujeito ao fluxo magnético gerado por ele mesmo, e por consequência a uma FEM. Como pela lei de Lenz a polaridade desta FEM será oposta à da sua causa, convencionou chamá-la de **força contra-eletro-motriz** (FCEM). A soma da FCEM com a queda de tensão no primário deverá ser igual à tensão v_1 aplicada, ou seja, $v_1 = R_1 i_\phi + FCEM$.

Capítulo 5

Circuitos Magnéticos

Circuitos magnéticos são dispositivos utilizados para concentrar o efeito magnético de uma corrente em uma região particular do espaço. Fazendo uma analogia com os circuitos elétricos, temos que [6]:

	Circuito Elétrico	Circuito Magnético.
Uma fonte de ...	FEM (V)	FMM (ampère-espira)
... produz ...	corrente (A)	fluxo (Wb)
... que é limitada pela	resistência (Ω)	relutância ($\frac{1}{H}$)

Define-se relutância como a oposição do material à passagem do fluxo, isto é, $\mathcal{R} = \frac{FMM}{\Phi}$. Para um material qualquer, esta também pode ser escrita como

$$\mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (5.1)$$

Equação 5.1: Definição de relutância para um material de comprimento l_c , área A_c e permeabilidade μ .

Em muitas situações práticas a relutância do núcleo é desprezível devido ao seu baixíssimo valor perante a relutância do entreferro.

Capítulo 6

Indutância Mútua e Auto-Indutância

Em um circuito magnético, a relação entre o fluxo ϕ e a corrente elétrica i geradora será linear, dada pela expressão

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (6.1)$$

Equação 6.1: Relação entre o fluxo e corrente elétrica no circuito magnético

na qual λ é o fluxo concatenado por um conjunto de N espiras ($\lambda = N\phi$). A essa relação dá-se o nome de **indutância**, expressa em Henries (H).

Presumindo que os materiais magnéticos sejam lineares, pode-se demonstrar (omitido aqui devido à extensão), como feito em [1], que a mesma relação da expressão 6.1 pode ser expressa em função do número de espiras e da relutância (\mathcal{R}), ou seja:

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (6.2)$$

Equação 6.2: 6.1 em termos da relutância e do número de espiras.

Um caso especial é quando há duas ou mais bobinas no mesmo circuito: temos a auto-indutância (provocada pela variação do campo da própria bobina) de cada bobina e a indutância mútua (provocada na outra bobina pelo campo de uma bobina). Pode-se demonstrar que a indutância entre um par de bobinas X e Y , enroladas em um núcleo de relutância desprezível, será dada por

$$L_{xy} = N_x N_y \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (6.3)$$

Equação 6.3: Expressão da indutância entre duas bobinas. Se $X = Y$, ela se refere à autoindutância

Capítulo 7

Conclusão

Bibliografia

- [1] FITZGERALD, A.E. KINGSLEY, C. Jr. UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [2] ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [3] KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 10ª Edição. São Paulo: Globo, 1994.
- [4] ASSUNÇÃO, J. T. **Circuitos Magnéticos**. Disponível em <http://www.ppgel.net.br/nepomuceno/ensino/eletromagnetismo/CirMag.pdf>. Acessado em 21/10/2012.
- [5] MACEDO, M. MACEDO. C. **Indutância**. Disponível em http://www.fisica.ufs.br/apostilas/Fisica_B_Aula_10.PDF. Acessado em 22/10/2012.
- [6] WENTWORTH, S. M. **Eletromagnetismo Aplicado**. Porto Alegre: Bookman, 2007.