

Transformadores

1.1- INTRODUÇÃO

No estudo da corrente alternada observamos algumas vantagens da CA em relação a CC. A maior vantagem da CA está relacionada com a facilidade de se elevar ou abaixar a tensão em um circuito, enquanto que em CC utilizaríamos circuitos eletrônicos de alto custo e de mão de obra mais especializada para os serviços de manutenção. Vimos também que para se transmitir energia elétrica a longas distâncias é preferível fazê-la em alta tensão, pois assim diminuimos consideravelmente a corrente nos cabos de transmissão de energia elétrica, diminuindo as perdas que é proporcional ao quadrado da corrente nos mesmos.

Em contrapartida, no processo de geração de energia elétrica não é prático gerá-la em alta tensão, pois o geradores deveriam ter uma tensão de isolamento muito grande, encarecendo os mesmos e tornando perigosa sua manutenção. Portanto a tensão gerada nos geradores das usinas, em torno dos 6 kV, é ligada a um transformador que elevará a tensão dos geradores a um valor que torna possível sua transmissão. No Brasil usa-se os valores de 69 kV, 138 kV e 250 kV, em algumas situações específicas poderão ser utilizados valores superiores chegando até 1000 kV. Observe que no extremo das linhas de distribuição, precisamos ter agora transformadores abaixadores, pois o nível de tensão para as residências e estabelecimentos comerciais é padronizado em 127/220 V. Sendo assim os transformadores elétricos podem ser utilizados para elevar ou abaixar os valores de tensões elétricas em um circuito ou sistema elétrico.

1.2- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do transformador, baseia-se no princípio da indução eletromagnética. Suponha duas bobinas com as da figura 1.1. Quando uma corrente elétrica alternada circular pela bobina 1 da figura, está produzirá um campo magnético variável que cortará as espiras da bobina 2, fazendo com que apareça um f.e.m. induzida em seus terminais, de acordo com a Lei de Lenz. Esta ação de gerar uma f.e.m. é também conhecida como a ação de transformador. Por meio desta ação a bobina 1 (primário) transfere energia elétrica para a bobina 2 (secundário) devido a um campo magnético variável, pois se o mesmo não variasse não teríamos o fenômeno da indução eletromagnética.

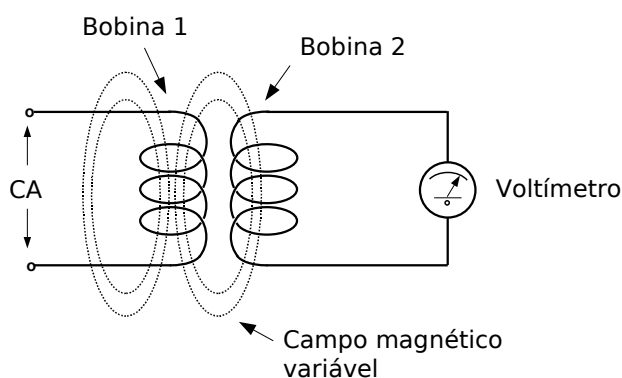


Figura 1.1

A figura 1.1 mostra um transformador elementar, pois seu núcleo é de ar, e desta forma seu rendimento será muito pequeno.

Se utilizarmos um material ferromagnético em seu núcleo, podemos aumentar consideravelmente seu rendimento, podendo assim ser utilizado para aplicações práticas. Os núcleos dos transformadores podem ser de dois tipos: envolvido (figura 1.2a) e envolvente (figura 1.2b).

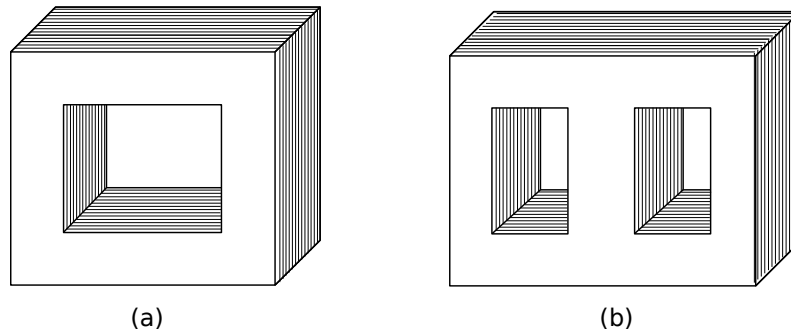


Figura 1.2

O núcleo é dito envolvido, quando os enrolamentos primário e secundário envolvem o núcleo. Já o núcleo envolvente, envolve os enrolamentos primário e secundário que são enrolados um sobre o outro no centro do núcleo.

1.3- TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Transformadores monofásicos, são transformadores que possuem ligações elétricas para apenas uma única fase.

1.3.1- Funcionamento a vazio

Suponha o transformador de núcleo envolvente da figura 1.3 abaixo.

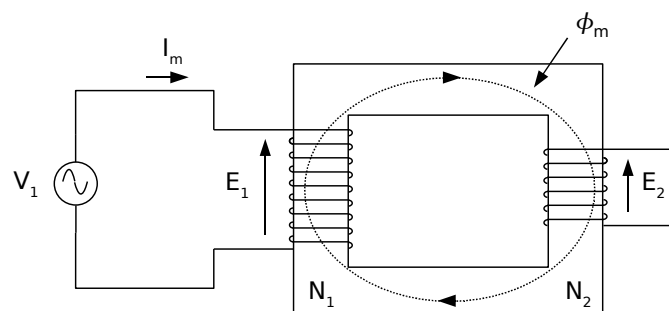


Figura 1.3

Ao ligarmos o transformador, aparece em seu primário uma corrente I_m , a qual chamamos de corrente de magnetização que é a responsável pela produção do fluxo de magnetização ϕ_m . Da mesma forma devido ao fenômeno da indução eletromagnética, teremos no primário do transformador uma f.e.m. de auto indução E_1 dada por:

$$E_1 = -N_1 \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

Essa variação no fluxo, também envolverá o secundário do transformador induzindo uma tensão E_2 em seu secundário dada por:

$$E_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

Como $\frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ é o mesmo no primário e secundário, podemos escrever que:

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}$$

Como $E_1 = V_1$ e $E_2 = V_2$ (tensão na saída do secundário), teremos então:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

A relação $\frac{N_1}{N_2}$ chamamos de relação de espiras representada pela letra grega alfa, sendo assim:

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Esta relação é muito importante, pois através dela relacionamos as tensões no primário e secundário do transformador.

1.3.2- Funcionamento com carga

Suponha o esquema da figura 1.4 abaixo.

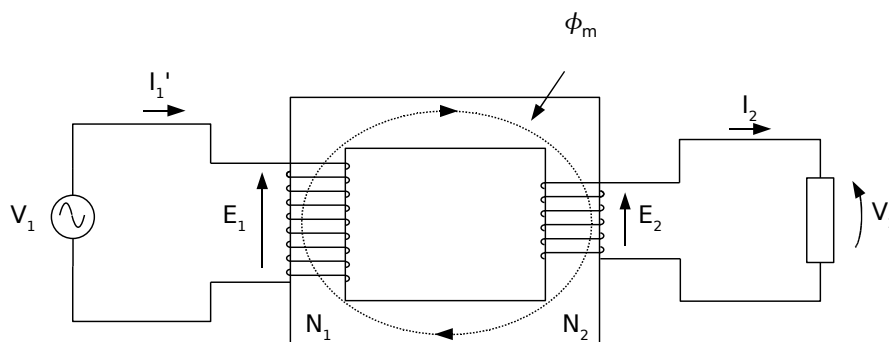


Figura 1.4

Quando uma carga é ligada ao secundário do transformador, aparece uma corrente I_2 no secundário, refletindo em uma corrente I_1' que é soma fasorial da corrente de magnetização com a corrente refletida pelo secundário ao primário devido a carga. Esta corrente I_1' é tal que devido a Lei de Lenz o fluxo produzido por I_2 será contrário a fluxo produzido por I_1 , tendo como resultante apenas o fluxo mútuo, ou fluxo de magnetização.

Sendo assim, a força magnetomotriz, definida com sendo o produto da corrente pelo número de espiras de uma bobina, será igual tanto no primário quanto no secundário, ou seja:

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2$$

$$N_1 \cdot I_1' = N_2 \cdot I_2$$

Supondo o transformador ideal $I_1' = I_1$, teremos então:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Observe que esta relação $\frac{N_1}{N_2}$ é a própria relação de transformação ou relação de espiras, onde podemos escrever que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Observe também que, isolando apenas o segundo e terceiro membros da expressão teremos:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Fazendo agora o produto cruzado,

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

Ora, $V_1 \cdot I_1$ é a potência no primário do transformador e $V_2 \cdot I_2$ é a potência no secundário do transformador. Podemos concluir então que a o potência consumida no secundário do transformador é refletida no primário, ou seja, o transformador não produz energia elétrica, apenas a transfere para outro enrolamento alterando proporcionalmente os valores de tensão e corrente.

1.3.3- Impedância refletida

Considere o transformador ideal da figura 1.5 abaixo. Assim como a corrente secundária é refletida no primário do transformador, podemos determinar o que chamamos de impedância refletida ou impedância referida ao primário.

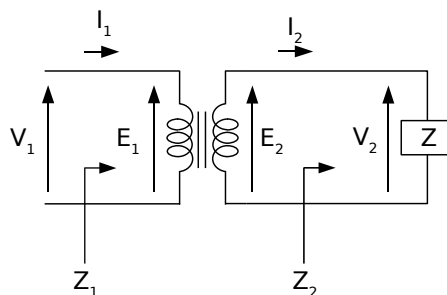


Figura 1.5

Para qualquer valor de impedância Z , a impedância vista pelo secundário será:

$$Z = Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

Como o transformador é ideal $\Rightarrow I_1' = I_1$, então a impedância vista pelo primário será:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$$

Sabemos que:

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad \text{e} \quad I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2, \quad \text{então:}$$

$$Z_1 = \frac{\frac{N_1}{N_2} V_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \frac{N_1}{N_2} V_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{1}{I_2}$$

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot \frac{V_2}{I_2}$$

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot Z_2 \Rightarrow Z_1 = \alpha^2 Z_2$$

Exemplo 1.1

Um transformador monofásico possui relação de espiras igual a 20. Supondo que seu primário foi ligado a uma fonte de tensão de 120 V, determine a tensão no secundário do transformador.

$$\alpha = 20 \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = 20$$

$$\frac{V_1}{V_2} = 20$$

$$\frac{120}{V_2} = 20$$

$$20 V_2 = 120$$

$$V_2 = 6 \text{ V}$$

Exemplo 1.2

Um transformador monofásico, possui 240 espiras em seu enrolamento primário que é ligado a uma fonte de tensão de 600 V. Quantas espiras deve possuir seu enrolamento secundário para que a tensão de saída seja de 50 V.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{600}{50} = \frac{240}{N_2}$$

$$N_2 = \frac{240 \cdot 50}{600}$$

$$N_2 = 20 \text{ espiras}$$

Exemplo 1.3

Deseja-se construir um casador de impedâncias, que case a impedância da saída de um circuito e excitação, cuja impedância é de 20Ω com a entrada de um amplificador, cuja impedância de entrada é de 1000Ω . Determine a relação de transformação do casador.

$$Z_1 = \alpha^2 Z_2$$

$$20 = 1000 \alpha^2$$

$$\alpha^2 = \frac{20}{1000} = 0,2$$

$$\alpha \simeq 0,45$$

Exemplo 1.4

Ao secundário de um transformador ideal foi ligada uma carga resistiva de $2,5 \Omega$ de resistência elétrica. Sendo a relação de transformação do transformador igual a 5 e que seu primário foi ligado a uma fonte de tensão de 220 V, determine:

a) a tensão na carga

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = 5 \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = 5$$

$$\frac{V_1}{V_2} = 5$$

$$\frac{220}{V_2} = 5$$

$$5 V_2 = 220$$

$$V_2 = 44V$$

b) a corrente no primário do transformador

$$V_2 = R_2 \cdot I_2$$

$$44 = 2,5 \cdot I_2$$

$$I_2 = 17,6 \text{ A}$$

$$\alpha = \frac{I_2}{I_1}$$

$$5 = \frac{17,6}{I_1}$$

$$I_1 = 3,52 \text{ A}$$

1.4- TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Transformadores trifásicos podem ser feitos utilizando-se três transformadores monofásicos ou com apenas um transformador trifásico que também pode ter o núcleo do tipo envolvido (mais comum, figura 1.6a) ou envolvente (figura 1.6b).

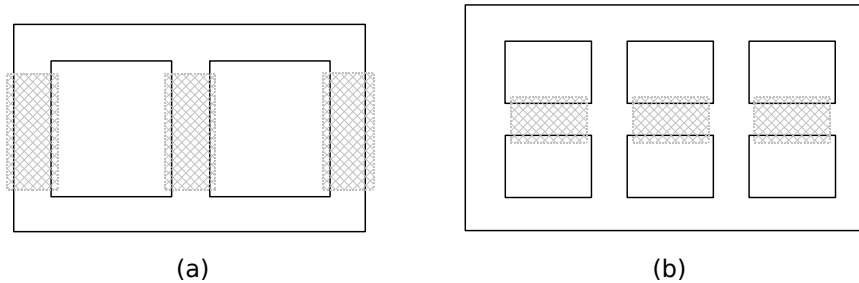


Figura 1.6

1.4.1- Conexões em um sistema trifásico

A três fases de um sistema trifásico podem ser ligadas ao primário de um transformador basicamente de duas formas distintas:

- Conexões em Y

Conhecendo-se a polaridade de cada enrolamento, isto é, o início e o fim de cada um deles, a conexão em Y, consiste em ligar o fim de cada fase a um ponto comum N, e os inícios de cada enrolamento às fases A, B e C. Observe a figura 1.7.

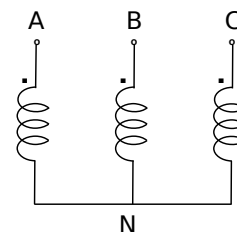


Figura 1.7

- Conexões em Δ

A conexão em triângulo é feita ligando-se o fim de cada enrolamento no início do outro, e o início de cada enrolamento é ligado a cada fase A, B e C. Observe a figura 1.8.

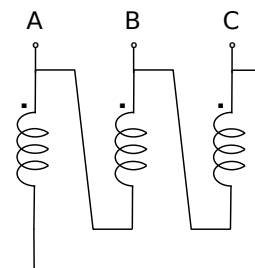


Figura 1.8

EXERCÍCIOS PROPOSTOS -----

1.1- Um transformador monofásico de 4,6 kVA, 2300/115 V, 60 Hz foi projetado para ter uma f.e.m. induzida de 2,5 volts/esp. Supondo-o ideal, calcule:

- o número de espiras do enrolamento de alta tensão.
- o número de espiras do enrolamento de baixa tensão.
- a corrente nominal para o enrolamento de alta tensão.
- a corrente nominal para o enrolamento de baixa tensão.
- a relação de transformação funcionando como elevador de tensão.
- a relação de transformação funcionando como abaixador de tensão.

1.2- O lado de alta tensão (AT) de um transformador monofásico abaixador, tem 800 esp e o lado de baixa tensão (BT) tem 100 esp. Uma tensão de 240 V é ligada ao lado de AT e uma impedância de 3Ω é ligada ao lado de BT, calcule:

- a corrente e tensão secundárias.
- corrente primária.
- a impedância de carga vista pelo primário.

1.3- Um servo amplificador CA tem uma impedância de saída de 250Ω e o servo motor CA, que ele deve acionar tem uma impedância de $2,5 \Omega$. Calcule:

- a relação de transformação do transformador que faça o acoplamento de impedância entre o servo amplificador e o servo motor.
- número de espiras do primário se o secundário possui 10 espiras.

1.4- Um transformador monofásico de relação de espiras igual a 6, tem seu primário ligado a uma fonte de tensão de 215 V. Em seu secundário existe uma carga resistiva de 5Ω e suponha que o transformador não seja mais ideal, passando a possuir uma resistência de $0,5 \Omega$ no enrolamento secundário e 10% deste valor no enrolamento primário, determine:

- a corrente primária.
- a corrente secundária.
- a tensão na carga.
- o rendimento do transformador.

1.5- Um transformador monofásico usado em eletrônica possui em seu primário 360 espiras ligado a uma tensão de 127 V, enquanto que seu enrolamento secundário possui 18 espiras e tem ligado aos seus terminais uma carga de 10Ω de impedância. Calcule supondo o transformador ideal:

- a tensão na carga.
- a corrente na carga.
- a corrente primária.
- a potência transferida do primário para o secundário.

1.6- Deseja-se projetar um transformador, ou seja, determinar sua relação de espiras e potência, para alimentar uma carga de $2,4 \Omega$ e 5 A, a partir de uma fonte de tensão de 220 V.

1.7- Um transformador trifásico ideal possui relação de espiras igual a 7. Calcule a tensão de linha no secundário do transformador, sendo que seu primário fio ligado em triângulo com uma tensão de linha igual a 210 V e seu secundário ligado em estrela.

1.8- Um transformador trifásico ligado em $Y \rightarrow Y$, tem seu lado de AT ligado a uma tensão de 220 V de linha. Sendo sua relação de transformação igual a 10 e seu secundário ligado a uma carga de 5Ω , calcule:

- a) a tensão de fase na carga ligada em triângulo
- b) a corrente de linha secundária.
- c) a corrente de linha primária.

1.9- Um transformador trifásico com relação de espiras igual a 10, tem seu primário ligado em triângulo. Determine as correntes de linha primária e secundária e a tensão de fase na carga quando o secundário possui uma carga em estrela de $2,5 \Omega$ de impedância, tendo o primário ligado em uma tensão de 600 V.

- a) é ligado em estrela.
- b) é ligado em triângulo

Respostas

- 1.1- a) 920 esp b) 46 esp c) 2 A d) 40 A e) 0,05 f) 20
1.2- a) 10 A e 30 V b) 1,25 A c) 192 Ω
1.3- a) 10 b) 100 esp
1.4- a) 1,08 A b) 6,48 A c) 32,56 V d) 90,8%
1.5- a) 6,35 V b) 0,635 A c) 31,75 mA d) 4,03 W
1.6- 60 W e $\alpha \simeq 18$
1.7- 52 V
1.8- a) 22 V b) 1,46 A c) 0,146 A
1.9- a) 4,15 A, 24 A e 60 V b) 1,37 A, 13,87 A e 34,68 V