

Transformadores

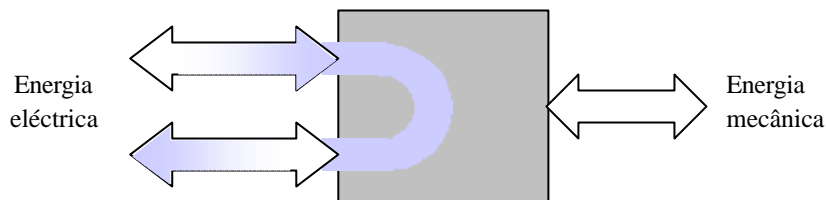


Figura 2.1

1. Introdução

Um transformador é um dispositivo que transforma uma corrente alternada sinusoidal (*ver cap. Electromagnetismo – Lei de Lenz-Faraday*), com uma determinada tensão, numa corrente eléctrica sinusoidal, com uma tensão eventualmente diferente, sendo esta transformação realizada através da acção de um fluxo magnético. É portanto algo que transforma energia eléctrica em energia eléctrica (com características diferentes), mantendo uma independência eléctrica – não há qualquer ponto de ligação eléctrica – entre as duas tensões do transformador. Dado, ainda, o princípio de conservação de energia, é óbvio que se mantém a potência ($P = W/t$) igual, dum lado e doutro do transformador, o que faz com que alterações em termos de tensão, provoquem alterações em termos de corrente, mantendo-se a energia que “entra” igual à energia que “sai”.

A criação do fluxo magnético é realizada com uma bobine de fio (*ver capítulo Electromagnetismo*), através da qual se faz passar uma corrente eléctrica variável no tempo (*lei de Lenz-Faraday*). O valor de tensão diferente, é obtido colocando uma segunda bobine de fio enrolada em torno da mesma peça de ferro, bobine que vai ser influenciada pelo fluxo magnético criado pela primeira bobine. A primeira bobine, onde se liga a fonte de tensão, é chamada de primário (ou enrolamento primário) e a segunda

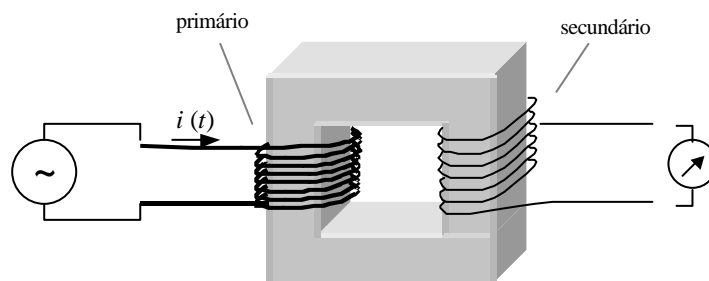


Figura 2.2

bobine, onde se vai buscar a tensão diferente, é chamada de secundário (ou enrolamento secundário).

Este tipo de máquina eléctrica é reversível. Isto é, se se obtém um valor de tensão X no

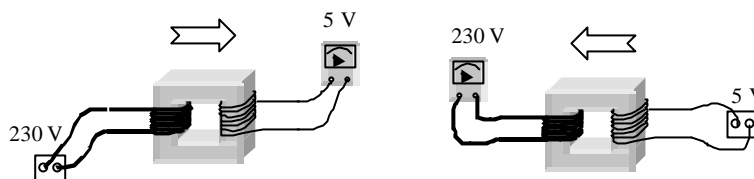


Figura 2.3

secundário à custa da presença de uma tensão Y no primário, então aplicando uma tensão X ao secundário obter-se-á uma tensão Y no primário – figura 1.2.

2. Necessidade de transformadores

O transformador é um dos equipamentos eléctricos de enorme utilização, dado que permite ajustar tensões e correntes às necessidades existentes.

De facto se pensarmos na nossa forma de abastecimento de energia eléctrica, desde logo concluímos que, face à enorme quantidade de utilizadores, a potência necessária é também enorme. Também o facto de as fontes de produção terem que estar concentradas – economias de escala – introduz, salvo raras excepções, distâncias elevadas entre a produção da energia eléctrica e o seu consumo. Concluindo, temos uma enorme potência eléctrica a transportar a uma elevada distância, o que, à luz do nossos conhecimentos, introduzirá elevadas perdas de Joule – energia dissipada em forma de calor [$P_{\text{joule}} = RI^2$] – o que não é, nitidamente, o objectivo pretendido.

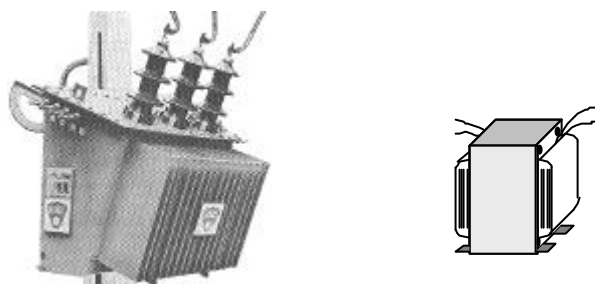


Figura 2.4

Por exemplo, uma central hidroeléctrica tem um gerador de 300 MVA, a 60 kV. A energia eléctrica produzida abastece uma cidade a 50 km de distância, através de um cabo com resistência de 0,2 Ω /km. Teremos, portanto, uma corrente de $300.000.000/60.000 = 5.000$ A, a transportar por um cabo com resistência $50 \times 0,2 = 10$ Ω , o que introduziria perdas de Joule de $10 \times (5.000)^2 = 250 \times 10^6$ W (250.000.000 W). É evidente que, este valor de potência dissipada é incomportável – dos 300 MVA iniciais (considerando um factor de potência unitário para facilidade de entendimento), apenas chegariam 50 MVA, ou seja 17%, servindo os restantes 83% para “aquecer” a atmosfera.

Sendo a energia dissipada por efeito de Joule, função do quadrado da intensidade, podemos baixar drasticamente esse valor, se se conseguir reduzir o valor da corrente. De facto, tendo o transformador capacidade de transformar tensões e mantendo-se o princípio de conservação de energia ($P_{\text{primário}} = P_{\text{secundário}}$), deduz-se que elevando a tensão se abaixará a corrente ($P = VI$), que é o efeito pretendido. Assim, na central hidroeléctrica, à saída do gerador, coloca-se um transformador elevador ($V_{\text{secundário}} > V_{\text{primário}}$) obtendo-se uma corrente, no secundário, mais baixa ($I_{\text{secundário}} < I_{\text{primário}}$) o que provocará perdas de Joule menos elevadas. No destino, como a tensão foi elevada para valores muito altos (na origem), coloca-se um transformador abaixador (ou redutor), agora com o efeito contrário – baixar a tensão e elevar a corrente.

Existem outras utilizações para os transformadores, que serão mencionadas adiante, tais como isolamento eléctrico e medição de correntes.

3. Tipos de transformadores

Potência

O objectivo é transformar potência – V_1, I_1 – num lado, em potência – V_2, I_2 – no outro lado, mantendo-se a frequência.

A relação entre a tensão presente num lado e a tensão presente no outro, é chamada a relação de transformação – r_t . Por exemplo, no caso da figura 1.3 a), a relação de transformação no 1º caso é de

$$r_t = \frac{V_1}{V_2} = \frac{230}{5} = 46$$

Corrente

O objectivo é que uma corrente induza, no enrolamento do transformador, uma fem. Essa fem_i é proporcional à corrente que a criou, donde, medindo a fem, saber-se-á a corrente.

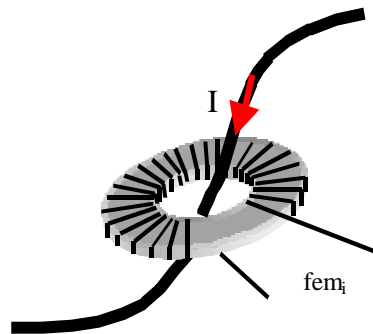


Figura 2.5

Isolamento

É um caso particular do transformador de potência, no qual a tensão no secundário é igual à tensão no primário – $r_t = 1$. O objectivo é obter um isolamento eléctrico entre o circuito ligado ao primário e o circuito ligado ao secundário.

Autotransformador

É um caso particular de transformador de potência, com um único enrolamento, dividido em dois. A tensão de “saída” é obtida à custa da divisão de tensão do enrolamento, como se pode ver na figura.

Este tipo de transformador é mais barato (um único enrolamento), no entanto não isola o circuito eléctrico primário do circuito eléctrico secundário. Havendo, por exemplo uma quebra nas espiras N_2 , a tensão V_S torna-se igual à tensão V_P .

Para este tipo de transformador a relação entre as tensões é dada por:

$$V_S = \frac{N_2}{N_1 + N_2} \cdot V_P$$

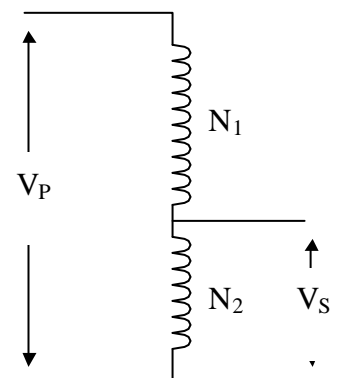


Figura 2.6

4. Representação esquemática do transformador

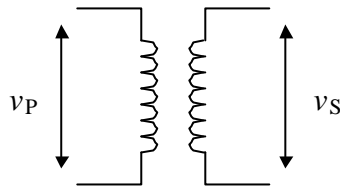


Figura 2.7 (a)



Figura 2.7 (b)

Electricamente, o transformador é representado simbolicamente como na figura 2.7 (a) ou como na figura 2.7 (b), sendo os enrolamentos primário e secundário, sujeitos às tensões v_P e v_S , respectivamente. Era habitual representar também o núcleo de ferro (que realiza o acoplamento magnético) com dois traços entre os dois enrolamento, mas tal tem vindo a ser abandonado.

5. Modelização do transformador

Transformador ideal

É um transformador sem perdas, isto é, a potência eléctrica obtida no secundário é igual à potência eléctrica injectada no lado do primário.

O transformador representado na figura 2.8, possui N_P espiras de fio no primário e N_S espiras de fio no secundário.

A relação de transformação para este transformador é dada por:

$$r_t = \frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S}$$

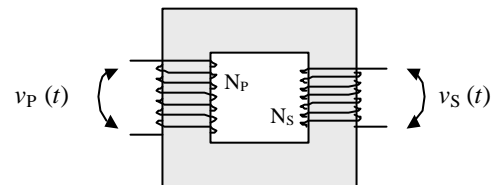


Figura 2.8

como estamos a considerar o transformador sem perdas:

$$S_P = S_S$$

$$v_P i_P = v_S i_S$$

$$\frac{v_P}{v_S} = \frac{i_S}{i_P}$$

isto é, a relação de transformação é:

$$r_t = \frac{N_P}{N_S} = \frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{i_S(t)}{i_P(t)}$$

Transformação de impedâncias

A impedância é definida como:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}}$$

como o transformador altera os valores de tensão e de corrente, altera também a razão entre eles e, conseqüentemente, o valor das impedâncias.

Considerando a figura 1.7, em que uma tensão é aplicada ao primário de um transformador e a tensão do secundário alimenta uma carga de impedância Z , cujo valor é dado por:

$$Z = \frac{v_S}{i_S}$$

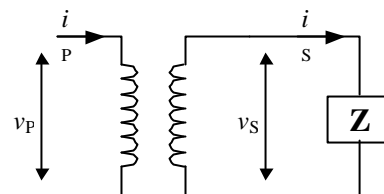


Figura 2.9

A impedância aparente (impedância Z vista do lado do primário, tendo o transformador pelo meio) – Z' – é dada por:

$$Z' = \frac{v_P}{i_P}$$

Como a relação de transformação é: $v_P = r_t v_S$ e $i_P = i_S / r_t$, vem:

$$Z' = \frac{v_P}{i_P} = \frac{r_t v_S}{\frac{i_S}{r_t}} = r_t^2 \frac{v_S}{i_S}$$

$$\boxed{Z' = r_t^2 \cdot Z}$$

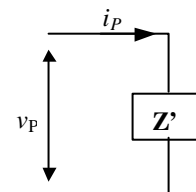


Figura 2.10

ou seja, poderemos sempre “passar” uma impedância, ligada ao secundário, para o primário, aplicando a expressão anterior, obtendo um circuito equivalente ao apresentado na figura 1.8.

6. Transformador real – circuito eléctrico equivalente

Tendo qualquer transformador, real, perdas, estas terão que ser consideradas, mesmo quando apenas ao nível de utilização da máquina – determinação do rendimento, que relaciona a energia fornecida e a energia utilizada. Às perdas já referidas no electromagnetismo (perdas por correntes induzidas, perdas por histerese e perdas por dispersão magnética) vêm adicionar-se as perdas de Joule nos enrolamentos primário e secundário, visto que têm resistência e por elas passam as correntes do primário e do secundário.

Entrando em conta com as referidas perdas, teremos o circuito eléctrico equivalente do transformador – figura 2.11:

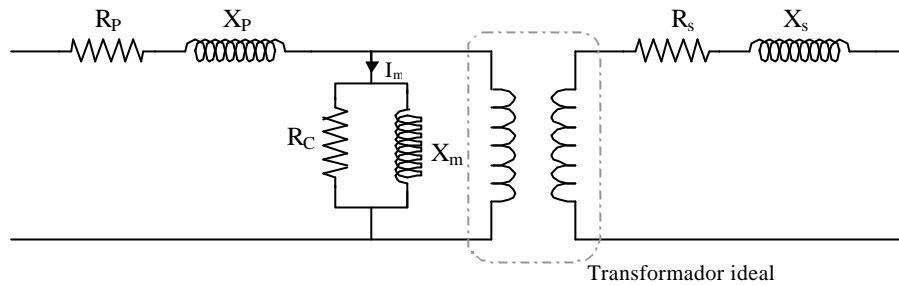


Figura 2.11

Em que:

- R_p, R_s resistência do enrolamento primário e secundário, respectivamente.
- X_p, X_s reactância de fuga
- R_c perdas por correntes de Eddy e por histerese
- X_m reactância de magnetização (permeabilidade, do ferro, finita)

As perdas referidas estão exemplificadas na figura 2.12

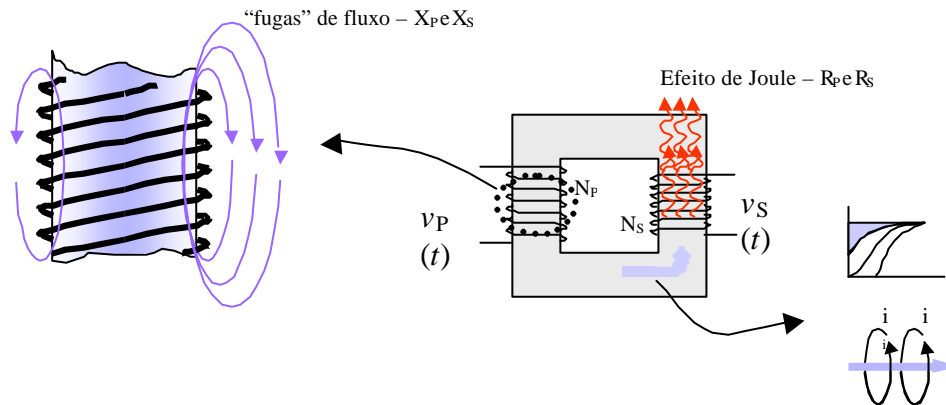


Figura 2.12

Estas imperfeições dos circuitos eléctrico e magnético, que permitiram idealizar o circuito eléctrico equivalente, indicam-nos as perdas no transformador, mas não nos dão qualquer indicação sobre a forma de onda da corrente, obtida no secundário. A não linearidade da curva de magnetização do ferro utilizado no núcleo, permite mostrar qual a forma da tensão obtida no secundário de um transformador – figura 2.13 – onde se pode constatar que, embora a onda de entrada seja sinusoidal, já a onda de saída apresenta distorção, isto é, não é rigorosamente sinusoidal.

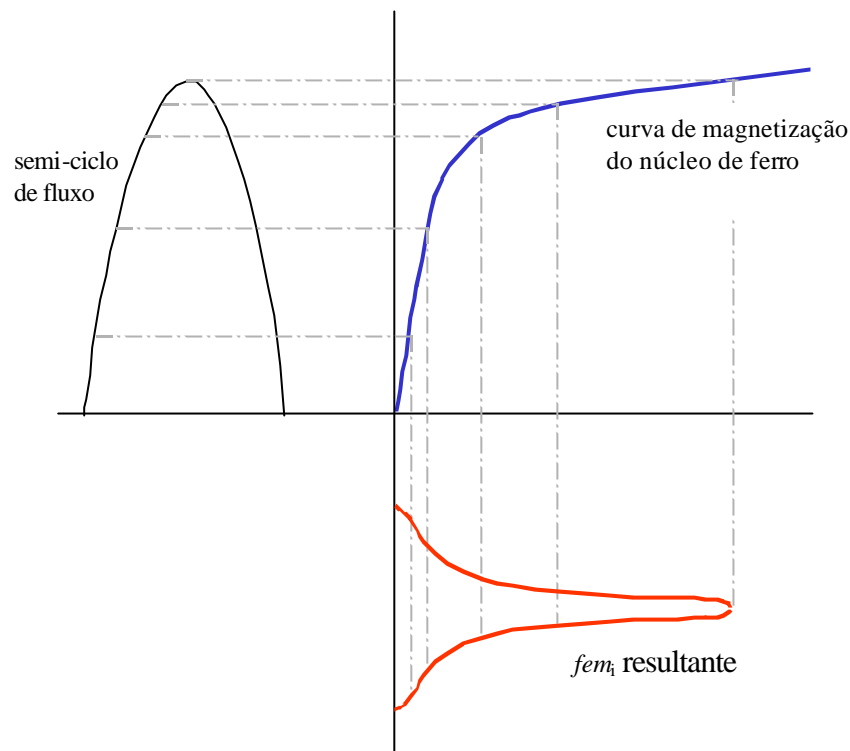


Figura 2.13

A determinação dos valores analíticos relacionados com as referidas perdas, pode ser realizada através de testes ao transformador – ensaio em curto circuito e ensaio em vazio.

7. Testes ao transformador

Ensaio em vazio

O secundário é deixado em aberto (não ligado a qualquer carga), sendo o enrolamento primário ligado à tensão nominal. Dado que o secundário está em vazio, nenhuma corrente flui nele e, conseqüentemente:

- nenhuma energia é transmitida para aquele ramo do circuito
- as perdas de Joule, no enrolamento secundário, são nulas

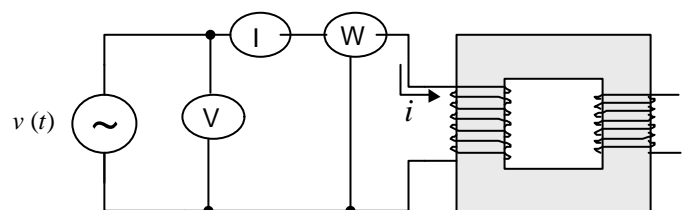


Figura 2.14

Verifica-se, entretanto, que o watímetro e o amperímetro, inseridos no circuito do primário, mostram valores não nulos – esta energia é “gasta” no enrolamento primário (Joule) e no núcleo de ferro (Eddy e histerese). Dado que o valor de R_P e X_P são muito inferiores a R_C e X_m ,

poderemos dizer que a energia gasta neste ensaio é atribuível às perdas de Eddy e de Histerese, denominadas de perdas no ferro – P_{FE}

Além deste valor de perdas, poderemos ainda determinar o factor de potência do transformador, em vazio. Este valor é importante, pois muitas vezes o transformador é deixado sem carga, tendo, do ponto de vista do fornecedor de energia, energia reactiva (consumida ou produzida) que importa conhecer. Assim, sendo a potência activa dada por:

$P = VI \cos \mathbf{j}$, poderemos dizer que, em vazio:

$$P_0 = V_n I_0 \cos \mathbf{j}_0$$

isto é, que:

$$\cos \mathbf{j}_0 = \frac{P_0}{V_n I_0}$$

em que P_0 é o valor da potência, lida no wattímetro e I_0 o valor da corrente, lida no amperímetro.

Ensaio em curto-circuito

O secundário é curto circuitado e aumenta-se a tensão no primário até que a corrente no secundário atinja o valor nominal.

Note-se que, estando o secundário em curto circuito, a sua impedância é quase nula, donde, a tensão necessária, no primário, para obter essa corrente, é muito pequena¹. É, assim, necessário possuir uma fonte de tensão regulável para alimentar com um valor reduzido o enrolamento primário².

Como neste ensaio a tensão no primário é reduzida, então a corrente que flui no enrolamento (I_p) é também reduzida.

Este ensaio permite conhecer, também, o valor da corrente de curto circuito do secundário (e, através da relação de transformação, a corrente de curto circuito do primário), fazendo uma regra de três simples – se com uma tensão V_{pcc} se obtém a corrente nominal no secundário, então com a tensão nominal no primário (e um curto circuito no secundário) obter-se-á a corrente de curto circuito. O conhecimento deste valor é de fundamental importância para a determinação de algumas grandezas relacionadas com dispositivos de protecção na instalação eléctrica, à qual o transformador pertence.

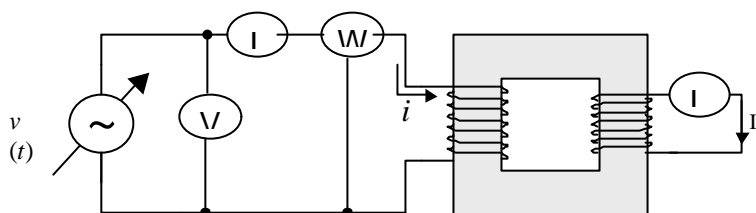


Figura 2.15

¹ Se a tensão no primário fosse a nominal, a corrente no secundário seria extremamente elevada, danificando esse enrolamento ($I_S = V_S / Z_S$)

² Estamos a supor um transformador abaixador

$$V_{1cc} \longrightarrow I_{2n} \quad I_{2cc} = \frac{V_{1n}}{V_{1cc}} \cdot I_{2n}$$

$$V_{1n} \longrightarrow I_{2cc}$$

É habitual este valor surgir em função da tensão de curto circuito, em percentagem.

$$I_{2cc} = \frac{V_{1n}}{V_{CC} \%} \cdot I_{2n}$$

8. Rendimento

Determinadas as perdas, poderemos determinar o rendimento do transformador.

Define-se o factor de carga (C), como sendo a relação entre a corrente do secundário do transformador, num determinado momento, e a sua corrente nominal, isto é:

$$C = \frac{I_2}{I_{2n}}$$

As perdas no Ferro são praticamente constantes, qualquer que seja a carga do transformador.

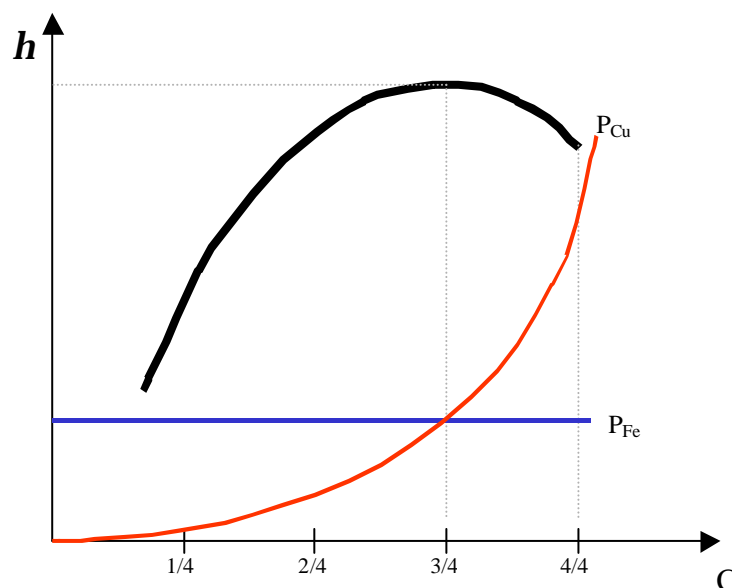
As perdas no Cobre dependem do factor de carga, já que a sua expressão é:

$$P_{Cu} = R_p \cdot I_p^2 + R_s \cdot I_s^2$$

podemos então definir o rendimento do transformador como:

$$h = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_s}{P_p} = \frac{P_s}{P_s + Perdas} = \frac{V_s I_s \cos \mathbf{j}}{V_s I_s \cos \mathbf{j} + P_{Cu} + P_{Fe}}$$

que tem o seu valor máximo, quando $P_{Fe} = P_{Cu}$, ou seja quando o factor de carga $C \approx \frac{3}{4}$



9. Arrefecimento de transformadores

Dada a existência de perdas por efeito de Joule, haverá aquecimento dos enrolamentos do transformador, aquecimento esse, que deverá ser dissipado¹. Dependendo da potência em jogo, essa dissipação poderá revestir-se de maior ou menor importância. Para transformadores de pequena potência ($I \searrow \Rightarrow E_{\text{joule}} \searrow$) essa dissipação processa-se por convecção natural. Para transformadores de média potência essa dissipação é realizada mergulhando os enrolamentos em óleo mineral que, para além de melhorarem o factor de dissipação, aumentam o isolamento eléctrico³. Para transformadores de elevada potência adiciona-se a convecção forçada do óleo.

10. Paralelo de transformadores

O paralelo de transformadores, por exemplo, para aumentar a potência que se tornou⁴ necessária a uma instalação, deverá obedecer a algumas regras, tais como valores de tensão iguais e índice horário igual.

De facto, fazendo o paralelo de 2 transformadores cujos valores de tensão no secundário (e no primário) não sejam iguais, vai criar uma diferença de potencial entre os dois, com a conseqüente circulação de corrente entre os transformadores. Este facto não poderá ocorrer.

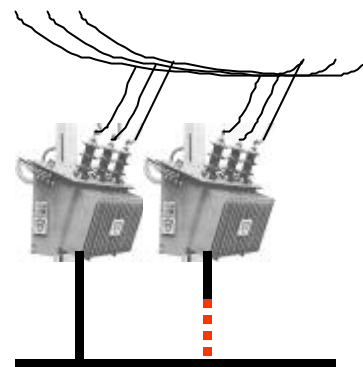


Figura 2.17

Já o respeito pelo índice horário (*índice que indica de que forma a tensão no secundário se relaciona com a tensão no primário, em termos de desfaseamento*), é menos evidente, embora igualmente importante para o bom funcionamento dos equipamentos.

De facto é também necessário, para além dos níveis de tensão iguais, que as tensões do secundário do novo transformador estejam em fase com as tensões do secundário do transformador existente, dado que se não estiverem vamos ter diferentes valores de amplitude, num e noutro transformador, o que implica uma diferença de potencial entre os dois – situação análoga à anterior.

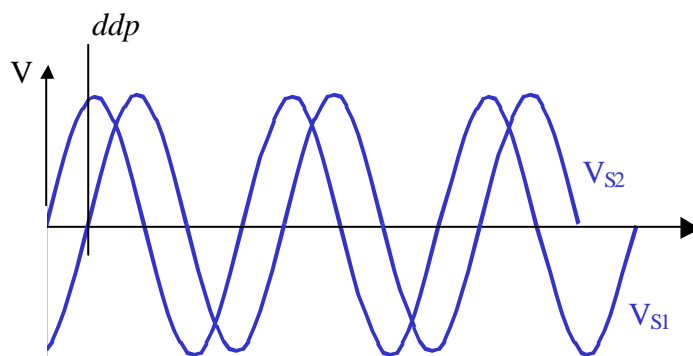


Figura 2.18

³ melhoram o isolamento entre os elevados potenciais, presentes nos enrolamentos, e a terra (potencial nulo)

⁴ Por exemplo porque se aumentou a capacidade de produção, com mais máquinas

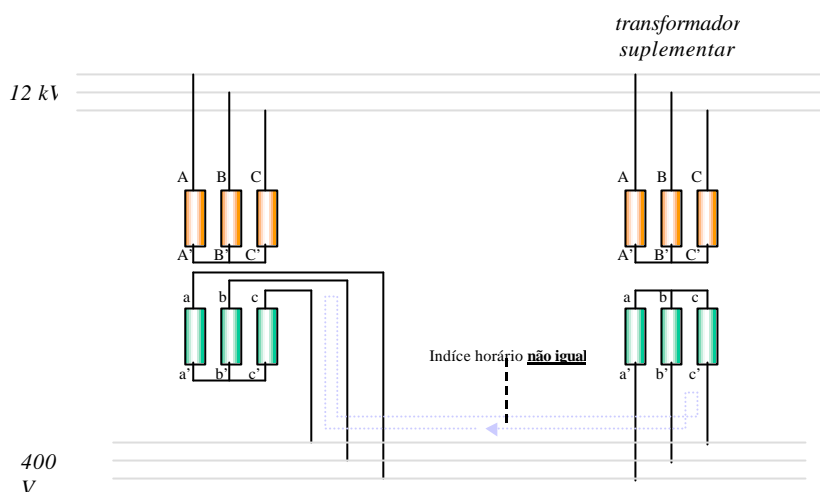


Figura 2.19

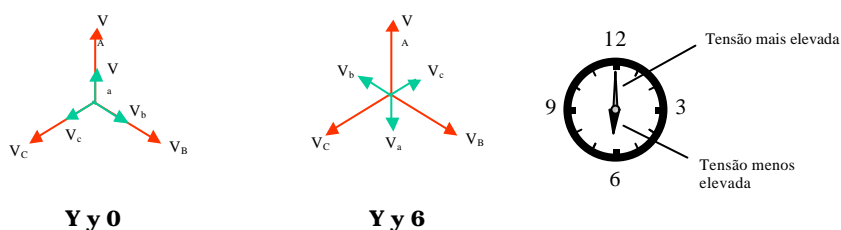


Figura 2.20

Na figura anterior, temos a referência Yy0 e Yy6. Esta simbologia tem a seguinte interpretação: as duas primeiras letras dizem como estão ligados os enrolamentos do lado de tensão mais elevada (letra maiúscula) e do lado da tensão menos elevada (letra minúscula) e o dígito que se lhes segue significa o quanto a tensão secundária aparecerá desfasada, relativamente à tensão primária que alimentará o transformador.

O valor do dígito corresponde ao valor das horas de um relógio, isto é 12 horas correspondem a 360°, ou seja cada hora corresponde a 30°. Portanto Yy6 significa que o desfasamento corresponde às seis horas, isto é o desfasamento é de 180°

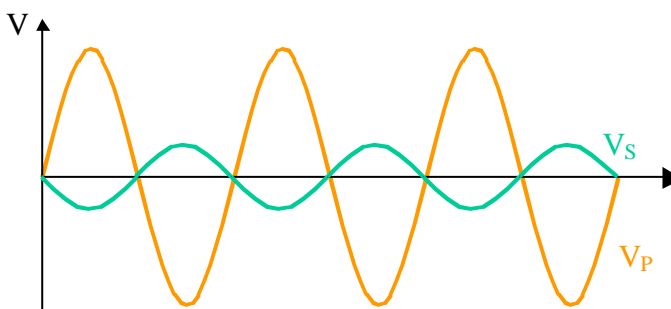


Figura 2.21

11. Queda de tensão em carga

Se se medir o valor da tensão do secundário de um transformador, quando este está em vazio (nenhuma carga ligada ao secundário), obteremos um valor que é diferente do valor da tensão do secundário quando este alimenta uma ou mais cargas.

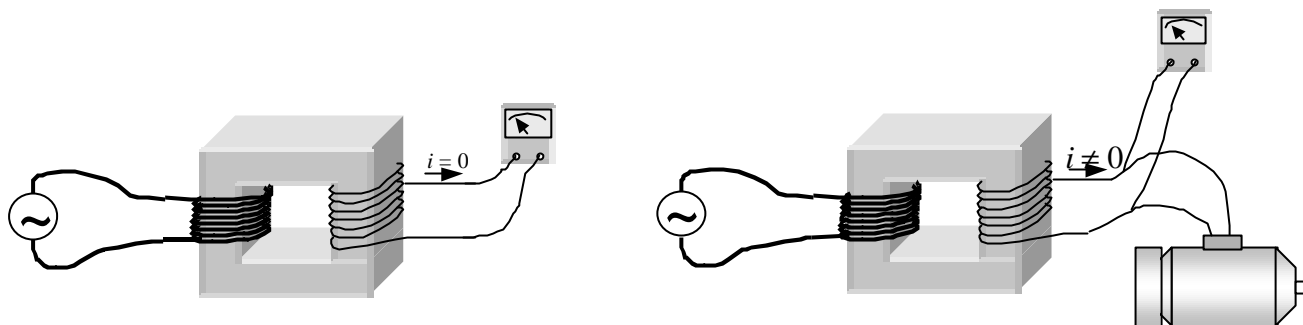


Figura 2.22

Esta diferença decorre do facto de que, no primeiro caso, a corrente no circuito secundário ser nula, já que não tem nenhuma carga ligada. Ao ligarem-se cargas ao secundário (2º caso), vai fluir uma corrente eléctrica no circuito secundário, que, tendo em conta que o enrolamento do secundário tem uma certa resistência, vai provocar uma queda de tensão no próprio enrolamento. Esta queda de tensão vai subtrair-se à queda de tensão induzida, sendo o resultado prático uma tensão em carga, inferior à tensão em vazio.

Note-se que, em transformadores de reduzida potência, a corrente no secundário é pequena, bem como é pequena a resistência do seu enrolamento, o que leva a que a queda de tensão, para este caso, é muito reduzida – isto é, não há grande diferença entre uma e outra. Já o contrário se passa em transformadores de elevada potência. Daí que a especificação da tensão do secundário é diferente, consoante se trate de um transformador de reduzida ou de elevada potência – no primeiro caso ($S < 16$ kVA), a tensão especificada para o secundário é a da tensão em carga; no segundo caso ($S > 16$ kVA), a tensão especificada é a da tensão em vazio

12. Notações utilizadas

Letra maiúscula – tensão mais elevada

Letra minúscula – tensão menos elevada

Designação das formas de ligação (para transformadores trifásicos):

Y – estrela

D – triângulo

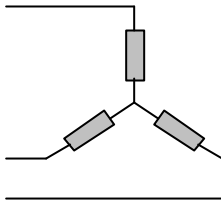
Z – zig-zag

dYn : lado da tensão mais elevada ligado em estrela, com neutro acessível; lado da tensão menos elevada ligado em triângulo

13. Formas de ligação de transformadores trifásicos

Seguidamente apresentam-se as diferentes formas de ligação dos enrolamentos de transformadores trifásicos:

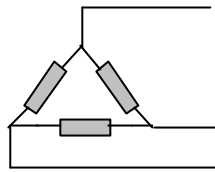
Ligação em estrela



$$V_{fase} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{linha}$$

- Menor isolamento
- Neutro ⇒ 2 tensões

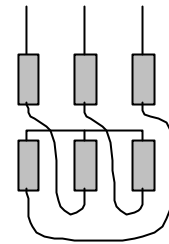
Ligação em triângulo



$$I_{fase} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_{linha}$$

- Menor secção (condutores)
- Pode manter 2 fases

Ligação em “zig-zag”



- Fluxos c sentidos contrários (mesma coluna)
- Permite desequilíbrio de cargas

Figura 2.23

As duas primeiras formas já são conhecidas (*ver capítulo Bases de corrente alternada*). Já a terceira forma – ligação em zig-zag – é nova. Esta forma pressupõe a partição de cada um dos três enrolamentos em dois semi-enrolamentos, interligados da maneira apresentada na figura – é uma espécie de estrela “desmembrada”.

14. Alternativa entre transformadores monofásicos e trifásicos

Existe uma alternativa a um transformador trifásico, que consiste na utilização de três transformadores monofásicos (cada um deles ligado a uma fase). Esta alternativa tem as suas vantagens e as suas desvantagens.

O transformador monofásico:

- é mais leve, logo mais facilmente transportável
- tem menores dimensões, logo é mais fácil arrumá-lo e pode reduzir o stock para 1/3
- na eventualidade de um defeito numa fase, podem manter-se os outros dois em funcionamento (isto é mantêm-se com duas fases em funcionamento)

O transformador trifásico:

- ocupa menos espaço e é menos pesado, que três monofásicos
- é mais barato (devido à poupança em isoladores)
- tem maior rendimento

ⁱ A questão da necessidade de dissipação da energia calorífica, prende-se com o encurtamento da duração de vida do isolante dos enrolamentos.