

O TRANSFORMADOR ELÉTRICO.

MÁQUINA FUNDAMENTAL NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA.

1. Introdução

O transformador é uma das máquinas elétricas mais importantes na área da eletrotécnica. Ao contrário dos motores e geradores elétricos, não é um conversor eletromecânico. É também um conversor, mas apenas dentro da mesma forma de energia, a energia elétrica. Na realidade é uma máquina estática, que altera as características da energia elétrica em que é alimentado para as adaptar à carga elétrica que vai alimentar.

Esta máquina foi desenvolvida por Michael Faraday, sendo assim o seu princípio de funcionamento justificado pelas leis da indução eletromagnética, leis de Faraday e de Lenz. Estas leis dizem, de uma forma sucinta, que havendo um movimento relativo entre um condutor elétrico e um campo magnético, manifesta-se no condutor uma força eletromotriz induzida (lei de Faraday), cujo sentido se opõe à causa que lhe dá origem (lei de Lenz). Estas leis traduzem-se matematicamente na seguinte equação:

$$e = - \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

em que:

e: força eletromotriz em Volt (V)

ϕ : fluxo magnético em Weber (Wb)

t: tempo em segundos (s)

Como a máquina é estática, o movimento relativo entre condutores e campo magnético só pode ser obtido pela variação do fluxo magnético no tempo, ou seja, a máquina só pode ser excitada magneticamente em corrente alternada. É por esta razão que o transformador é uma máquina elétrica que apenas funciona em corrente alternada.

O transformador é então uma máquina elétrica estática, com duas ou mais bobinagens que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternada num outro sistema de tensão e corrente alternada com valores normalmente diferentes, mas com a mesma frequência da fonte que o alimenta.

A figura 1 mostra um transformador de potência que equipa uma subestação da rede nacional de transporte (RNT):



Figura 1. Transformador de Potência da RNT

A utilização desta máquina, que apenas funciona em corrente alternada, determinou que a energia elétrica seja produzida e utilizada em corrente alternada, sendo os atuais Sistemas Elétricos de Energia (SEE) em todo o mundo organizados e estruturados em quatro subsistemas, o subsistema de produção da energia, o subsistema de transmissão da energia, o subsistema de distribuição da energia e o subsistema de utilização da energia elétrica.

No entanto, a importância desta máquina é transversal a todo o setor eletrotécnico. Ela é importante na eletrônica, em sistemas de telecomunicações, eletrônica de potência, em sistemas de medições de tensões e correntes

(transformadores de medida) normalmente muito elevadas, em sistemas de isolamento de instalações elétricas e proteção de pessoas contra o perigo de eletrocussão, nos SEE e, de uma forma geral, sempre que são necessários diferentes níveis de tensões e correntes alternadas.

Em termos de dimensões e potências, dependendo da utilização, existem pequenos transformadores monofásicos, com potências da ordem das unidades ou dezenas de Volt-Ampère (VA), normalmente utilizados em equipamentos eletrônicos, transformadores de média potência, monofásicos e trifásicos, com potências da ordem das centenas ou milhares de kVA, normalmente utilizados no setor industrial e em postos de transformação, e os transformadores monofásicos, habitualmente trifásicos, utilizados nas subestações das redes de transporte e distribuição de energia elétrica, com potências da ordem das dezenas e centenas de MVA.

O transformador convencional é constituído por um núcleo de ferro e duas bobinagens separadas fisicamente, uma do lado da tensão mais elevada e outra do lado da tensão mais baixa. Primário, será a bobinagem que é ligada à rede que alimenta o transformador. Secundário, será a bobinagem que alimenta a carga aos terminais do transformador.

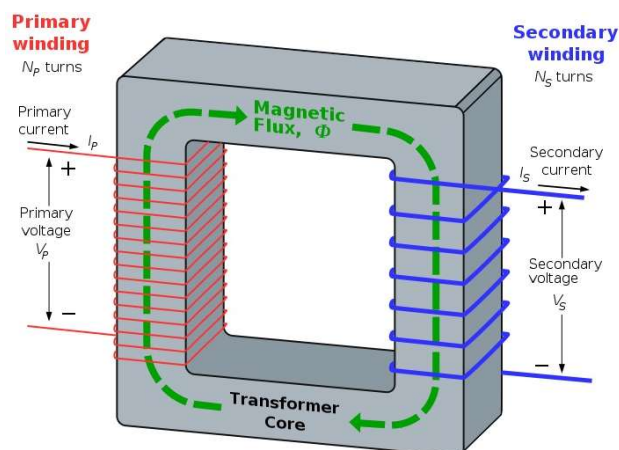


Figura 3. Transformador abaixador, monofásico

[Fonte: Wikipedia]

Há um transformador especial, denominado autotransformador, que além do núcleo de ferro tem apenas uma bobinagem, comum ao lado do primário e secundário do transformador.

Sendo uma máquina mais simples e mais barata que o transformador convencional, tem uma forte utilização nos SEE, especialmente quando é necessário fazer regulação para estabilizar o nível da tensão.



Figura 2. Subestação da RNT equipada com Transformador de Potência Efacec

2. Estrutura dos Sistemas Elétricos de Energia

Os atuais sistemas elétricos de energia (SEE) consistem em unidades de produção, onde a energia primária é convertida em energia elétrica, nas redes de transmissão e distribuição, que transportam a energia elétrica até aos locais de consumo, e nos equipamentos dos consumidores (também chamados de "cargas"), onde a energia é utilizada.

Embora inicialmente a produção, transporte e consumo de energia elétrica, se destinasse apenas alimentar pequenas regiões geográficas com sistemas de pequenas dimensões, atualmente esses sistemas regionais são interligados por linhas de transmissão de alta e muito alta tensão, formando sistemas complexos com redes fortemente interligadas que abrangem amplas áreas geográficas.

A interligação das redes permite economias de escala, com uma utilização mais eficiente dos geradores, maior fiabilidade e um fator de carga mais elevado, ou seja, a relação entre a carga média e carga máxima devido à diversidade da carga, aumentando assim a capacidade de utilização das redes de energia.

A interligação das redes também leva a um aumento da complexidade dos sistemas, e uma qualquer perturbação em uma parte do sistema pode ter um impacto muito negativo no sistema global interligado.

A Figura 4 ilustra a estrutura básica dos sistemas elétricos de energia.

Este modelo organizativo dos atuais SEE, baseado em grandes centrais de produção de energia elétrica, afastados dos centros de consumo, por razões ambientais e de existência do recurso energético primário que será convertido em energia elétrica, fundamentalmente a água, impõe a necessidade de diferentes níveis de tensão.

Na realidade, por razões económicas relacionadas com a minimização das perdas elétricas no transporte de energia até aos grandes centros de consumo, impõe-se a necessidade de fazer essa transmissão em valores muito elevados de tensão, tipicamente 400, 220 e 150 kV. Depois, junto aos centros de consumo, é necessário distribuir esta energia, agora num nível de tensão mais reduzido, tipicamente, 30, 24 e 15 kV.

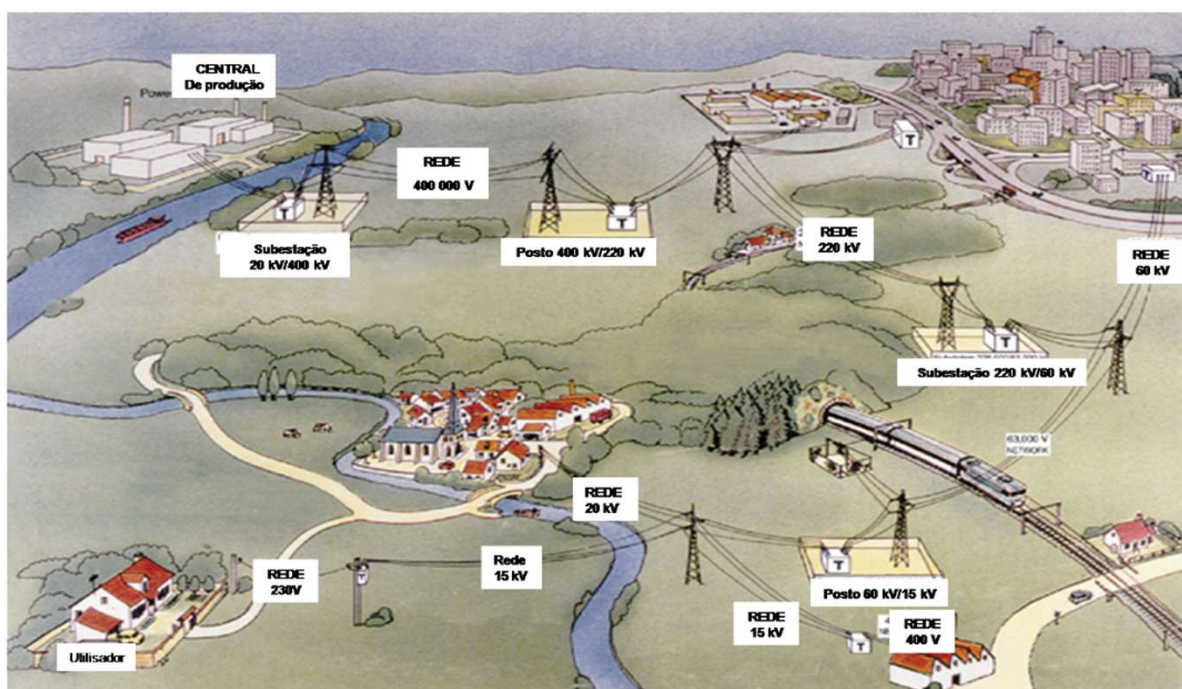


Figura 4. Estrutura dos sistemas elétricos de energia

A interligação da rede de transporte à rede de distribuição é tipicamente efetuada a 60 kV. Depois, é necessário alimentar os consumidores, sendo estes maioritariamente alimentados em baixa tensão, 230 V (alimentação monofásica), ou 400 V (alimentação trifásica), através dos postos de transformação.

O transformador é a única máquina que permite obter todos estes níveis de tensão. Como apenas funciona em corrente alternada, esta é a razão dos SEE serem atualmente organizados e estruturados da forma que foi apresentada e apenas funcionarem em corrente alternada. Confirma-se assim a importância desta máquina na estrutura e organização dos atuais SEE.

Este modelo organizativo dos SEE, produção centralizada em grande escala, afastada dos centros de consumo, remonta aos finais do século XIX e foi defendida por Nicolai Tesla, em oposição a Thomas Edison, que defendia a produção de energia no próprio local em que era consumida, semelhante ao que atualmente é considerado a produção distribuída.

3. Transformadores de Potência

A importância do transformador é transversal a todo o setor da eletrotecnia, havendo vários tipos de transformadores consoante o fim a que se destinam. No entanto, pelas razões anteriormente referidas, ele toma uma importância acrescida na sua utilização nos SEE como transformador de potência, monofásico ou trifásico, habitualmente trifásico, destinado ao transporte e distribuição de energia, em gamas de potência situadas entre as dezenas de kVA e as centenas de MVA.

Os transformadores de potência utilizados nos SEE devem ser projetados e construídos para que, além de se conseguir um custo aceitável, também se consiga:

- Uma boa regulação de tensão: implica que tenham reduzidas quedas de tensão. Consegue-se pela intensificação do acoplamento magnético entre enrolamentos para redução dos fluxos de dispersão e correspondentes quedas reativas;

- Elevados rendimentos: implica obtenção de baixas perdas de energia, tanto na bobinagem de cobre como no núcleo de ferro. Consegue-se limitando as solicitações dos materiais utilizados (densidades de corrente no cobre e induções no ferro) a níveis compatíveis com os custos, melhorando por outro lado as suas propriedades;
- Baixas correntes e perdas no funcionamento em vazio: as baixas correntes em vazio conseguem-se com altas indutâncias de magnetização, utilizando núcleos com ferro de elevada permeabilidade magnética. Menores perdas em vazio significam, fundamentalmente, menores perdas no ferro.

Como habitualmente se tratam de sistemas trifásicos, os transformadores utilizados também o são (também podem ser usados bancos de três transformadores monofásicos). As ligações entre enrolamentos podem ser realizadas em estrela 'Y ou y', triângulo 'D ou d' ou zigue-zague 'Z ou z' (letra maiúscula refere-se ao enrolamento do lado da tensão mais elevada e a letra minúscula ao enrolamento do lado da tensão mais baixa).

A partir daqui, neste documento, considera-se que o transformador vai funcionar como abaixador. Assim, o enrolamento de mais alta tensão será o primário e o enrolamento de mais baixa tensão será o secundário do transformador.

Desta forma, de acordo com a ligação de ambos os enrolamentos, pode-se ter diferentes configurações para um transformador. O esquema de ligação Yy é normalmente usado à saída de centrais e grandes subestações de distribuição. O esquema Dy é usado nos postos de transformação com o triângulo para as tensões da ordem dos 15 kV e a estrela do secundário para as tensões compostas de cerca de 400 V. É usado com condutor neutro e ligação à terra do neutro dos enrolamentos. A ligação Yd surge em subestações de distribuição para reduzir a tensão do transporte para níveis da distribuição. Normalmente, o neutro da estrela é ligado à terra e o triângulo a alimentar linhas aéreas ou redes de cabos subterrâneos.

4. Circuito equivalente do transformador

O funcionamento do transformador pode ser modelizado através do seu circuito equivalente, que está ilustrado na figura 5. O transformador real pode ser representado por um transformador ideal em que aos enrolamentos do primário e secundário se encontram ligadas impedâncias representativas dos fenómenos que ocorrem no transformador real e que depreciam o transformador ideal: quedas de tensão devidas às resistências e às indutâncias de fugas magnéticas, perdas de energia por efeito de Joule nas resistências, magnetização e perdas no ferro.

Este modelo é válido para regimes permanentes de funcionamento, com grandezas sinusoidais, não considerando os fenómenos não lineares do transformador real, como a saturação, histerese, etc.

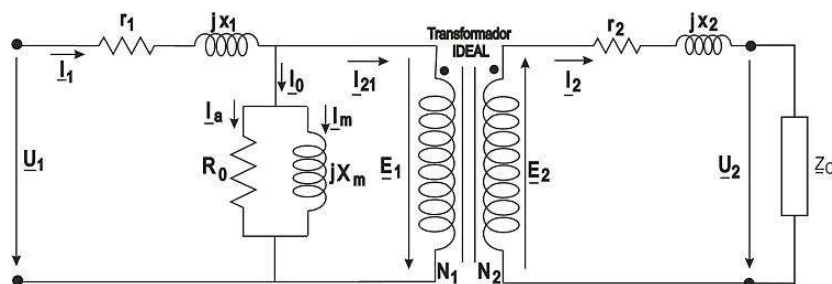


Figura 5. Circuito equivalente do transformador

O transformador ideal está isento de quedas de tensão, fugas magnéticas e perdas de energia. Para qualquer regime de funcionamento, as tensões e intensidades de corrente são transformadas com alteração do módulo na proporção direta do número de espiras para as tensões e na proporção inversa para as correntes, e com uma rotação de fase de 180° para ambas as grandezas.

As perdas na bobinagem de cobre por efeito de Joule (R_2) traduzem-se no aquecimento dos enrolamentos do primário e secundário devido à passagem da corrente. No modelo estão consideradas na potência dissipada em r_1 e r_2 que representam a resistência do enrolamento primário e secundário, respetivamente.

As perdas no ferro devido à histerese e às correntes de Foucault traduzem-se no aquecimento do núcleo de ferro do transformador. São proporcionais ao quadrado da tensão aplicada ao transformador. As perdas histeréticas estão associadas à orientação dos domínios magnéticos do material ferromagnético. Estas perdas são função não linear da tensão aplicada ao transformador. As perdas no ferro estão consideradas no modelo na potência dissipada em R_0 .

As reactâncias x_1 e x_2 estão associadas aos fluxos de fugas ou dispersão que ocorrem no transformador quando o fluxo do núcleo (principal) se escapa e atravessa apenas um dos enrolamentos. Os efeitos da excitação magnética do núcleo são considerados na reactância de magnetização X_m .

As equações de funcionamento do transformador são apresentadas a seguir (as letras sublinhadas indicam fasores), em que os índices 1 referem-se a grandezas do lado da tensão mais elevada, e os índices 2 referem-se a

grandezas do lado da tensão mais baixa:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \quad (2)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 \quad (3)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_{21} \quad (4)$$

$$\underline{I}_{21} = -\frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 \quad (5)$$

$$\underline{E}_1 = -j\omega N_1 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

$$\underline{E}_2 = -j\omega N_2 \frac{\Phi_M}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

em que:

$$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1;$$

$$\underline{Z}_2 = r_2 + jx_2;$$

N_1 – número de espiras do enrolamento primário;

N_2 – número de espiras do enrolamento secundário;

E_1 – f.e.m. induzida no primário;

E_2 – f.e.m. induzida no secundário;

Φ_M – valor máximo do fluxo principal;

I_{21} – corrente do secundário referida ao primário.

Sendo o transformador uma máquina que está ligada em conjunto com outras máquinas nas redes de energia elétrica, será mais adequada o tratamento dos problemas relativos ao seu funcionamento se for representado como uma associação de impedâncias ou um quadripolo. Olhando para o esquema da figura 5, verifica-se que uma simples associação de impedâncias se torna impossível devido à presença dos dois enrolamentos do transformador ideal.

É possível obter um circuito equivalente referido a um enrolamento, onde as grandezas no enrolamento equivalente vão ter valores diferentes das correspondentes no enrolamento real. Designar-se-ão com o índice 12 as grandezas do lado da alta referidas ao lado da baixa tensão.

No esquema da figura 6 mostra-se o circuito equivalente referido ao lado da tensão mais baixa, com uma carga ligada aos terminais do secundário (transformador abaixador).

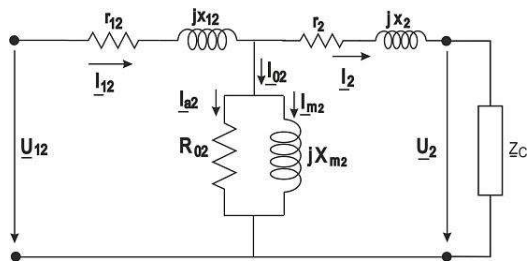


Figura 6. Circuito equivalente referido ao secundário

Assim, sendo a razão do número de espiras dada por:

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad (8)$$

a passagem das impedâncias do primário para o secundário pode ser feita dividindo o seu valor pelo quadrado da razão do número de espiras, como se segue:

$$Z_{12} = \frac{Z_1}{a^2} \quad (9)$$

O valor da tensão do primário referido ao secundário U_{12} pode ser obtido a partir da expressão:

$$U_{12} = -\frac{U_1}{a} \quad (10)$$

O valor da corrente no primário será igual a:

$$I_1 = -\frac{I_{12}}{a} \quad (11)$$

Se o transformador tem baixas fugas magnéticas e o valor da corrente absorvida em vazio não é elevado, é possível, obter um circuito equivalente simplificado relativamente ao circuito anterior. Assim, considerando que a queda de tensão na impedância do primário assume valores muito baixos, o valor do fluxo e indução são praticamente constantes independentemente do regime de carga. Chega-se desta forma ao circuito equivalente simplificado, que está representado na figura 7:

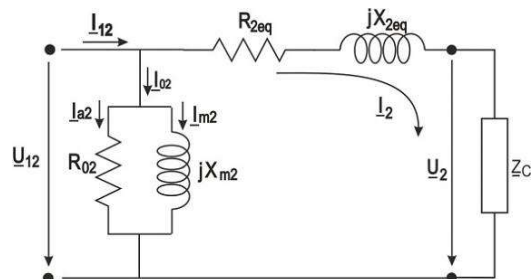


Figura 7. Circuito equivalente simplificado

Neste circuito, a resistência do primário referida ao secundário r_{12} e a resistência do secundário r_2 foram agrupadas em R_{2eq} , assim como as reatâncias em X_{2eq} . Então, $R_{2eq} = r_{12} + r_2$ e $X_{2eq} = x_{12} + x_2$.

Para transferir as impedâncias do secundário para o primário estas são multiplicadas pelo quadrado da razão do número de espiras:

$$Z_{21} = a^2 Z_2 \quad (12)$$

Quando se trata de transformadores trifásicos deve utilizar-se circuito equivalente por fase, com os valores das tensões e das correntes por bobinação de fase. Por outro lado, deve utilizar-se a razão de transformação m no lugar da razão do número de espiras pois, dependendo do tipo de ligação dos enrolamentos do primário e secundário, estas podem ser diferentes.

A razão de transformação pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$m = \frac{U_{1N}}{U_{20}} \quad (13)$$

em que U_{1N} é a tensão nominal do lado da tensão mais elevada, sendo U_{20} a tensão do lado da baixa com o transformador em vazio.

Para a análise do paralelo de transformadores vai considerar-se este esquema equivalente simplificado, cujo diagrama fasorial está representado na figura 8, para uma carga indutiva:

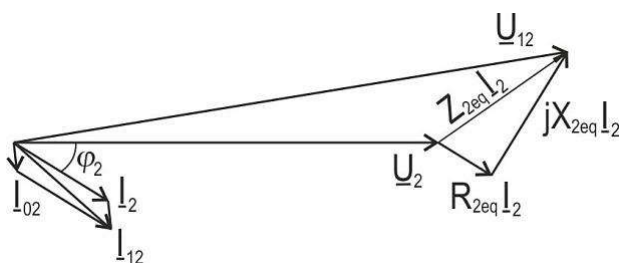


Figura 8. Diagrama fasorial correspondente ao circuito simplificado referido ao lado da tensão mais baixa

5. Funcionamento de transformadores em paralelo

Como referido anteriormente, o agrupamento de transformadores em paralelo é de grande importância para o funcionamento dos sistemas elétricos de energia. Esta ligação em paralelo tem algumas vantagens, nomeadamente:

- Maior fiabilidade do sistema: se um dos transformadores ficar com algum defeito, o outro pode continuar a alimentar a carga;
- Possibilidade de manutenção sem cortes de alimentação: pode realizar-se manutenção num dos transformadores sem que seja necessário desligar a alimentação da carga (se a potência disponível no outro transformador for suficiente para alimentar a restante carga);
- Expansão do sistema: possibilidade de aumento da capacidade do sistema, acrescentando um transformador para aliviar outro que esteja em sobrecarga, ou simplesmente, aumento da potência disponível para alimentar a carga.
- Operação sob condições mais favoráveis de carga: com as variações de carga que existem ao longo do dia, é vantajoso ter os transformadores a funcionar em condições próximas às de máximo rendimento. Isto significa introduzir ou retirar de funcionamento unidades, para que se mantenham ligadas as que fiquem a funcionar próximo do seu regime nominal.

A questão fundamental que surge quando se pretende ligar dois transformadores em paralelo, seja porque é necessário aumentar a potência instalada num posto de transformação, seja por razões de garantir melhor fiabilidade do serviço, tem a ver com o modo como a carga total solicitada ao conjunto se vai repartir pelos diferentes transformadores. O ideal será repartir a carga pelos transformadores de forma proporcional às suas potências nominais e haver concordância de fase entre a corrente que circula no secundário de cada transformador e a corrente total na carga. Não se verificando estas condições significará que a capacidade do conjunto à plena carga será inferior à soma das potências nominais de cada transformador.

5.1. Condições para o funcionamento de transformadores em paralelo

Para que se consiga uma distribuição da carga pelos transformadores de forma proporcional à sua potência nominal é necessário ter atenção ao seguinte:

- Às polaridades dos transformadores monofásicos e sequência de fases dos polifásicos;
- Aos deslocamentos de fase entre primários e secundários de transformadores trifásicos;
- Às tensões nominais e relações de transformação;
- Aos valores das impedâncias de curto-circuito dos transformadores.

Polaridade

A polaridade de um enrolamento refere-se à característica que mostra a dependência do sentido da f.e.m. induzida em relação ao fluxo que a gera (normalmente assinalada com uma seta ou um ponto). Assim, dois terminais de dois enrolamentos são da mesma polaridade ou homólogos quando estiverem igualmente situados relativamente ao sentido positivo num e noutro enrolamento.

A figura 9 ilustra um processo simples de identificar os terminais com a mesma polaridade de um transformador. Em primeiro lugar, alimenta-se um dos enrolamentos com uma tensão alternada, que pode ser de baixo valor relativamente ao valor nominal do enrolamento. Os terminais identificados com ponto têm a mesma polaridade se o valor da tensão V_t for igual à soma das tensões V_1 e V_2 . Estas tensões podem ser medidas com um voltímetro ou com um osciloscópio.

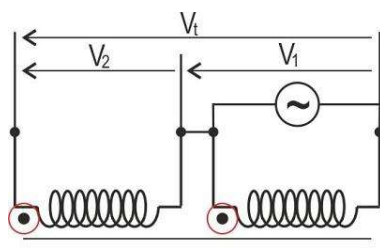


Figura 9. Identificação de terminais com mesma polaridade

Uma vez identificados os terminais do transformador, a ligação em paralelo é feita interligando-se os terminais igualmente identificados nos dois transformadores.

Deslocamentos de fase

No caso dos transformadores trifásicos (ou polifásicos) além do problema da polaridade dos enrolamentos de cada fase no primário e secundário, há que acrescentar o problema dos desfasamentos que podem ocorrer entre as tensões aos seus terminais, nas ligações em estrela, triângulo ou zig-zague.

Podem ligar-se em paralelo dois transformadores trifásicos quando os seus deslocamentos de fase forem iguais. Se não o forem, as correntes de circulação entre eles podem atingir valores inaceitáveis.

Tensões nominais e relações de transformação

Para que dois transformadores possam ser ligados em paralelo é necessário, além de terem razões de transformação iguais, que os valores eficazes das suas tensões nominais sejam iguais. Diferenças nas relações de transformação levariam ao aparecimento de correntes de circulação entre os transformadores que poderiam atingir valores inaceitáveis.

Por outro lado, quando dois (ou mais) transformadores se ligam em paralelo significa que recebem energia da mesma linha pelo primário e a transferem para outra linha pelo secundário. Assim, devem ter a mesma tensão quer no primário quer no secundário, tanto em módulo como em fase. Desta forma, uma condição que deve ser garantida quando se pretende ligar dois transformadores em paralelo é que ambos tenham as mesmas tensões nominais no primário e secundário, que significa que devem ter a mesma razão de transformação m .

Uma forma simples de verificar se os dois transformadores têm as mesmas tensões em valor eficaz, frequência e fase, está ilustrada na figura 10 (para dois transformadores monofásicos):

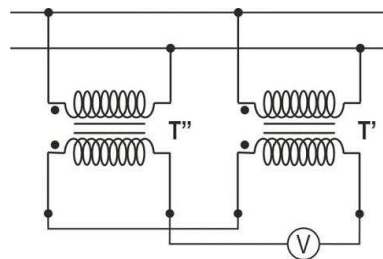


Figura 10. Paralelo de dois transformadores monofásicos

Se, com as ligações indicadas, houver concordância de fase, a tensão indicada no voltímetro será nula. Se por outro lado o valor indicado no voltímetro for o dobro da tensão de cada transformador, significa que as ligações estão trocadas.

Valores das impedâncias equivalentes

A análise que se segue aplica-se aos dois transformadores monofásicos da figura 9, T' e T'', com razões de transformação $m'=m''=m$. Dessa análise verifica-se que o agrupamento em paralelo dos dois transformadores é ideal quando se tem igualdade de argumentos assim como módulos das suas impedâncias complexas equivalentes. Isto significa terem tensões de curto-circuito iguais.

Assim, ao alimentarem uma carga com uma potência total S. As contribuições de cada um dos transformadores S' e S'' serão proporcionais às suas potências nominais. Assim, ambos podem funcionar em simultâneo à plena carga.

A potência total S solicitada pela carga será numericamente igual à soma das potências individuais fornecidas por cada transformador $S=S'+S''$, situação resultante da concordância de fase das correntes I' e I'' fornecidas por T' e T'' respetivamente.

Dado que esta análise vai referir-se às correntes secundárias, no esquema equivalente de cada transformador não se considera a impedância de excitação, pelo que o esquema equivalente dos dois transformadores em paralelo será o representado na figura 11.

Considera-se ainda que:

$$\underline{U}'_{1N} = \underline{U}''_{1N} \text{ e } \underline{U}'_{20} = \underline{U}''_{20} = \underline{U}_{20}.$$

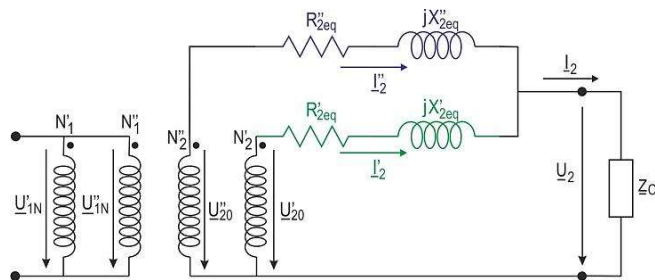


Figura 11. Circuito equivalente de dois transformadores em paralelo

As equações de funcionamento do lado secundário do transformador são:

$$\underline{U}_{20} - \underline{U}_2 = \underline{Z}'_{2e} \underline{I}'_2 = \underline{Z}''_{2eq} \underline{I}''_2 \quad (14)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}'_2 + \underline{I}''_2 \quad (15)$$

Deste sistema pode obter-se:

$$\frac{\underline{I}'_2}{\underline{I}''_2} = \frac{\underline{Z}''_{2e}}{\underline{Z}'_{2e}} \quad (16)$$

$$\underline{I}'_2 = \frac{\underline{Z}''_{2e}}{\underline{Z}'_{2e} + \underline{Z}''_{2eq}} \underline{I}_2 \quad (17)$$

$$\underline{I}''_2 = \frac{\underline{Z}'_{2e}}{\underline{Z}'_{2e} + \underline{Z}''_{2eq}} \underline{I}_2 \quad (18)$$

As equações (17) e (18) determinam as correntes de cada transformador enquanto (16) mostra que estas se distribuem na razão inversa das impedâncias equivalentes.

Impedâncias iguais em módulo e fase

Como referido anteriormente, o ideal seria que a carga se dividisse proporcionalmente às potências nominais de cada transformador e quando houvesse concordância de fase entre a corrente de cada transformador e a corrente solicitada pela carga. Estas condições traduzem-se na seguinte relação:

$$\frac{\underline{I}'_2}{\underline{I}''_2} = \frac{\underline{I}'_{2N}}{\underline{I}''_{2N}} \quad (19)$$

Como, de acordo com (16) obtém-se:

$$\frac{I'_{2e}}{I''_{2e}} = \frac{Z''_{2eq}}{Z'_{2e}} \quad (20)$$

Agrupando estas duas equações, obtém-se:

$$Z'_{2eq} I'_{2N} = Z''_{2eq} I''_{2N} \quad (21)$$

o que implica que os dois transformadores tenham iguais tensões de curto-circuito nominais.

Se os dois transformadores tiverem também iguais quedas ôhmicas e indutivas nominais:

$$R'_{2e} I'_{2N} = R''_{2eq} I''_{2N}; X'_{2e} I'_{2N} = X''_{2eq} I''_{2N} \quad (22)$$

então:

$$\frac{I'_{2N}}{I''_{2N}} = \frac{R''_{2eq}}{R'_{2e}} = \frac{X''_{2eq}}{X'_{2e}} \quad (23)$$

Substituindo em (20) e (21) obtém-se:

$$\frac{I'_{2e}}{I''_{2e}} = \frac{Z''_{2e}}{Z'_{2eq}} = \frac{R''_{2eq}}{R'_{2e}} = \frac{X''_{2e}}{X'_{2eq}} = \frac{I'_{2N}}{I''_{2N}} \quad (24)$$

Analisando esta expressão, verifica-se que, independentemente do valor da carga, os dois transformadores funcionam com iguais quedas ôhmicas e iguais quedas indutivas.

Isto significa que os diagramas de tensões são coincidentes e as correntes fornecidas por cada transformador estão em fase com a corrente solicitada pela carga, como ilustrado na

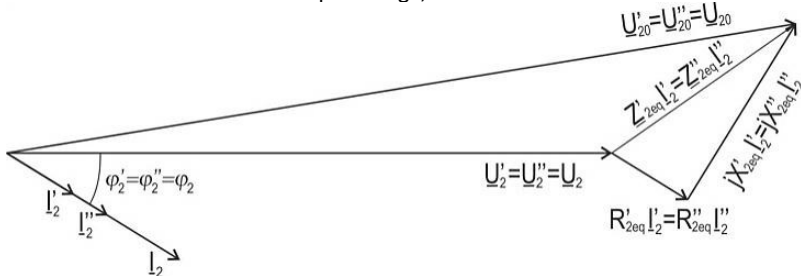


Figura 12. Diagrama fasorial para o paralelo de dois transformadores com iguais quedas ôhmicas e indutivas

Em relação às potências que cada transformador fornece à carga elas serão proporcionais à potência nominal de cada um, como se demonstra a seguir:

$$\frac{S'}{S''} = \frac{U_{20} I'_{2e}}{U_{20} I''_{2e}} = \frac{U_{20} I'_{2N}}{U_{20} I''_{2N}} = \frac{S'_{2N}}{S''_{2N}} \quad (25)$$

$$\frac{P'}{P''} = \frac{U_{20} I'_{2e} \cos \varphi'_{2e}}{U_{20} I''_{2e} \cos \varphi'_{2e}} = \frac{I'_{2N}}{I''_{2N}} = \frac{S'_{2N}}{S''_{2N}} \quad (26)$$

Então, ao se efetuar o agrupamento de dois transformadores em paralelo o pretendido é que a carga seja dividida pelos transformadores de forma proporcional à sua potência. Se os transformadores forem de potências iguais, podem dividir por eles a carga em partes iguais se, fornecendo a mesma corrente, apresentarem a mesma queda de tensão. Assim, é necessário que as resistências e reatâncias equivalentes de ambos sejam iguais. Pode afirmar-se que devem ter a mesma tensão de curto-circuito.

Impedâncias iguais apenas em módulo

Supor agora que os triângulos de quedas não são iguais, embora tenham a mesma hipotenusa, ou seja, igualdade em módulo das tensões de curto-circuito. Assim, pode escrever-se:

$$Z'_{2e} I'_{2N} = Z''_{2eq} I''_{2N}$$

$$R'_{2eq} I'_{2N} \neq R''_{2eq} I''_{2N}$$

$$X'_{2e} I'_{2N} \neq X''_{2e} I''_{2N} \quad (27)$$

As equações (19), (20) e (21) mantêm-se, por isso há uma distribuição proporcional das correntes. Há ainda uma distribuição proporcional das potências aparentes (25).

Assim, os dois diagramas de tensões vão ter triângulos de quedas apenas com as hipotenusas coincidentes, como ilustrado na figura 13, para uma carga indutiva. Verifica-se facilmente que as fases das correntes são diferentes, não sendo proporcional a distribuição das potências ativas.

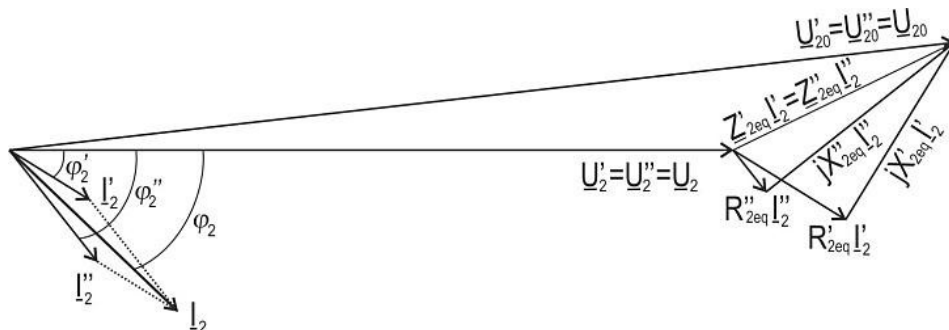


Figura 13. Diagrama fasorial para o paralelo de dois transformadores com diferentes quedas ôhmicas e indutivas

Daqui se pode concluir que os dois transformadores podem funcionar em paralelo, simultaneamente à plena carga mas, como se tem $\varphi'_2 \neq \varphi''_2$, há diferença de fase nas correntes e $|I_2| < |I'_2 + I''_2|$.

Impedâncias diferentes em módulo e fase

Se também não for possível igualar os módulos das tensões de curto-circuito, obtém-se:

$$Z'_{2eq} I'_{2N} = \alpha Z''_{2eq} I''_{2N} \quad (\alpha > 1) \quad (28)$$

Como (20) se mantém, combinando com esta última expressão, fica:

$$\frac{I'_{2N}}{I''_{2N}} = \frac{I'_{2N}}{\alpha I''_{2N}}$$

(29)

Verifica-se desta forma que deixa de haver uma distribuição de correntes proporcional. Senão vejamos: se o transformador T' estiver a funcionar em regime nominal, ou seja, $I'_2 = I'_{2N}$, $I''_2 = \alpha I''_{2N}$, que significa que o transformador T'' estaria a funcionar em sobrecarga. Para que T'' não entre em sobrecarga, a máxima corrente que T' deve fornecer à

carga $\frac{I'_{2N}}{\alpha}$, que é inferior ao seu valor nominal.

Se um dos transformadores possuir uma tensão de curto-circuito menor significa que tem uma menor impedância equivalente. Como a potência se divide por eles na razão inversa das impedâncias equivalentes, o que possuir menor impedância equivalente, para ter a mesma queda de tensão, é forçado a fornecer uma maior corrente.

Daqui se conclui que este conjunto está subaproveitado, pois para um deles funcionar à corrente nominal o outro (o que tem maior tensão de curto-circuito) estará a funcionar abaixo do regime nominal.

5.2. Paralelo de transformadores trifásicos

Para se efetuar o paralelo de dois transformadores trifásicos devem garantir-se as condições enunciadas anteriormente. Assim, deve garantir-se que os deslocamentos de fase das tensões secundárias sejam iguais. Nos transformadores trifásicos, esta igualdade está relacionada com a forma de ligação dos seus enrolamentos (estrela, triângulo ou zigue-zague), ou seja, depende do desvio angular dos transformadores.

Segundo a norma CEI 60076, o desvio angular corresponde ao desfasamento entre os fasores representativos das tensões entre o ponto neutro (real ou fictício) e os terminais homólogos de dois enrolamentos, quando aos enrolamentos de mais alta tensão se supõe ligado um sistema de tensões trifásico direto com sequência numérica ou alfabética, se os seus terminais forem designados por números ou letras, respetivamente. O desfasamento correspondente ao desvio angular é medido em atraso.

Desta forma, o desvio angular é o desfasamento, em atraso, entre as tensões simples dos enrolamentos do primário (mais alta tensão) e do secundário (reais ou fictícias), da mesma fase. Este desfasamento pode traduzir-se pela hora indicada num relógio em que a posição do fasor que traduz a tensão entre o neutro e o terminal de linha do enrolamento de tensão mais elevada é fixada nas 12 horas (ponteiro dos minutos). O ponteiro das horas corresponde ao fasor que traduz a tensão entre o neutro e o terminal de linha homólogo do enrolamento de mais baixa tensão. O desvio angular exprime-se numericamente pelas horas correspondentes, ou seja, obtém-se dividindo por 30° o desfasamento entre os fasores indicados.

Para o conceito ficar mais claro, suponhamos o transformador ilustrado na figura 14. O enrolamento do primário (mais alta tensão) está ligado em triângulo e o secundário em estrela.

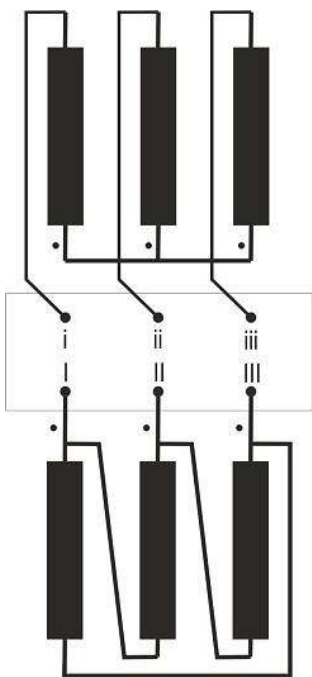


Figura 14. Transformador trifásico com primário ligado em triângulo e secundário em estrela

Para determinar o desvio angular e desta forma o índice horário, toma-se como referência a tensão simples I (fictícia neste caso) coincidente com as 12 horas. Como na estrela estão disponíveis os terminais não homólogos, as relações de fase entre as tensões correspondentes dos dois lados são:

i em oposição a I-III

ii em oposição a II-I

iii em oposição a III-II

Estas relações estão ilustradas na figura 15:

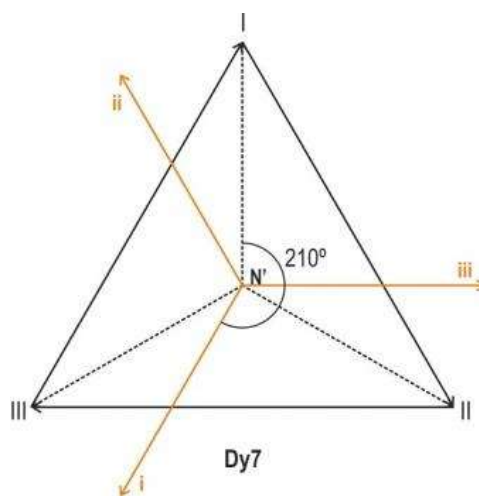
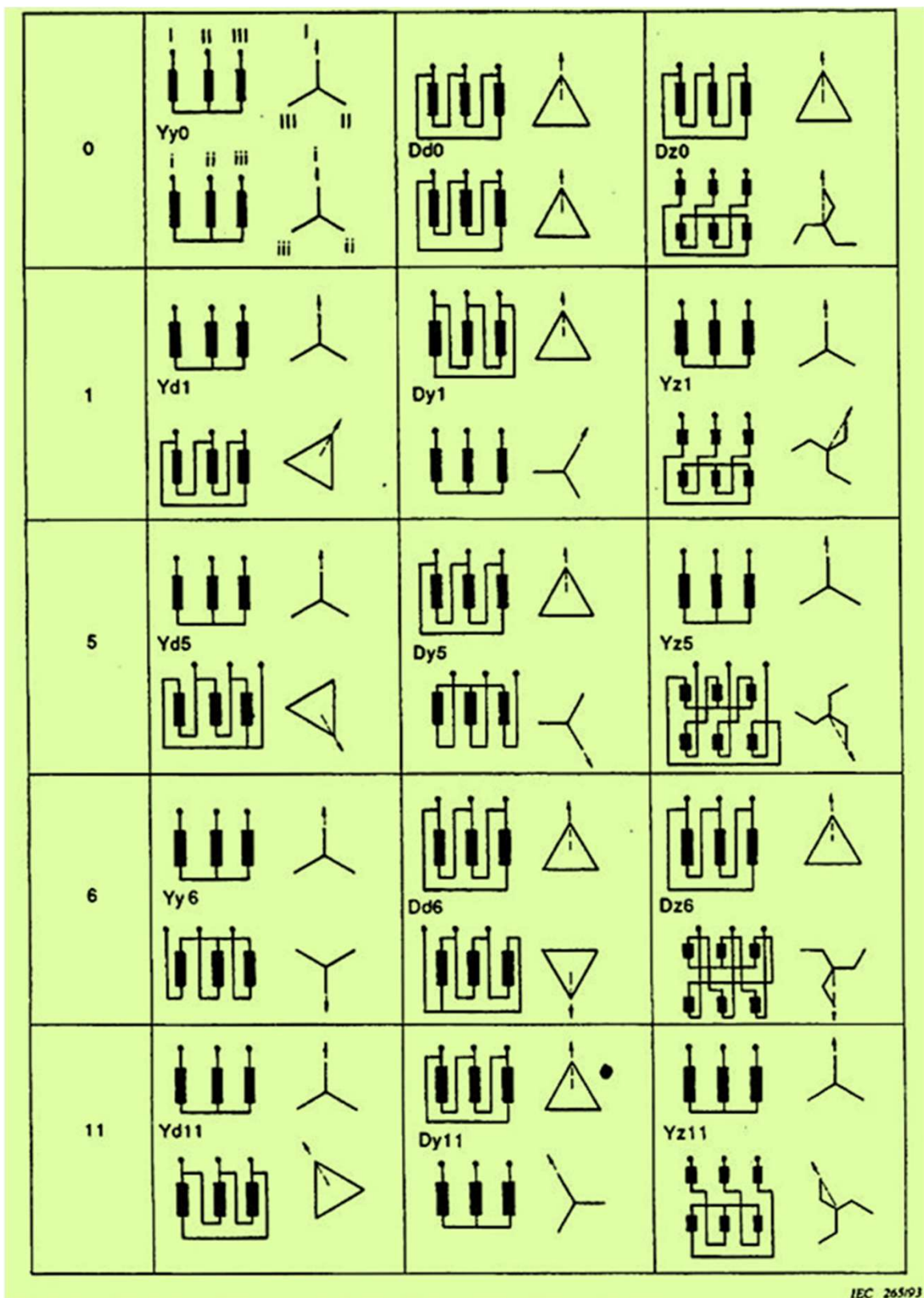


Figura 15. Determinação do desvio angular do transformador trifásico

Como indicado na figura, o atraso de i relativamente a I é de 210° , correspondente às 7 horas. Desta forma o transformador tem um índice 7 ($210/30$).

Na chapa de características deste transformador aparecerá a designação Dy7.

As ligações mais usuais estão ilustradas na figura 16.



IEC 265/93

Figura 16. Esquemas de ligação mais usuais em transformadores trifásicos

Do que foi exposto, percebe-se que dois transformadores com o mesmo sistema de tensões no lado da alta tensão, um com o índice 6 e outro com o índice 7, não vão ter as tensões do lado da baixa em fase. Assim, para se efetuar o paralelo de dois transformadores trifásicos eles deverão pertencer a um mesmo grupo. Os quatro grupos existentes são os seguintes:

GRUPO I: Índices horários 0, 4, e 8;

GRUPO II: Índices horários 6, 10 e 2;

GRUPO III: Índices horários 1 e 5;

GRUPO IV: Índices horários 7 e 11.

Para o paralelo de transformadores com o mesmo índice, bastará ligar em ambos os lados os terminais com a mesma designação.

Dentro de um grupo, se os índices horários apresentam uma diferença de 4 ou 8, isto significa que há um desfasamento

entre eles de 120° ou 240° , coincidente com o de duas fases de um sistema trifásico.

Desta forma, ligam-se num dos lados os terminais com a mesma designação e no outro lado ligam-se entre si terminais por permutação circular das designações, como ilustrado na figura 17.

Há, porém, a possibilidade de efetuar o paralelo de transformadores de grupos diferentes (III e IV), de acordo com o seguinte:

Um transformador do grupo III pode ligar-se em paralelo com um do grupo IV se a ordem de sucessão das fases de um transformador se inverte em relação ao outro, como ilustrado na figura 18.

Com exceção desta possibilidade anteriormente referida, é impossível o paralelo de transformadores pertencentes a grupos diferentes.

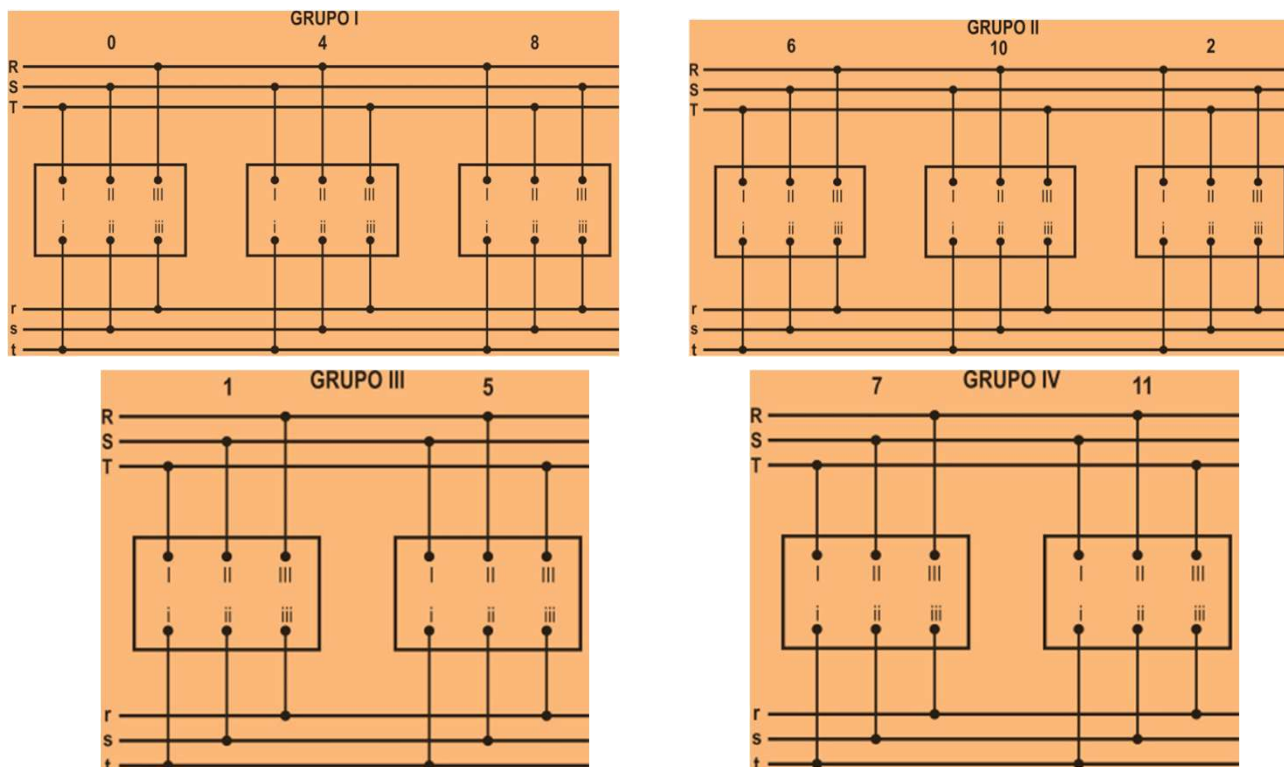


Figura 17. Ligações para o paralelo de transformadores trifásicos pertencentes ao mesmo grupo horário

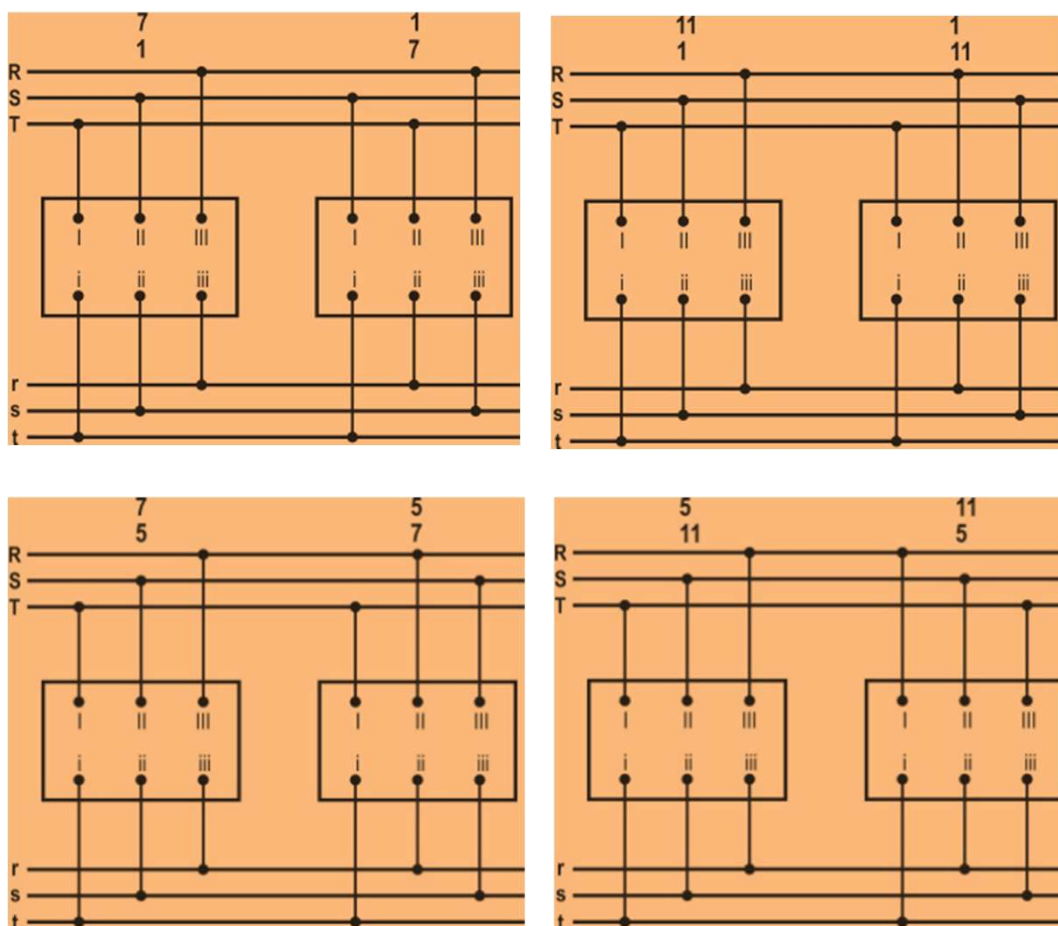


Figura 18. Ligações para o paralelo de transformadores trifásicos pertencentes a grupos horários diferentes (III e IV)

6. Conclusões

O Transformador Elétrico é das máquinas elétricas mais importantes, sendo a sua utilização transversal em todo o setor eletrotécnico.

É responsável por a energia elétrica disponível para utilização ser em corrente alternada, e por o modelo organizativo e estrutura dos atuais SEE basear-se nos subsistemas de produção, transporte, distribuição e utilização da energia elétrica. Neste âmbito, ele é fundamentalmente utilizado em sistemas de potência, habitualmente na versão de máquina trifásica, com gamas de potência entre as dezenas de kVA e as centenas de MVA.

Nas subestações das redes de transporte e distribuição de energia, ele pode aparecer como uma unidade trifásica ou em banco trifásico, que consiste na associação de três transformadores monofásicos interligados para formarem um sistema trifásico.

Há também um transformador especial denominado autotransformador, mais simples e mais barato que o transformador convencional, que tem apenas uma bobinagem que é comum ao primário e ao secundário do transformador. Esta máquina tem uma elevada utilização pela capacidade de variar de forma contínua o valor da tensão em corrente alternada, mas é fundamentalmente importante como estabilizador do nível da tensão nas subestações da rede de transporte e distribuição de energia elétrica.

Quando se pretende colocar dois ou mais transformadores monofásicos a funcionar em paralelo, há que ter alguns cuidados. Para que o funcionamento em paralelo se realize de forma ideal, ou seja, com distribuição da potência solicitada pela carga proporcional à potência de cada transformador, devem garantir-se as seguintes condições:

- Iguais tensões nominais dos enrolamentos primários e secundários;
- Iguais relações de transformação;
- Iguais tensões de curto-circuito com iguais quedas óhmicas e indutivas nominais;
- Mesma polaridade nos terminais interligados.

Quando se trata de transformadores trifásicos, além destas condições é necessário garantir que as tensões estão em fase, ou seja, ambos devem pertencer ao mesmo grupo horário, embora se possam ligar em paralelo transformadores pertencentes ao grupo III e IV.

Quando se agrupam transformadores de potências diferentes, o que tiver menor potência deve ter maior impedância equivalente. Os triângulos das quedas de tensão dos dois devem estar entre si na razão inversa das suas potências.

No entanto não é aconselhável efetuar o paralelo de transformadores com potências muito diferentes (no máximo 1:3), porque assim será difícil satisfazer os requisitos anteriores e o conjunto estará a ser subaproveitado.

Referências bibliográficas:

- I. E. Commission, "IEC 60076-1: Power Transformers," in General, ed, 1999.
- José Beleza Carvalho, Estrutura, Organização e Funcionamento dos Sistemas Elétricos de Energia; Revista Neutro-à-Terra, Edição nº 28, Dezembro de 2021.
- Alexandre Marques da Silveira, Transformadores: Funcionamento em paralelo na rede elétrica; Revista Neutro-à-Terra, Edição nº 27, Junho de 2021.
- S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, Fourth ed.: McGraw Hill, 2005.
- R. G. Jordão, Transformadores, 1ª edição ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- C. C. Carvalho, "Transformadores," Sebenta ed. Porto: FEUP, 1983, p. 249.
- M. A. R. Pozueta. (2008, Dezembro). Transformadores en Paralelo. Available: http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos_Paralelo.pdf
- A. Martignoni, Transformadores, 8ª ed.: Editora Globo, 1969.