

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Podemos efectuar transformação trifásica de tensões recorrendo a :

- Transformadores trifásicos
- Bancos de transformadores monofásicos compostos por três transformadores monofásicos iguais cujos primários e secundários serão ligados nos moldes mais convenientes.

As vantagens de um TT relativamente a um banco trifásico são:

- ter menor peso
- ocupar menor espaço
- ter um menor preço (cerca de 15% menos) pois requer menor nº de isoladores (3 contra os 6 do banco)
- tem um maior rendimento
- manuseamento e ligação de uma unidade única

As vantagens do banco trifásico são:

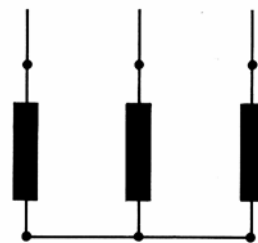
- transporte mais fácil na medida em que é constituído por unidades independentes
- exige menor reserva de potência. Se um transformador avaria basta um outro para o substituir o que vale $S/3$. No TT em caso de falha é preciso S . (Um outro TT).
- Poder funcionar com um T avariado desde que estejam os 3 em triângulo...

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

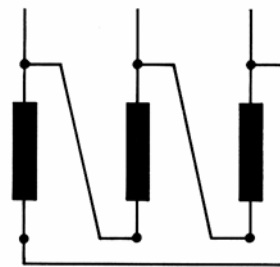
- LIGAÇÃO DOS ENROLAMENTOS

São essencialmente três as formas de ligação para os enrolamentos primários e secundários de um TT:

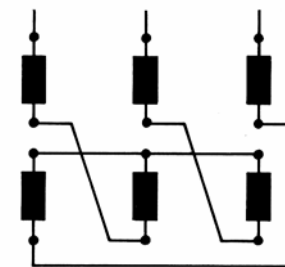
- a) Estrela (com ou sem neutro acessível)
- b) Triângulo
- c) Ziguezague (com ou sem neutro acessível); (cada enrolamento tem duas partes bobinadas em duas colunas distintas; é raro usar esta ligação para o primário).



a Estrela



b Triângulo

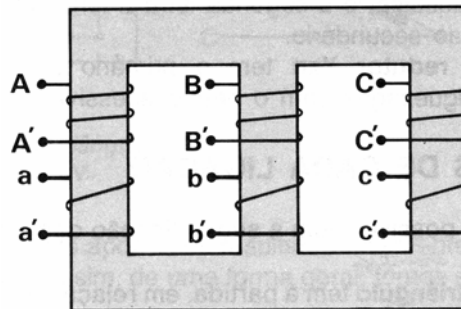


c Ziguezague

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

- CONVENÇÕES.PLACA DE TERMINAIS.

Da figura abaixo indicada temos que **A** e **a** são terminais com a mesma polaridade sendo os opostos **A'** e **a'**. (Diz-se que dois extremos de enrolamentos de uma mesma coluna têm igual polaridade, se simultaneamente possuem potenciais positivos ou negativos em relação aos outros dois.)



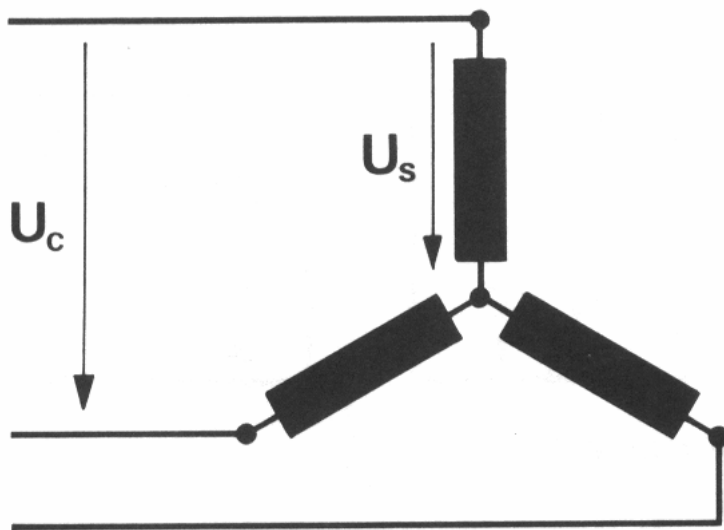
Quanto às letras usadas para representar os enrolamentos, tomam-se as letras maiúsculas para a tensão mais elevada e as minúsculas para a tensão mais baixa. O mesmo princípio é aplicado nas designações das ligações. A letra **n** ou **N** tem a função de designar que o neutro se encontra acessível respectivamente para tensão inferior ou superior.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

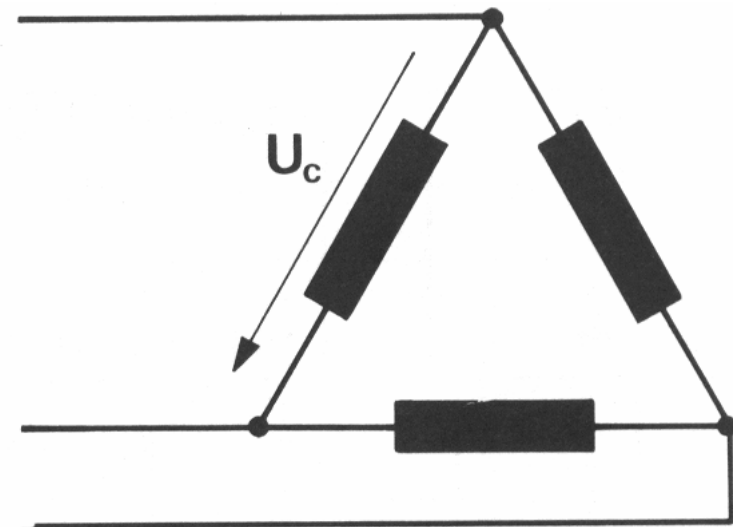
- APLICAÇÕES DE CADA LIGAÇÃO.

- Ligação em estrela.

Esta ligação tem, em relação à ligação em triângulo, a vantagem de permitir o neutro acessível o que conduz à possibilidade de acesso a dois níveis distintos de tensão. Também tem a vantagem de requerer menor isolamento eléctrico face ao triângulo. (Basta ver qual o nível de tensão a que estão sujeitos os enrolamentos num caso e noutro...).



$$U_c = \sqrt{3} U_s$$

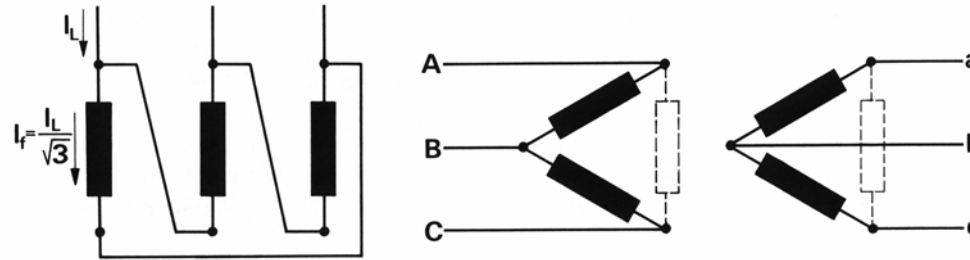


TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

- APLICAÇÕES DE CADA LIGAÇÃO.

- Ligação em triângulo.

Tem a vantagem de ter correntes nos enrolamentos $\sqrt{3}$ menores do que as correntes nas linhas conduzindo a enrolamentos com espiras de menor secção, (mais fácil construção).



Outra vantagem já foi referida anteriormente e vamos explicá-la melhor agora:

No caso de um banco de transformadores ligados em triângulo, a avaria de um deles continua a permitir o funcionamento do todo se bem que com um nível de potência inferior ao da potência inicialmente prevista...

Vamos demonstrar que é efectivamente assim:

Considere-se um banco de T ligados em triângulo quer no primário quer no secundário.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Cada transformador terá uma potência igual a $\frac{S}{3} = U_c \cdot I'$.

(I' = corrente em cada enrolamento = "corrente na fase"; U_c = tensão composta).

O conjunto terá uma potência total dada por: $S = 3 \cdot U_c \cdot I' = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_L$.

(I_L representa a corrente na linha que por sua vez é $\sqrt{3} \cdot I'$).

Nesta situação (antes da avaria), a potência disponível é igual à potência instalada.

Quando se dá a avaria de um transformador, podemos proceder à chamada ligação em V conforme está explicitado na figura anterior.

Sendo trifásicas e simétricas as tensões entre A, B e C, as tensões induzidas entre ab e bc serão iguais e esfasadas de 120° . A tensão entre ca, somada com as outras duas dá uma resultante nula, constituindo o todo um sistema trifásico simétrico, uma vez que ca é em grandeza igual às restantes e esfasada de 120° delas.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Nesta situação sabemos que não poderemos ultrapassar em termos de corrente na linha o valor anteriormente especificado de I' pois agora a referida corrente na linha é a que passa directamente nos enrolamentos.

Assim a potência total disponível após a avaria é dada por: $S' = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I'$.

Potência disponível antes: $S = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_L$.

$$\text{Donde: } \frac{S'}{S} = \frac{I'}{I_L} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \rightarrow 57,7\%$$

Isto permite demonstrar que a ligação em V só permite ter como potência disponível 57,7% da potência dos três transformadores em triângulo.

$$\text{A potência instalada é agora: } S_i = 2 \cdot \frac{S}{3} = 0,667$$

(NOTA: É raro recorrer a transformadores com os dois lados em triângulo).

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

- APLICAÇÕES DE CADA LIGAÇÃO.

- Ligação em ziguezague.

Esta ligação é usada quando está prevista a existência de grandes desequilíbrios ao nível da carga. Lembrando que esta ligação se encontra subdividida em colunas distintas, é fácil compreender que uma sobrecarga numa fase de alimentação da carga, no secundário, irá afectar duas fases no primário. É normal encontrar este tipo de ligação no secundário de transformadores de distribuição onde o natural desequilíbrio das cargas dos consumidores será menor para o lado da rede de distribuição uma vez que afecta duas fases desta, como já foi dito.

- CONFRONTO DAS LIGAÇÕES APRESENTADAS...

As ligações em estrela e triângulo gastam o mesmo peso de cobre embora para a estrela se tenha menor comprimento e maior secção. O ziguezague gasta mais cobre ($2\sqrt{3}/3$ vezes mais), mesma secção que a estrela mas com comprimento $2\sqrt{3}/3$ vezes maior. Relativamente ao triângulo, gasta uma secção $\sqrt{3}$ vezes maior e um comprimento $2/3$.

Por motivos de economia (cerca de 15%), em termos do peso de cobre dá-se preferência a ligações em estrela e triângulo. O ziguezague aparece essencialmente: para tensões de enrolamento não superiores a 500V; em secundários de BT de transformadores com potência não superior a 100KVA.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Com o aumento da tensão (acima de 20KV) surge sobretudo a ligação em estrela:

- Menor tensão por enrolamento
- Construtivamente mais fácil em termos de execução de ligações
- Maior secção do enrolamento = maior robustez

Para potências elevadas e tensões relativamente baixas : triângulo!
(menor secção do cobre = maior economia)

• VALORES NOMINAIS

As tensões nominais de um transformador trifásico são compostas e a razão de transformação incluirá essas tensões! Se os enrolamentos 1^{ário} e 2^{ário} usarem igual associação de fases, a razão de transformação coincidirá com a razão do n° de espiras tal como acontece em monofásico. Mas por vezes isso não acontece...

Exemplo: 1^{ário} em triângulo e 2^{ário} em estrela.

A razão do n° de espiras é dada pela razão das tensões por enrolamento: $\frac{N1}{N2} = \frac{U_{1nc}}{U_{20S}}$

A razão de transformação: $m = \frac{U_{1nc}}{U_{20c}}$. Assim temos: $\frac{N1}{N2} = \sqrt{3} \cdot m$

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

- FUNCIONAMENTO EM REGIME SINUSOIDAL SIMÉTRICO [CCC_102/103]

Em regime simétrico as grandezas nas diferentes fases apenas diferem no esfasamento de 120°. Efectua-se o estudo por fase, valendo todas as equações referentes ao circuito equivalente dadas no transformador monofásico. Deve recorrer-se igualmente ao teorema de Kennelly que permite efectuar a transformação de um triângulo numa estrela equivalente. Deste modo, considera-se todos os enrolamentos como ligados em estrela e usa-se tensões simples e correntes nas linhas nas equações que estudámos para o transformador monofásico.

Nos ensaios económicos medem-se as potências globais trifásicas e para determinar as impedâncias mais uma vez se recorre a tensões simples e correntes nas linhas:

$$Z_0 = \frac{U_{ls}}{I_0} \quad Z_2 = \frac{U_{lcs}}{m \cdot I_{2n}} \quad R_2 = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{2n}^2}$$

Quando se consideram todos os circuitos em estrela equivalente, ao referir as grandezas de um enrolamento ao outro, deve figurar a razão de transformação **m** e não a razão do nº de espiras.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

- UTILIZAÇÃO DAS DIFERENTES LIGAÇÕES...

Y_0y_0 → pouco usada devido a problemas relacionados com fenómenos devidos a harmónicos.

Yy_0 → usada em saída de centrais e grandes subestações de distribuição...; não é aconselhável quando se prevêem grandes desequilíbrios de carga.

Dy_0 → é o transformador mais usado nos PT's, com o triângulo para as tensões de 15KV e a estrela secundária para as tensões compostas da ordem dos 400V. Usado com condutor neutro e ligação à terra do neutro dos enrolamentos. Aparece igualmente com muita frequência à saída das centrais com o triângulo alimentado pelo gerador e a estrela a alimentar linhas de saída geralmente com o neutro à terra.

Yd → aparece em subestações de distribuição para reduzir as tensões de transporte para as de distribuição. Tem geralmente o neutro da estrela à terra e o triângulo a alimentar linhas aéreas de distribuição ou redes de cabos.

Yz_0 → aparece com frequência nos PT's com potência não superior a 100KVA.

Dd → aparece às vezes em PT's privados a alimentar circuitos de força motriz.

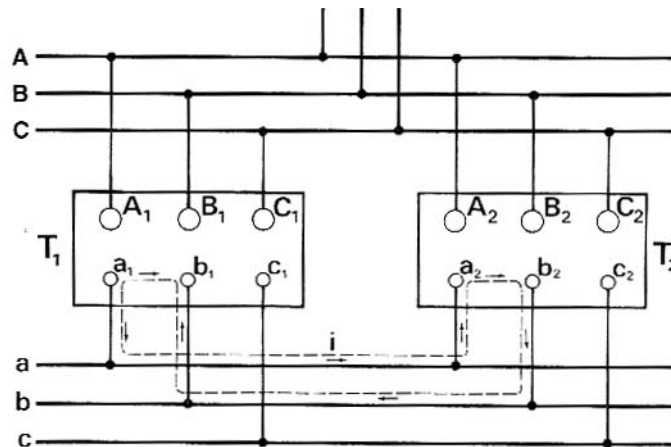
As restantes ligações ou suas variantes praticamente não são usadas.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

- GRUPOS DE LIGAÇÕES E ÍNDICE HORÁRIO.

Para ligarmos em paralelo dois transformadores trifásicos, T1 e T2, é essencial conhecer os desfasamentos entre as tensões primárias e secundárias de cada um deles. Se por exemplo as três tensões do secundário de T1 não estiverem em fase com as três tensões do secundário de T2, poderão circular, entre os transformadores, correntes muito elevadas passíveis de os danificar.

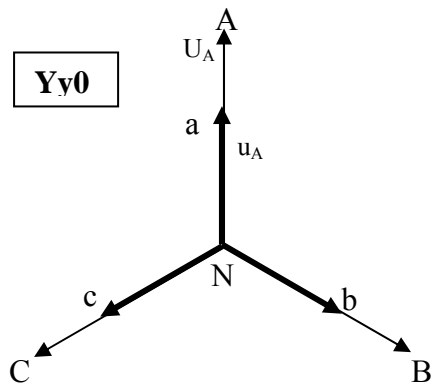
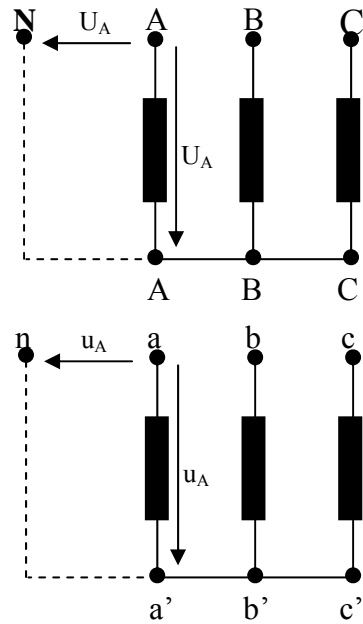
O desfasamento das tensões secundárias em relação às primárias é sempre um múltiplo de 30° . (Este desfasamento depende do sentido relativo dos enrolamentos e dos modos de ligação no primário e no secundário).



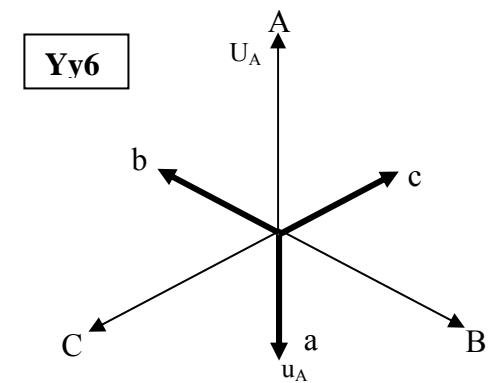
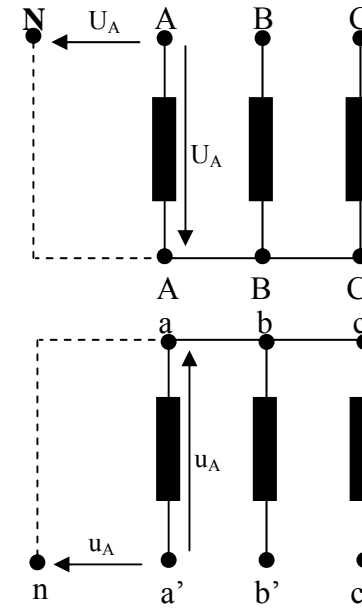
Nos acetatos a seguir encontram-se exemplificadas algumas ligações e os respectivos índices horários, bem como um resumo das várias ligações existentes e seus grupos de pertença...

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

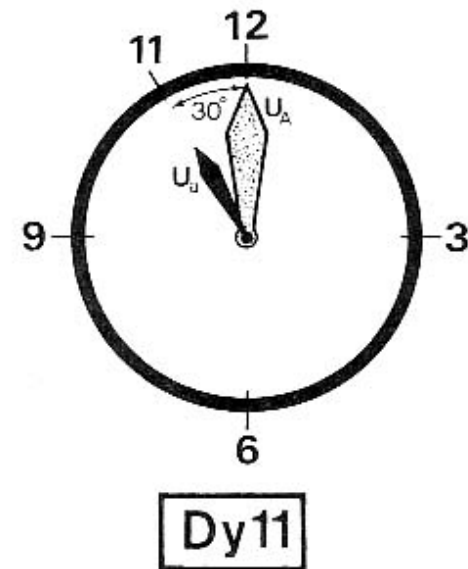
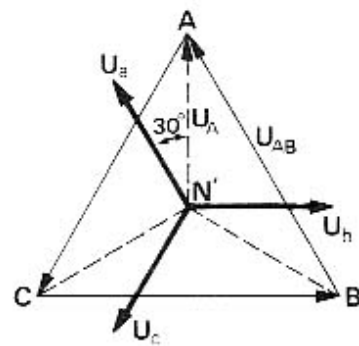
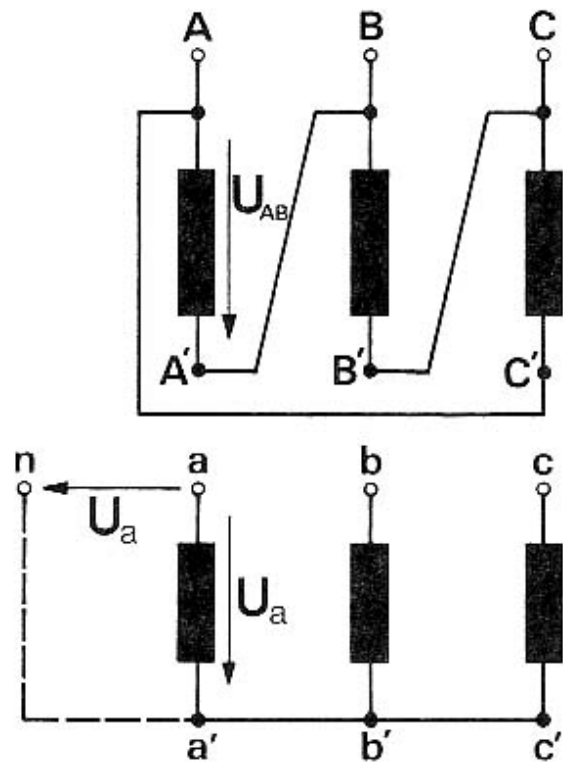
1º CASO



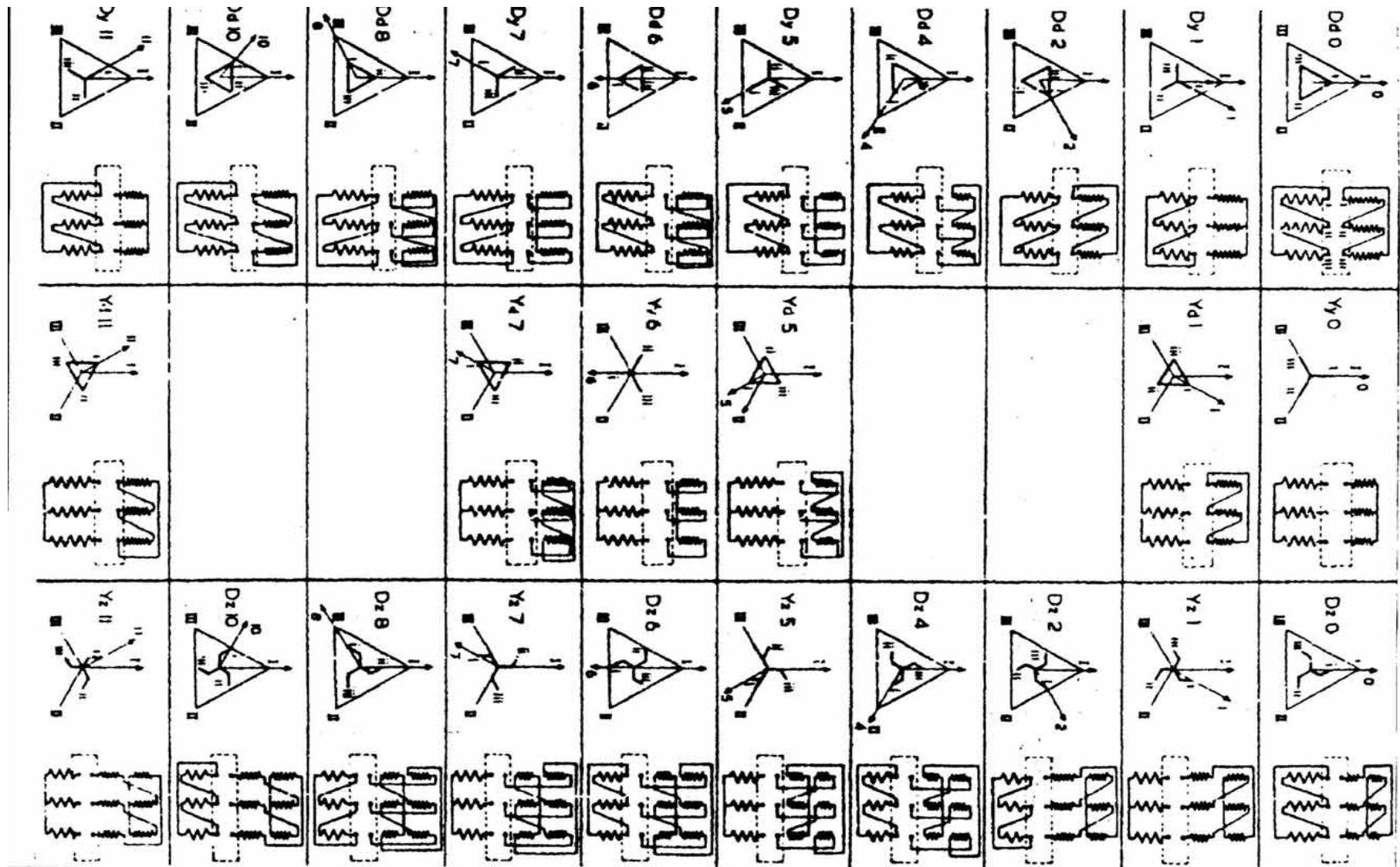
2º CASO



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

- PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Noção de paralelo de dois transformadores: os primários são alimentados pela mesma rede e os secundários fornecem energia a uma rede / elemento comum.

Para efectuar um paralelo há que respeitar as seguintes condições:

1. Os transformadores devem ter as mesmas tensões primárias e secundárias, ou seja, a mesma razão de transformação – **m**.
2. Os transformadores devem ter iguais tensões de curto-circuito.
3. Os transformadores devem pertencer ao mesmo grupo de ligação.

[NOTA: Poderemos, excepcionalmente, ter em paralelo, transformadores dos grupos III e IV a partir do momento em que se garanta a inversão da ordem de sucessão de fases de um dos transformadores face ao outro.]

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

AGRUPAMENTOS EM FUNÇÃO DOS ÍNDICES HORÁRIOS:

Grupo I : Índices horários 0, 4 e 8

Grupo II : Índices horários 6, 10 e 2

Grupo III : Índices horários 1 e 5

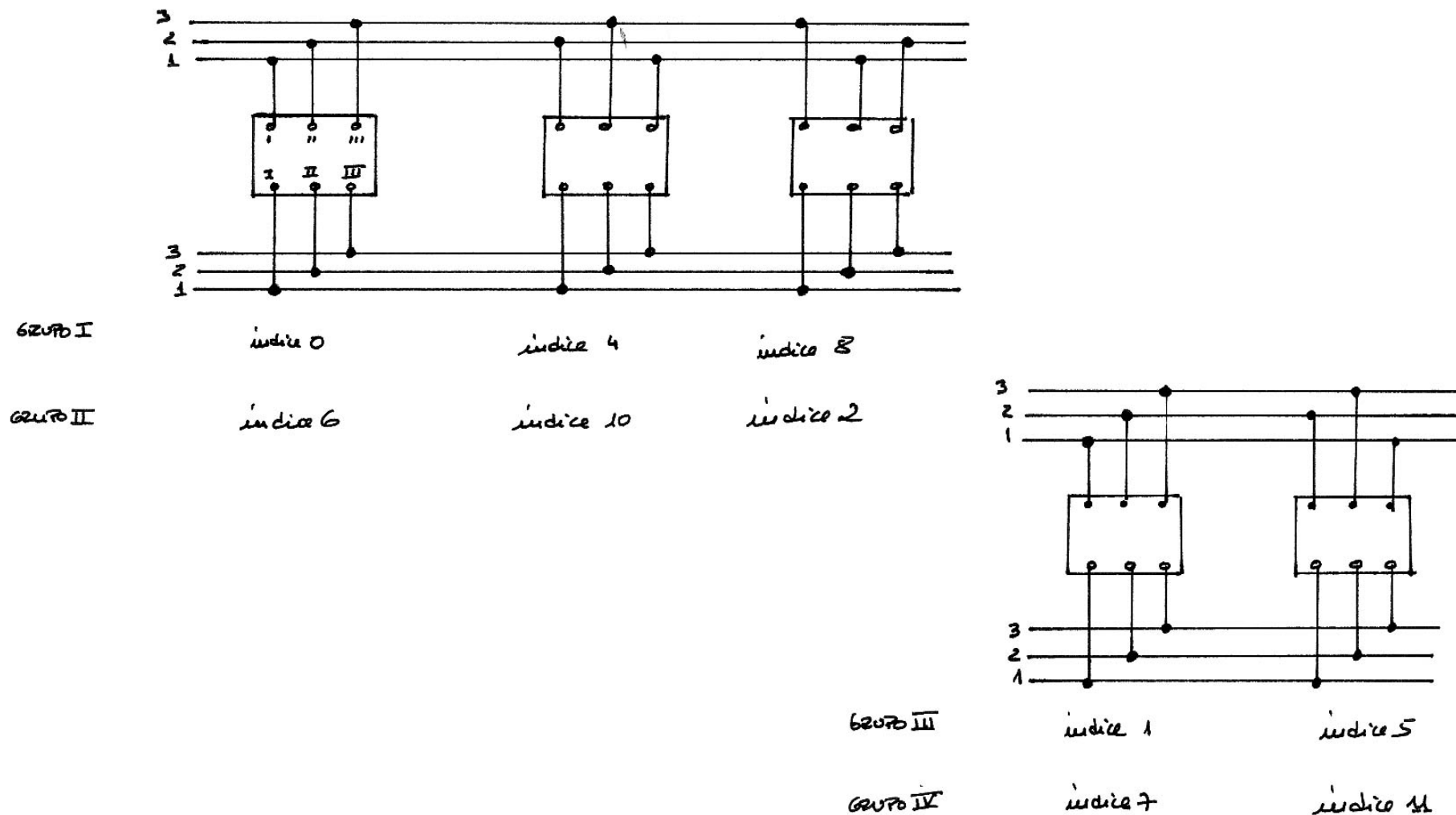
Grupo IV : Índices horários 7 e 11

REGRAS A TER EM CONTA NO PARALELO DE TRANSFORMADORES

1. Dentro de um mesmo grupo, quando os índices horários diferem faz-se, por exemplo, a ligação dos primários segundo a mesma sequência e no secundário de um dos transformadores efectua-se a ligação após permutação circular das designações. (A diferença nos índices de um mesmo grupo é sempre de 4 ou 8 o que significa esfasamentos de 120° ou 240° . Isto equivale aos esfasamentos das fases num sistema trifásico.)
2. Tal como já se referiu, um transformador do grupo III pode funcionar em paralelo com um do grupo IV se a ordem de sucessão de fases de um deles se inverter em relação ao outro. (Isto significa efectuar essa inversão no primário e no secundário de um dos transformadores)

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

A título de exemplo para o caso 1, mostra-se como deve ser feita a ligação no paralelo com índices diferentes mas dentro do mesmo grupo.



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Agora para o caso 2, com as ligações para efectuar o paralelo entre transformadores do grupo III e IV.

