

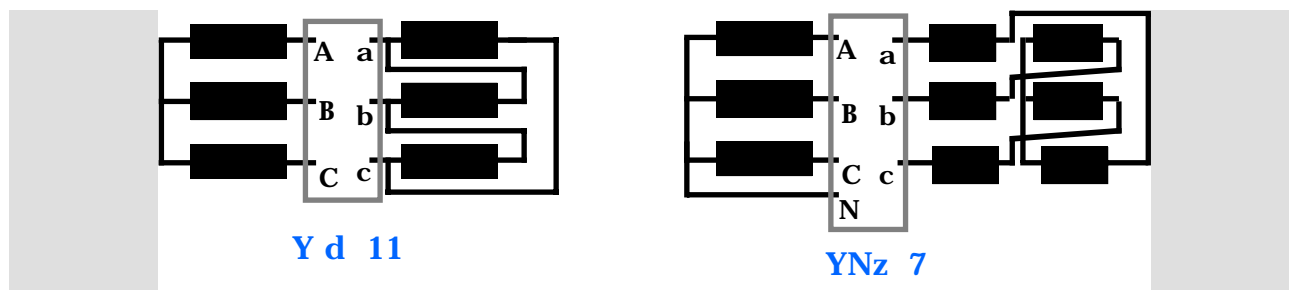
Transformadores

Ligações e Esfasamentos

Manuel Vaz Guedes

FEUP – Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto

Nos transformadores trifásicos existe uma diferença de fase entre os fasores representativos da tensão no enrolamento primário e da tensão no enrolamento secundário. Este ângulo de diferença de fase depende da ligação dos enrolamentos de cada um dos lados do transformador e da forma como é construído o enrolamento. Devido a essa diferença de fase, quando se pretende efectuar o paralelo entre dois transformadores trifásicos surge a possibilidade de, para determinadas ligações, as tensões no secundário serem iguais em módulo mas estarem esfasadas entre si, impedindo a realização do paralelo ou obrigando a uma alteração da ordem de ligação das diferentes fases do secundário de um dos transformadores.



Como o esfasamento entre a tensão no primário e a tensão no secundário de um transformador trifásico fica definido no momento da construção — quando se faz a construção das bobinas e quando se ligam os enrolamentos das fases —, cada transformador tem na chapa de característica uma informação sobre aquele ângulo de esfasamento, fornecida através de um *índice horário* (integrando o símbolo de ligação) ou de uma *representação em relógio*.

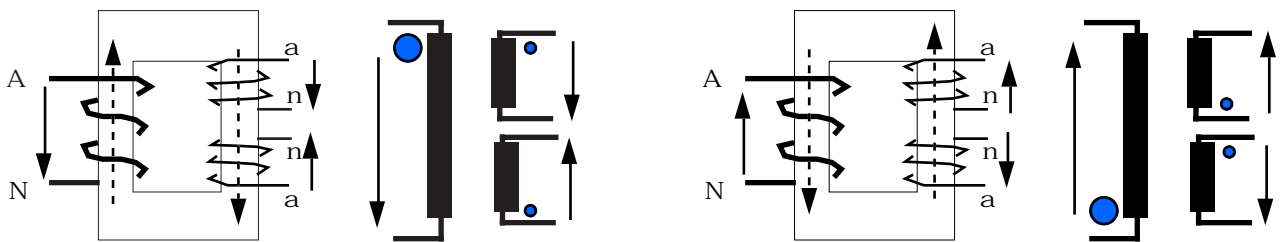
Devido à sua importância, os símbolos de esfasamento entre as tensões primárias e as tensões secundárias, assim como a sua determinação e aplicação, estão normalizados: CEI_60076-1 (1993).

Como o desrespeito pelas indicações do índice horário pode provocar a destruição dos


transformadores no momento da ligação que estabelecerá o paralelo entre eles, para uma correcta aplicação dos transformadores trifásicos torna-se necessário conhecer bem a indicação do índice horário de um transformador trifásico, a respectiva determinação, e a aplicação desse conhecimento dos índices horários na forma de estabelecer o paralelo entre os transformadores.

1. Problema do Esfasamento entre Tensões

Na fase de construção das bobinas de um transformador, o enrolamento primário pode ficar montado de forma a que a força magnetomotriz por ele criada tenha um sentido tal que o fluxo magnético na porção do núcleo envolvida pela bobina tenha um sentido do terminal N para o terminal A , ou então pode estar montado de forma a que o fluxo magnético percorre a bobina do terminal A para o terminal N . No enrolamento secundário pode ficar montado de forma a que o fluxo magnético percorre a bobina do terminal a para o terminal n , ou então pode estar montado de forma a que o fluxo magnético percorre a bobina do terminal n para o terminal a . Estas duas possibilidades diferentes de montagem traduzem-se por duas características diferentes para a tensão nos terminais da bobina: ou a tensão nos terminais do secundário está em fase com a tensão primária, ou está em oposição de fase.

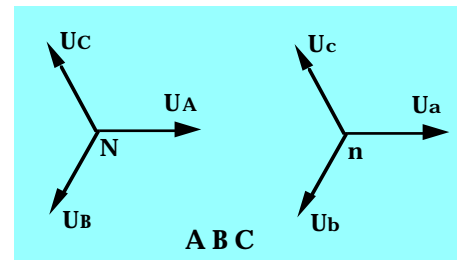
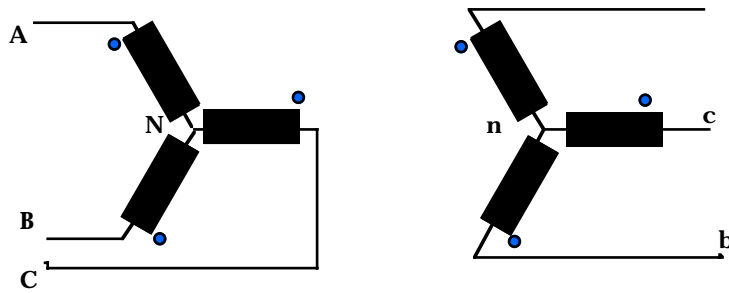


Assim tem de se atribuir um sentido ao fluxo criado pela bobina do enrolamento primário, e depois, considerando que na coluna do transformador o fluxo da indução magnética tem sempre o mesmo sentido, verifica-se que em cada bobina secundária há que associar um sentido para a força electromotriz que nela é induzida pelo fluxo magnético. Desta forma fica devidamente caracterizada a tensão que surge nos terminais da bobina secundária.

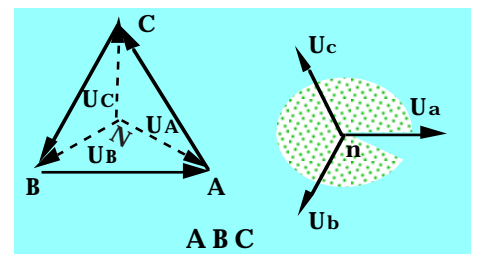
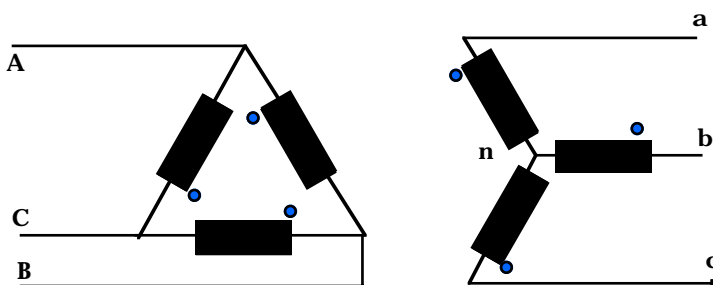
Portanto há uma necessidade de convenção da direcção da tensão nos terminais de uma bobina de um enrolamento, principalmente quando a sua representação gráfica  não fornece qualquer informação sobre o sentido de enrolamento do fio condutor.

Quando se consideram as diferentes ligações possíveis com as três bobinas de um enrolamento num transformador trifásico — estrela (\mathbf{Y}, \mathbf{y}), triângulo (\mathbf{D}, \mathbf{d}), zigue-zague (\mathbf{Z}, \mathbf{z}) —, e se considera que o enrolamento está alimentado por sistema de tensões simétrico directo (a ordem de sucessão de fases do sistema de tensões é: $\mathbf{A-B-C}$), verifica-se que pode existir, ou não, uma diferença no ângulo de fase da tensão primária e da tensão secundária — representadas pela tensão simples no respectivo enrolamento.

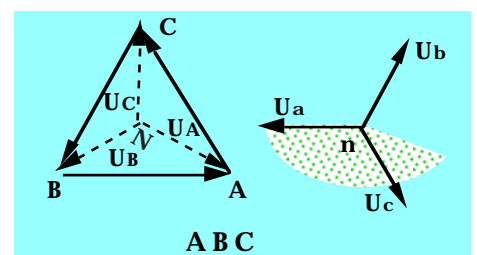
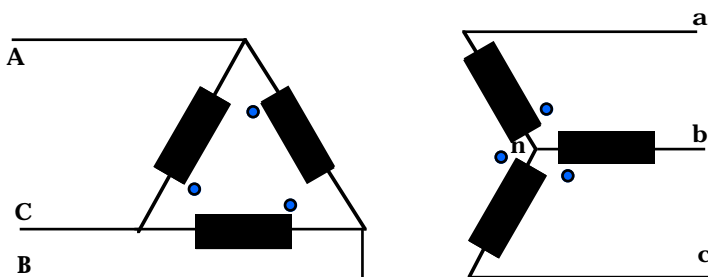
Considerando um transformador com as bobinas dos enrolamentos ligadas em estrela — \mathbf{Yy} —, verifica-se que não existe esfasamento entre as tensões simples primárias e as tensões simples secundárias, isto é: a respectiva diferença de fase é nula.



Quando se considera um transformador trifásico com as bobinas do enrolamento primário ligado em triângulo e do enrolamento secundário ligado em estrela — **Dy** —, verifica-se que existe um esfasamento de 330° ($11 \cdot \pi/6$ rad.) em atraso entre a tensão simples do enrolamento secundário e a tensão simples do enrolamento primário.



Quando se considera um transformador trifásico com as bobinas do enrolamento primário ligado em triângulo e do enrolamento secundário ligado em estrela — **Dy** — mas agora com a polaridade das bobinas do enrolamento secundário trocada, verifica-se que existe um esfasamento de 150° ($5 \cdot \pi/6$ rad.) em atraso entre a tensão simples do enrolamento secundário e a tensão simples do enrolamento primário



Pode-se ver que a diferença de fase entre as tensões simples do enrolamento primário e a tensão simples do enrolamento secundário de um transformador trifásico depende da forma como é feita a ligação das bobinas nos enrolamentos, portanto das ligações nos enrolamentos,

Mas é notório que a determinação desse ângulo depende de um conjunto de convenções — sequência de fases no sistema de tensões de alimentação; sentido das forças electromotrizes no enrolamento; as tensões a relacionar — que não devem variar com a pessoa que faz a determinação daquela diferença de fase.

Existe portanto uma necessidade de *normalizar* os conceitos empregues, e o modo de determinação do ângulo de diferença de fase.

Existe, também, a necessidade de ter conhecimento da importância da informação contida na diferença de fase entre as tensões do primário e do secundário de um transformador, no caso de se procurar estabelecer o paralelo entre dois transformadores trifásicos.



Se as tensões secundárias dos transformadores trifásicos a colocar em paralelo não estão em fase, então no momento em que se estabelece o paralelo aplica-se ao circuito secundário uma tensão — igual à diferença fasorial da tensão secundária de cada transformador — que pode ter uma amplitude suficiente para provocar a circulação de uma corrente elevada na malha formada pelos enrolamentos secundários dos dois transformadores. A passagem dessa corrente eléctrica elevada nos condutores das bobinas, para além de aquecimento, provoca o aparecimento de forças mecânicas entre as espiras da bobina. Essas forças mecânicas podem ter um valor tal que cause a deformação das espiras (normalmente circulares), ou mesmo a sua rotura — *colapso mecânico das bobinas*.

2. Definições

Perante a necessidade de normalização no estudo do problema da diferença de fase entre a tensão do secundário e a tensão do primário de um transformador trifásico, segue-se o que é recomendado na norma da Comissão Electrotécnica Internacional — CEI-60067 de 1993, na sua parte 1.

Num transformador trifásico o enrolamento que recebe energia activa de uma fonte de energia eléctrica constitui o *enrolamento primário*. O enrolamento secundário fornece energia activa a uma carga eléctrica. Como se vê, esta definição nada tem a ver com o valor da tensão, podendo o transformador ser *elevador* ou *abaixador* da tensão, conforme ao enrolamento primário é aplicada uma tensão inferior ou superior à tensão do enrolamento secundário.

Note-se que pode haver um terceiro enrolamento, com uma potência nominal normalmente inferior à do enrolamento secundário que é chamado: *enrolamento terciário*.

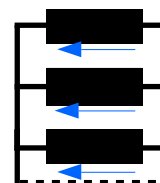
Para cada bobina de um enrolamento é possível caracterizar a dependência do sentido da força electromotriz induzida relativamente ao fluxo magnético indutor — *polaridade da bobina* — através de uma seta ou através de um ponto (maior potencial) num dos terminais da bobina.



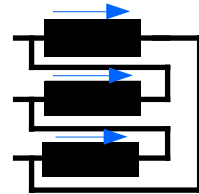
Diz-se que dois terminais, cada um da sua bobina, são *homólogos* quando tiverem a mesma polaridade (quando estiverem igualmente situados relativamente ao sentido positivo de cada enrolamento).

A ligação das três bobinas de um enrolamento pode ser feita em estrela, em triângulo e em zigue-zague. Derivada da ligação em triângulo existe uma ligação — ligação em V ou em triângulo aberto.

ligação em estrela — **Y**, **y** — ligação de um enrolamento trifásico em que cada uma das bobinas de fase tem unidos num ponto comum (o ponto neutro) os terminais homólogos, enquanto que os outros terminais estão ligados aos terminais de linha.

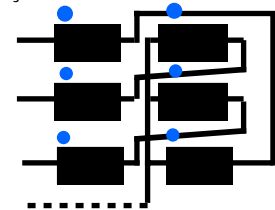


Ligação em triângulo — D , d — ligação de um enrolamento trifásico em que cada uma das bobinas de fase tem um dos seus terminais ligado ao terminal não homólogo de outra bobina (estão ligadas em série formando um circuito fechado).



Ligação em triângulo aberto ou em V — ligação de um enrolamento trifásico em que as bobinas de fase estão associadas em série sem fechar um nó do triângulo (formando um circuito aberto).

ligação em zigue-zague — Z , z — ligação de um enrolamento trifásico em que cada uma das bobinas de fase tem duas partes com forças electromotrizes esfasadas entre si (normalmente 120° ; $2\pi/3$ rad), e estão ligadas num ponto comum (neutro).



As diferentes ligações serão representadas por símbolos — **Y, D, Z** — com letras maiúsculas para o enrolamento de alta tensão, e letras minúsculas — **y, d, z** — para o enrolamento de baixa tensão. Se o ponto neutro de uma ligação em estrela ou de uma ligação em zigue-zague for acessível do exterior (através de um terminal próprio) a identificação será feita com o símbolo — **N , n** —, ficando **YN (yn)** ou **ZN (zn)**.

Os diferentes símbolos referentes à ligação de um transformador trifásico são anotados por ordem decrescente da respectiva tensão nominal (*seguido do índice horário*). — **Dyn 8**.

Para um auto-transformador a ligação do enrolamento designa-se por “auto” ou por “a” — **Yna**.

Pode-se agora definir o *desvio angular* de um enrolamento trifásico.

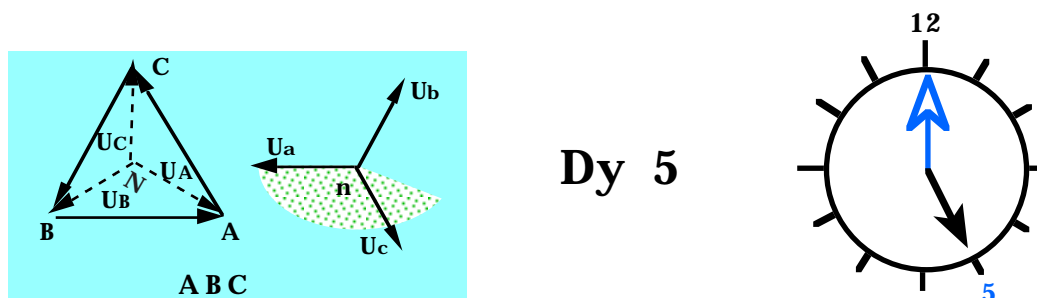
Desvio Angular de um enrolamento trifásico — é o esfasamento em atraso entre os fasores representativos das tensões simples (reais ou fictícias) do enrolamento de mais baixa tensão e do enrolamento de mais alta tensão, quando um sistema trifásico directo de tensões está aplicado ao enrolamento de mais alta tensão.

- O fasor da tensão aplicada ao enrolamento de mais alta tensão é tomado como referência. O sentido de rotação do diagrama fasorial é o directo (ou contrário ao movimento dos ponteiros do relógio) dando a sequência A – B – C.
- A as tensões simples são fictícias quando o enrolamento está ligado em triângulo (D; d), e portanto apenas se pode desenhar a estrela fictícia de tensões simples no interior da representação do triângulo real de tensões compostas;
- Note que se comparar as tensões simples na fase A (a) já pode determinar o desvio angular;
- O ângulo de esfasamento correspondente ao desvio angular é representado pelo *índice horário* — a hora indicada por um relógio de ponteiros em que há correspondência entre o ponteiro maior e a tensão simples do enrolamento de alta tensão indicando as 12 h, e entre o ponteiro menor e o fasor da tensão simples da baixa tensão no enrolamento da fase correspondente;
 - o Note que a distância angular entre dois algarismos do relógio é de 30° ($\pi/6$ rad.), e assim, por exemplo, um esfasamento angular de 150° corresponde a $150/30 = 5$ h;

- o A progressão crescente das horas indica um aumento do ângulo de esfasamento em atraso.

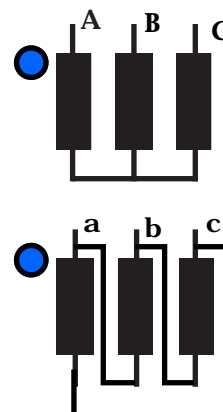
Atendendo a que a estrela de tensões simples do enrolamento de mais alta tensão constitui a origem dos esfasamentos com a tensão simples no enrolamento de mais baixa tensão, e representa o desvio angular 0 (zero), o desvio angular da tensão simples do enrolamento de baixa tensão representa o índice horário do transformador

A representação do índice horário é feita pelo algarismo representativo da hora correspondente ao desvio angular dividido por 30° , ou por uma representação esquemática do mostrador de um relógio com os ponteiros na posição dos fasores das tensões consideradas na definição de índice horário.



Perante estas definições e convenções torna-se muito importante o método de determinação do *índice horário* de um transformador trifásico.

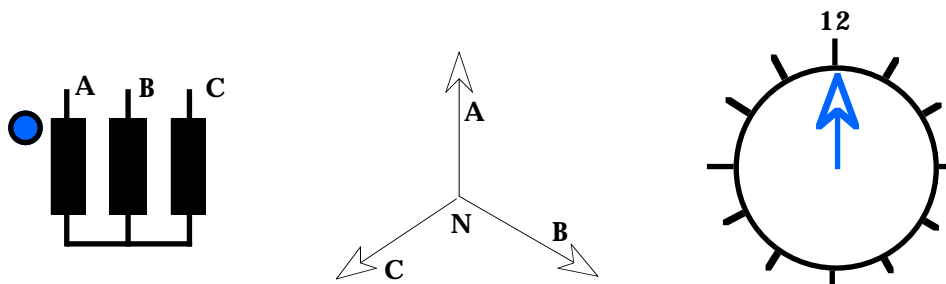
- 1º) — faz-se a representação dos transformadores segundo a forma normalizada — o desenho da ligação deve ser feito com o enrolamento de alta tensão em cima e o enrolamento de baixa tensão em baixo; indicando-se o sentido das forças electromotrizes induzidas através da convenção adoptada (bolas ou setas).



- 2º) — pode-se imediatamente escrever o símbolo de ligação dos enrolamentos:

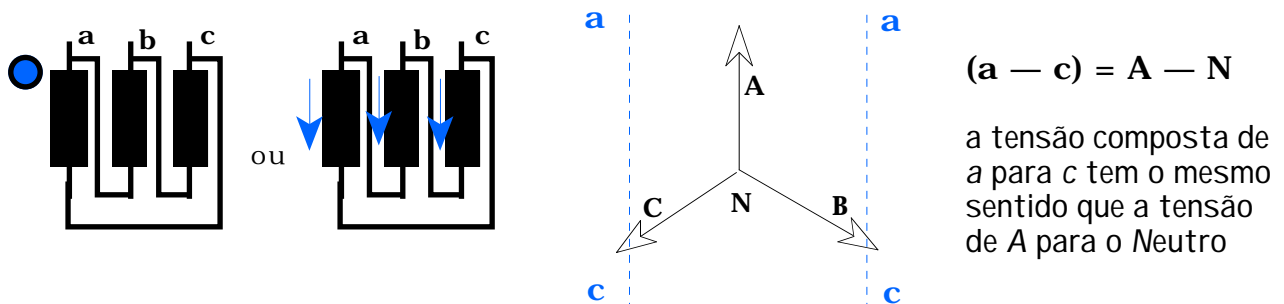
Yd ?

- 3º) — desenha-se a estrela de tensões do enrolamento de alta tensão (neste caso real):



- Fica, assim definido um sentido para os fasores representativos das forças electromotrizes do enrolamento de mais alta tensão;

- 4º) — para construir a estrela de tensões simples do enrolamento secundário atende-se ao sentido das forças electromotrizes induzidas no secundário e indicadas pela convenção adoptada (as bolas ou as setas):

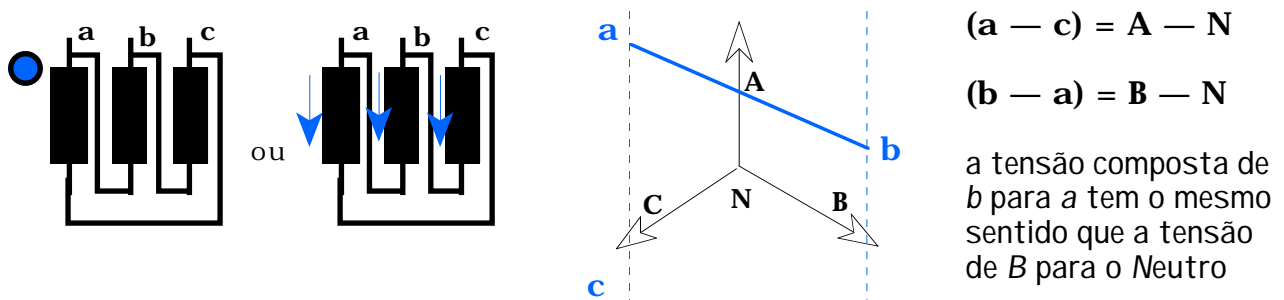


Como neste caso a ligação do enrolamento é em triângulo vai-se construir o triângulo das tensões que aparecem nos terminais (a, b, c) e, a partir dele, a estrela de tensões simples.

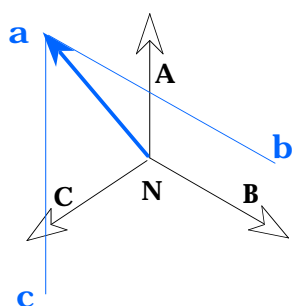
Faz-se a seguinte análise: a tensão entre os terminais a e c tem o mesmo sentido que a tensão entre o terminal A e o Neutro no enrolamento de mais alta tensão (enrolamento de referência). Pode-se acompanhar este raciocínio com a escrita da fórmula: $(a - c) = A - N$.

Mas, com esta primeira análise não fica definido se o fasor está à direita ou à esquerda do fasor \underline{NA} . Apenas fica caracterizado que o vértice a do triângulo está em cima e o vértice c está em baixo (face ao diagrama do enrolamento de referência)

Torna-se necessário continuar a análise:



Faz-se a seguinte análise: a tensão entre os terminais b e a tem o mesmo sentido que a tensão entre o terminal B e o Neutro no enrolamento de mais alta tensão (enrolamento de referência). Pode-se acompanhar este raciocínio com a escrita da fórmula: $(b - a) = B - N$.

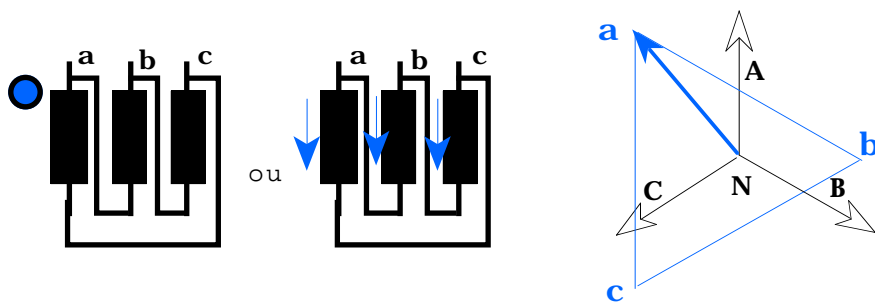


Pode-se já verificar que o fasor \underline{ac} tem afinal a posição da esquerda e formar-se-á o triângulo equilátero das tensões compostas no enrolamento de mais baixa tensão.

Já se podia concluir sobre a posição do fasor das tensão simples na fase a, que estaria numa posição fazendo um ângulo em atraso de 330° , a que corresponde o índice horário 11.

Mas pode-se completar a análise feita (que necessariamente tem de

permitir fechar regularmente o triângulo de tensões).



$$(a - c) = A - N$$

$$(b - a) = B - N$$

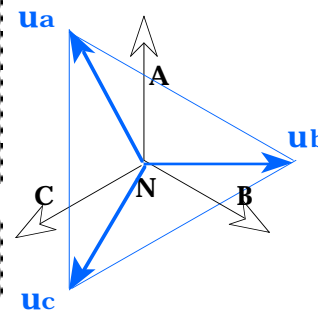
$$(c - b) = C - N$$

a tensão composta de c para b tem o mesmo sentido que a tensão de C para o Neutro

Faz-se a seguinte análise: a tensão entre os terminais c e b tem o mesmo sentido que a tensão entre o terminal C e o Neutro no enrolamento de mais alta tensão (enrolamento de referência). Pode-se acompanhar este raciocínio com a escrita da fórmula: $(c - b) = C - N$.

Note-se que o ponto neutro da estrela de tensões simples no enrolamento de baixa tensão não coincide com o ponto Neutro do enrolamento de alta. Deve-se isto a o desenho ser apenas um esboço que acompanha o raciocínio, expresso na tabela com as fórmulas, para estabelecimento da direcção e o sentido do fasor \underline{U}_a .

Uma representação mais correcta seria



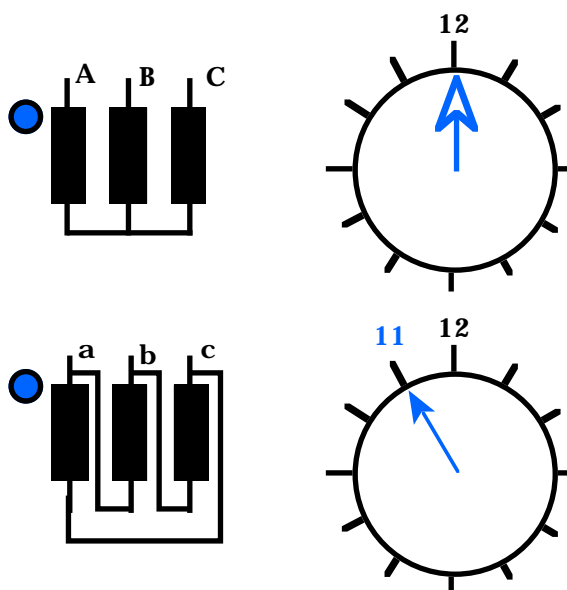
Através da figura determina-se que o ângulo entre os fasores \underline{U}_a e \underline{N}_A é de 330° em atraso.

5º) — pode-se agora apresentar o resultado final, tal como deveria figurar numa placa de características:

5.a) – símbolo de ligação

Yd 11

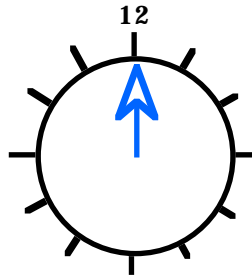
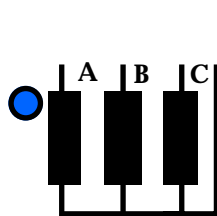
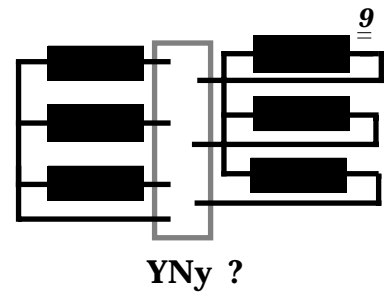
5.b) – representação dos relógios



Ligações e Esfasamentos

Poder-se-ia utilizar um outro exemplo: um transformador trifásico abaixador estrela-estrela com o neutro do enrolamento de alta tensão acessível.

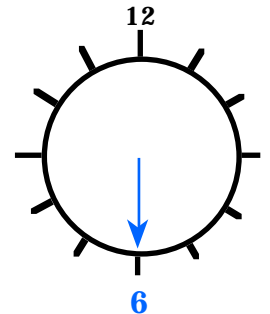
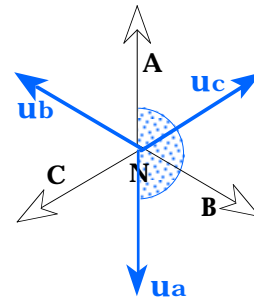
A determinação do índice horário está feita na figura seguinte.



$$(n - a) = A - N$$

$$(n - b) = B - N$$

$$(n - c) = C - N$$



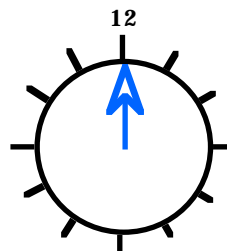
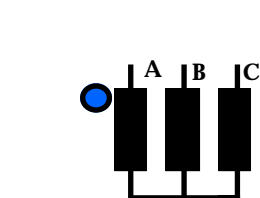
YNy 6

YNy ?

Neste caso (dos mais simples) a maior dificuldade estava em passar do diagrama das ligações do transformador horizontal para a representação vertical (imposta pela Norma).

Seguindo a direcção da tensão, e acompanhando com a escrita das fórmulas da tabela, logo na primeira análise $(n - a) = (A - N)$ se detectava que o desvio angular era de 180° . O resto da análise serve apenas para confirmar o resultado.

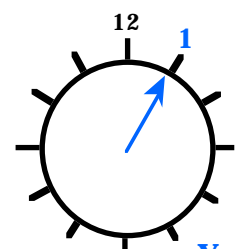
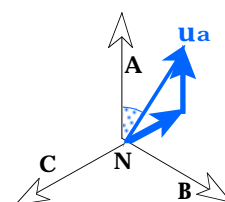
No caso de o enrolamento secundário estar ligado em zigue-zague, há que ter presente a definição de ligação em zigue-zague de um enrolamento trifásico — a tensão simples no enrolamento é a diferença da tensão nos enrolamentos parcelares que estão percorridos por fluxos magnéticos esfasados de 120° ($2\pi/3$ rad) (por isso as forças electromotrizes geradas em cada um dos enrolamentos parcelares que compõe uma ligação entre o neutro e o terminal estão esfasadas de 120°).



$$(n - a) = (C - N) + (N - A)$$

$$(n - b) = (A - N) + (N - B)$$

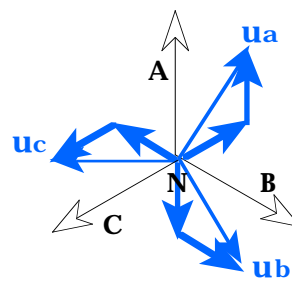
$$(n - c) = (B - N) + (N - C)$$



Yz 1

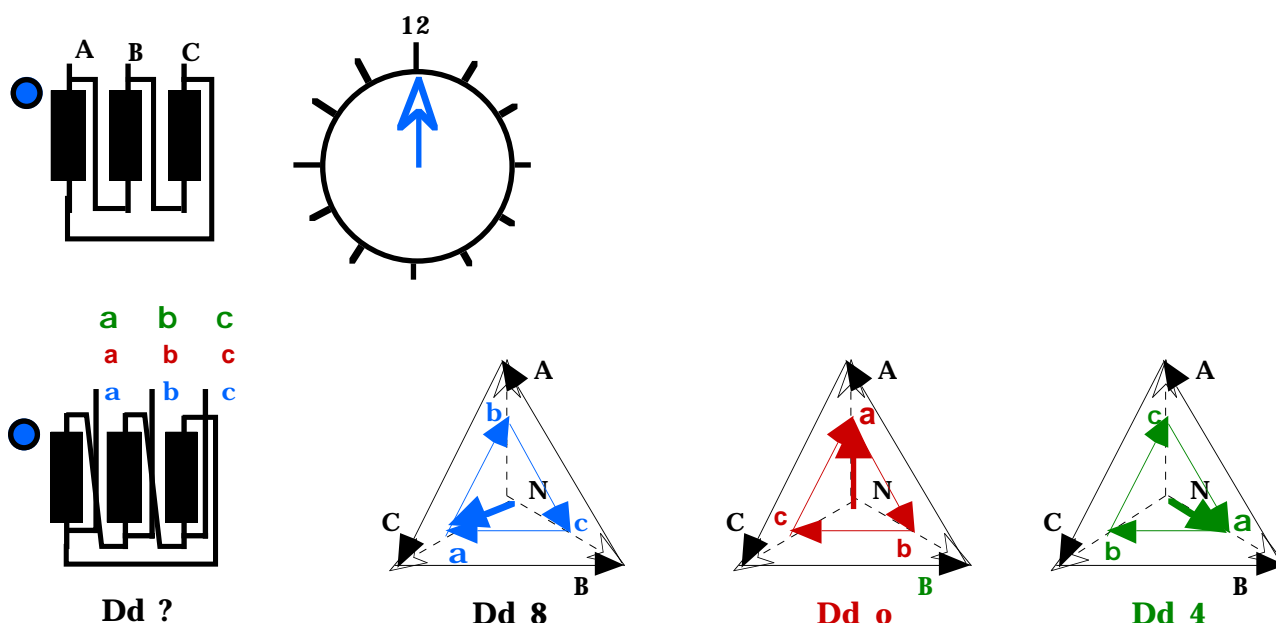
Yz ?

Também neste caso não é necessário efectuar a análise completa para determinar o valor do índice horário. No entanto, a análise completa permite verificar a correcção do raciocínio efectuado através da simetria do diagrama fasorial final.



Exercício: aconselha-se a repetir a determinação do índice horário para qualquer uma das ligações apresentadas na figura da página 123 dos apontamentos [CCC-1], atendendo à alteração das normas de representação apresentadas neste texto.

Um erro possível na determinação do desvio angular do enrolamento de baixa tensão do transformador consiste em trocar os índices indicadores das fases — enquanto o sistema de tensões trifásico é simétrico directo, o sistema de tensões secundário não coincide com essa ordem de sucessão de fases.



Mas este erro permite verificar que as ligações com índices horários que difiram de 120° ($(2\pi/3 \text{ rad})$ ou (4 h)) são redutíveis umas às outras por mera permutação circular das designações das fases. Isso leva à definição de grupo de ligações.

Grupo de ligações — conjunto de ligações dos enrolamentos de um transformador trifásico com o mesmo desvio angular ou com desvios angulares redutíveis

Grupo I — 0, 4, 8

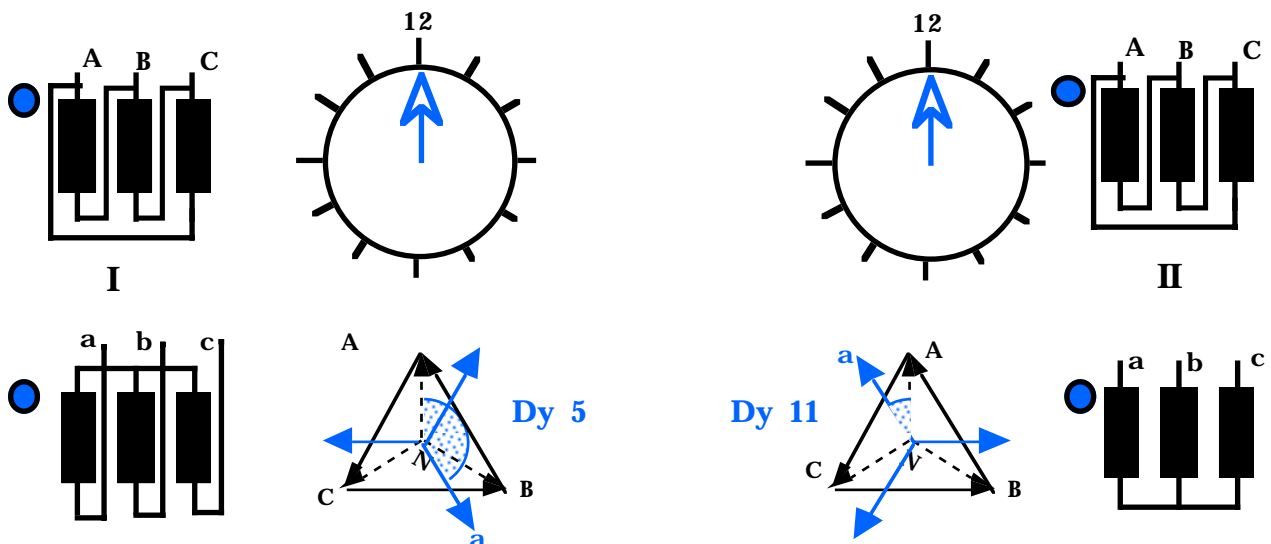
Grupo II — 6, 10, 2

Grupo III — 1, 5

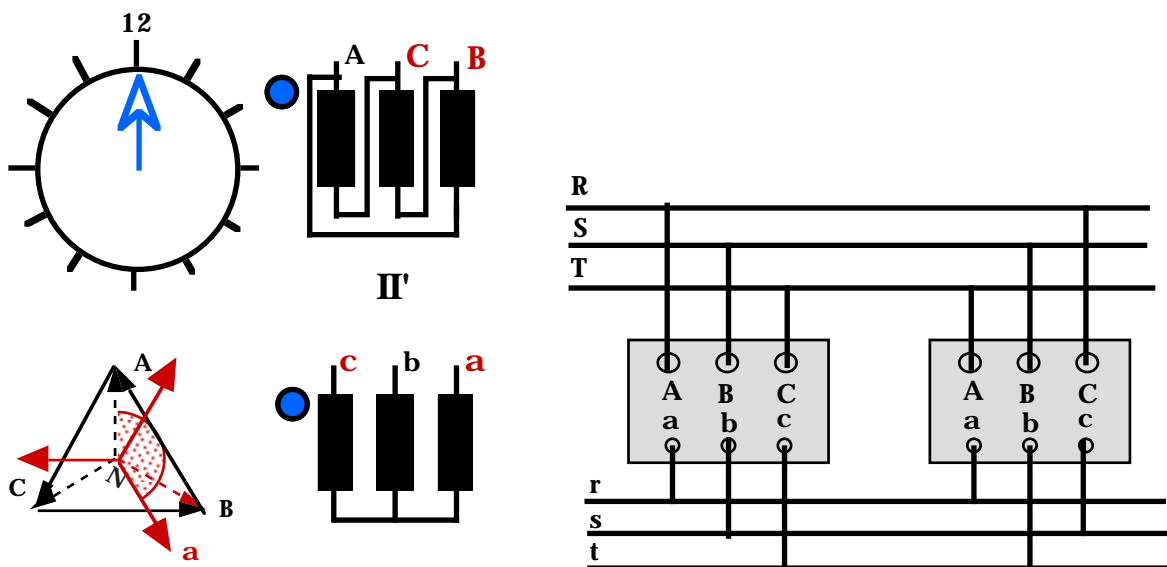
Grupo IV — 7, 11

Note que num mesmo grupo os índices horários diferem de 4 (120° ; $2\pi/3 \text{ rad}$) ou 8 (240° ; $4\pi/3 \text{ rad}$), o que corresponde aos ângulos de fase de um sistema trifásico.

No caso particular do grupo III e do grupo IV, a inversão da ordem de sucessão de fases permite passar de um grupo para outro:



Alterando a ordem de ligação de fases no transformador B (Dy 11) — no enrolamento de maior tensão B troca com C e no enrolamento de mais baixa tensão c troca com a — verifica-se que o transformador passa a ter um índice horário 5 e, portanto, as tensões nos secundários dos transformadores A e B estão em fase.



Por isso a Norma Portuguesa NP-443 aconselha a utilização de transformadores trifásicos de distribuição imersos em óleo com tensão primária igual a 30 kV com ligações de índice horário **5** ou **11** (grupos III e IV).

3. Uma Aplicação: paralelo de transformadores trifásicos

O conhecimento do índice horário tem aplicação na ligação em paralelo de transformadores trifásicos.

Para se poder efectuar o paralelo entre dois transformadores trifásicos é necessário que se verifiquem as seguintes condições:

- Iguais tensões nominais dos enrolamentos primários;
- Iguais tensões nominais nos enrolamentos secundários;

Note que esta igualdade de tensões é em módulo e em fase!

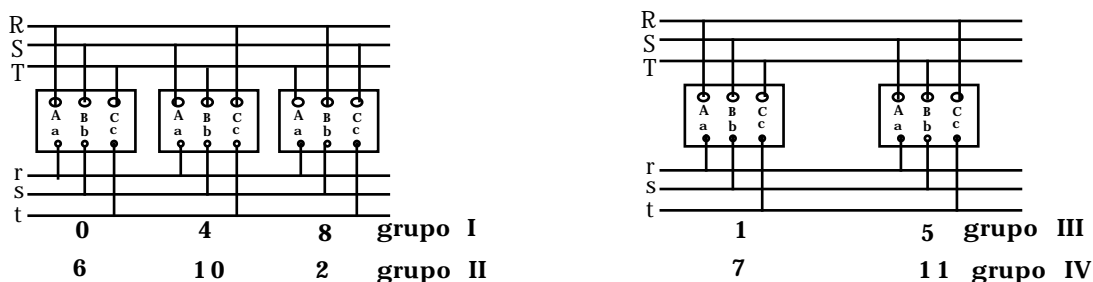
- Iguais tensões de curto-circuito.

Na situação ideal devem ser iguais as quedas óhmicas e as quedas indutivas nominais (iguais fasores das tensões de curto-circuito). Senão deve verificar-se a igualdade em módulo das tensões de curto-circuito.

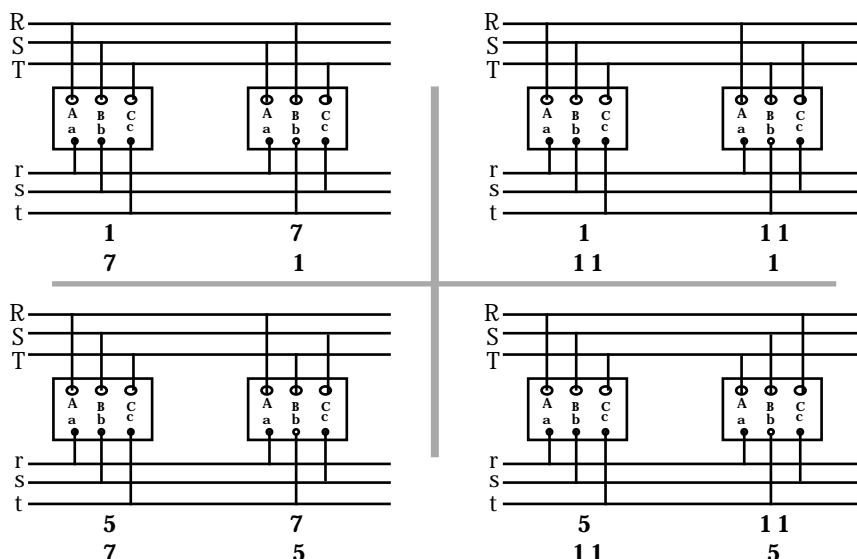
Mas, como, para a mesma ordem de sucessão de fases no enrolamento primário as tensões no enrolamento secundário têm um esfasamento relativamente à tensão do primário, que depende da ligação das bobinas desse enrolamento, torna-se necessário utilizar a informação contida no índice horário para se poder efectuar um paralelo de transformadores trifásicos com segurança.

Atendendo a que para todas as ligações possíveis foi possível verificar que há quatro grupos de ligações e que cada grupo os transformadores apresentam índices horários que são redutíveis, é possível estabelecer, e justificar, as seguintes regras para efectuar o paralelo de transformadores trifásicos.

- 1) — é possível o paralelo de dois transformadores trifásicos com o mesmo índice horário;
- 2) — se os dois transformadores trifásicos têm índices horários pertencentes ao mesmo grupo, de um dos lados ligam-se os terminais com a mesma designação, enquanto que no outro lado se faz a ligação permutando as designações dos terminais a ligar (de forma a que essa nova ligação tenha o mesmo índice horário que o outro transformador).



- 3) — pode-se efectuar o paralelo entre dois transformadores, pertencente um ao grupo III e o outro ao grupo IV, desde que se proceda a uma inversão da ordem de sucessão de fases nos dois lados de um dos transformadores de forma a que essa nova ligação tenha o mesmo índice horário que o outro transformador.



Para além dos transformadores trifásicos com índices horários dos grupos III e IV não é possível estabelecer o paralelo entre transformadores de grupos de ligação diferentes.



Bibliografia

- [CCC-1] Carlos Castro Carvalho; "Transformadores", AEFEP, 1983
- [MIT-1] MIT Electrical Engineering Staff; "Magnetic Circuits and Transformers", The MIT Press, 1943
- [CEI_60076] Comissão Electrotécnica Internacional; Transformateurs de Puissance; Power Transformers, 1993
- [NP-443] Norma Portuguesa; "Transformadores Trifásicos de Distribuição — características principais", 1970
- [JSP-1] S. A. Stigant, A. C. Franklin; "JSP —Transformer Book", Newnes-Butterworths