



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSE - 07
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDOS DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – GSE

INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS COM TRANSFORMADORES DE DIFERENTES GRUPOS DE LIGAÇÃO ANGULAR

Flavio Vicente de Miranda Schmidt

COPEL TRANSMISSÃO

RESUMO

Para minimizar interferências no sistema elétrico, todo transformador de potência tem um dos enrolamentos fechado em triângulo. Esta característica construtiva insere um deslocamento angular entre grandezas vetoriais ao passar pelo transformador.

A maioria da bibliografia disponível sobre operação de transformadores em paralelo, ou passíveis de serem paralelados, colocam como uma das condições que esses equipamentos pertençam ao mesmo grupo de ligação. O trabalho mostra que construtivamente esses equipamentos diferem muito pouco entre si e se conectados convenientemente, praticamente todos podem trabalhar em paralelo, desde que respeitadas as outras condições para estes serviços.

Não é necessário modificar internamente os transformadores.

PALAVRAS CHAVE

Transformador de potência, paralelismo tfs, operação tfs distintos, sincronismo tfs diversos, grupos de ligação contornável.

1.0 INTRODUÇÃO

Os transformadores do sistema elétrico têm os enrolamentos de fase de um dos lados ligados em triângulo internamente nos equipamentos trifásicos e externamente nos bancos monofásicos de transformadores. O outro enrolamento, ou os outros, é normalmente ligado em estrela que é uma conexão que pode usar isolamento progressivo mais econômico na composição do custo desse equipamento, além das vantagens de poder ter o neutro acessível.

O enrolamento em triângulo, em relação ao estrela, impõem um deslocamento angular em todas as grandezas vetoriais que passam pelo transformador.

Essa característica construtiva dos transformadores de potência implica em ser a definição do grupo de ligação uma das especificações necessárias na aquisição desses equipamentos para que possam trabalhar com os demais transformadores existentes no sistema.

No entanto, devidamente conhecido o comportamento de cada transformador e a possibilidade de se variar convenientemente a conexão com o sistema é possível fazer com que estes equipamentos trabalhem com outros independente de haver coincidência nesta característica. Este trabalho visa demonstrar essas possibilidades.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO

Para demonstrar essa possibilidade, usaremos esquemas de transformador trifásico de dois enrolamentos, mas as conclusões podem ser estendidas para transformadores com qualquer número de enrolamentos ou bancos monofásicos.

2.1 - CONEXÕES TÍPICAS PARA DESLOCAMENTOS ANGULARES DISTINTOS

Os esquemas abaixo mostram as quatro conexões típicas possíveis para transformadores de dois enrolamentos envolvendo conexões em triângulo-estrela ou estrela-triângulo, denominados, neste trabalho, de básicos.

Fisicamente o que difere entre uma conexão e outra ou é o fechamento da ligação em triângulo ou a posição deste em relação ao outro enrolamento, o ligado em estrela.

Nesse contexto existem basicamente quatro possibilidades, como segue :-

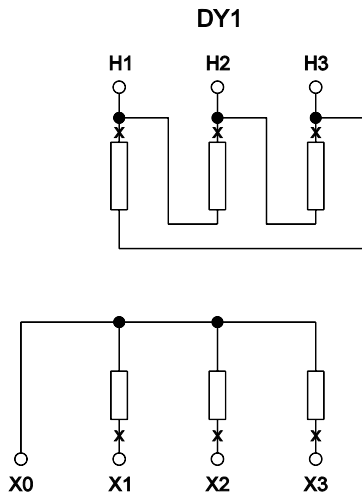


Figura 1 - Esquema de transformador do grupo Dy1

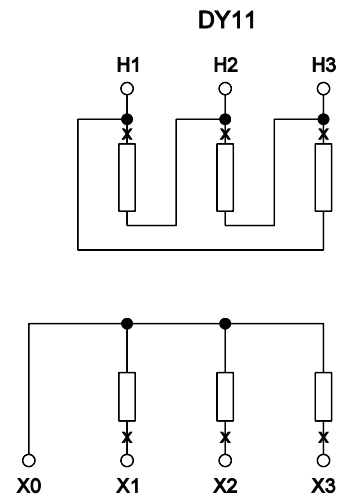


Figura 2 - Esquema de transformador do grupo Dy11

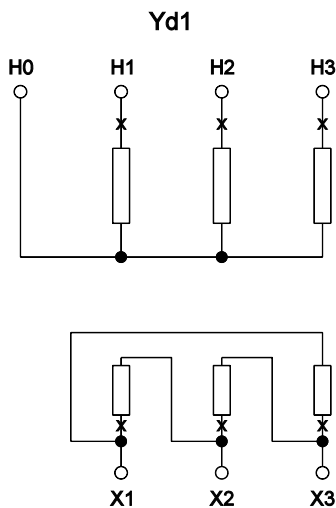


Figura 3 - Esquema de transformador do grupo Yd1

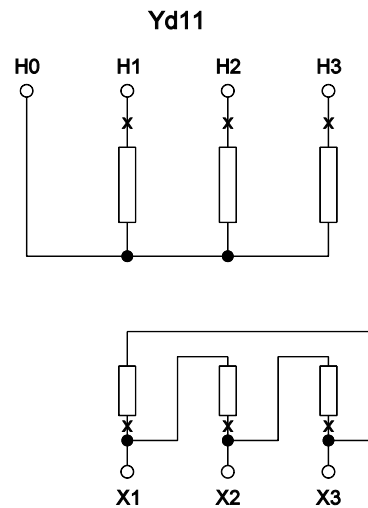


Figura 4 - Esquema de transformador do grupo Yd11

Os outros deslocamentos angulares derivados destas ligações básicas, previstos na bibliografia, serão tratados como alternativas viáveis nos próximos itens. As denominações das ligações atribuídas às conexões típicas são decorrentes da analogia angular aos ponteiros de um relógio.

2.2 - DIAGRAMAS VETORIAIS

Os transformadores esquematizados nas Figuras de 1 a 4 já estão com as polaridades dos enrolamentos parciais definidos que só dependem do sentido do enrolamento adotado na construção do bobinado. A identificação dos

terminais, normalmente exteriorizadas por buchas de passagem, se confundem com estes terminais e podem ser tratadas indistintamente por uma ou outra terminologia (terminal de enrolamento = bucha a ele conectado). A seqüência dos terminais é do menor índice para o maior. A letra "H" é reservada para indicar o terminal de tensão superior, TS., e a "X" para indicar os terminais das buchas de tensão inferior, TI.. O índice "0" é reservado para indicar o terminal neutro do enrolamento ligado em estrela.

A convenção utilizada neste trabalho é de que as tensões do sistema sejam equilibradas, deslocadas de 120° elétricos entre si, denominadas com as letras "A" "B" e "V" nesta ordem, representadas no plano por vetores cujo módulo representa o valor eficaz da tensão, que girando em torno de um ponto fixo no sentido anti-horário, reproduzem a característica alternada da tensão elétrica para um observador fixo.

Para tirar dos diagramas vetoriais o deslocamento angular, no caso entre tensões, é necessário comparar grandezas de mesma natureza, tensões entre fases ou tensões entre fase e neutro (terra).

Todos os esquemas das Figuras 1 a 4 só funcionarão como o transformador especificado se as fases na seqüência natural do sistema equilibrado, forem conectadas aos terminais do mesmo, na seqüência crescente desses terminais.

2.2.1 - Dy1

Conectando o transformador esquematizado na Figura 1 às fases A, B e V, respectivamente aos terminais H1, H2 e H3, o diagrama das tensões aplicadas e o resultante entre as buchas X1X0, X2X0 e X3X0, é o mostrado na Figura 5 à seguir. Para garantir o equilíbrio das tensões induzidas o terminal de neutro X0 deve ser aterrado.

É fácil verificar que o vetor V_{ba} entre os terminais X2 e X1 está atrasado do vetor V_{ba} entre os terminais H2 e H1, ou que o vetor V_a entre X1 e X0, está atrasado do vetor virtual V_a entre H1 e "H0", terminal também virtual do valor de 30° elétricos, lembrando do sentido anti-horário.

Tendo em conta que uma das características do sistema equilibrado é seu aspecto simétrico e cíclico, qualquer uma das seqüências abaixo pode ser usada para conectar a seqüência de tensões de fases A B V sem alterar o resultado.

Seqüências de terminais H1 H2 H3 ou H3 H1 H2 ou ainda H2 H3 H1.

Então qualquer das seqüências tabuladas a seguir aplicadas ao transformador esquematizado na Figura 1 resultará no mesmo deslocamento angular, denominado seqüência positiva de conexões.

$$\text{Dy1} \quad \begin{matrix} (*)A & B & V \\ H1 & H2 & H3 \\ X1 & X2 & X3 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} A & B & V \\ H3 & H1 & H2 \\ X3 & X1 & X2 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} A & B & V \\ H2 & H3 & H1 \\ X2 & X3 & X1 \end{matrix}$$

2.2.2 -Dy11

Da mesma forma conectando o transformador esquematizado na Figura 2 às fases A, B e V, o diagrama das tensões aplicadas e o resultante entre as buchas da TI., é o mostrado na Figura 6, onde é fácil verificar que o vetor V_{ab} entre X1X2 está adiantado do vetor V_{ab} entre H1H2, ou que o vetor V_a de X1 para X0 está adiantado do vetor virtual V_a de H1 para "H0" do valor de 30° elétricos. A tensão induzida está adiantada da aplicada de 30° é o mesmo que a aplicada está adiantada de 330°

Qualquer das combinações das seqüências a seguir resultarão no mesmo deslocamento angular.

$$\text{Dy11} \quad \begin{matrix} (*)A & B & V \\ H1 & H2 & H3 \\ X1 & X2 & X3 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} A & B & V \\ H3 & H1 & H2 \\ X3 & X1 & X2 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} A & B & V \\ H2 & H3 & H1 \\ X2 & X3 & X1 \end{matrix}$$

2.2.3 -Yd1

Nesta conexão típica conforme esquematizado na Figura 3 o diagrama das tensões aplicadas e o resultante entre as buchas X1X2, X2X3 e X3X1, é o mostrado na Figura 7, onde é fácil verificar que o vetor V_{ab} entre X1X2 está atrasado do vetor homônimo entre H1H2, ou que o vetor virtual V_a induzido X1"X0" está atrasado do vetor V_a de H1H0 do valor de 30° elétricos, no sentido anti-horário.

Todas as combinações das seqüências a seguir resultarão no mesmo deslocamento angular.

$$\text{Yd1} \quad \begin{matrix} (*)A & B & V \\ H1 & H2 & H3 \\ X1 & X2 & X3 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} A & B & V \\ H3 & H1 & H2 \\ X3 & X1 & X2 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} A & B & V \\ H2 & H3 & H1 \\ X2 & X3 & X1 \end{matrix}$$

2.2.4 -Yd11

Conectando as fases A, B e V na TS., do transformador esquematizado na Figura 4, o diagrama das tensões aplicadas e as resultantes entre as buchas da TI., é o mostrado na Figura 8, onde é fácil verificar que o vetor V_{ba} entre X2X1 está adiantado do vetor homônimo em H2H1, ou que o vetor virtual V_a de X1"X0" está adiantado do V_a H1H0 do valor de 30° elétricos, no sentido anti-horário, ou ainda, que as tensões induzidas estão atrasadas de 330° elétricos.

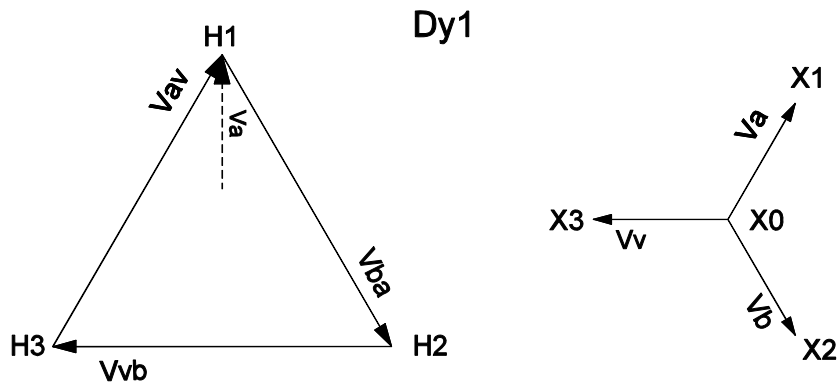


Figura 5 - Diagrama vetorial de uma ligação Triângulo-Estrela deslocada de 30° Dy1.

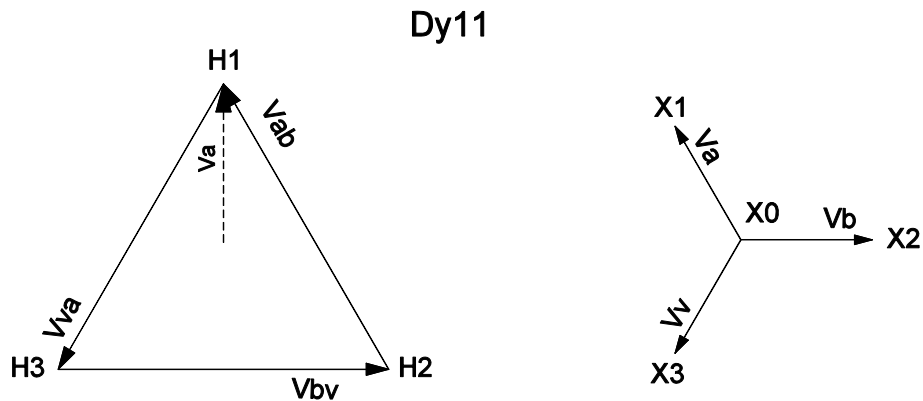


Figura 6 - Diagrama vetorial de uma ligação Triângulo-Estrela deslocada de 330° Dy11.

As seqüências a seguir levam ao mesmo resultado no deslocamento angular.

$$\begin{array}{ccc}
 Yd11 & \begin{array}{ccc} (*)A & B & V \\ H1 & H2 & H3 \\ X1 & X2 & X3 \end{array} & \Rightarrow & \begin{array}{ccc} A & B & V \\ H3 & H1 & H2 \\ X3 & X1 & X2 \end{array} & \Rightarrow & \begin{array}{ccc} A & B & V \\ H2 & H3 & H1 \\ X2 & X3 & X1 \end{array}
 \end{array}$$

3.0- POSSIBILIDADE DE TRANSFORMADORES TRABALHAREM COM DESLOCAMENTOS ANGULARES DIFERENTE DO ESPECIFICADO

Comparando as Figuras 1 e 2 que representam o esquema de transformadores construtivamente diferentes, abstenho-se da identificação dos terminais, é fácil verificar que um é o outro rebatido em torno de um eixo imaginário vertical entre eles.

Este fato permite a primeira possibilidade de usar um transformador como se fosse outro.

3.1 - TRANSFORMADOR DY1 TRABALHANDO COMO SE FOSSE DY11

Conectando propositamente aos terminais do transformador esquematizado na Figura 1 a seqüência de fases natural do sistema invertida em relação as identificações crescentes dos terminais, teremos um transformador conectado como segue, e respondendo conforme diagrama vetorial representado na Figura 9, denominada de seqüência negativa de conexões.

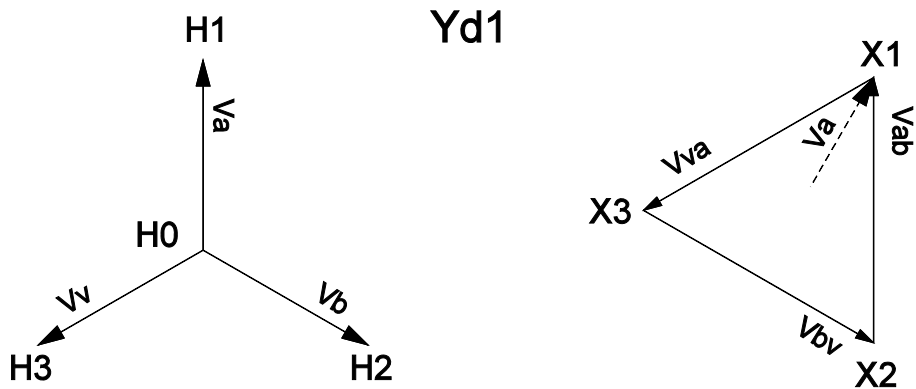


Figura 7 - Diagrama vetorial de uma ligação Estrela-Triângulo deslocada de 30° Yd1.

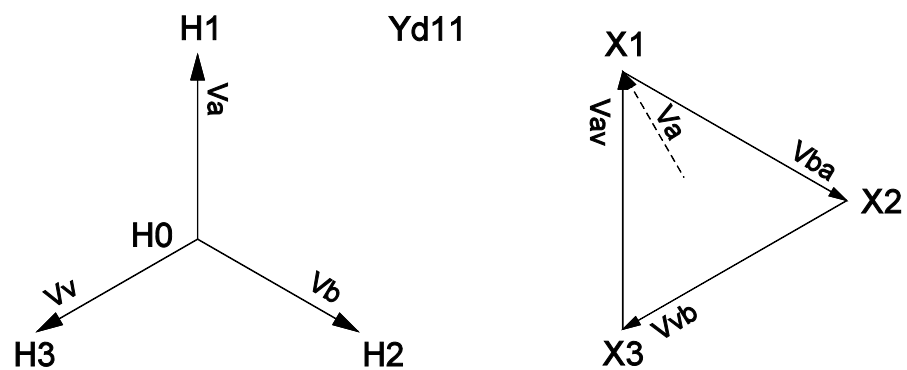


Figura 8 - Diagrama vetorial de uma ligação Estrela-Triângulo deslocada de 330° Yd11.

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Dy1 trabalhando como Dy11 | (*) | V | B | A | => | V | B | A | => | V | B | A |
| | | H1 | H2 | H3 | | H3 | H1 | H2 | | H2 | H3 | H1 |
| | | X1 | X2 | X3 | | X3 | X1 | X2 | | X2 | X3 | X1 |

Fica claro, comparando os vetoriais das Figuras 9 e 5, que além dos terminais, foram variados os vetores aplicados (terminais H) e os induzidos (terminais X) e, conseqüentemente, o ângulo entre eles.

3.2 - OUTROS TRANSFORMADORES TRABALHANDO FORA DA ESPECIFICAÇÃO

Analogamente, pode-se aplicar a seqüência natural do sistema na seqüência invertida das buchas de um transformador Dy11, Figura 2, para que ele responda como um Dy1.

Na Figura 3, originalmente para ser um Yd1, pode trabalhar como se fosse um Yd11.

Um Yd11 pode responder como se fosse um Yd1. A Tabela 1 mostra as conexões para esses casos.

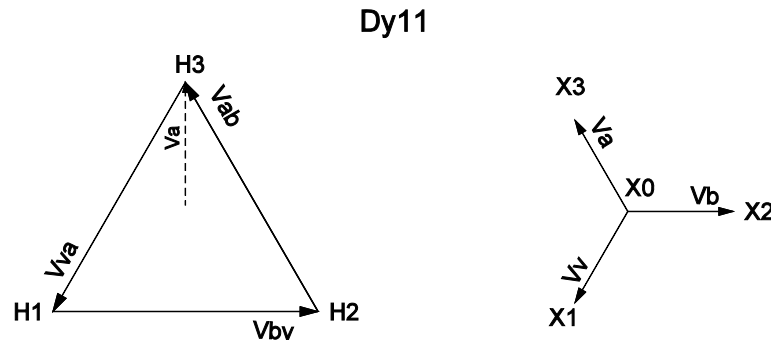


Figura 9 - Diagrama vetorial de uma ligação Triângulo estrela deslocada de 330° Dy11 obtido de um Transformador especificado para ser um Dy1.

TABELA 1 – Seqüência de combinações de terminais ligados propositadamente com a seqüência de fases natural do sistema invertida em relação aos terminais.

| | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|---------------|---------------|----|---------------|---------------|---------------|----|---------------|---------------|---------------|
| Do sub-item 2.2.2 e Fig. 2 altera-se um Dy11 trabalhando como Dy1 | (*)V H1 X1 | B H2 X2 | A H3 X3 | => | V H3 X3 | B H1 X1 | A H2 X2 | => | V H2 X2 | B H3 X3 | A H1 X1 |
| Do sub-item 2.2.3 e Fig. 3 altera-se um Yd1 trabalhando como Yd11 | (*)V H1 X1 | B H2 X2 | A H3 X3 | => | V H3 X3 | B H1 X1 | A H2 X2 | => | V H2 X2 | B H3 X3 | A H1 X1 |
| Do sub-item 2.2.4 e Fig. 4 altera-se um Yd11 trabalhando como Yd1 | (*)V H1 X1 | B H2 X2 | A H3 X3 | => | V H3 X3 | B H1 X1 | A H2 X2 | => | V H2 X2 | B H3 X3 | A H1 X1 |

4.0 – TRANSFORMADORES COM DESLOCAMENTO ANGULAR PARTICULARES

A bibliografia cita ainda transformadores com deslocamento angulares acima de 120° elétricos para o sentido normal, horário e para o anti-horário.

Construtivamente esses equipamentos seriam muito semelhantes aos esquematizados no item 1.2 Figuras de 1 à 4. Qualquer um dos transformadores esquematizados que for construído com o sentido de enrolamento invertido em relação a um dos esquematizados mudará a polaridade do enrolamento envolvido, constituído dos três enrolamentos monofásicos.

Para mostrar como seria uma ligação dessas, já que todas as outras são deduzidas seguindo o mesmo raciocínio, na Figura 10, foi escolhido um dos esquemas para demonstrar essa possibilidade.

Invertendo a polaridade do esquema original de um transformador Yd1 da Figura 3 primeiramente do enrolamento indutor H e no outro caso invertendo a polaridade do enrolamento induzido X, para representar, cada um, um transformador construtivamente distinto, resultarão os diagramas vetoriais da Figura 10.

Na prática não é possível alterar a polaridade de um transformador já construído. Entretanto, observando melhor o esquema de ligação do segundo caso da Figura 10, onde foi alterado a polaridade do enrolamento em triângulo, abstendo-se da identificação dos terminais o esquema é muito parecido com a Figura 3 tomando-se como saída das tensões induzidas os terminais não polarizados de cada enrolamento parcial na mesma perna do núcleo.

Como na ligação triângulo sempre se dispõem de um lado polarizado de um enrolamento de fase ligado eletricamente com outro enrolamento de fase não polarizado, podemos nos mesmos terminais disponíveis externamente ao transformador, combinar as fases do lado indutor, TS, com o lado induzido, TI., de formas a conseguir o mesmo resultado de um transformador onde o sentido de um dos enrolamentos é invertido em relação ao esquema básico.

| | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|--|---------------|---------------|---------------|--|---------------|---------------|---------------|
| Do esquema da Fig. 3, originalmente Yd1 trabalhando como Yd5 | A H1 X2 | B H2 X3 | V H3 X1 | | A H3 X1 | B H1 X2 | V H2 X3 | | A H2 X3 | B H3 X1 | V H1 X2 |
|--|---------------|---------------|---------------|--|---------------|---------------|---------------|--|---------------|---------------|---------------|

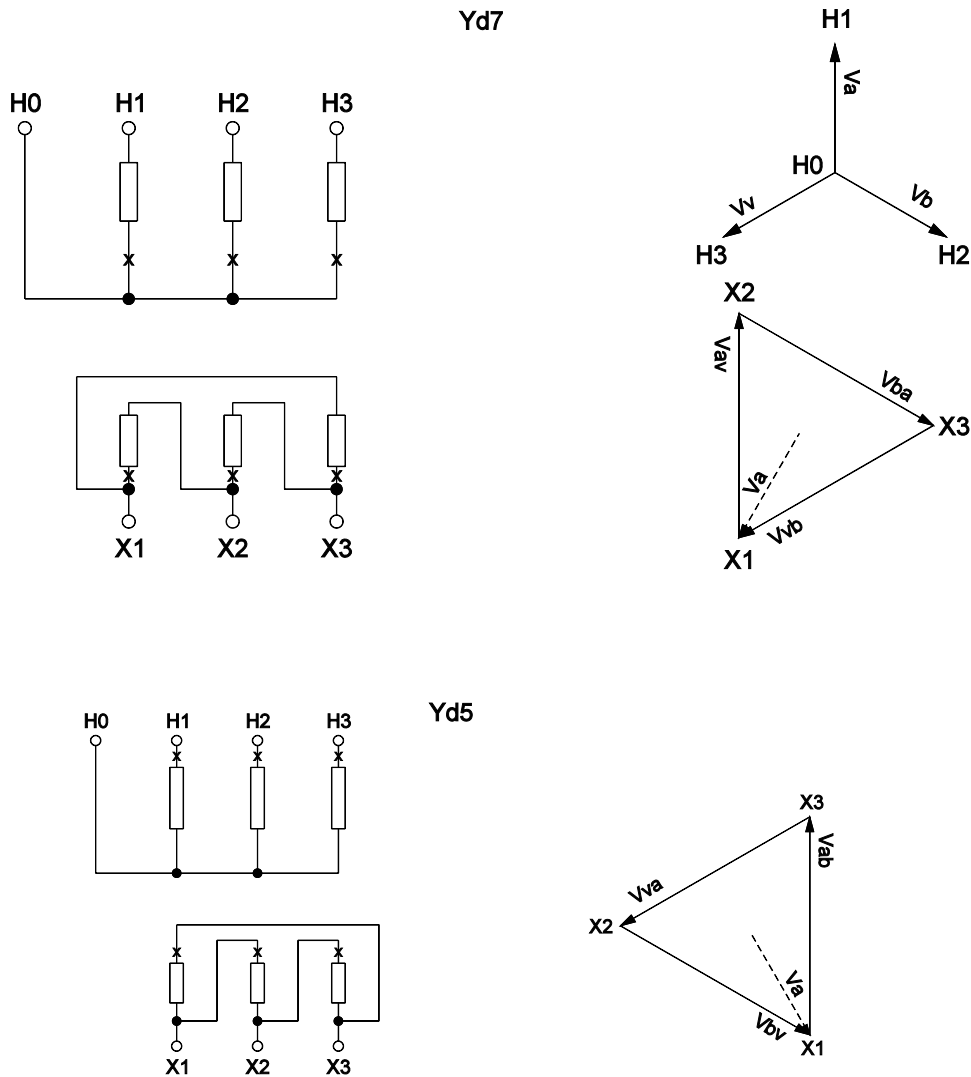


Figura 10 - No primeiro caso invertida a polaridade do enrolamento em Estrela, resulta um deslocamento de 210° ou Yd7. O segundo, invertida a polaridade do enrolamento triângulo, resultando um deslocamento angular de 150° ou Yd5.

Da mesma forma se consegue que um transformador Yd11 trabalhe como um Yd7, que um Dy1 trabalhe como Dy5 e, um Dy11 trabalhe como Dy7.

Mas como apresentado nos sub-itens 3.1 e 3.2 e Tabela 1 que os Dy1 e Yd1 podem trabalhar como Dy11 e Yd11 respectivamente, usaremos somente aqueles dois casos para conseguir todas as possibilidades derivadas da aplicação deste conceito.

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| | Do segundo caso da Tabela 1, Yd1 como Yd11 e este como Yd7 | V H1 X2 | B H2 X3 | A H3 X1 | V H3 X1 | B H1 X2 | A H2 X3 | V H2 X3 | B H3 X1 | A H1 X2 |
| Analogamente | Do item 2.2.1 originalmente Dy1 trabalhando como Dy5 | A H3 X1 | B H1 X2 | V H2 X3 | A H1 X2 | B H2 X3 | V H3 X1 | A H2 X3 | B H3 X1 | V X3 X1 X2 |
| E | Do item 3.1 Dy1 como Dy11 e este como Dy7 | V H3 X1 | B H1 X2 | A H2 X3 | V H2 X3 | B H3 X1 | A H1 X2 | V H1 H2 H3 | B H2 H3 | A H3 X1 X2 |

Fica assim demonstrado que um transformador construído originalmente para operar como Dy1 pode ser convenientemente conectado para trabalhar como qualquer um de suas variantes, qual sejam Dy11, Dy7 e Dy5.

Da mesma forma um transformador original Yd1 pode ser propositadamente conectado para operar como uma de suas variantes, Yd11, Yd7 e Yd5.

Apesar de todo o desenvolvimento deste item ter sido no sentido de comprovar que as duas conexões básicas Dy1 e Yd1 poderiam trabalhar como qualquer uma de suas variantes, a recíproca no caso é verdadeira, ou seja, qualquer uma das conexões ditas variantes ou derivadas poderão trabalhar como as outras derivadas ou até a básica correspondente.

As Tabelas a seguir, Tabela 2, mostram os transformadores classificados por seu grupo de ligação original e como devem ser conectados para poder ser sincronizados com o transformador definido pela primeira linha e uma das colunas da interseção. O fato de ter mais de uma possibilidade é pelo já visto aspecto simétrico e cíclico do sistema equilibrado.

TABELA 2 Para um transformador da primeira coluna trabalhar com qualquer um dos quatro da linha 1, deverá ser conectado conforme mostrado em uma das interseções linhas-coluna respectivas

| Dy | Dy1 | | | Dy5 | | | Dy7 | | | Dy11 | | | Yd | Yd1 | | | Yd5 | | | Yd7 | | | Yd11 | | | | | | | | | | | |
|------|------|----|----|-----|----|----|-----|----|----|------|----|----|------|-----|------|----|-----|----|----|-----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | Fase | A | B | V | A | B | V | A | B | V | A | B | | V | Fase | A | B | V | A | B | V | A | B | V | A | B | V | | | | | | | |
| Dy1 | H1 | H2 | H3 | H3 | H1 | H2 | H2 | H1 | H3 | H3 | H2 | H1 | Yd1 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | | | | | | |
| | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | | X1 | X2 | X3 | X2 | X3 | X1 | X1 | X3 | X2 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | | | | | | |
| | H3 | H1 | H2 | H2 | H3 | H1 | H3 | H2 | H1 | H1 | H3 | H2 | | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | | | | | | |
| Dy5 | X3 | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | Yd5 | X3 | X1 | X2 | X1 | X2 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 |
| | H2 | H3 | H1 | H1 | H2 | H3 | H1 | H3 | H2 | H2 | H1 | H3 | | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | H3 | | | | | | |
| | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | | X3 | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X2 | X1 | X3 | | | | | | |
| Dy7 | H2 | H3 | H1 | H1 | H2 | H3 | H3 | H2 | H1 | H1 | H3 | H2 | Yd7 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | H1 | | | |
| | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | | X3 | X1 | X2 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X2 | X3 | X1 | | | | | | |
| | H3 | H1 | H2 | H2 | H3 | H1 | H2 | H1 | H3 | H3 | H2 | H1 | | H3 | H1 | H2 | H3 | H2 | H1 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | | | | | | |
| Dy11 | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | Yd11 | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 |
| | H1 | H3 | H2 | H2 | H1 | H3 | H1 | H2 | H3 | H3 | H1 | H2 | | H1 | H3 | H2 | H1 | H3 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | | | | | | |
| | X1 | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | | X3 | X2 | X1 | X3 | X2 | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 | X1 | X3 | X1 | X2 | | | | | | |

5.0 – CONCLUSÕES

Qualquer transformador pode trabalhar em paralelo ou em condições de serem colocados em paralelo durante manobras no sistema independente de seu grupo específico de deslocamento angular, bastando que para isso pertençam a mesma classe, Dy ou Yd e observem as outras condições de paralelismo, qual sejam :-

- Mesmas tensões nominais,
- Mesma relação de transformação,
- Mesma impedância,
- Se incorporado com reguladores de tensão, mesmos degraus de tensão entre taps.

Todo o trabalho foi baseado em experiências práticas quanto ao aspecto construtivo dos transformadores.

Foi elaborado com a pretensão de contribuir, não só em aplicações práticas, mas principalmente, que sirva como ferramenta para outros estudos e pesquisas mais aprofundados .

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TRANSFORMADORES TEORIAS E ENSAIOS – José Carlos de Oliveira, - João Roberto Cogo, - José Policarpo G. de Abreu.

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS – Antônio Bossi e Ezio Sesto – Original Impianti Elettrici, -Tradução de Carlos Antônio Lauand.