

Distribuição de Energia Elétrica

Elemento *Transformer* do OpenDSS

Lucas Melo

Universidade Federal do Ceará

Setembro 2024

Objetivos

- ▶ Descrever os principais parâmetros que o OpenDSS utiliza para definir o elemento *Transformer*.
- ▶ Apresentar conceitos importantes para definição dos parâmetros de um transformador, como ensaios de transformadores em vazio e em curto-circuito.
- ▶ Mostrar diferentes configurações/conexões de transformadores, bem como a sua definição no software, com exemplos de códigos na linguagem de programação do OpenDSS.

Por quê?

- ▶ Os transformadores de potência são elementos fundamentais nos sistemas elétricos de potência.
- ▶ Eles tornam possível a geração e a transmissão de eletricidade em níveis de tensão mais econômicos e tecnicamente adequados e a utilização de energia a níveis de tensão mais adequados para cada dispositivo.
- ▶ Eles permitem interligar sistemas de diferentes tensões, garantindo uma maior flexibilidade, confiabilidade e melhor aproveitamento da potência instalada nos sistemas elétricos.

Modelagem

Transformadores modelados:

- ▶ **Transformador Monofásico**
- ▶ **Transformador Trifásico**
- ▶ **Transformador de Fase Dividida**

Ensaio de curto-circuito e em vazio são realizados nos transformadores com o propósito de se obter os valores da impedância série e admitância shunt. Esses valores serão utilizados como parâmetros no OpenDSS.

Modelagem

$$\bar{Z}_{sc} = R_{sc} + j \times X_{sc} \quad (1)$$

$$\bar{Y}_{oc} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (2)$$

Em que,

- ▶ \bar{Z}_{sc} : Impedância de Curto-Circuito
- ▶ R_{sc} : Resistência que representa as Perdas no Cobre
- ▶ X_{sc} : Reatância de Curto-Circuito
- ▶ \bar{Y}_{oc} : Admitância de Circuito-Aberto
- ▶ G_{oc} : Condutância que representa as Perdas no Ferro
- ▶ B_{oc} : Suceptância de Magnetização

Os índices "sc" e "oc" vêm do inglês, short-circuit e open-circuit, respectivamente.

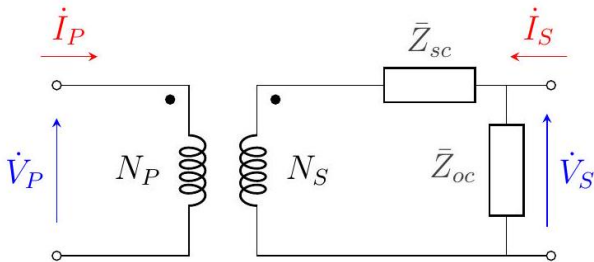
Transformador Monofásico

Na imagem do proximo slide é apresentado o modelo elétrico de um transformador monofásico, que apresenta os seguintes dados:

- ▶ Potência Aparente Nominal: $|\bar{S}_n|$
- ▶ Tensão Nominal do Primário: $|\dot{V}_{P_n}|$
- ▶ Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{S_n}|$
- ▶ Corrente Nominal do Primário: $|\dot{I}_{P_n}|$
- ▶ Corrente Nominal do Secundário: $|\dot{I}_{S_n}|$
- ▶ Relação de Transformação: $a = \frac{N_P}{N_S} = \frac{|\dot{E}_{P_n}|}{|\dot{E}_{S_n}|} \approx \frac{|\dot{V}_{P_n}|}{|\dot{V}_{S_n}|} = \frac{|\dot{I}_{S_n}|}{|\dot{I}_{P_n}|}$
- ▶ Impedância de Curto-Circuito: \bar{Z}_{sc}
- ▶ Impedância de Circuito Aberto: \bar{Z}_{oc}

Ensaio de Curto-Circuito

Por conveniência, define-se o primário do transformador como sendo o enrolamento de maior tensão e o secundário, conseqüentemente, como o de menor tensão.



O ensaio de curto-circuito é realizado para se obter a impedância de curto-circuito, \bar{Z}_{sc} , e o valor das perdas variáveis ou perdas no cobre na condição de plena carga, P_{sc} .

Ensaio de Curto-Circuito

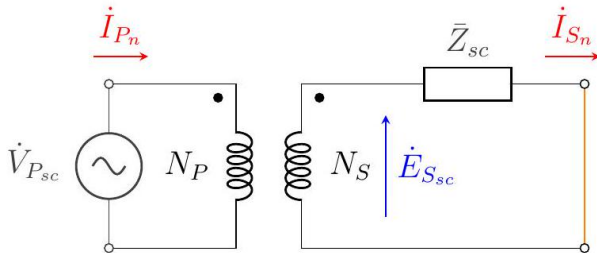
Para realizar esse ensaio, normalmente, por questões práticas e de segurança, o enrolamento de menor tensão (no nosso caso, o secundário) é colocado em curto-circuito e, em seguida, o enrolamento primário é alimentado com tensões crescentes até que a corrente medida no primário atinja seu valor, $|\dot{I}_{P_n}|$.

Esse procedimento é adotado, pois, ao curto-circuitar o enrolamento de menor tensão, evita-se medir correntes de magnitude elevada, dado que a corrente nominal no enrolamento de maior tensão de um transformador é menor que a do enrolamento de menor tensão, enquanto que a tensão medida é bem baixa, comumente menor que 10% da tensão nominal.

Ensaio de Curto-Circuito

A partir desse ensaio é possível obter as seguintes medidas elétricas:

- ▶ Corrente Nominal do Primário: $|\dot{I}_{P_n}|$
- ▶ Tensão de Curto-Circuito do Primário: $|\dot{V}_{P_{sc}}|$
- ▶ Perda no Cobre na Condição Nominal: P_{sc}



Ensaio de Curto-Circuito

A impedância de curto-circuito pode ser calculada através da Equação 3. Entretanto, não são conhecidos tanto o fasor da corrente nominal do primário quanto a tensão \dot{E}_{Sc} , que corresponde a uma grandeza elétrica imensurável, dado que ela é interna ao modelo do transformador adotado.

$$\bar{Z}_{sc} = \frac{\dot{E}_{Sc}}{\dot{I}_{S_n}} = R_{sc} + j \times X_{sc} \quad (3)$$

Ensaio de Curto-Circuito

Utilizando a relação de transformação do transformador, pode-se relacionar os módulos da tensão e da corrente do enrolamento de alta tensão com os correspondentes módulos do enrolamento de menor tensão, conforme (4) e (5).

$$\left| \dot{E}_{S_{sc}} \right| = \frac{I}{a} \times \left| \dot{V}_{P_{sc}} \right| \quad (4)$$

$$\left| \dot{I}_{S_n} \right| = a \times \left| \dot{I}_{P_n} \right| \quad (5)$$

Ensaio de Curto-Circuito

Posto isto, pode-se calcular o módulo da impedância de curto-circuito visto pelo secundário aplicando a Equação 6.

$$|\bar{Z}_{sc}| = \frac{|\dot{E}_{S_{sc}}|}{|\dot{I}_{S_n}|} = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{P_{sc}}|}{|\dot{I}_{P_n}|} \quad (6)$$

A Equação 8 apresenta como se pode calcular o ângulo da impedância de curto-circuito.

$$P_{sc} = |\dot{V}_{P_{sc}}| \times |\dot{I}_{P_n}| \times \cos \varphi_{sc} \quad (7)$$

$$\varphi_{sc} = \arccos \left(\frac{P_{sc}}{|\dot{V}_{P_{sc}}| \times |\dot{I}_{P_n}|} \right) \quad (8)$$

Ensaio de Curto-Circuito

A impedância de curto-circuito pode ser escrita como a soma de uma resistência e uma reatância de curto-circuito, conforme apresentado na Equação 9.

$$\bar{Z}_{sc} = R_{sc} + j \times X_{sc} \quad (9)$$

$$R_{sc} = \text{Re} (\bar{Z}_{sc}) = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{P_{sc}}|}{|\dot{I}_{P_n}|} \times \cos \varphi_{sc} \quad (10)$$

$$X_{sc} = \text{Im} (\bar{Z}_{sc}) = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{P_{sc}}|}{|\dot{I}_{P_n}|} \times \sin \varphi_{sc} \quad (11)$$

Ensaio de Curto-Circuito

Pode-se escrever essa impedância em pu , conforme (12).

$$\bar{z}_{sc} = \frac{\bar{Z}_{sc}}{Z_{Base\ 2}} = r_{sc} + j \times x_{sc} \quad (12)$$

Em que:

$$Z_{Base2} = \frac{|V_{S_n}|}{|I_{S_n}|} = \frac{|\dot{V}_{S_n}|^2}{|\bar{S}_n|} = \frac{|S_n|}{|I_{S_n}|^2} \quad (13)$$

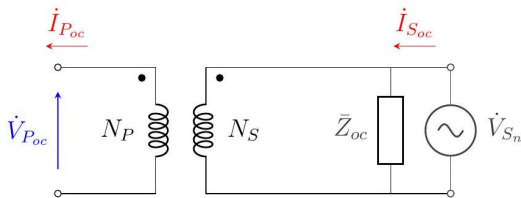
Por fim, P_{sc} , em pu , pode ser relacionada com R_{sc} , também em pu , conforme Equação 14.

$$p_{sc} = \frac{P_{sc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{R_{sc} \times |\dot{I}_{S_n}|^2}{|\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{R_{sc} \times |\dot{I}_{S_n}|^2}{Z_{Base\ 2} \times |\dot{I}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{R_{sc}}{Z_{Base2}} = r_{sc} \quad (14)$$

Ensaio a Vazio

Através do ensaio à vazio é possível calcular a impedância de circuito-aberto, \bar{Z}_{oc} , e medir diretamente o valor das perdas constantes ou perdas no ferro, P_{oc} .

Para realizar esse ensaio, normalmente, por questões práticas e de segurança, o enrolamento de maior tensão do transformador é deixado em vazio e, em seguida, o enrolamento de menor tensão é alimentado com tensão nominal, $|\dot{V}_{S_n}|$, conforme apresentado na imagem.



Ensaio em Vazio

Esse procedimento é adotado, pois ao deixar o enrolamento de maior tensão em vazio evita-se medir tensões de magnitude elevada ao mesmo tempo em que a magnitude da corrente em vazio medida no enrolamento de maior tensão é desprezível.

A partir desse ensaio é possível obter as seguintes medidas elétricas:

- ▶ Corrente em Vazio no Secundário: $|\dot{I}_{S_{oc}}|$
- ▶ Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{S_n}|$
- ▶ Perdas no Ferro: P_{oc}

Ensaio em Vazio

O primário do transformador está em vazio e, portanto, a sua corrente, $\dot{I}_{P_{oc}}$, é nula.

Dessa forma, pode-se calcular a admitância \bar{Y}_{oc} e o seu módulo conforme as equações (15) e (16), respectivamente.

$$\bar{Y}_{oc} = \frac{1}{\bar{Z}_{oc}} = \frac{\dot{I}_{S_{oc}}}{\dot{V}_{S_n}} = G_{oc} + j \cdot B_{oc} \quad (15)$$

$$|\bar{Y}_{oc}| = \frac{|\dot{I}_{S_{oc}}|}{|\dot{V}_{S_n}|} \quad (16)$$

Ensaio em Vazio

A Equação 18 apresenta como é possível calcular o ângulo da impedância \bar{Z}_{oc} .

$$P_{oc} = |\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_{oc}}| \times \cos \varphi_{oc} \quad (17)$$

$$\varphi_{oc} = \arccos \left(\frac{P_{oc}}{|\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_{oc}}|} \right) \quad (18)$$

Ensaio em Vazio

A admitância \bar{Y}_{oc} pode ser escrita como a soma de uma condutância e uma susceptância de magnetização, conforme apresentado na Equação 19.

$$\bar{Y}_{oc} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (19)$$

$$G_{oc} = \text{Re} (\bar{Y}_{oc}) = \frac{|\dot{I}_{Soc}|}{|\dot{V}_{Sn}|} \times \cos \varphi_{oc} \quad (20)$$

$$B_{oc} = \text{Im} (\bar{Y}_{oc}) = -\frac{|\dot{I}_{Soc}|}{|\dot{V}_{Sn}|} \times \sin \varphi_{oc} \quad (21)$$

Ensaio em Vazio

Note que B_{oc} possui um valor negativo, pois essa susceptância tem caráter indutivo. A admitância \bar{Y}_{oc} pode ser escrita em pu, conforme (22).

$$\bar{y}_{oc} = \bar{Y}_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} + j \times b_{oc} \quad (22)$$

A perda no ferro P_{oc} pode ser relacionada com G_{oc} conforme a Equação 23.

$$p_{oc} = \frac{P_{oc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{G_{oc} \times |\dot{V}_{S_n}|^2}{|\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{G_{oc} \times |\dot{V}_{S_n}|^2}{|\dot{V}_{S_n}| \times \frac{|\dot{V}_{S_n}|}{Z_{Base2}}} = G_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} \quad (23)$$

Ensaio em Vazio

A corrente em vazio no secundário $\dot{I}_{S_{oc}}$ pode ser dividida em duas partes, conforme apresentado em (24), em pu: $i_{S_{real}}$, que passa pela condutância, e $i_{S_{mag}}$, que passa pela susceptância, chamada de corrente de magnetização.

$$\dot{i}_{S_{oc}} = \dot{i}_{S_{real}} + \dot{i}_{S_{mag}} \quad (24)$$

Por fim, o módulo da corrente de magnetização no secundário, $i_{S_{mag}}$, pode ser relacionada com o módulo da susceptância de magnetização, b_{oc} , conforme a Equação 46.

$$\left| \dot{i}_{S_{mag}} \right| = \frac{\left| \dot{I}_{S_{mag}} \right|}{\left| \dot{I}_{S_n} \right|} = \frac{|B_{oc}| \times \left| \dot{V}_{S_n} \right|}{\left| \dot{V}_{S_n} \right| \times \frac{1}{Z_{Base\ 2}}} = |B_{oc}| \times Z_{Base\ 2} = |b_{oc}| \quad (25)$$

Transformador Trifásico

Com a finalidade de também encontrar as impedâncias de curto-circuito e de circuito-aberto para transformadores trifásicos, o método também é aplicado à esses transformadores de forma similar. As impedâncias são calculadas independentemente do seu tipo de ligação.

Um transformado trifásico, em geral, apresenta os seguintes dados elétricos:

- ▶ Potência Aparente Trifásica Nominal: $|\bar{S}_n|$
- ▶ Tensão de Linha Nominal do Primário: $|\dot{V}_{P_n}|$
- ▶ Tensão de Linha Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{S_n}|$
- ▶ Corrente de Linha Nominal do Primário: $|\dot{I}_{P_n}|$

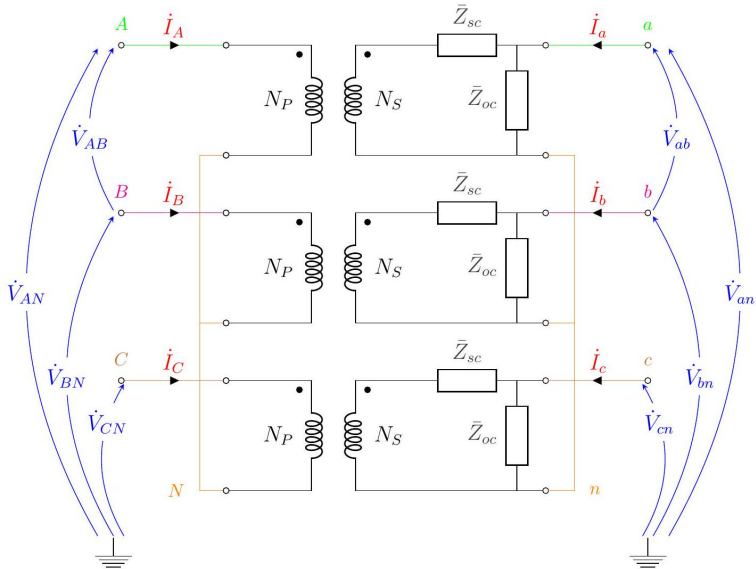
Transformador Trifásico

- ▶ Corrente de Linha Nominal do Secundário: $|\dot{I}_{S_n}|$
- ▶ Relação de Transformação: $a = \frac{N_P}{N_S} \approx \frac{|\dot{V}_{P_n}|}{|\dot{S}_{S_n}|} = \frac{|\dot{I}_{S_n}|}{|\dot{I}_{P_n}|}$
- ▶ Impedância de Curto-Circuito de cada Enrolamento: \bar{Z}_{sc}
- ▶ Impedância de Circuito-Aberto de cada Enrolamento: \bar{Z}_{oc}
- ▶ Perdas Trifásicas no Cobre na Condição de Plena Carga: P_{sc}
- ▶ Perdas Trifásicas no Ferro: P_{oc}

O modelo elétrico para um transformador trifásico utiliza três modelos de transformadores monofásicos conectados de acordo com a ligação desejada.

Por exemplo, o próximo slide apresenta o modelo elétrico de um transformador trifásico conectado em estrela-estrela isoladas.

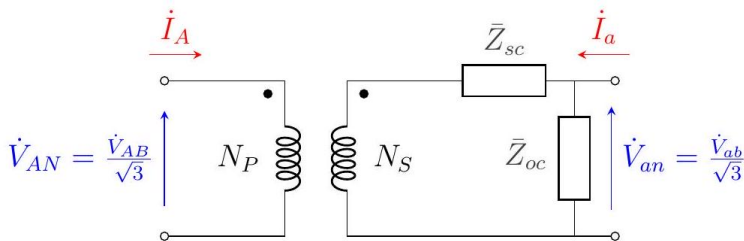
Transformador Trifásico



Transformador Trifásico

Um Transformador trifásico é, em geral, um elemento equilibrado, pois as suas impedâncias de curto-circuito são idênticas para as três fases, assim como as impedâncias de circuito-aberto.

Posto isto, pode-se extrair, de qualquer transformador trifásico, independentemente de sua ligação, um modelo monofásico equivalente derivado de um trifásico representado em estrela, conforme a imagem.

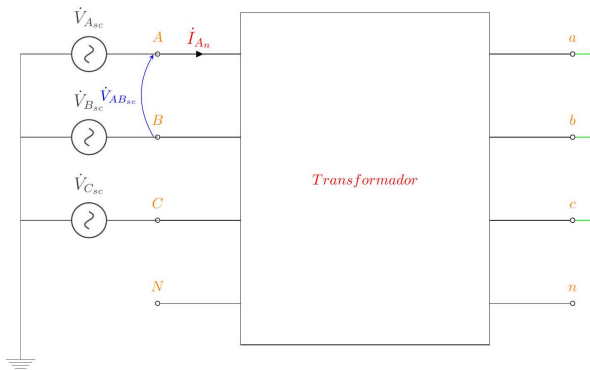


Ensaio de Curto-Circuito

O monofásico equivalente é o modelo matemático que é utilizado para se obter as impedâncias de curto-circuito e de circuito-aberto através das medidas obtidas nos ensaios de curto-circuito e em vazio.

A montagem apresentada no próximo slide é utilizada no ensaio de curto-circuito em um transformador trifásico qualquer.

Ensaio de Curto-Circuito



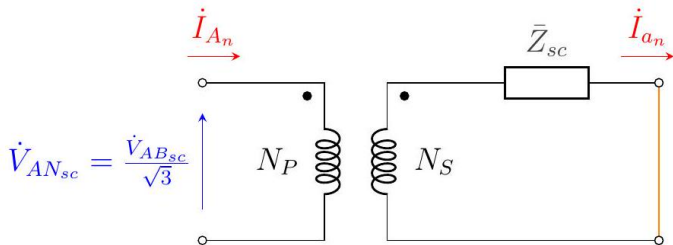
O transformador em si é representado como uma caixa preta, pois a montagem independe da conexão do transformador. Como pode-se notar, o secundário está em curto-circuito e o primário é alimentado por um sistema trifásico de tensão simétrico que produz correntes de linha nominais.

Ensaio de Curto-Circuito

A partir desse ensaio, é possível obter as seguintes medidas elétricas:

- ▶ Corrente de Linha Nominal do Primário: $|\dot{I}_{A_n}|$
- ▶ Tensão de Linha de Curto-Circuito do Primário: $|\dot{V}_{AB_{sc}}|$
- ▶ Perda Trifásica no Cobre na Condição de Plena Carga: P_{sc}

O modelo utilizado para calcular a impedância de curto-circuito é apresentado nesse circuito.



Ensaio de Curto-Circuito

Semelhante ao apresentado no ensaio a vazio monofásico, pode-se escrever o módulo da impedância de curtocircuito visto pelo secundário em (26).

$$|\bar{Z}_{sc}| = \frac{I}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{ABsc}|}{\sqrt{3} \times |\dot{I}_{A_n}|} \quad (26)$$

$$|\bar{Z}_{sc}| = \frac{I}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{ABsc}|}{\sqrt{3} \times |\dot{I}_{A_n}|}$$

Ensaio de Curto-Circuito

O ângulo da impedância de curto-circuito pode ser calculada conforme a Equação 28.

$$P_{sc} = \sqrt{3} \times |\dot{V}_{AB_{sc}}| \times |\dot{I}_{A_n}| \times \cos \varphi_{sc} \quad (27)$$

$$\varphi_{sc} = \arccos \left(\frac{P_{sc}}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{AB_{sc}}| \times |\dot{I}_{A_n}|} \right) \quad (28)$$

Ensaio de Curto-Circuito

Logo, a resistência e a reatância de curto-circuito são apresentadas em (30) e (31).

$$\bar{Z}_{sc} = R_{sc} + j \times X_{sc} \quad (29)$$

$$R_{sc} = \text{Re} (\bar{Z}_{sc}) = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{AB_{sc}}|}{\sqrt{3} \times |\dot{I}_{A_n}|} \times \cos \varphi_{sc} \quad (30)$$

$$X_{sc} = \text{Im} (\bar{Z}_{sc}) = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{AB_{sc}}|}{\sqrt{3} \times |\dot{I}_{A_n}|} \times \sin \varphi_{sc} \quad (31)$$

Ensaio de Curto-Circuito

A impedância de curto-circuito pode escrita em pu, conforme a Equação 32.

$$\bar{z}_{sc} = \frac{\bar{Z}_{sc}}{Z_{Base2}} = r_{sc} + j \times x_{sc} \quad (32)$$

Em que,

$$Z_{Base2} = \frac{|V_{S_n}|}{|I_{S_n}|} = \frac{|\dot{V}_{S_n}|^2}{|\bar{S}_n|} = \frac{|S_n|}{|I_{S_n}|^2} \quad (33)$$

Ensaio de Curto-Circuito

Por fim, P_{sc} pode ser relacionada com R_{sc} , conforme Equação 34 .

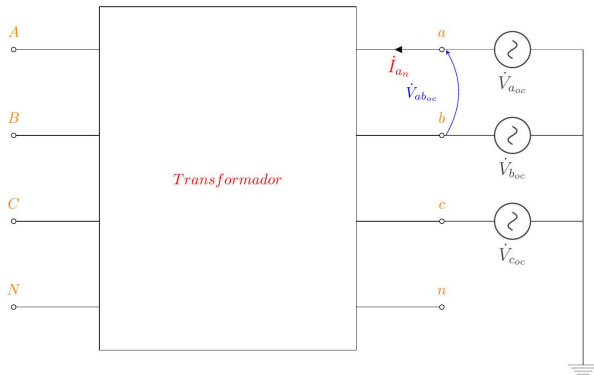
$$p_{sc} = \frac{P_{sc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{3 \times R_{sc} \times |\dot{I}_{a_n}|^2}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{3 \times R_{sc} \times |\dot{I}_{a_n}|^2}{3 \times Z_{\text{Base } 2} \times |\dot{I}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = r_{sc} \quad (34)$$

Lembrando que,

$$|\dot{I}_{S_n}| = |\dot{I}_{a_n}| \quad (35)$$

Ensaio em Vazio

A abaixo apresenta a conexão que deve ser feita para se realizar o ensaio em vazio em um transformador trifásico. O secundário é alimentado por um sistema trifásico de tensão simétrico com valores nominais e, o primário, é deixado em vazio.

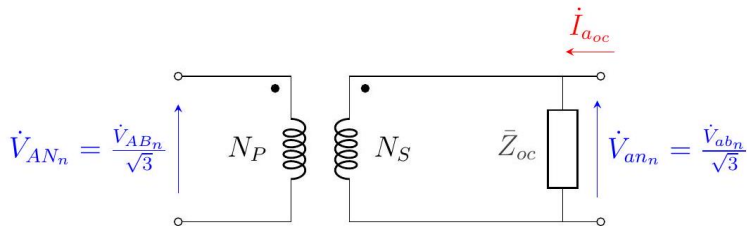


Ensaio em Vazio

A partir desse ensaio, obtém-se as seguintes medidas elétricas:

- ▶ Corrente de Linha em Vazio do Secundário: $|\dot{I}_{a_{oc}}|$
- ▶ Tensão de Linha Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{ab_n}|$
- ▶ Perda Trifásica no Ferro: P_{oc}

O modelo matemático utilizado para se calcular a impedância de circuito-aberto:



Ensaio em Vazio

Pode-se escrever a admitância de circuito aberto e o seu módulo em (36) e (37), respectivamente.

$$\bar{Y}_{oc} = \frac{\mathbf{I}}{\bar{\mathbf{Z}}_{oc}} = \sqrt{3} \times \frac{\dot{I}_{a_{oc}}}{\dot{V}_{ab_n}} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (36)$$

$$|\bar{Y}_{oc}| = \sqrt{3} \times \frac{|\dot{I}_{a_{oc}}|}{|\dot{V}_{ab_n}|} \quad (37)$$

Ensaio em Vazio

O ângulo da impedância de circuito-aberto pode ser calculada conforme a Equação 39.

$$P_{oc} = \sqrt{3} \times |\dot{V}_{ab_n}| \times |\dot{I}_{a_{oc}}| \times \cos \varphi_{oc} \quad (38)$$

$$\varphi_{oc} = \arccos \left(\frac{P_{oc}}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{ab_n}| \times |\dot{I}_{a_{oc}}|} \right) \quad (39)$$

Ensaio em Vazio

Logo, a condutância e a susceptância de magnetização podem ser expressas conforme (41) e (42).

$$\bar{Y}_{oc} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (40)$$

$$G_{oc} = \text{Re} (\bar{Y}_{oc}) = \sqrt{3} \times \frac{|\dot{I}_{aoc}|}{|\dot{V}_{ab_n}|} \times \cos \varphi_{oc} \quad (41)$$

$$B_{oc} = \text{Im} (\bar{Y}_{oc}) = -\sqrt{3} \times \frac{|\dot{I}_{aoc}|}{|\dot{V}_{ab_n}|} \times \sin \varphi_{oc} \quad (42)$$

Ensaio em Vazio

Portanto, a admitância de circuito-aberto pode ser escrita em pu, conforme apresentado em (43).

$$\bar{y}_{oc} = \bar{Y}_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} + j \times b_{oc} \quad (43)$$

Ensaio em Vazio

A perda trifásica no ferro, P_{oc} pode ser relacionada com G_{oc} , conforme Equação 44.

$$p_{oc} = \frac{P_{oc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{3 \times G_{oc} \times |\dot{V}_{an_n}|^2}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{3 \times G_{oc} \times \frac{|\dot{V}_{ab_n}|^2}{3}}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{S_n}| \times \frac{|\dot{V}_{S_n}|}{\sqrt{3} \times Z_{Base2}}} = G_{oc} \times Z_{\mathbf{Base\ 2}} = g_{oc} \quad (44)$$

Lembrando que,

$$|\dot{V}_{S_n}| = |\dot{V}_{ab_n}| \quad (45)$$

Ensaio em Vazio

Por fim, a corrente de magnetização do secundário, $|\dot{I}_{a_{mag}}|$, pode ser relacionada com a susceptância de magnetização, B_{oc} , conforme Equação 46.

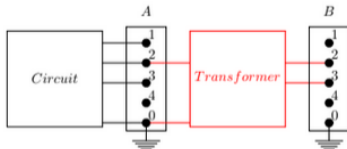
$$|\dot{i}_{a_{mag}}| = \frac{|\dot{I}_{a_{mag}}|}{|\dot{I}_{S_n}|} = \frac{|B_{oc}| \times \frac{|\dot{V}_{ab_n}|}{\sqrt{3}}}{|\dot{V}_{S_n}| \times \frac{1}{\sqrt{3} \times Z_{Base_2}}} = |B_{oc}| \times Z_{Base_2} = |b_{oc}| \quad (46)$$

Exemplo para um Transformador Monofásico

Para o primeiro exemplo, é assumido que transformador monofásico da imagem apresenta os seguintes dados:

- ▶ Nome: *TrafoMono*
- ▶ Potência Aparente Nominal: $|\bar{S}_n| = 100 \text{ kVA}$
- ▶ Tensão Nominal do Primário: $|\dot{V}_{Pn}| = \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 7.9674 \text{ kV}$
- ▶ Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{Sn}| = 0.22 \text{ kV}$
- ▶ Conectado entre as Barras: A e B
- ▶ Primário Conectado entre Fase B e Neutro/Terra
- ▶ Secundário Conectado entre Fases B e C

Exemplo para um Transformador Monofásico



Pode-se definir os transformadores em linguagem de programação do OpenDSS utilizando duas formas distintas, conforme apresentado a seguir.

Primeira Alternativa

Nesta forma, o usuário deve inserir as informações de tensão, potência e conexão de cada enrolamento separadamente.

A parte resistiva da impedância de curto-circuito é definida a partir das propriedades:

- ▶ *%loadloss*; ou
- ▶ *%r*.

Obs: diferentemente de *%r*, que é um parâmetro individual de cada enrolamento, *%loadloss* é um parâmetro do elemento transformador como um todo, que deve ser declarado antes das especificação dos parâmetros específicos aos enrolamentos.

Por esse motivo, apesar do nome do parâmetro ser *%r*, em notas técnicas, costumamos fazer referência à *%r1* e *%r2*, por exemplo, a transformadores com dois enrolamentos.

Primeira Alternativa

A reatância de curto-circuito, por sua vez, é definida através da propriedade *xbl*.

As expressões abaixo relacionam as grandezas obtidas através dos ensaios de curto-circuito e os parâmetros utilizados no OpenDSS.

$$\%loadloss = \%r_1 + \%r_2 = 100 \times p_{sc} = 100 \times r_{sc} \quad (47)$$

$$xbl = 100 \times x_{sc} \quad (48)$$

Primeira Alternativa

Já a admitância de circuito-aberto é definida através das propriedades *%noloadloss* e *%imag* para a condutância e susceptância, respectivamente.

$$\%noloadloss = 100 \times p_{oc} = 100 \times g_{oc} \quad (49)$$

$$\%imag = 100 \times |i_{mag}| = 100 \times |b_{oc}| \quad (50)$$

A seguir é apresentado um exemplo de transformador definido através da primeira alternativa:

Clear

```
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8  
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]
```

```
New Transformer.TrafoMono phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15  
%noloadloss=0.015 %imag=2  
~ wdg=1 bus=A.2 kv=7.9674 kva=100  
~ wdg=2 bus=B.2.3 kv=0.22 kva=100
```

```
Set voltagebases =[13.8 0.22]
```

```
Calc voltagebases
```

Solve

Segunda Alternativa

Diferente do caso anterior, na segunda alternativa o usuário deve inserir as informações de tensão, potência e conexão para ambos os enrolamentos através dos parâmetros kVs, kVAs e buses, respectivamente, os quais são arrays de dois elementos.

Os parâmetros devem ser inseridos nos arrays de forma individual e na ordem dos enrolamentos.

Segunda Alternativa

A seguir, o mesmo exemplo do caso anterior é apresentado de acordo com a segunda alternativa:

Clear

```
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8  
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]
```

```
New Transformer.TrafoMono phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15  
%noloadloss=0.015 %imag=2 kvs=[7.9674 0.22] buses=[A.2 B.2.3]  
kvas=[100 100]
```

```
Set voltagebases =[13.8 0.22]
```

```
Calc voltagebases
```

Solve

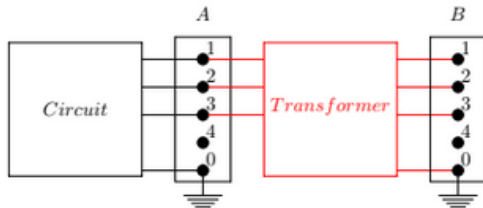
Exemplos para Transformadores Trifásicos

Para esse exemplo, diferentes conexões de transformadores trifásicos são definidas, sendo algumas através de modos distintos.

- ▶ Nome: *TrafoTri*
- ▶ Potência Aparente Nominal: \bar{S}_n
- ▶ Tensão Nominal do Primário: $|\dot{V}_{Pn}| = 13.8 \text{ kV}$
- ▶ Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{Sn}| = 0.22 \text{ kV}$
- ▶ Impedância de Curto-Circuito: \bar{Z}_{sc}
- ▶ Impedância de Circuito Aberto: \bar{Z}_{oc}
- ▶ Conectado entre as Barras: A e B
- ▶ Impedância de Curto-Circuito do Transformador Monofásico:
 $\bar{z}_{sc} = 0.0015 + j \times 0.05 pu$
- ▶ Admitância de Circuito-Aberto do Transformador Monofásico: $\bar{y}_{oc} = 0.0015 - j \times 0.02 pu$

Conexão DY_I(+30°)

Conexão no OpenDSS:



Conexão DY_I(+30°)

- Opção 1: através de um banco de três transformadores monofásicos

Clear

```
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.TrafoA phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15
%noloadloss=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.1.3 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.1 kv=0.127 kva=100 conn=wye
```

```
New Transformer.TrafoB phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15
%noloadloss=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.2.1 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.2 kv=0.127 kva=100 conn=wye
```

```
New Transformer.TrafoC phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15
%noloadloss=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.3.2 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.3 kv=0.127 kva=100 conn=wye
```

```
Set voltagebases =[13.8]
```

```
Calc voltagebases
```

```
Solve
```

Conexão DY_I(+30°)

- Opção 2: através de um único transformador trifásico

Clear

```
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8  
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]
```

```
New Transformer.TrafoTri phases=3 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15  
%noloadloss=0.015 %imag=2 LeadLag=Lag  
~ wdg=1 bus=A kv=13.8 kva=300 conn=delta  
~ wdg=2 bus=B kv=0.22 kva=300 conn=wye
```

```
Set voltagebases =[13.8 0.22]
```

```
Calc voltagebases
```

Solve

Conexão DY_{II}(-30°)

- Opção 1: através de um banco de três transformadores monofásicos

Clear

```
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.TrafoA phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15
%noloadloss=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.1.2 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.1 kv=0.127 kva=100 conn=wye
```

```
New Transformer.TrafoB phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15
%noloadloss=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.2.3 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.2 kv=0.127 kva=100 conn=wye
```

```
New Transformer.TrafoC phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15
%noloadloss=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.3.1 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.3 kv=0.127 kva=100 conn=wye
```

```
Set voltagebases =[13.8]
```

```
Calc voltagebases
```

```
Solve
```


Conexão DY_{II}(-30°)

- Opção 2: através de um único transformador trifásico

Clear

```
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8  
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]
```

```
New Transformer.TrafoTri phases=3 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15  
%noloadloss=0.015 %imag=2 LeadLag=Lead  
~ wdg=1 bus=A kv=13.8 kva=300 conn=delta  
~ wdg=2 bus=B kv=0.22 kva=300 conn=wye
```

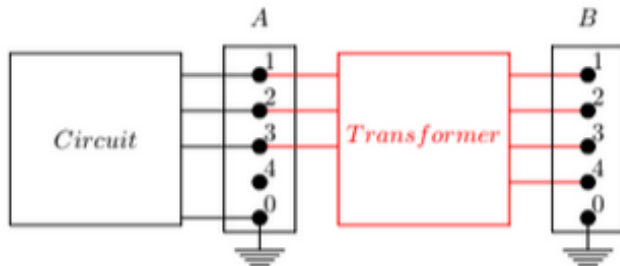
```
Set voltagebases =[13.8 0.22]
```

```
Calc voltagebases
```

Solve

Conexão YY

Conexão no OpenDSS:



Conexão YY

- Opção 1: Sem impedância de aterramento no secundário

Clear

```
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8  
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]
```

```
New Transformer.TrafoTri phases=3 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15  
%noloadloss=0.015 %imag=2  
~ wdg=1 bus=A kv=13.8 kva=300 conn=wye  
~ wdg=2 bus=B.1.2.3.4 kv=0.22 kva=300 conn=wye
```

```
Set voltagebases =[13.8 0.22]
```

```
Calcvoltagebases
```

Solve

Conexão YY

- Opção 2: Com impedância de aterramento no secundário

Clear

```
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8  
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]
```

```
New Transformer.TrafoTri phases=3 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15  
%noloadloss=0.015 %imag=2  
~ wdg=1 bus=A kv=13.8 kva=300 conn=wye  
~ wdg=2 bus=B.1.2.3.4 kv=0.22 kva=300 conn=wye
```

```
New Reactor.Ground phases=1 bus1=B.4 r=10 x=10
```

```
Set voltagebases =[13.8 0.22]
```

```
Calc voltagebases
```

Solve

Especificação de Transformadores para o Cálculo de Perdas Técnicas - PRODIST Módulo 7

O módulo 7 do PRODIST define os valores regulatórios de perdas totais e em vazio para os transformadores de distribuição em seu anexo I.

As perdas em vazio e total são definidas dependendo do nível de tensão primária e da potência nominal do transformador, sendo seus valores dados em Watts.

Por esse motivo, para efeito de modelagem no OpenDSS, essas perdas podem ser especificadas diretamente através dos parâmetros *%loadloss* e *%noloadloss* do elemento Transformer.

Como exemplo, vamos modelar um transformador trifásico cujos parâmetros foram especificados em [1] e são repetidos abaixo, a menos dos dados de perdas, que serão extraídos do anexo I de [3]:

- ▶ Nome: TR_I
- ▶ Potência Aparente Nominal: 150 kVA
- ▶ Número de Enrolamentos: 2
- ▶ Tensão Nominal do Primário: $|\dot{V}_{Pn}| = 13.8 \text{ kV}$
- ▶ Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{Sn}| = 0.38 \text{ kV}$
- ▶ Conexão: *delta/estrela*
- ▶ Tap: 1.05
- ▶ Conectado entre as Barras: A e B
- ▶ Reatância de curto-circuito: $2.72\% = 0.00272 \text{ pu}$
- ▶ Conectado entre as Barras (por exemplo) = A e B

Como o nível de tensão primária desse transformador é de 13.8 kV, deve-se utilizar a Tabela I, do Anexo I de [3].

Para a potência nominal de 150kVA, temos então que a perda em vazio desse transformadores de distribuição deve ser 485W, enquanto que a perda total deve ser de 2335W.

Assim, o parâmetro *%noloadloss* pode ser calculado por:

$$\%noloadloss = \frac{485}{150000} \times 100 = 0.3233 \quad (51)$$

$$\%loadloss = \frac{2335 - 485}{150000} \times 100 = 1.2333 \quad (52)$$

Então, o código na linguagem de programação do OpenDSS para esse transformador é: