

Elemento *Circuit* (V_{source}) do OpenDSS

1 Objetivo

O objetivo desse documento é descrever os principais parâmetros que o OpenDSS utiliza para definir o elemento *Circuit*. Para tanto, conceitos importantes, comumente apresentados em cursos de sistemas elétricos de potência, são utilizados, como: Componentes Simétricas; Curto-Circuito Trifásico; Curto-Circuito Monofásico.

Por fim, exemplos de códigos na linguagem de programação do OpenDSS são apresentados.

2 Por quê?

Todo sistema definido no OpenDSS deve conter um único elemento *Circuit* (equivalente de Thévenin) como sendo o primeiro elemento a ser declarado. A sua função é representar qualquer sistema linear visto de um ponto do circuito elétrico por uma fonte de tensão em série com uma impedância.

Esse conceito pode ser melhor entendido através da Figura 1, que apresenta um sistema fictício constituído por dois subsistemas, $S1$ e $S2$, conectados entre si através do ponto A . Suponha, por exemplo, que se deseja estudar em detalhes apenas o sistema $S2$. Nesse caso, supondo que o sistema $S1$ seja linear, pode-se utilizar o elemento *Circuit* para representá-lo, isto é, uma fonte de tensão em série com uma impedância capaz de representar todo o circuito que se encontra à esquerda do ponto A , conforme Figura 2.

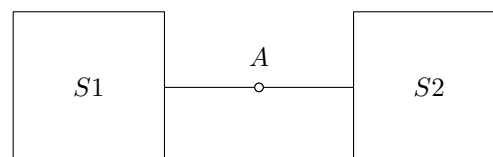


Figura 1: Sistema Elétrico Fictício

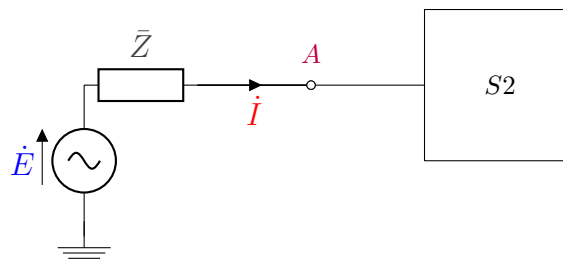


Figura 2: Equivalente de Thévenin do Sistema A

3 Modelagem

A Figura 3 apresenta o modelo elétrico do elemento *Circuit*.

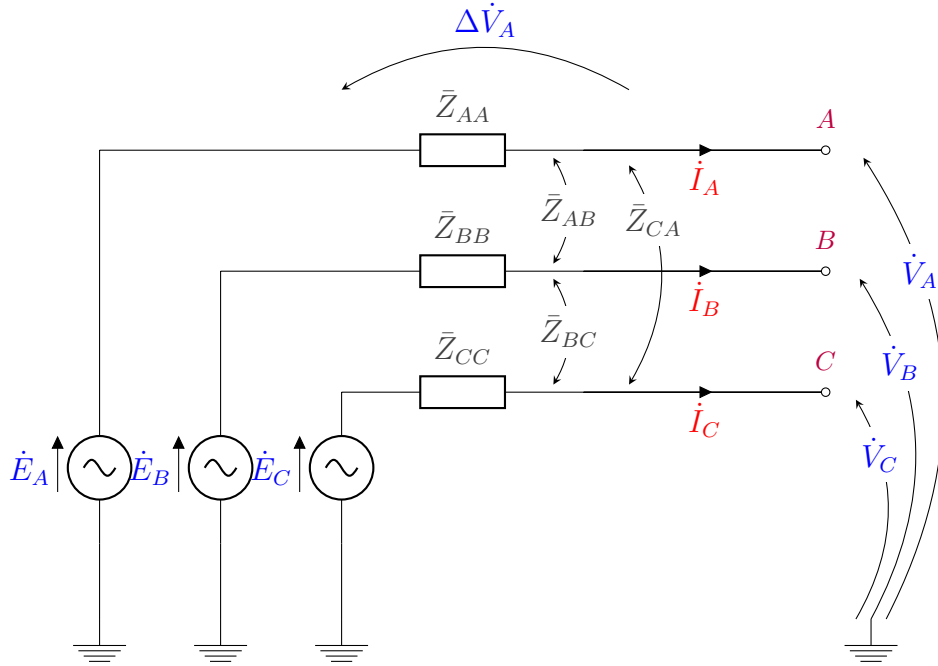


Figura 3: Modelo Matemático do Elemento *Circuit*

Por definição, esse elemento corresponde a uma fonte de tensão trifásica e simétrica, isto é, três fontes de tensão senoidais de mesma amplitude e defasadas entre si de 120° . Além disso, as impedâncias próprias e as impedâncias mútuas são iguais entre si, conforme as expressões (1) e (2), onde \bar{Z}_p e \bar{Z}_m são definidos como impedâncias própria e mútua, respectivamente.

$$\bar{Z}_p = \bar{Z}_{AA} = \bar{Z}_{BB} = \bar{Z}_{CC} \quad (1)$$

$$\bar{Z}_m = \bar{Z}_{AB} = \bar{Z}_{BC} = \bar{Z}_{CA} \quad (2)$$

O sistema de tensão trifásico simétrico pode ser representado por três fasores \dot{E}_A , \dot{E}_B e \dot{E}_C , conforme apresentado na Figura 4.

3.1 Cálculo das Componentes Simétricas das Impedâncias Próprias e Mútuas do Elemento *Circuit*

As impedâncias em componentes simétricas podem ser utilizadas como parâmetros para definir o elemento *Circuit* no OpenDSS. A seguir, é apresentado o cálculo das impedâncias sequenciais a partir das impedâncias em componentes de fase.

Observando a Figura 3, é possível escrever três equações da segunda lei de Kirchhoff, uma para cada fase, e obter a Equação 3, na forma matricial.

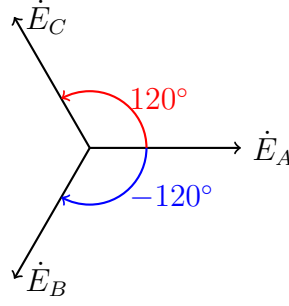


Figura 4: Diagrama Fasorial do Sistema de Tensão Trifásico Simétrico do Elemento *Circuit*

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_A \\ \Delta \dot{V}_B \\ \Delta \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_p & \bar{Z}_m & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_p & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_m & \bar{Z}_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde a matriz 3×3 das impedâncias de fase também é chamada de \bar{Z} .

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_p & \bar{Z}_m & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_p & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_m & \bar{Z}_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

A Equação 5 apresenta a relação matemática entre as impedâncias próprias e mútuas e suas componentes simétricas.

$$\bar{Z}_{012} = \mathbf{A}^{-1} \times \bar{Z} \times \mathbf{A} \quad (5)$$

onde,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

e

$$\alpha = 1/\underline{120^\circ} \quad (7)$$

Assim, aplicando-se (4), (6) e (7) em (5), têm-se que:

$$\bar{Z}_{012} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_p + 2 \times \bar{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_p - \bar{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_p - \bar{Z}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

\bar{Z}_0 , \bar{Z}_1 e \bar{Z}_2 são definidas como impedâncias de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente. Note que, para esse caso, em particular, \bar{Z}_1 é igual a \bar{Z}_2 .

Esses valores podem ser utilizados para definir o elemento *Circuit*, conforme apresentado na seção (4.1.1).

3.2 Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

Além das impedâncias sequenciais, o par de potências de curto-circuito trifásico e monofásico, \bar{S}_{sc3} e \bar{S}_{sc1} , ou o par de correntes de curto-circuito trifásico e monofásico, \bar{I}_{sc3} e \bar{I}_{sc1} , também podem ser utilizados para definir o elemento *Circuit*.

Nessa seção, \bar{S}_{sc3} e \bar{I}_{sc3} são calculados considerando que o elemento *Circuit* está na condição de curto-circuito trifásico, conforme apresentado na Figura 5.

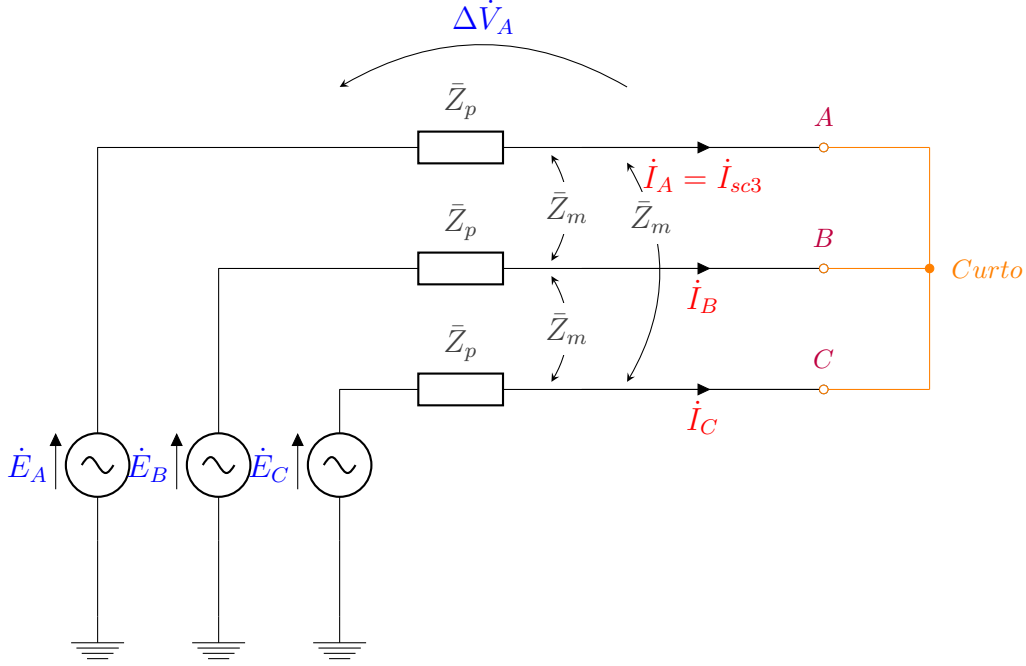


Figura 5: Elemento *Circuit* na Condição de Curto-Circuito Trifásico

Pode-se definir a corrente de curto-circuito trifásico e a tensão de linha entre as fases *A* e *B* conforme as relações (9) e (10).

$$\bar{I}_{sc3} = \bar{I}_A \quad (9)$$

$$\bar{E}_{AB} = \bar{E}_A - \bar{E}_B = \sqrt{3} \times \bar{E}_A / 30^\circ \quad (10)$$

Observando a Figura 5, é possível escrever a equação da segunda lei de Kirchhoff para a fase *A* e obter a Equação 12.

$$\Delta \bar{V}_A = \bar{E}_A - 0 = \bar{Z}_p \times \bar{I}_A + \bar{Z}_m \times \bar{I}_B + \bar{Z}_m \times \bar{I}_C \quad (11)$$

$$\bar{E}_A = \bar{Z}_p \times \bar{I}_A + \bar{Z}_m \times (\bar{I}_B + \bar{I}_C) \quad (12)$$

Aplicando a primeira lei de Kirchhoff no nó *Curto*, é possível escrever a Equação 14.

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (13)$$

$$\dot{I}_B + \dot{I}_C = -\dot{I}_A \quad (14)$$

Assim, aplicando-se (14) em (12) e, também, lembrando que $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_p - \bar{Z}_m$, conforme apresentado em (8), tem-se que:

$$\dot{E}_A = (\bar{Z}_p - \bar{Z}_m) \times \dot{I}_A = \bar{Z}_1 \times \dot{I}_A \quad (15)$$

A partir da Equação 15, é possível obter o valor do módulo da corrente de curto-circuito trifásico em função da impedância de sequência positiva, conforme apresentado abaixo:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{sc3} = \frac{\dot{E}_A}{\bar{Z}_1} = \frac{\dot{E}_{AB} \angle -30^\circ}{\sqrt{3} \times \bar{Z}_1} \quad (16)$$

$$|\dot{I}_A| = \frac{|\dot{E}_{AB}|}{\sqrt{3} \times |\bar{Z}_1|} \quad (17)$$

A potência de curto-circuito trifásico, por sua vez, é definida como três vezes a potência fornecida por uma das fases, conforme a Equação 18, pois o circuito apresentado é simétrico.

$$\bar{S}_{sc3} = 3 \times \dot{E}_A \times \dot{I}_A^* \quad (18)$$

A partir de (16) e (18) é possível obter o valor do módulo da potência de curto-circuito trifásico em função do módulo da impedância de sequência positiva, conforme apresentado na Equação 21.

$$\bar{S}_{sc3} = 3 \times \dot{E}_A \times \frac{\dot{E}_A^*}{\bar{Z}_1^*} = \frac{(\sqrt{3} \times |\dot{E}_A|)^2}{\bar{Z}_1^*} \quad (19)$$

$$\bar{S}_{sc3} = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{\bar{Z}_1^*} \quad (20)$$

$$|\bar{S}_{sc3}| = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{|\bar{Z}_1|} \quad (21)$$

3.3 Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Monofásico

Nessa seção, \bar{S}_{sc1} e \dot{I}_{sc1} são calculados considerando que o elemento *Circuit* está na condição de curto-circuito monofásico em sua fase A, conforme apresentado na Figura 6.

Pode-se definir a corrente de curto-circuito monofásico conforme a relação (22).

$$\dot{I}_{sc1} = \dot{I}_A \quad (22)$$

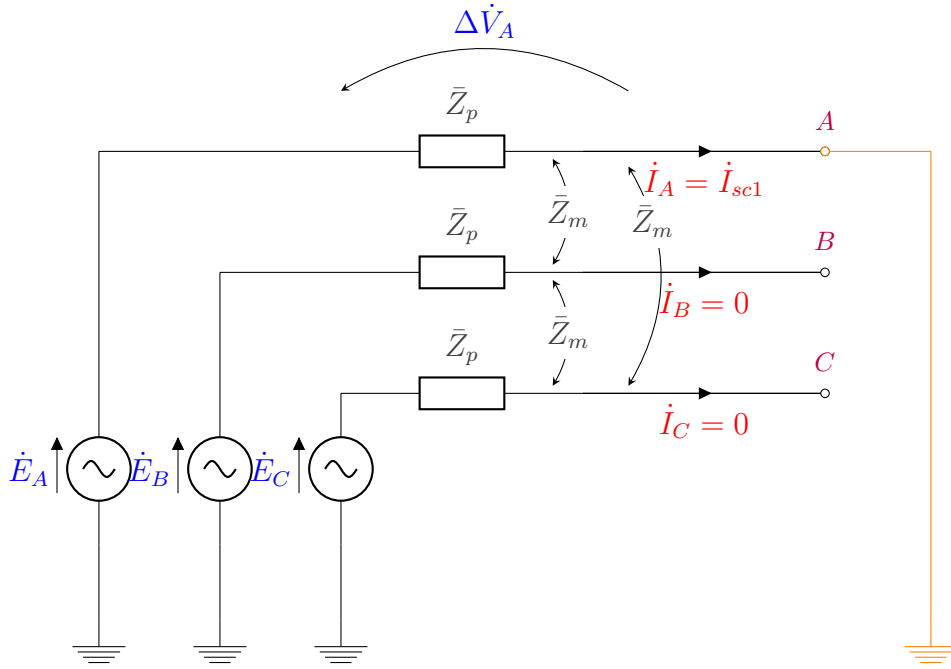


Figura 6: Elemento *Circuit* na Condição de Curto-Circuito Monofásico

Observando a Figura 6 e aplicando a segunda lei de Kirchhoff para a fase A, temos que:

$$\Delta \dot{V}_A = \dot{E}_A - 0 = \bar{Z}_p \times \dot{I}_A + \bar{Z}_m \times 0 + \bar{Z}_m \times 0 \quad (23)$$

$$\dot{E}_A = \bar{Z}_p \times \dot{I}_A \quad (24)$$

A partir da Equação 24, é possível obter o valor do módulo da corrente de curto-circuito monofásico em função do módulo da impedância própria, conforme apresentado na Equação 26.

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{sc1} = \frac{\dot{E}_A}{\bar{Z}_p} = \frac{\dot{E}_{AB} / -30^\circ}{\sqrt{3} \times \bar{Z}_p} \quad (25)$$

$$|\dot{I}_A| = \frac{|\dot{E}_{AB}|}{\sqrt{3} \times |\bar{Z}_p|} \quad (26)$$

A potência de curto-circuito monofásico é definida conforme a Equação 27.

$$\bar{S}_{sc1} = 3 \times \dot{E}_A \times \dot{I}_A^* \quad (27)$$

Aplicando-se (25) em (27), obtém-se o valor do módulo da potência de curto-circuito monofásico em função do módulo da impedância própria, conforme apresentado na Equação 30.

$$\bar{S}_{sc1} = 3 \times \dot{E}_A \times \frac{\dot{E}_A^*}{\bar{Z}_1^*} = \frac{(\sqrt{3} \times |\dot{E}_A|)^2}{\bar{Z}_p^*} \quad (28)$$

$$\bar{S}_{sc1} = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{\bar{Z}_p^*} \quad (29)$$

$$\bar{S}_{sc1} = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{|\bar{Z}_p|} \quad (30)$$

Para se obter \bar{S}_{sc1} e \dot{I}_{sc1} em função de \bar{Z}_0 e \bar{Z}_1 , basta utilizar a relação entre \bar{Z}_p e o par \bar{Z}_0 e \bar{Z}_1 , conforme a Equação 31, derivada a partir das relações encontradas em (8).

$$\bar{Z}_p = \frac{1}{3} \times \bar{Z}_0 + \frac{2}{3} \times \bar{Z}_1 \quad (31)$$

3.4 Relação entre os Parâmetros Obtidos

Nessa seção, são apresentadas as relações entre os pares de parâmetros que podem ser utilizados para a definição do elemento *Circuit*. Os pares são: \bar{S}_{sc1} e \bar{S}_{sc3} ; \dot{I}_{sc1} e \dot{I}_{sc3} ; \bar{Z}_0 e \bar{Z}_1 . Note que não é possível utilizar o par \bar{Z}_p e \bar{Z}_m para definir esse elemento.

A Equação 32 apresenta as relações entre \bar{S}_{sc1} , \dot{I}_{sc1} e \bar{Z}_p . Onde \dot{E}_{AB} é o valor nominal da tensão de linha do elemento e \bar{Z}_p se relaciona com \bar{Z}_0 e \bar{Z}_1 através da Equação 31.

$$\bar{S}_{sc1} = 3 \times \dot{E}_A \times \dot{I}_{sc1}^* = \sqrt{3} \times \dot{E}_{AB} \angle -30^\circ \times \dot{I}_{sc1}^* = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{\bar{Z}_p^*} \quad (32)$$

A Equação 33 apresenta as relações entre \bar{S}_{sc3} , \dot{I}_{sc3} e \bar{Z}_1 .

$$\bar{S}_{sc3} = 3 \times \dot{E}_A \times \dot{I}_{sc3}^* = \sqrt{3} \times \dot{E}_{AB} \angle -30^\circ \times \dot{I}_{sc3}^* = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{\bar{Z}_1^*} \quad (33)$$

4 Exemplos de Códigos

Nessa seção, os parâmetros apresentados anteriormente são utilizados para definir o elemento *Circuit* na linguagem de programação do OpenDSS, conforme configuração apresentada na Figura 7.

4.1 Primeiro Exemplo

Para o primeiro exemplo, é assumido que o equivalente de Thévenin trifásico apresenta os seguintes dados:

- Nome: *TheveninEquivalente*

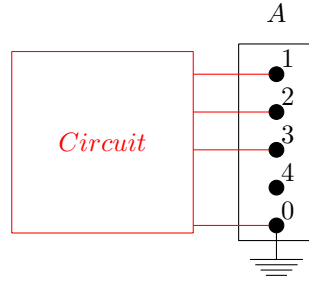


Figura 7: Conexão do *Circuit* no OpenDSS

- Tensão Nominal: $|\dot{E}_{AB}| = 13.8 \text{ kV}$
- Tensão de Operação: $|\dot{e}_A| = 1.1 \text{ pu}$
- Conectado na Barra: *PontoThevenin*
- Impedância de Sequência Zero: $\bar{Z}_0 = 0.025862916 + j \times 0.077588748 \Omega$
- Impedância de Sequência Positiva: $\bar{Z}_1 = 0.023094242 + j \times 0.092376969 \Omega$

4.1.1 Definição a partir das Impedâncias

Essas informações podem ser utilizadas para definir o elemento *Circuit*, conforme apresentado no código a seguir:

```
Clear
New Circuit.TheveninEquivalent bus1=PontoThevenin pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.025862916, 0.077588748] Z1=[0.023094242, 0.092376969]

Set voltagebases=[13.8]
Calc voltagebases

Solve
```

4.1.2 Definição a partir das Potências de Curto-Circuito

Considera-se que se conhece apenas as potências de curto-circuito para definir o elemento *Circuit*. Entretanto, para obter o mesmo elemento da seção (4.1.1), as potências de curto-circuito são calculadas a partir das equações (20), (29) e (31). Com os valores das potências de curto-circuito calculados, considera-se que os valores das impedâncias não são mais dados. Para obtê-los, é necessário utilizar as relações descritas nas equações (20) e (29).

$$\bar{Z}_p = \frac{1}{3} \times \bar{Z}_0 + \frac{2}{3} \times \bar{Z}_1 \quad (34)$$

$$= \frac{1}{3} \times (0.025862916 + j \times 0.077588748) + \frac{2}{3} \times (0.023094242 + j \times 0.092376969) \quad (35)$$

$$= (0.002401713 + j \times 0.087447562) \Omega \quad (36)$$

$$\bar{S}_{sc1} = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{\bar{Z}_p^*} = \frac{13.8^2}{(0.002401713 - j \times 0.087447562)} \quad (37)$$

$$= 2100/\underline{74.6426^\circ} \text{ MVA} \quad (38)$$

$$\bar{S}_{sc3} = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{\bar{Z}_1^*} = \frac{13.8^2}{0.023094242 - j \times 0.092376969} \quad (39)$$

$$= 2000/\underline{75.9638^\circ} \text{ MVA} \quad (40)$$

Um ponto importante sobre o OpenDSS é que o mesmo só aceita os módulos das potências de curto-circuito como parâmetros de entrada. Os ângulos das potências de curto-circuito devem ser inseridos de forma indireta.

A forma de se inserir o valor do ângulo da potência de curto-circuito trifásico é através do parâmetro $x1r1$ que representa a relação $\frac{X_1}{R_1}$. Onde R_1 e X_1 são os valores da resistência e da reatância de sequência positiva, respectivamente.

Posto isso, pode-se escrever a impedância de sequência positiva e a potência de curto-circuito trifásico segundo as equações (41) e (42).

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j \times X_1 = |\bar{Z}_1|/\varphi_1 \quad (41)$$

$$\bar{S}_{sc3} = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{|\bar{Z}_1|/\varphi_1} = |\bar{S}_{sc3}|/\varphi_1 \quad (42)$$

Portanto, a inclusão do valor do ângulo da potência de curto-circuito trifásico através do parâmetro $x1r1$ deve ser realizada conforme a Equação 43.

$$x1r1 = \frac{X_1}{R_1} = \tan(\varphi_1) = \tan(75.9638^\circ) = 4 \quad (43)$$

Para inserir a valor do ângulo da potência de curto-circuito monofásico é necessário utilizar o parâmetro $x0r0$, que representa a relação $\frac{X_0}{R_0}$. R_0 e X_0 são os valores da resistência e da reatância de sequência zero, respectivamente.

Dessa maneira, \bar{Z}_0 deve ser calculado a partir dos dados das potências de curto-circuito. Primeiro, calcula-se o valor de \bar{Z}_1 através da Equação 44.

$$\bar{Z}_1 = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{\bar{S}_{sc3}^*} = \frac{13.8^2}{2000/\underline{75.9638^\circ}} \quad (44)$$

$$= 0.023094242 + j \times 0.092376969 \Omega \quad (45)$$

Em seguida, calcula-se o valor de \bar{Z}_p através da Equação 46.

$$\bar{Z}_p = \frac{|\dot{E}_{AB}|^2}{\bar{S}_{sc1}^*} = \frac{13.8^2}{2100/-74.6426^\circ} \quad (46)$$

$$= 0.002401713 + j \times 0.087447562 \, \Omega \quad (47)$$

Com os valores de \bar{Z}_1 e \bar{Z}_p , calcula-se o valor de \bar{Z}_0 através da Equação 48, que é resultado de uma manipulação matemática da Equação 31.

$$\bar{Z}_0 = 3 \times \bar{Z}_p - 2 \times \bar{Z}_1 \quad (48)$$

$$= 0.025862916 + j \times 0.077588748 \, \Omega \quad (49)$$

Por fim, a relação $\frac{X_0}{R_0}$ é calculada conforme a Equação 50.

$$x0r0 = \frac{X_0}{R_0} = \frac{0.077588748}{0.025862916} = 3 \quad (50)$$

Finalmente, os dados dos módulos das potências de curto-circuito e as relações $\frac{X_0}{R_0}$ e $\frac{X_1}{R_1}$ são utilizados para definir o elemento *Circuit*, conforme apresentado no código a seguir:

```
Clear
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=PontoThevenin pu=1.1 basekv=13.8
~ MVAsc3=2000 x1r1=4 MVAsc1=2100 x0r0=3

Set voltagebases=[13.8]
Calc voltagebases

Solve
```

4.1.3 Definição a partir das Correntes de Curto-Circuito

Para definir o mesmo elemento da seção (4.1.1), os dados das correntes de curto-circuito são obtidos através das equações (32) e (33).

$$\dot{I}_{sc1} = 87858/-74.6426^\circ \, A \quad (51)$$

$$\dot{I}_{sc3} = 83674/-75.9638^\circ \, A \quad (52)$$

Do mesmo modo que as potências de curto-circuito, a definição do elemento *Circuit* também é realizada através dos módulos das correntes de curto-circuito e das relações $\frac{X_0}{R_0}$ e $\frac{X_1}{R_1}$. Assim sendo, com os dados das correntes de curto-circuito \dot{I}_{sc1} e \dot{I}_{sc3} , calcula-se as potências de curto-circuito através das equações (32) e (33) e, portanto, o método para obtenção das relações $\frac{X_0}{R_0}$ e $\frac{X_1}{R_1}$ apresentado na seção (4.1.2) pode ser utilizado.

Finalmente, os dados dos módulos das correntes de curto-circuito e as relações $\frac{X_0}{R_0}$ e $\frac{X_1}{R_1}$ são utilizados para definir o elemento *Circuit*, conforme apresentado no código a seguir:

```
Clear
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=PontoThevenin pu=1.1 basekv=13.8
~ Isc3=83674 xlr1=4 Isc1=87858 x0r0=3

Set voltagebases=[13.8]
Calc voltagebases

Solve
```

4.2 Segundo Exemplo

Esse exemplo tem o objetivo de apresentar como se deve definir o elemento *Circuit* na condição de barramento infinito, ou seja, com tensão nominal em seu terminal de saída independente da potência fornecida pelo elemento.

Para esse exemplo, é assumido que o equivalente de Thévenin trifásico apresenta os seguintes dados:

- Nome: *TheveninEquivalente*
- Tensão Nominal: $|\dot{E}_{AB}| = 13.8 \text{ kV}$
- Tensão de Operação: $|\dot{e}_A| = 1.1 \text{ pu}$
- Conectado na Barra: *PontoThevenin*
- Operando como Barramento Infinito

Essas informações podem ser utilizadas para definir o elemento *Circuit* na linguagem de programação do OpenDSS. Um equivalente de Thévenin operando como um barramento infinito consiste nada mais nada menos em considerar as impedâncias próprias e mútuas desse elemento como sendo nulas. Porém, isso não é possível de se realizar no OpenDSS. Por esse motivo, utiliza-se valores extremamente baixos para essas impedâncias, de tal forma que a queda de tensão sobre as mesmas é praticamente nula, conforme apresentado no código a seguir:

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

Set voltagebases=[13.8]
Calc voltagebases

Solve
```

5 Comentários Adicionais

Esse material foi disponibilizado gratuitamente, porém, ao utilizá-lo, pedimos que as devidas referências sejam feitas.

Se você possui alguma dúvida ou encontrou algum erro nessa nota técnica, por favor, entre em contato conosco através do e-mail **opendss.brasil@gmail.com**.

6 Referências

- [1] Oliveira, C.B., H.P. Schmidt, N. Kagan e E.J. Robba: *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas*. Edgard Blücher, São Paulo, 2ª edição, 2000.
- [2] Stevenson, W.D.: *Elements of power system analysis*. McGraw-Hill series in electrical engineering: Power and energy. McGraw-Hill, 1982, ISBN 9780070612792.