



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Distribuição de Energia Elétrica

Fluxo de Carga e Curto-circuito em sistemas de distribuição

Prof. Lucas Melo

Universidade Federal do Ceará

Agosto de 2021

Fluxo de Carga em SDEE

As análises realizadas em sistemas de distribuição consistem em dois tipos:

- ① Análise sob condições normais de operação: estudo de **fluxo de carga**;
- ② Análise sob condições anormais de operação: estudo de **curto-circuito**;

Com os modelos de cada um dos componentes que constituem o sistema de distribuição essas análises tornam-se possíveis de serem realizadas.

O Estudo de Fluxo de Carga

Conceito

- ① A **análise nodal convencional** ou de loop **não é adequada** para estudos de fluxo de potência **porque os dados de entrada para cargas são normalmente fornecidos em termos de potência, não impedância.**
- ② Além disso, **os geradores são considerados fontes de potência, não fontes de tensão** ou corrente.
- ③ O problema de fluxo de potência é, portanto, formulado como **um conjunto de equações algébricas não lineares** adequadas para processamento computacional.

Fluxo de Carga em SDEE

Para a determinações das tensões nas barras e as correntes nas linhas:

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}^* = \text{const} \quad (1)$$

Assim,

$$\mathbf{V} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{I}^{*-1}$$

$$\mathbf{I} = \left[\mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{S} \right]^*$$

A análise de fluxo de carga de um alimentador de distribuição é bem semelhante aquela de um sistema de transmissão inter-conectado.

Os dados iniciais da análise geralmente são:

- 1 As tensões na barra da subestação;
- 2 A potência das cargas conectadas ao sistema e como estas se comportam (potência constante, impedância constante e corrente constante);
- 3 Tipos e comprimento dos condutores.
- 4 Transformadores e seus parâmetros;

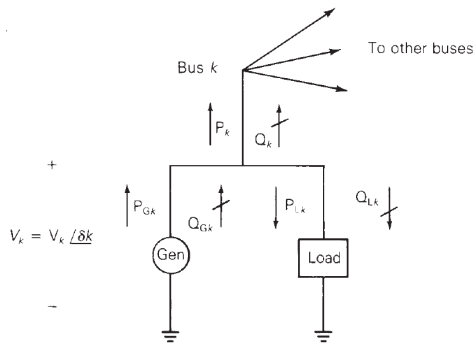
Fluxo de Carga em SDEE

A saída do fluxo de carga deve determinar:

- ① Magnitudes e ângulos das tensões em cada um dos nós do sistema;
- ② Fluxo de corrente em cada trecho;
- ③ Perdas no sistema;
- ④ Potência total de entrada.

Fluxo de Carga em SDEE

Conforme mostrado na Figura, para cada barra k teremos as seguintes variáveis:



- tensão na barra V_k ;
- ângulo de fase da tensão δ_k ;
- potência ativa equivalente da barra P_k ;
- potência reativa equivalente da barra Q_k ;

No problema do fluxo de carga **apenas duas dessas variáveis são especificadas como dados de entrada**, as outras duas são desconhecidas e serão determinadas pelo **algoritmo**.

Fluxo de carga em SDEE

Para cada uma das barras temos que:

$$P_k = P_{GK} - P_{LK} \quad (2)$$

$$Q_k = Q_{GK} - Q_{LK} \quad (3)$$

Cada barra é classificada de acordo com as variáveis que estão disponíveis como dado de entrada:

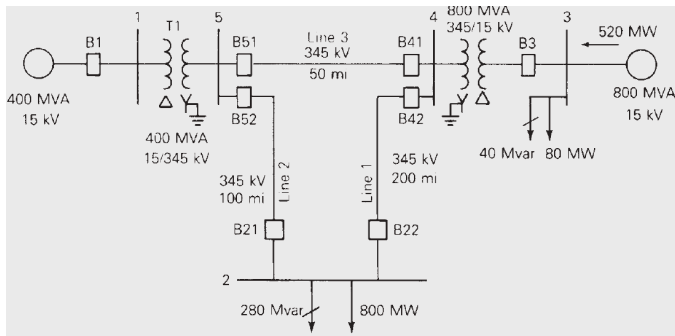
- **Barra de referência (Swing):** Para essa barra são conhecidos módulo e ângulo da tensão, geralmente $1,0/\underline{0,0^\circ}$;
- **Barra de carga (PQ):** São conhecidos potência ativa e reativa consumidas/geradas pela barra;
- **Barra de tensão controlada (PV):** São conhecidos potência ativa e tensão na barra.

Fluxo de carga em SDEE

Com base nos parâmetros das **linhas de transmissão**, ou seja, os parâmetros de impedância série e admitância em paralelo e dos **transformadores** que existem no sistema é possível montar a matriz de admitância Y_{barra} , em que:

y_{kk} = soma das admitâncias conectadas na barra k ;

y_{kn} = - (soma das admitâncias conectadas entre as barras k e n , em que $k \neq n$)



Fluxo de carga em sistemas de transmissão

Um sistema elétrico de potência qualquer pode ser representado por meio da seguinte expressão:

$$\mathbf{I}_{[n,1]} = \mathbf{Y}_{barra[n,n]} \cdot \mathbf{V}_{[n,1]} \quad (4)$$

Em que:

\mathbf{I} é o vetor de correntes injetadas em cada uma das barras do sistema;

\mathbf{V} é o vetor de tensões em cada uma das barras do sistema; e

\mathbf{Y}_{barra} é a matriz de admitâncias do sistema.

Assim, podemos escrever, em notação escalar, para cada barra k do sistema:

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (5)$$

A questão é: Como determinar os valores do vetor de tensão \mathbf{V} ?

Fluxo de carga em sistemas de transmissão

A pergunta do slide anterior pode ser respondida pelo seguinte equacionamento:

Primeiro desenvolve-se uma expressão para determinar o valor da potência equivalente em cada barra k do sistema independente de um valor explícito de corrente:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k \cdot I_k^* \quad (6)$$

$$P_k + jQ_k = V_k \cdot \left[\sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right]^* \quad (7)$$

Para obter uma notação mais limpa, substituem-se os valores de $V_n = V_n e^{j\delta_n}$ e $Y_{kn} = Y_{kn} e^{j\theta_{kn}}$:

$$P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n e^{j(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})} \quad (8)$$

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (9)$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (10)$$

Fluxo de carga em sistemas de transmissão

Utilizando então a equação nodal do sistema (LKC), o problema de fluxo de carga dado por $\mathbf{I} = \mathbf{Y}_{barra} \cdot \mathbf{V}$ é solucionado de acordo com o problema equivalente linear $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{y}$. Dessa forma, a variável \mathbf{x} equivale ao vetor de tensões \mathbf{V} , e deve ser calculado.

Para resolver $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{y}$, dados os valores de \mathbf{A} e de \mathbf{y} , o método de *Gauss-Seidel* resolve que, para cada $x_k(i+1)$:

$$y_k = a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + \dots + a_{kk}x_k + \dots + a_{kn}x_n \quad (11)$$

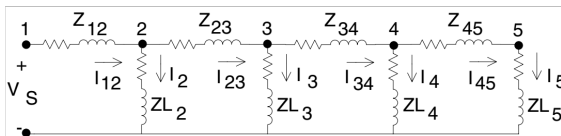
$$x_k(i+1) = \frac{1}{a_{kk}} \left[y_k - \sum_{n=1}^{k-1} a_{kn}x_n(i+1) - \sum_{n=k+1}^N a_{kn}x_n(i) \right] \quad (12)$$

Nas equações de fluxo de carga, é equivalente, aplicando um dos métodos iterativos (*Gauss-Seidel*) para resolução desse problema:

$$\mathbf{Y}_{barra} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{I} \implies V_k(i+1) = \frac{1}{y_{kk}} \cdot \left[\underbrace{\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*(i)}}_{I_k} - \underbrace{\sum_{n=1}^{k-1} y_{kn} V_n(i+1)}_{atualizado} - \underbrace{\sum_{n=k+1}^N y_{kn} V_n(i)}_{y_{kn} \cdot v_n} \right] \quad (13)$$

Fluxo de Carga em SDEE

Rede de distribuição linear.



Procedimento:

- 1 Inicia-se o cálculo das correntes a partir do nó mais afastado da fonte;
- 2 O cálculo da corrente neste nó atribui-se um valor de tensão qualquer (pode ser a tensão na fonte);
- 3 Procede-se no cálculo das correntes e tensões na linha em direção à fonte;
- 4 Ao chegar na fonte, realiza-se o seguinte cálculo:

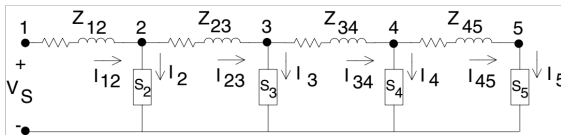
$$Ratio = \frac{V_s}{V_1} \quad (14)$$

Em que V_s é a tensão especificada para a fonte e V_1 é a tensão encontrada a partir dos cálculos realizados.

Por fim, como trata-se de uma **rede linear** para se encontrar os valores reais de tensões e correntes do sistema, basta multiplicá-los pelo fator *Ratio*.

Fluxo de carga em SDEE

Rede de distribuição não linear.



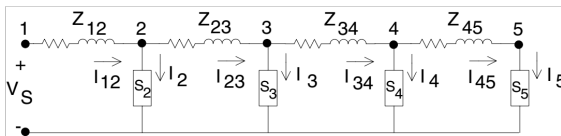
Cálculo das correntes dos nós n na fase de **Varredura Direta** (*forward sweep*)

$$[V_{abc}]_n = [a] \cdot [V_{abc}]_m + [b] \cdot [I_{abc}]_m$$

$$[I_{abc}]_n = [c] \cdot [V_{abc}]_m + [d] \cdot [I_{abc}]_m$$

Fluxo de carga em SDEE

Rede de distribuição não linear.



Cálculo das tensões nos nós m na fase de **Varredura Inversa** (*backward sweep*)

$$[V_{abc}]_m = [A] \cdot [V_{abc}]_n - [B] \cdot [I_{abc}]_m$$

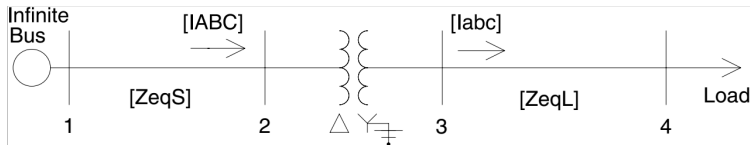
Exemplo: Sistema

For the system, the infinite bus voltages are balanced three-phase of 12.47 kV line-to-line.

The source line segment from Node 1 to Node 2 is a three-wire delta 2000 ft. long and is constructed on configuration showed in next slide.

The load line segment from Node 3 to Node 4 is 2500 ft. long and is also constructed on the same pole configuration, but is a four-wire wye.

Both line segments use 336,400 26/7 ACSR phase conductors, and the neutral conductor on the four-wire wye line is 4/0 6/1 ACSR. Since the lines are short, the shunt admittance will be neglected.



Exemplo: Dados do sistema

$$[Z_{eqS}_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.3225 & 0.0361 + j0.2752 \\ 0.0361 + j0.3225 & 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.2955 \\ 0.0361 + j0.2752 & 0.0361 + j0.2955 & 0.1414 + j0.5353 \end{bmatrix} \Omega$$

$$[Z_{eqL}_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.1907 + j0.5035 & 0.0607 + j0.2302 & 0.0598 + j0.1751 \\ 0.0607 + j0.2302 & 0.1939 + j0.4885 & 0.0614 + j0.1931 \\ 0.0598 + j0.1751 & 0.0614 + j0.1931 & 0.1921 + j0.4970 \end{bmatrix} \Omega$$

$$2000 \text{ kVA}, \quad 12.47 - 2.4 \text{ kV}, \quad Z = 1.0 + j6.0\%$$

The feeder serves an unbalanced three-phase wye-connected load of:

$S_a = 750 \text{ kVA}$ at 0.85 lagging power factor

$S_b = 1000 \text{ kVA}$ at 0.90 lagging power factor

$S_c = 1250 \text{ kVA}$ at 0.95 lagging power factor

Exemplo: Linha 1

$$[a_1] = [d_1] = [U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[b_1] = [ZeqS_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.3225 & 0.0361 + j0.2752 \\ 0.0361 + j0.3225 & 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.2955 \\ 0.0361 + j0.2752 & 0.0361 + j0.2955 & 0.1414 + j0.5353 \end{bmatrix}$$

Exemplo: Linha 1

$$[c_1] = [0]$$

$$[A_1] = [a_1]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[B_1] = [a_1]^{-1} \cdot [b_1]$$

$$= \begin{bmatrix} 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.3225 & 0.0361 + j0.2752 \\ 0.0361 + j0.3225 & 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.2955 \\ 0.0361 + j0.2752 & 0.0361 + j0.2955 & 0.1414 + j0.5353 \end{bmatrix}$$

Exemplo: Linha 2

$$[a_2] = [d_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[b_2] = \begin{bmatrix} 0.1907 + j0.5035 & 0.0607 + j0.2302 & 0.0598 + j0.1751 \\ 0.0607 + j0.2302 & 0.1939 + j0.4885 & 0.0614 + j0.1931 \\ 0.0598 + j0.1751 & 0.0614 + j0.1931 & 0.1921 + j0.4970 \end{bmatrix}$$

$$[c_2] = [0]$$

$$[A_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[B_2] = \begin{bmatrix} 0.1907 + j0.5035 & 0.0607 + j0.2302 & 0.0598 + j0.1751 \\ 0.0607 + j0.2302 & 0.1939 + j0.4885 & 0.0614 + j0.1931 \\ 0.0598 + j0.1751 & 0.0614 + j0.1931 & 0.1921 + j0.4970 \end{bmatrix}$$

Exemplo: Transformador

$$Z_{\text{base}} = \frac{2.4^2 \cdot 1000}{2000} = 2.88 \, \Omega$$

$$Z_{t_{\text{low}}} = (0.01 + j0.06) \cdot 2.88 = 0.0288 + j0.1728 \, \Omega$$

The transformer phase impedance matrix is

$$[Z_{t_{abc}}] = \begin{bmatrix} 0.0288 + j0.1728 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0288 + j0.1728 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0288 + j0.1728 \end{bmatrix} \Omega$$

$$\text{The turns ratio: } n_t = \frac{12.47}{2.4} = 5.1958$$

$$\text{The transformer ratio: } a_t = \frac{12.47}{\sqrt{3} \cdot 2.4} = 2.9998$$

Exemplo: Transformador

$$[a_t] = \frac{-n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -3.4639 & -1.7319 \\ -1.7319 & 0 & -3.4639 \\ -3.4639 & -1.7319 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[b_t] = \frac{-n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 2 \cdot Z_t & Z_t \\ Z_t & 0 & 2 \cdot Z_t \\ 2 \cdot Z_t & Z_t & 0 \end{bmatrix}$$

$$[b_t] = \begin{bmatrix} 0 & -0.0998 - j0.5986 & -0.0499 - j0.2993 \\ -0.0499 - j0.2993 & 0 & -0.0998 - j0.5986 \\ -0.0998 - j0.5986 & -0.0499 - j0.2993 & 0 \end{bmatrix}$$

Exemplo: Transformador

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1925 & -0.1925 & 0 \\ 0 & 0.1925 & -0.1925 \\ -0.1925 & 0 & 0.1925 \end{bmatrix}$$

Exemplo: Transformador

$$[A_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1925 & 0 & -0.1925 \\ -0.1925 & 0.1925 & 0 \\ 0 & -0.1925 & 0.1925 \end{bmatrix}$$

$$[B_t] = [Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.0288 + j0.1728 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0288 + j0.1728 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0288 + j0.1728 \end{bmatrix}$$

Exemplo: Tensões do Sistema

$$[ELL_s] = \begin{bmatrix} 12,470 / \underline{30} \\ 12,470 / \underline{-90} \\ 12,470 / \underline{150} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[ELN_s] = \begin{bmatrix} 7199.6 / \underline{0} \\ 7199.6 / \underline{-120} \\ 7199.6 / \underline{120} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[V4] = \begin{bmatrix} 2400 / \underline{-30} \\ 2400 / \underline{-150} \\ 2400 / \underline{90} \end{bmatrix} \text{ V}$$

Exemplo: Nó 4

$$[S_4] = \begin{bmatrix} 750 / \underline{31.79} \\ 1000 / \underline{25.84} \\ 1250 / \underline{18.19} \end{bmatrix} \text{ kVA}$$

$$I_{4_i} = \left(\frac{S_i \cdot 1000}{V_{4_i}} \right)^* = \begin{bmatrix} 312.5 / \underline{-61.8} \\ 416.7 / \underline{-175.8} \\ 520.8 / \underline{71.8} \end{bmatrix} \text{ A}$$

Exemplo: Nó 3

$$[V3] = [a_2] \cdot [V4] + [b_2] \cdot [I4] = \begin{bmatrix} 2470.9 / \underline{-29.5} \\ 2534.4 / \underline{-148.4} \\ 2509.5 / \underline{94.1} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[I3] = [c_2] \cdot [V4] + [d_2] \cdot [I4] = \begin{bmatrix} 312.5 / \underline{61.8} \\ 416.7 / \underline{-175.8} \\ 520.8 / \underline{71.8} \end{bmatrix} \text{ A}$$

Exemplo: Nó 2

$$[V2] = [a_t] \cdot [V3] + [b_t] \cdot [I3] = \begin{bmatrix} 7956.4 / \underline{3.3} \\ 7344.5 / \underline{-113.4} \\ 7643.0 / \underline{120.5} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[I2] = [c_t] \cdot [V3] + [d_t] \cdot [I3] = \begin{bmatrix} 118.2 / \underline{-23.5} \\ 150.3 / \underline{-137.8} \\ 148.3 / \underline{88.9} \end{bmatrix} \text{ A}$$

Exemplo: Nó 1

$$[V1] = [a_1] \cdot [V_2] + [b_1] \cdot [I2] = \begin{bmatrix} 7985.9 / \underline{3.4} \\ 7370.6 / \underline{-113.2} \\ 7673.6 / \underline{120.7} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[I1] = [c_1] \cdot [V2] + [d_1] \cdot [I2] = \begin{bmatrix} 118.2 / \underline{-23.5} \\ 150.3 / \underline{-137.8} \\ 148.3 / \underline{88.9} \end{bmatrix} \text{ A}$$

Exemplo: Tensões de Linha no nó 1

$$[VLL1] = [D] \cdot [V1] = \begin{bmatrix} 13,067.5 / \underline{33.7} \\ 13,411.4 / \underline{-85.7} \\ 13,375.9 / \underline{152.7} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[\text{Error}]_{pu} = \frac{|[ELL_s - VLL1]|}{12,470} = \begin{bmatrix} 0.0809 \\ 0.1086 \\ 0.0876 \end{bmatrix} \text{ per-unit}$$

Exemplo: Cálculo das Tensões na varredura reversa

$$[V2] = [A_l] \cdot [ELN_s] - [B_l] \cdot [I2] = \begin{bmatrix} 7171.1 / \underline{-0.1} \\ 7176.7 / \underline{-120.2} \\ 7169.3 / \underline{119.8} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[V3] = [A_t] \cdot [V2] - [B_t] \cdot [I3] = \begin{bmatrix} 2354.0 / \underline{-31.2} \\ 2351.0 / \underline{-151.6} \\ 2349.9 / \underline{87.8} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[V4] = [A_2] \cdot [V3] - [B_2] \cdot [I4] = \begin{bmatrix} 2283.7 / \underline{-31.7} \\ 2221.4 / \underline{-153.6} \\ 2261.0 / \underline{83.2} \end{bmatrix} \text{ V}$$

Exemplo: Tensão Final no nó 4

$$[V4_{\text{final}}] = \begin{bmatrix} 2278.7 / \underline{-31.8} \\ 2199.8 / \underline{-153.5} \\ 2211.2 / \underline{83.1} \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[V4_{120}] = \begin{bmatrix} 113.9 / \underline{-31.8} \\ 110.0 / \underline{-153.5} \\ 110.6 / \underline{83.1} \end{bmatrix} \text{ V}$$

Qual ferramenta utilizar para o cálculo?

Uma bastante popular é o OpenDSS.

Development of the OpenDSS program began in April 1997 at Electrotek Concepts, Inc.

At that time the program was simply called “DSS” for Distribution System Simulator.

Roger Dugan was the principal author of the software supported shortly thereafter by Tom McDermott.

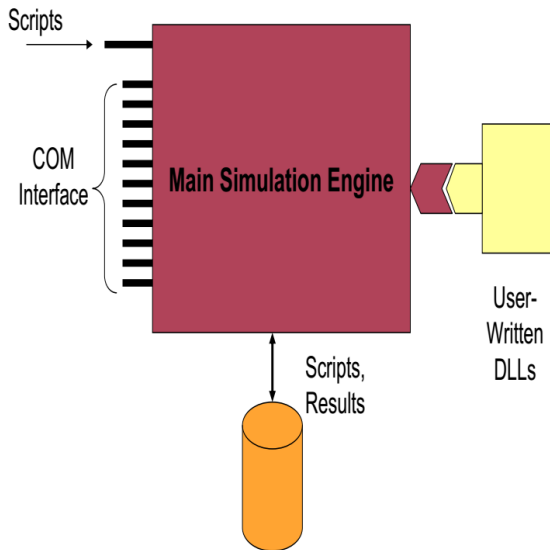
The two comprised the development team until late 2001 when Tom left Electrotek.

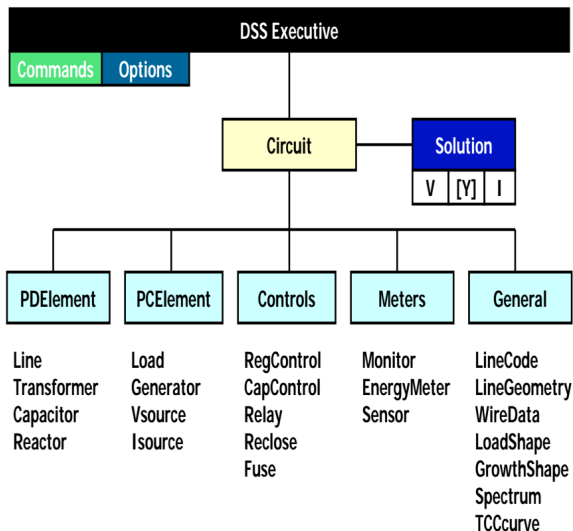
Qual ferramenta utilizar para o cálculo?

Roger continued maintaining and evolving the program alone until recently when Tom again became part of the development team through the OpenDSS project.

The DSS had been acquired by EPRI Solutions in 2004, which was united with EPRI in 2007.

In 2008, EPRI released the software under an open source license to cooperate with other grid modernization efforts active in the Smart Grid area





Definição do sistema no Open DSS

Definição do circuito principal

```
new circuit.KerstingExample10_2  
~ basekv=12.47 pu=1.0001 phases=3 bus1=SourceBus  
~ Angle=0  
~ MVAsc3=20000 MVASC1=21000
```

Definição do sistema no Open DSS

Definição das linhas

```
New linecode.line_s nphases=3 BaseFreq=60
```

```
~ rmatrix = (0.4013 | 0.0953 0.4013 | 0.0953 0.0953 0.
```

```
~ xmatrix = (1.4133 | 0.8515 1.4133 | 0.7266 0.7802 1.
```

```
~ units=mi
```

```
New linecode.line_l nphases=3 BaseFreq=60
```

```
~ rmatrix = (0.4576 | 0.156 0.4666 | 0.1535 0.1580 0.4
```

```
~ xmatrix = (1.0780 | 0.5017 1.0482 | 0.3849 0.4236 1.
```

```
~ units=mi
```

Definição do sistema no Open DSS

Definição do transformador

```
New Transformer.trafo_1 Phases=3 Windings=2 XHL=6  
~ wdg=1 bus=bus_2 conn=delta kv=12.47 kva=6000 %r=0.5  
~ wdg=2 bus=bus_3 conn=wye kv=4.16 kva=6000 %r=0.5
```

Definição do sistema no Open DSS

Definição das linhas

```
New Line.b1_b2 Phases=3 Bus1=SourceBus Bus2=bus_2  
Linecode=line_s Length=2000 units=ft
```

```
New Line.b3_b4 Phases=3 Bus1=bus_3 Bus2=bus_4  
Linecode=line_1 Length=2500 units=ft
```

Definição do sistema no Open DSS

Definição das cargas

```
New Load.load_4a Bus1=bus_4.1 Phases=1 Conn=wye Model=
kv=2.4 kva=750 pf=0.85
```

```
New Load.load_4b Bus1=bus_4.2 Phases=1 Conn=wye Model=
kv=2.4 kva=1000 pf=0.9
```

```
New Load.load_4c Bus1=bus_4.3 Phases=1 Conn=Wye Model=
kv=2.4 kva=1250 pf=0.95
```


Definição do sistema no Open DSS

Comandos para o solver

```
Set Voltagebases=[12.47, 4.16]
```

```
calcv
```

```
Solve
```

```
Show Voltages LN Nodes
```

Definição do sistema no Open DSS

Comandos para o solver

LINE-GROUND and LINE-LINE VOLTAGES BY BUS & NODE

Bus	Node	VLN (kV)	Angle	pu	Base kV	VLL (kV)	Angle	pu
BUS_1	1	7.1997 / _	0.0	1	12.470	12.47 / _	30.0	1
-	2	7.1996 / _	-120.0	1	12.470	12.47 / _	-90.0	0.99998
-	3	7.1994 / _	120.0	0.99998	12.470	12.47 / _	150.0	0.99999
BUS_2	1	7.1681 / _	-0.1	0.99563	12.470	12.424 / _	29.8	0.99634
-	2	7.1717 / _	-120.2	0.99614	12.470	12.413 / _	-90.2	0.99546
-	3	7.1657 / _	119.8	0.9953	12.470	12.411 / _	149.8	0.99527
BUS_3	1	2.3515 / _	-31.2	0.97908	4.160	4.0781 / _	-1.4	0.98032
-	2	2.3475 / _	-151.6	0.97742	4.160	4.0702 / _	-121.9	0.97841
-	3	2.3402 / _	87.9	0.97438	4.160	4.044 / _	118.4	0.9721
BUS_4	1	2.2752 / _	-31.9	0.94731	4.160	3.9122 / _	-3.0	0.94044
-	2	2.2128 / _	-153.2	0.92133	4.160	3.8961 / _	-124.8	0.93655
-	3	2.2159 / _	83.6	0.92262	4.160	3.7979 / _	116.3	0.91297

Definição do sistema no Open DSS

Comandos para o solver

CIRCUIT ELEMENT CURRENTS

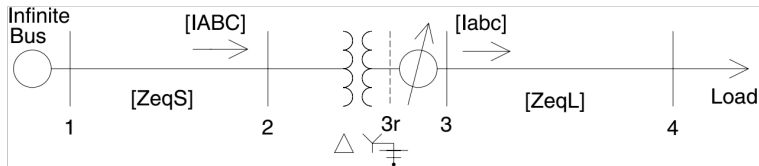
(Currents into element from indicated bus)

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real)	+j	(Imag)
ELEMENT = "Vsource.SOURCE"						
BUS_1	1	122.87 / _	153.3 =	-109.73	+j	55.281
BUS_1	2	156.08 / _	37.2 =	124.3	+j	94.388
BUS_1	3	150.38 / _	-95.6 =	-14.569	+j	-149.67

BUS_1	0	122.87 / _	-26.7 =	109.73	+j	-55.281
BUS_1	0	156.08 / _	-142.8 =	-124.3	+j	-94.388
BUS_1	0	150.38 / _	84.4 =	14.569	+j	149.67
ELEMENT = "Transformer.TRAFO_1"						
BUS_2	1	122.87 / _	-26.7 =	109.73	+j	-55.284
BUS_2	2	156.08 / _	-142.8 =	-124.31	+j	-94.386
BUS_2	3	150.38 / _	84.4 =	14.572	+j	149.67
BUS_2	0	0 / _	0.0 =	0	+j	0

BUS_3	1	328.18 / _	116.3 =	-145.52	+j	294.16
BUS_3	2	424.28 / _	1.0 =	424.22	+j	7.1211
BUS_3	3	531.17 / _	-114.6 =	-221.18	+j	-482.93
BUS_3	0	190.54 / _	107.6 =	-57.519	+j	181.65

Exemplo: Inserção de Regulador de Tensão



Exemplo: Inserção de Regulador de Tensão

The voltages at Node 4 are below the required 120 (121 ± 1) V. These low voltages can be corrected with the installation of three step-voltage regulators connected in wye on the secondary bus (Node 3) of the transformer. The new configuration of the feeder is shown in Figure 10.8. For the regulator, the potential transformer ratio will be 2400-120 V ($N_{pt} = 20$), and the CT ratio is selected to carry the rated current of the transformer bank. The rated current is

$$I_{\text{rated}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 2.4} = 832.7$$

The CT ratio is selected to be $1000:5 = CT = 200$.

Exemplo: Inserção de Regulador de Tensão

$$Z_{eq_i} = \frac{V_{3_i} - V_{4_i}}{I_{3_i}} = \begin{bmatrix} 0.1414 + j0.1829 \\ 0.2078 + j0.2826 \\ 0.0889 + j0.3833 \end{bmatrix} \Omega$$

The three regulators are to have the same R and X compensator settings. The average value of the computed impedances will be used:

$$Z_{\text{avg}} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{k=1}^3 Z_{eq_k} = 0.1461 + j0.2830 \Omega$$

Exemplo: Inserção de Regulador de Tensão

$$R' + jX' = (0.1461 + j0.2830) \cdot \frac{1000}{20} = 7.3 + j14.2 \text{ V}$$

The value of the compensator settings in ohms is

$$R_{\Omega} + jX_{\Omega} = \frac{7.3 + j14.2}{5} = 1.46 + j2.84 \text{ } \Omega$$

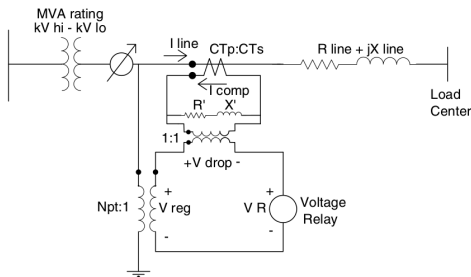
Exemplo: Inserção de Regulador de Tensão

$$Vreg_i = \frac{V3_i}{PT} = \begin{bmatrix} 117.5 / \underline{-31.2} \\ 117.1 / \underline{-151.7} \\ 116.7 / \underline{87.8} \end{bmatrix} \text{ V}$$

The compensator currents are

$$Icomp_i = \frac{I3_i}{CT} = \begin{bmatrix} 1.6456 / \underline{-63.6} \\ 2.2730 / \underline{-179.4} \\ 2.8267 / \underline{64.9} \end{bmatrix} \text{ A}$$

Exemplo: Inserção de Regulador de Tensão



$$[V_{\text{relay}}] = [V_{\text{reg}}] - [Z_{\text{comp}}] \cdot [I_{\text{comp}}] = \begin{bmatrix} 113.0 / -32.5 \\ 111.2 / -153.8 \\ 110.0 / 84.7 \end{bmatrix} \text{ V}$$

Exemplo: Inserção de Regulador de Tensão

$$Tap_i = \frac{120 - |V4_i|}{0.75} = \begin{bmatrix} 9.3 \\ 11.7 \\ 13.4 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 9 \\ 12 \\ 13 \end{bmatrix}$$

$$[V4_{120}] = \begin{bmatrix} 121.0 / \underline{-31.8} \\ 120.1 / \underline{-153.3} \\ 121.5 / \underline{83.9} \end{bmatrix} \text{ V}$$

Definição do sistema no Open DSS

Definição do regulador de tensão

```
New Transformer.Reg1 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666  
~ Buses=[bus_3.1 bus_3r.1] kVs=[2.4  
2.4] %LoadLoss=0.01
```

```
new regcontrol.Reg1 transformer=Reg1 winding=2  
vreg=122 band=2 ptratio=20  
ctprim=1000 R=7.3 X=14.2
```

```
New Transformer.Reg2 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666  
~ Buses=[bus_3.2 bus_3r.2] kVs=[2.4  
2.4] %LoadLoss=0.01
```

```
new regcontrol.Reg2 transformer=Reg2 winding=2  
vreg=122 band=2 ptratio=20  
ctprim=1000 R=7.3 X=14.2
```

```
New Transformer.Reg3 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666
```

Definição do sistema no Open DSS

Comandos para o solver

```
New Line.b1_b2 Phases=3 Bus1=bus_1 Bus2=bus_2  
Linecode=line_s Length=2000 units=ft
```

```
New Line.b3r_b4 Phases=3 Bus1=bus_3r Bus2=bus_4  
Linecode=line_l Length=2500 units=ft
```

Definição do sistema no Open DSS

Comandos para o solver

LINE-GROUND and LINE-LINE VOLTAGES BY BUS & NODE

Bus	Node	VLN (kV)	Angle	pu	Base kV	VLL (kV)	Angle	pu
BUS_1	1	7.1996 / _	0.0	1	12.470	12.47 / _	30.0	1
-	2	7.1995 / _	-120.0	0.99999	12.470	12.47 / _	-90.0	0.99997
-	3	7.1993 / _	120.0	0.99997	12.470	12.47 / _	150.0	0.99999
BUS_2	1	7.1673 / _	-0.1	0.99552	12.470	12.422 / _	29.8	0.99618
-	2	7.1701 / _	-120.2	0.99591	12.470	12.41 / _	-90.2	0.99521
-	3	7.1644 / _	119.8	0.99511	12.470	12.409 / _	149.8	0.99514
BUS_3	1	2.3514 / _	-31.2	0.97901	4.160	4.0773 / _	-1.5	0.98011
-	2	2.3444 / _	-151.7	0.97612	4.160	4.0654 / _	-122.0	0.97725
-	3	2.3374 / _	87.8	0.97319	4.160	4.039 / _	118.4	0.97091
BUS_3R	1	2.5129 / _	-31.2	1.0463	4.160	4.3827 / _	-1.3	1.0535
-	2	2.5347 / _	-151.7	1.0553	4.160	4.4206 / _	-121.8	1.0627
-	3	2.5562 / _	87.8	1.0643	4.160	4.3666 / _	118.0	1.0497
BUS_4	1	2.4436 / _	-31.7	1.0174	4.160	4.2243 / _	-2.7	1.0155
-	2	2.3989 / _	-153.2	0.99879	4.160	4.2499 / _	-124.4	1.0216
-	3	2.4388 / _	83.9	1.0154	4.160	4.1318 / _	116.1	0.99321

Definição do sistema no Open DSS

Comandos para o solver

CONTROLLED TRANSFORMER TAP SETTINGS

Name	Tap	Min	Max	Step	Position
reg1	1.06875	0.90000	1.10000	0.00625	11
reg2	1.08125	0.90000	1.10000	0.00625	13
reg3	1.09375	0.90000	1.10000	0.00625	15