



GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA.

GSI Nº: ART056-09 - CD 382-09



MODELAGEM DE SISTEMA ELÉTRICO CONTENDO PONTE CONVERSORA EM FORMAÇÃO DE GRAETZ OPERANDO COMO RETIFICADOR OU INVERSOR PARA APLICAÇÃO EM PROGRAMAS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

João Roberto Cogo

Revisão 0 - Emissão Inicial.

Documentos de Referência: ART83.CHI - Modelagem de Sistema Elétrico contendo Ponte Conversora em
Formação de Graetz Operando como Retificador ou Inversor e
ART348-07 - CD 262-07

Páginas: capa+ 10 Nº pág inicial 1 Nº pág final 10

Distribuição

Disponível para o Site da GSI

Rev.	Data/Autor	Data/Verificado	Data/Aprovado	Data/Emissão Original	Observações
0	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	Para Informação
a					
b					
c					

1 - OBJETIVO

Este texto tem por objetivo apresentar a modelagem dos componentes de um sistema de um sistema de elétrico contendo um conversor ligado em ponte trifásica (formação Graetz), que pode tanto operar como retificadora quanto como inversora. Esta modelagem é tomada como base para análise do circuito através do programa MicroTran^R.

O circuito básico é mostrado na FIGURA 1.

2 - MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS QUE COMPÕEM O SISTEMA

O programa MicroTran^R basicamente calcula as tensões e correntes em função do tempo a partir da forma da onda de tensão da fonte. Assim sendo, para cada componente representativo do sistema elétrico e modelagem é mostrada a seguir.

2.1 - SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA

O sistema de suprimento de energia é representado como sendo uma fonte ideal de tensão atrás de uma resistência e uma indutância equivalente. A FIGURA 2 ilustrada.

Na FIGURA 2 tem-se:

$$e_a = E_{\max} \cdot \text{sen } \omega t \dots\dots\dots (1)$$

$$e_b = E_{\max} \cdot \text{sen } (\omega t - 3\pi/2) \dots\dots\dots (2)$$

$$e_c = E_{\max} \cdot \text{sen } (\omega t + 3\pi/2) \dots\dots\dots (3)$$

Para o caso de sistema de suprimento de energia:

$$R_s = \frac{1}{S_{cc}} \cdot \cos \varphi_{cc} \cdot \frac{(U_{B1})^2}{S_B} \dots\dots\dots (4)$$

$$L_s = \frac{1}{2\pi \cdot f_{rede}} \cdot \frac{(U_{B1})^2}{S_{cc}} \cdot \text{sen } \varphi_{cc} \dots\dots\dots (5)$$

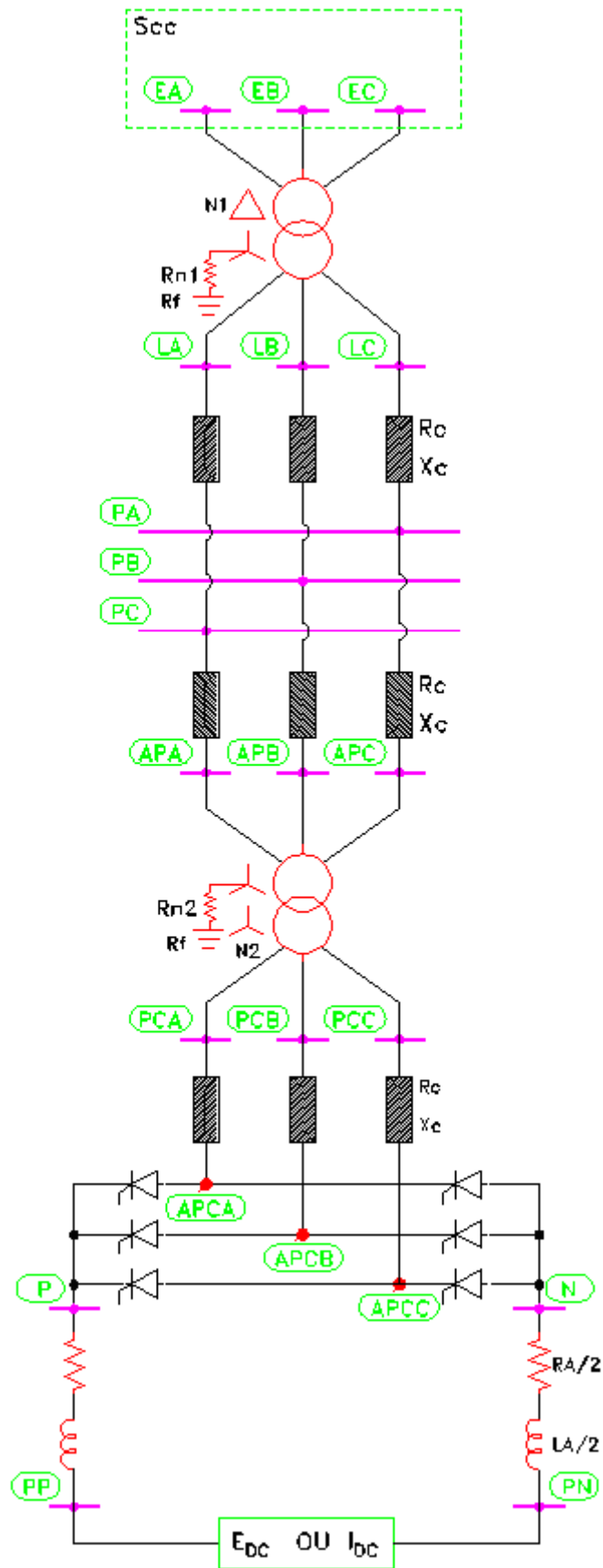


FIGURA 1 - CIRCUITO BÁSICO PARA MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO CONTENDO CONVERSOR

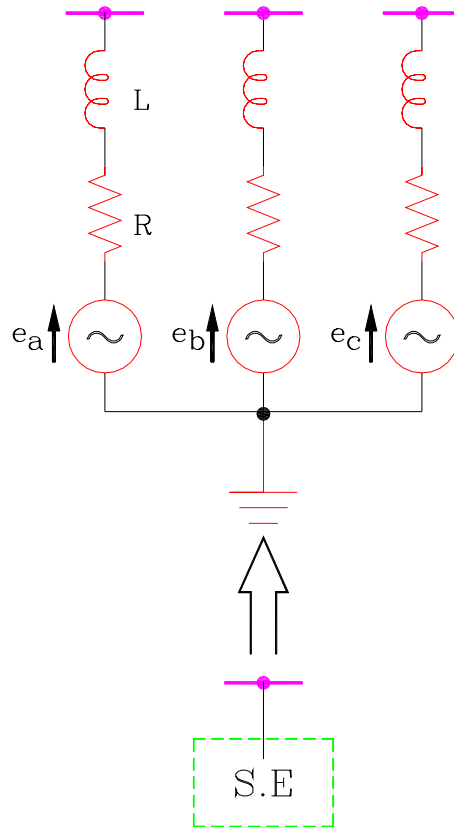


FIGURA 2 - MODELAGEM DO SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA

onde, nas equações (1), (2), (3), (4) e (5) tem-se:

S_{cc} - potência de curto-circuito trifásica (VA).

φ_{cc} - ângulo de fase entre os fasores tensão e corrente de curto circuito.

U_{B1} - tensão base ([V]).

S_B - potência base ([VA]).

f_{rede} - frequência da tensão da rede de suprimento de energia (Hz).

E_{max} - valor máximo da tensão ([V]).

2.2 - TRANSFORMADORES COM DOIS ENROLAMENTOS

Os transformadores são modelados por fase através de sua representação matricial, tomando como base a FIGURA 3.

A matriz representativa de uma das fases do transformador mostrado na FIGURA 3c é indicada a seguir na equação (6).

A parcela resistiva é definida por:

$$[R] = \frac{R}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \left(\frac{U_p}{U_s}\right)^2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (6a)$$

A parcela indutiva é definida por:

$$[\omega L]^{-1} = \frac{R}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{U_p}{U_s} \\ \frac{U_p}{U_s} & \left(\frac{U_p}{U_s}\right)^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6b)$$

onde, nas equações (6a) e (6b) tem-se:

R - resistência equivalente dos enrolamentos primário e secundário do transformador, referida ao lado primário em ([ohm]).

X - reatância de dispersão equivalente aos enrolamentos primário e secundário do transformador, referida ao lado primário em ([ohm]).

$[\omega L]^{-1}$ - inverso da reatância de dispersão (SIEMENS).

U_p - tensão de fase no lado primário do transformador ([V]).

U_s - tensão de fase no lado secundário do transformador ([V]).

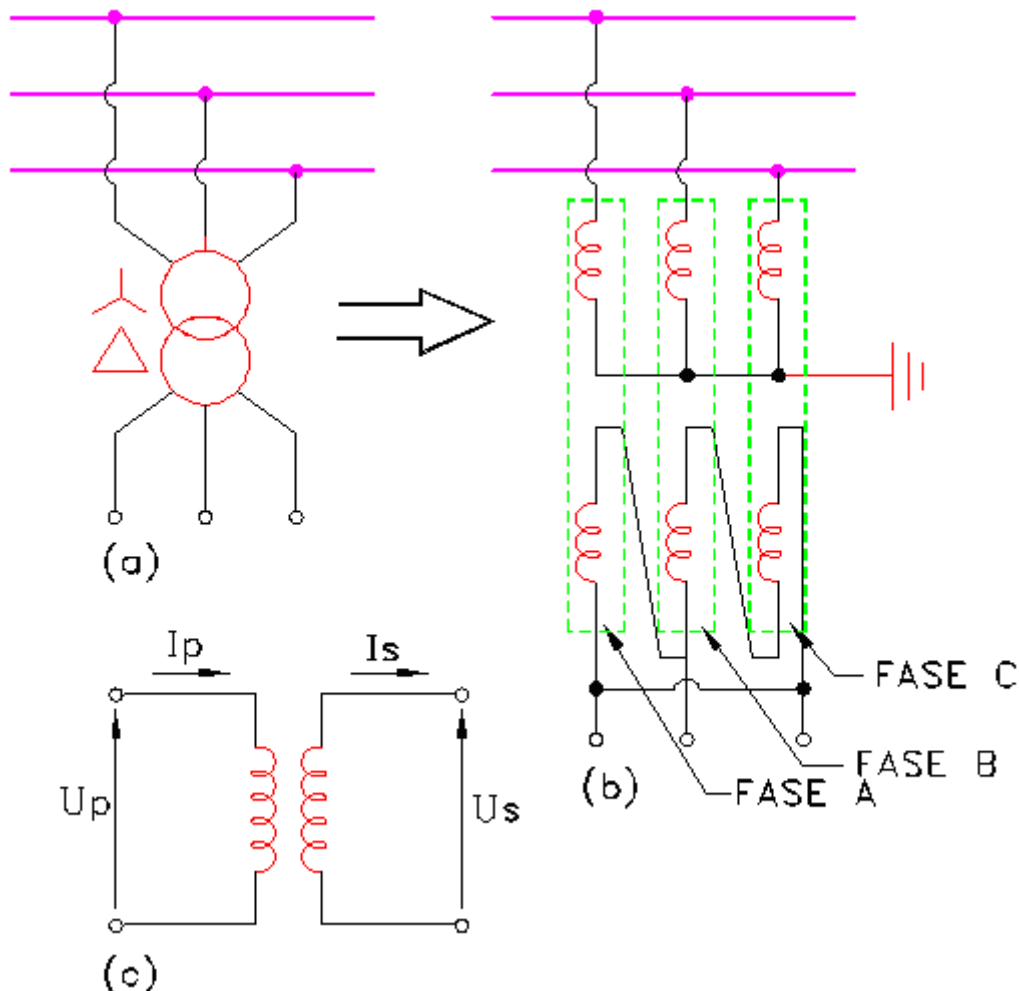


FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES COM DOIS ENROLAMENTOS

a - DIAGRAMA EQUIVALENTE;

b - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS;

c - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DE UMA FASE.

2.3 - TRANSFORMADORES COM TRÊS ENROLAMENTOS

Para o sistema indicado na FIGURA 1, se o retificador fosse de 12 pulsos, seria possível a utilização de um transformador de três enrolamentos, conforme mostra a FIGURA 4.

A FIGURA 5 mostra como o transformador de três enrolamentos pode ser representado por fase.

A FIGURA 6 mostra o circuito equivalente do transformador de três enrolamentos com as impedâncias do lado de tensão superior (“High” - H), inferior (“Low” - L) e terciário (“Tertiary” - T) em [ohm] referidas ao lado de tensão superior. Nota-se, naturalmente, a correção com o quadrado do número de espiras apenas para as impedâncias dos lados L e T.

As impedâncias de curto-circuito do lado L, referido ao lado H (\dot{Z}_{HL}), e do lado T, referida ao lado H (\dot{Z}_{HT}), são dadas por:

$$\frac{\dot{U}_H}{I_H} = \dot{Z}_{HL} = \dot{Z}_H + \dot{Z}_L \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\dot{U}_H}{I_H} = \dot{Z}_{HT} = \dot{Z}_H + \dot{Z}_T \dots\dots\dots (8)$$

A equação (7) é válida para o secundário em curto e o terciário em aberto, enquanto que a equação (8) vale para o terciário em curto e o secundário em aberto.

Para determinar a impedância entre o secundário (L) e o terciário (T), deve-se considerar o primário em aberto, alimentação no secundário com o terciário em curto. Nestas condições tem-se o circuito da FIGURA 7.

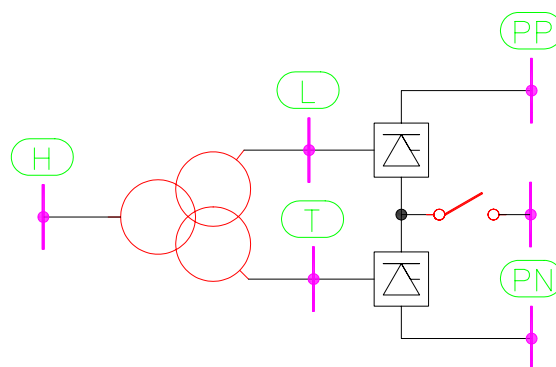


FIGURA 4 - UTILIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE TRÊS ENROLAMENTOS

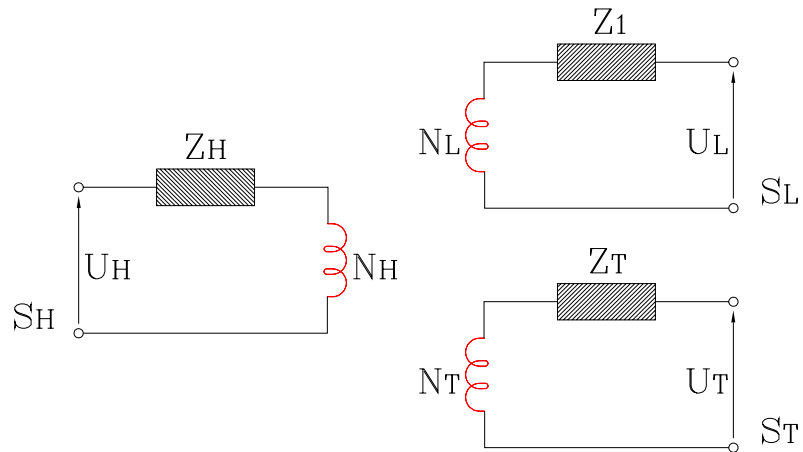


FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO TRANSFORMADOR POR FASE

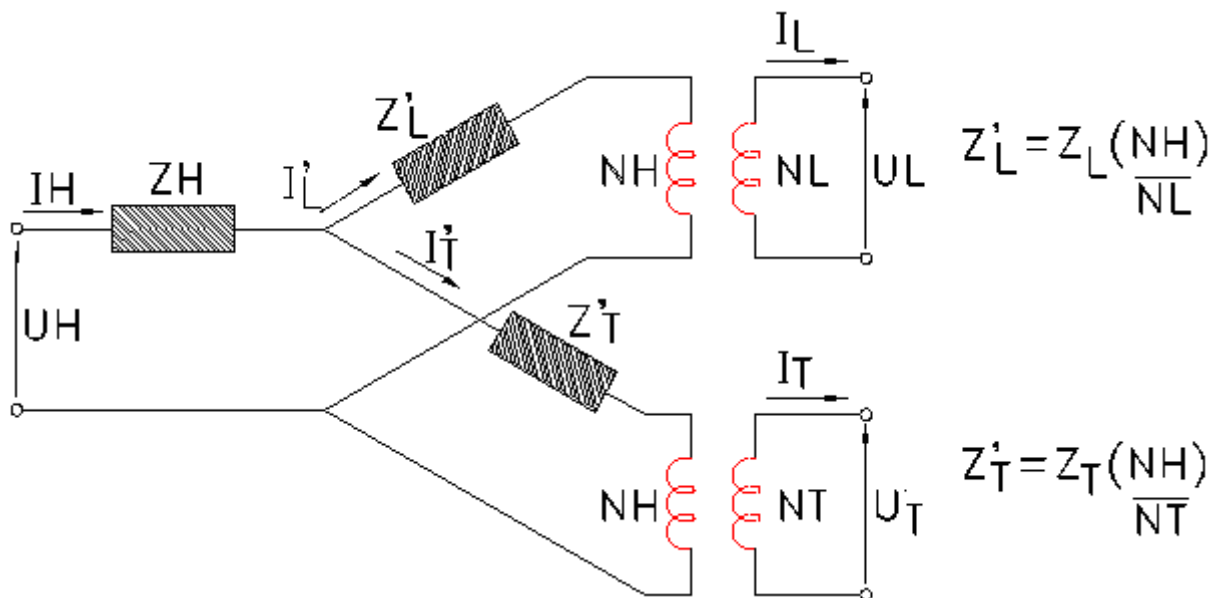


FIGURA 6 - CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DO TRANSFORMADOR DE TRÊS ENROLAMENTOS, REFERIDO AO LADO H

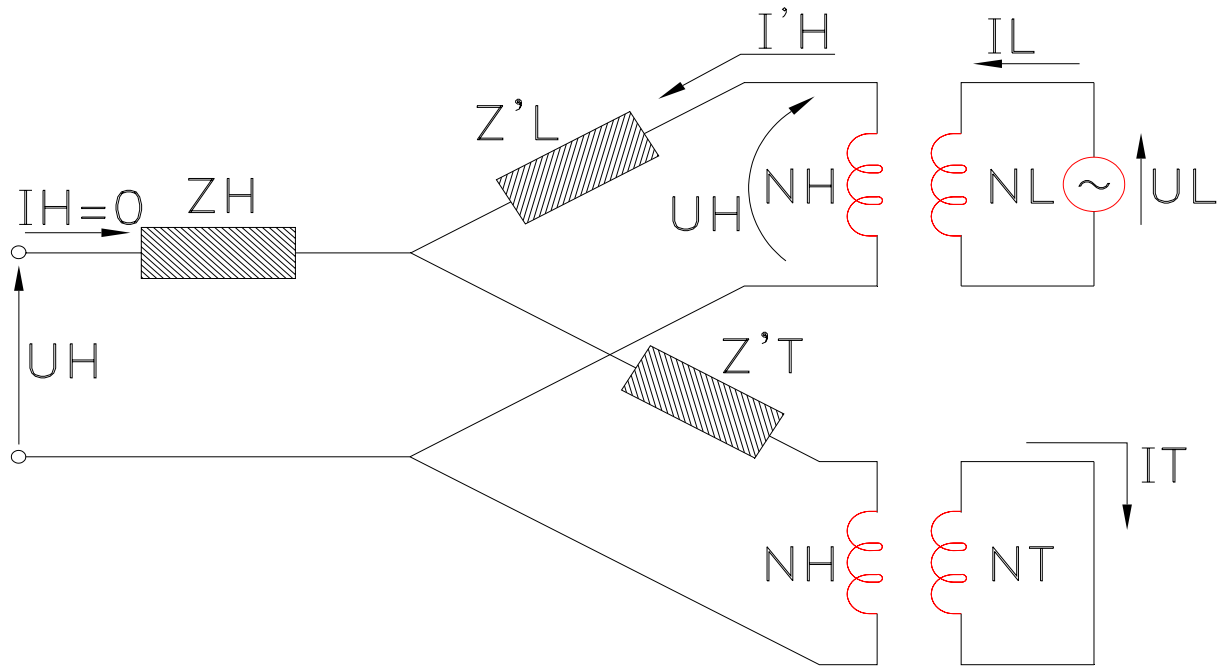


FIGURA 7 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA DETERMINAR A IMPEDANCIA

$$\dot{Z}_{LT}$$

No circuito da FIGURA 7 tem-se:

$$\frac{U_H}{U_L} = \frac{N_H}{N_L} \dots\dots\dots (9)$$

$$I_H \cdot N_H = I_L \cdot N_L \dots\dots\dots (10)$$

$$\dot{Z}_{LT} = \frac{U_L}{I_L} = \frac{\dot{U}_H \cdot \frac{N_2}{N_1}}{I_H \frac{N_1}{N_2}} = \frac{U_H}{I_H} \cdot \left(\frac{N_L}{N_H}\right)^2 \dots\dots\dots (11)$$

Considerando-se ainda a FIGURA 7, tem-se:

$$\frac{\dot{U}_H}{\dot{I}_H} = \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 \dots\dots\dots (12)$$

resultando então:

$$\dot{Z}_{LT} = \left(\frac{N_L}{N_H}\right)^2 \cdot [\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3] \dots\dots\dots (13)$$

Todas as grandezas constantes das equações anteriores estão em valores absolutos ([V]), ([A]) e ([ohm]). Caso se queira adotá-los em valores percentuais, tem-se:

$$\dot{Z}_{HL} \% = \dot{Z}_H \% + \dot{Z}_L \% \dots\dots\dots (14)$$

$$\dot{Z}_{HT} \% = \dot{Z}_H \% + \dot{Z}_T \% \dots\dots\dots (15)$$

$$\dot{Z}_{LT} \% = \frac{S_L}{S_H} \cdot (\dot{Z}_L \% + \dot{Z}_T \%) \dots\dots\dots (16)$$

Na equação (14) toma-se como base U_H e S_H , na equação (15) toma-se também como base U_H e S_H , enquanto que na equação (16) toma-se como base U_L e S_L . Tem-se ainda:

$$\dot{Z}_H \% = \frac{1}{2} \cdot (\dot{Z}_{HL} \% + \dot{Z}_{HT} \% - \frac{S_H}{S_L} \cdot \dot{Z}_{LT} \%) \dots\dots\dots (17)$$

$$\dot{Z}_L \% = \frac{1}{2} \cdot (\frac{S_H}{S_L} \cdot \dot{Z}_{LT} \% + \dot{Z}_{HL} \% - \dot{Z}_{HT} \%) \dots\dots\dots (18)$$

$$\dot{Z}_T \% = \frac{1}{2} \cdot (\dot{Z}_{HT} \% + \frac{S_H}{S_L} \cdot \dot{Z}_{LT} \% - \dot{Z}_{HL} \%) \dots\dots\dots (19)$$

Nas equações (17), (18) e (19) foram tomados como base U_H e S_H .

Nas equações anteriores tem-se:

U_H - tensão base do lado de tensão superior (High - H).

U_L - tensão base do lado de tensão inferior (Low - L).

U_T - tensão base do lado do terciário (Tertiary - T).

S_H - potência base do lado de tensão superior (High - H).

S_L - potência base do lado de tensão inferior (Low - L).

S_T - potência base do lado do terciário (Tertiary - T).

2.4 - CABOS OU LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os cabos e/ou linhas de transmissão são representados através de seu circuito equivalente a parâmetros concentrados de acordo com a FIGURA 8 a seguir. Nesta FIGURA tem-se:

R - resistência do cabo ou linha de transmissão.

X_L - reatância indutiva do cabo ou linha de transmissão.

X_C - reatância capacitiva do cabo ou linha de transmissão.

Existem outros modelos de cabos e linhas de transmissão no programa MicroTran^R, porém, para fins de análise de conversores, o modelo apresentado é suficiente.

2.5 - SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA UTILIZADOS EM CONVERSORES

Diodos, Tiristores e Transistores são os semicondutores de potência que podem ser utilizados no programa MicroTran^R.

Os diodos são elementos que entram em condução ao ficarem submetidos a uma tensão anodo-catodo positiva e bloqueiam quando a corrente reversa atingir um valor pré-determinado. Já os tiristores (retificadores controlados de silício SCR) têm a mesma situação de bloqueio dos diodos, porém a sua entrada em condução, normalmente irá depender da existência de um pulso de gatilho e de uma tensão anodo-catodo positiva. Os transistores comportam-se como os tiristores, a exceção de que o bloqueio dos mesmos ocorre simplesmente com a eliminação do pulso de gatilho (ou base).

Os semicondutores de potência serão representados por chaves ideais e as quedas de tensão anodo-catodo correspondentes, por resistores ligados em serie com os mesmos.

Este mesmo tipo de representação é usado para chaves convencionais (disjuntores e seccionadores).

2.6 - MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA

As máquinas de corrente contínua podem ser representadas por uma fonte de corrente constante para um determinado valor de corrente de carga (principalmente em um período de 12 (doze) ciclos de duração de uma falta) ou por uma fonte de tensão. Em qualquer caso deve-se levar em conta as indutâncias e resistências de armadura, conforme mostra a FIGURA 9.

Na FIGURA 9 tem-se:

R_A - resistência do circuito de armadura ([ohm]).

L_A - indutância do circuito de armadura ([mH]).

E_{DC} - força eletromotriz induzida na armadura ([V]).

I_{DC} - corrente de armadura, correspondente ao conjugado da carga.

2.7 - ELEMENTOS R, L E C

Os elementos R, L e C que compõem o sistema elétrico serão representados da forma convencional utilizada em modelagens de sistemas elétricos.

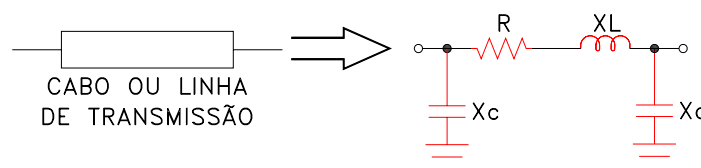


FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DE CABOS E LINHAS DE TRANSMISSÃO

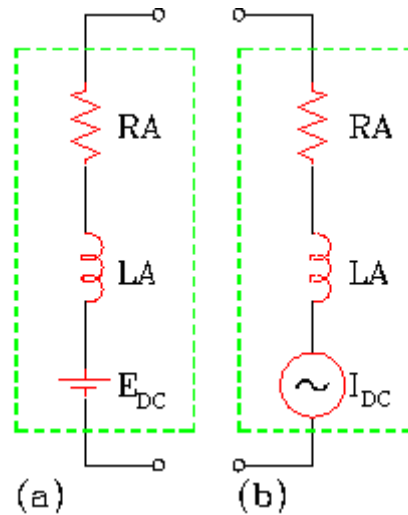


FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA

3 - BIBLIOGRAFIA

- [1] - DOMMEL, H.W.; MARTI, J.R.; MARTI, L.; DOMMEL, I.I.: “Microtran Transients Analysis Program for Personal Computers”, Microtran Power System Analysis Corporation - Vancouver, Canada, January 1990.