



GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA.



GSI N°.: ART063-09 - CD 382-09

SELEÇÃO DO ÂNGULO DE DISPARO (α) NO CÁLCULO DA POTÊNCIA NECESSÁRIA A SER FORNECIDA PELO COMPENSADOR ESTÁTICO

João Roberto Cogo

Revisão 0 - Emissão Inicial.

Documentos de Referência: ART364-08 - CD 311-08

Páginas: capa+ 13 Nº pág inicial 1 Nº pág final 13

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					

O comportamento de um reator controlado por tiristores face às solicitações impostas pela carga, é regido por um sistema de controle, através da escolha adequada dos ângulos de disparo dos tiristores. Uma maneira de se calcular o ângulo de disparo conveniente à uma determinada condição de carga, é explicada à seguir.

Considere o sistema elétrico dado na FIGURA 1 a seguir.

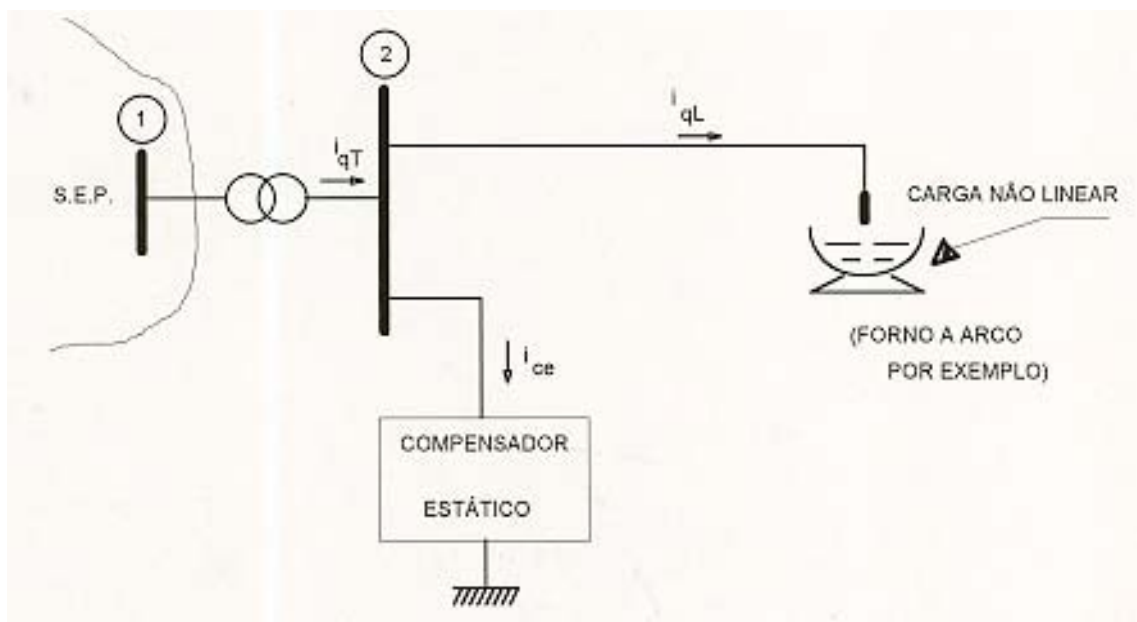


FIGURA 1 - SISTEMA EM ANÁLISE

O compensador estático em análise está mostrado na FIGURA 2.

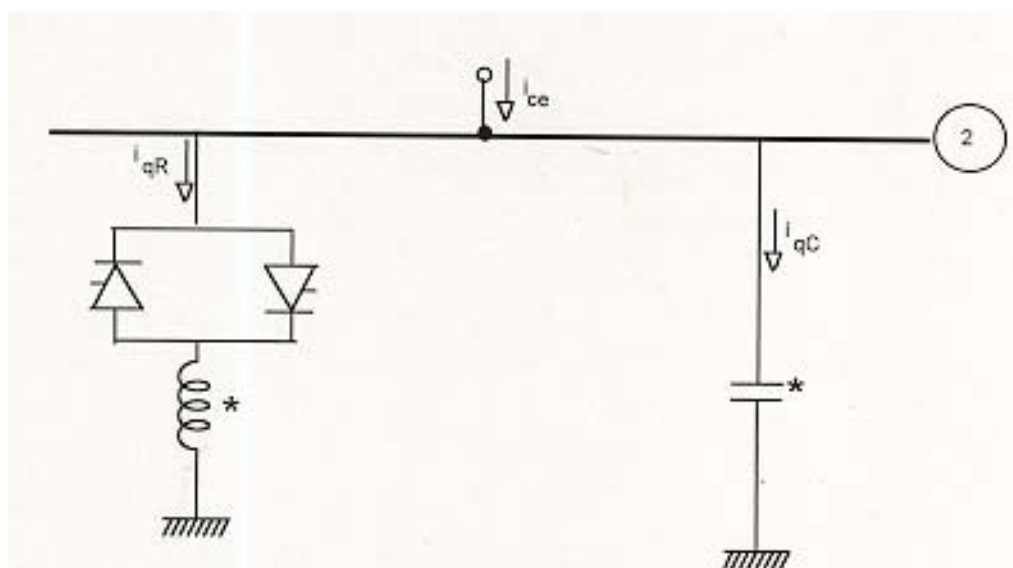


FIGURA 2 - COMPENSADOR ESTÁTICO A SER UTILIZADO NO SISTEMA DA FIGURA 1.

* Equipamento normalmente isolado.

Nota-se que o maior valor de tensão na barra 2 ocorre quando a carga estiver desconectada do sistema e os tiristores do compensador bloqueados.

O circuito mostrado na FIGURA 3, ilustra o sistema elétrico de suprimento de energia mostrado na FIGURA 1 representada pelo seu equivalente de THEVENIN.

Para as análises subseqüentes desprezou-se efeito da parte real das correntes, na tensão e também foi desconsiderando a componente resistiva da impedância do sistema. Dessa forma, se o objetivo for manter a tensão no barramento 2 em um valor igual à U_{REF} , então pode-se escrever as seguintes equações:

- para $U_{21} = U_{REF}$ deve-se ter:

$$I_{qT1} = 0 \quad (1)$$

- para $U_{21} \neq U_{REF}$ deve-se ter:

$$I_{qT1} = \frac{U_{21} - U_{REF}}{X_{TH}} \quad (2)$$

Sendo

X_{TH} - O valor do equivalente de Theveniu “visto” de barra 2;

U_{REF} - Valor da tensão a ser controlada na barra 2;

U_{21} - Tensão atual na barra 2 a frequência fundamental;

I_{qR1} - Corrente através do reator na frequência fundamental;

I_{qT1} - Corrente no sistema de suprimento de energia.

Na frequência fundamental a FIGURA 1 torna-se, em termos de diagrama de impedâncias, a FIGURA 3 a seguir:

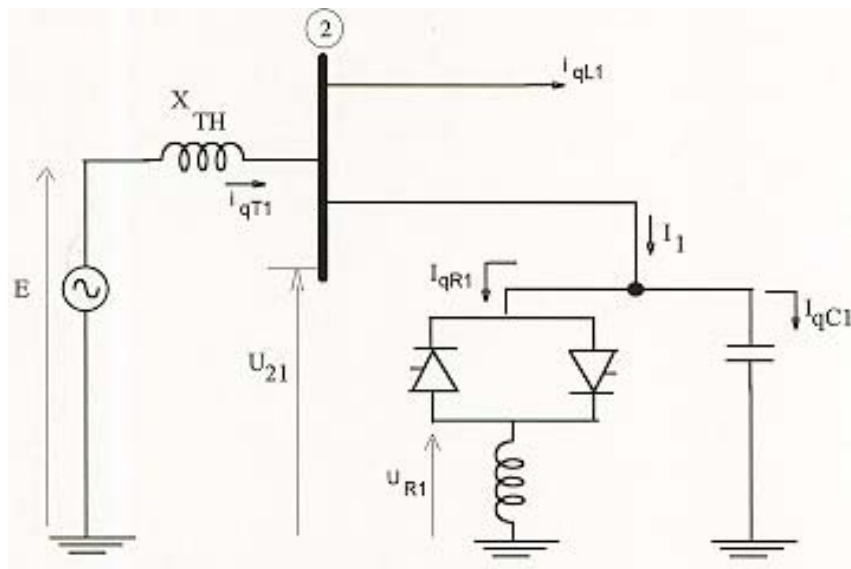


FIGURA 3 - SISTEMA ALIMENTADOR E BARRAMENTO COM COMPENSADOR ESTÁTICO DO TIPO REATOR CONTROLADO POR TIRISTORES E CAPACITOR FIXO.

Para um ângulo de disparo qualquer a forma de onda de corrente I_q em função do tempo no reator controlado por tiristores, relativamente, a tensão aplicada ao mesmo está mostrada na FIGURA 4.

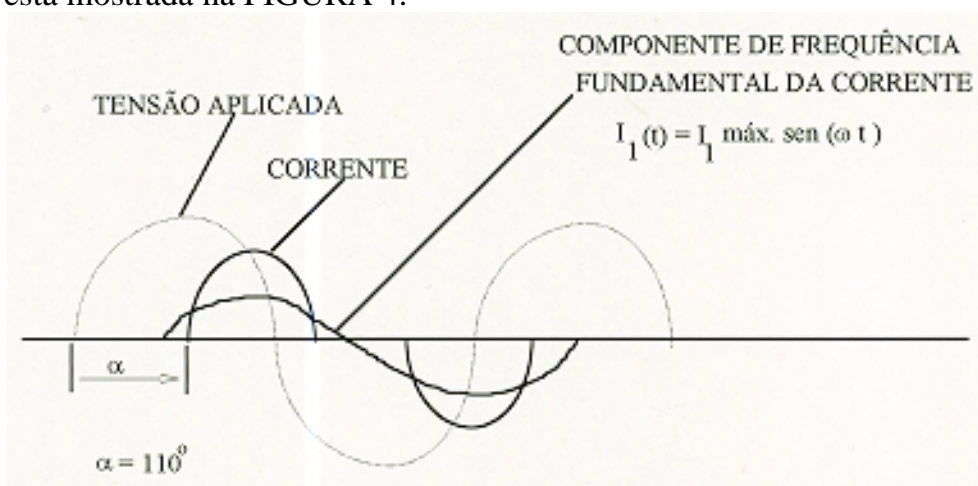


FIGURA 4 - FORMAS DE ONDA DA TENSÃO E CORRENTE NO COMPENSADOR ILUSTRADO NAS FIGURAS 2 E 3.

O valor máximo do componente fundamental da corrente que passa pelo reator (vide FIGURA 2) é dado, em função de α , por:

$$I_{\max}(\alpha) = \frac{U_{\max}}{\omega L} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \text{sen}(2\alpha) \right] \quad (3)$$

O valor eficaz da corrente fundamental é dado por:

$$I_1 = \frac{I_{1\max}(\alpha)}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Como o valor eficaz da tensão na barra 2 na frequência fundamental é dado por:

$$U_{21} = \frac{U_{1\max}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

e a reatância indutiva na frequência fundamental é:

$$X_R = \omega L \quad (6)$$

tem-se:

$$I_{\max} = \frac{U_{1\max}}{X_R} = \frac{\sqrt{2}}{X_R} \cdot U_2 \quad (7)$$

Onde:

U_{\max} - valor de pico da tensão da fonte na frequência fundamental;

U_{21} - valor de RMS da tensão da fonte na barra 2 na frequência fundamental;

X_R - reatância do reator à frequência fundamental da rede.

Portanto, em regime permanente, o valor eficaz da corrente, a frequência fundamental $I_1(\alpha)$ que flui através do reator é dada por:

$$I_1(\alpha) = \frac{U_{21}}{\pi \cdot X_R} \cdot [2 \cdot (\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] \quad (8)$$

O reator deve ser dimensionado para compensar a máxima tensão que pode aparecer na barra. Assim, o cálculo do reator deverá levar em conta o valor eficaz da máxima tensão que pode ocorrer no barramento. A máxima tensão que ocorre no barramento onde deve se instalar um compensador estático (barra 2 da FIGURA 3) acontece na seguinte situação.

- reator desconectado (ângulo de disparo em 180°)
- toda a carga desligada
- todos os bancos de capacitores ligados aos barramentos (barra 2 no caso da FIGURA 3)

Com estas condições tem-se o circuito da FIGURA 3 reduzido aquele ilustrado na FIGURA 4.

Da FIGURA 4, a tensão máxima na barra 2, em módulo, é dada por:

$$U_{APM} = \frac{U_o}{X_C - X_{TH}} \cdot X_C \quad (9)$$

O reator controlado por tiristores, que compõe o compensador estático, deve agir de modo a impor um ângulo de disparo de modo que a tensão na barra (barra 2 da FIGURA 3) onde está o referido equipamento deverá atingir o valor de referência (U_{REF}). A FIGURA 5 ilustra.

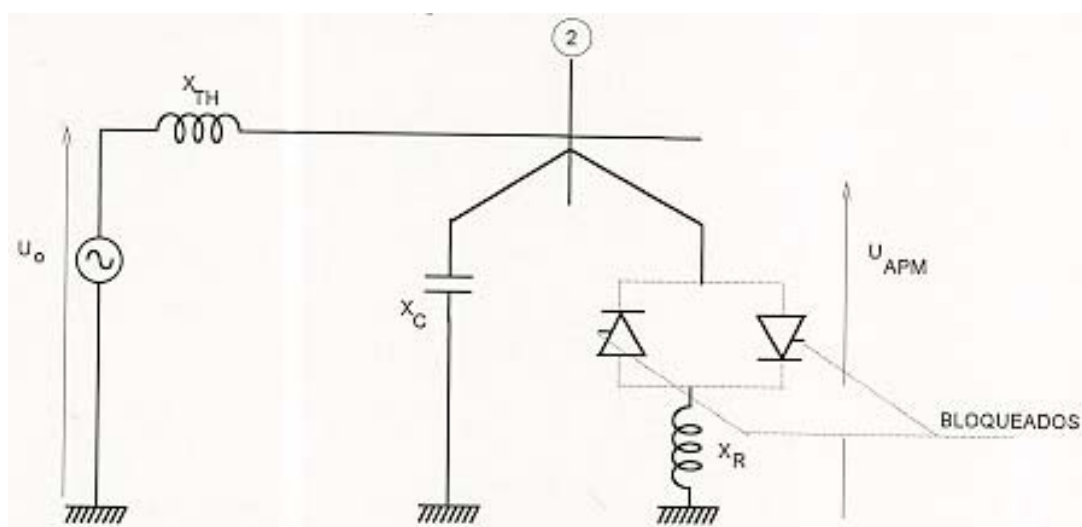


FIGURA 4 - DETERMINAÇÃO DA MÁXIMA TENSÃO ONDE O COMPENSADOR ESTÁTICO SERÁ INSTALADO

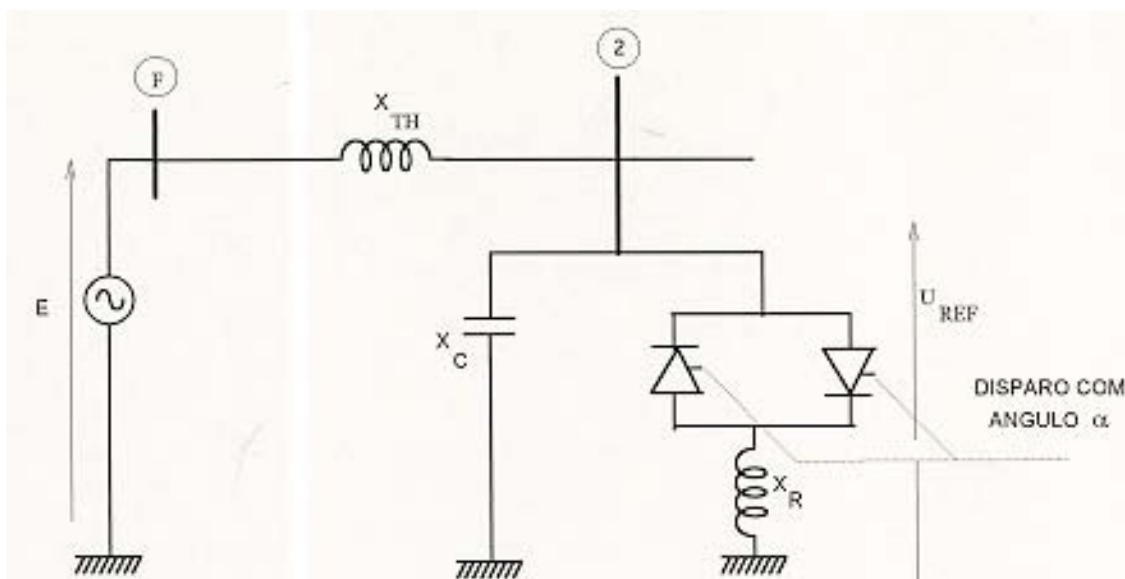


FIGURA 5 - OBTENÇÃO DA TENSÃO DESEJADA

Da FIGURA 5 nota-se que o desbloqueio dos pulsos de disparo, levando-se o ângulo α ao valor desejado, deverá fazer a tensão na barra 2 chegar ao valor desejado (U_{REF}) no caso.

A condição para obter, nestas condições - sem carga - o valor de tensão de referência deve ser feito, normalmente, para $\alpha = 90^\circ$.

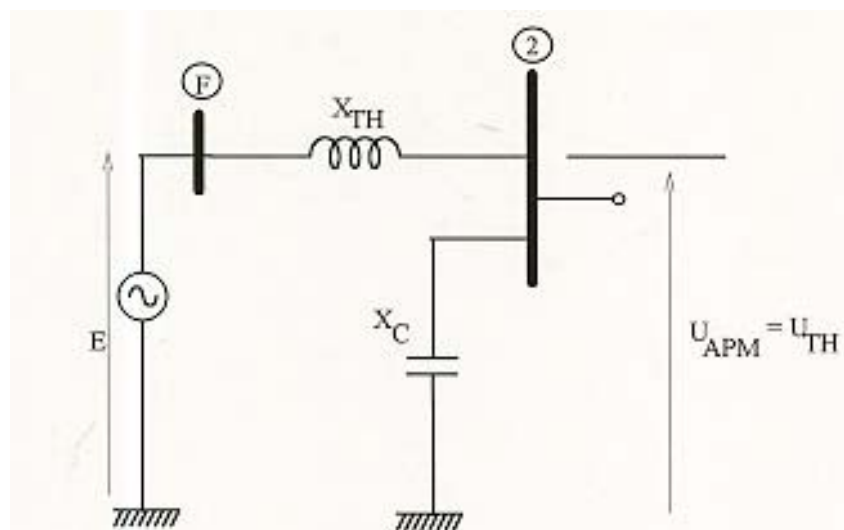
O cálculo da tensão de referência pode ser feito usando-se o Teorema de Thevenin, onde o valor da impedância equivalente de Thevenin é obtido através do paralelismo entre X_C e X_{TH} .

Da FIGURA 6.b, tem-se:

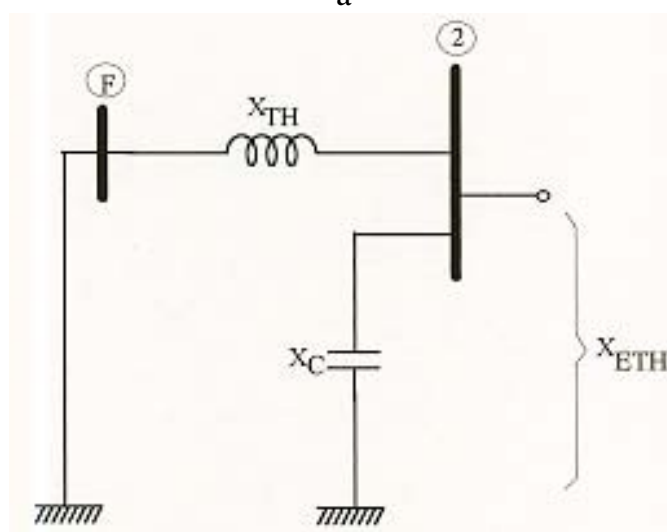
$$X_{ETH} = \frac{X_{TH} \cdot X_C}{X_C - X_{TH}} \quad (10)$$

Desta forma, a partir da FIGURA 6.c, pode-se escrever, que:

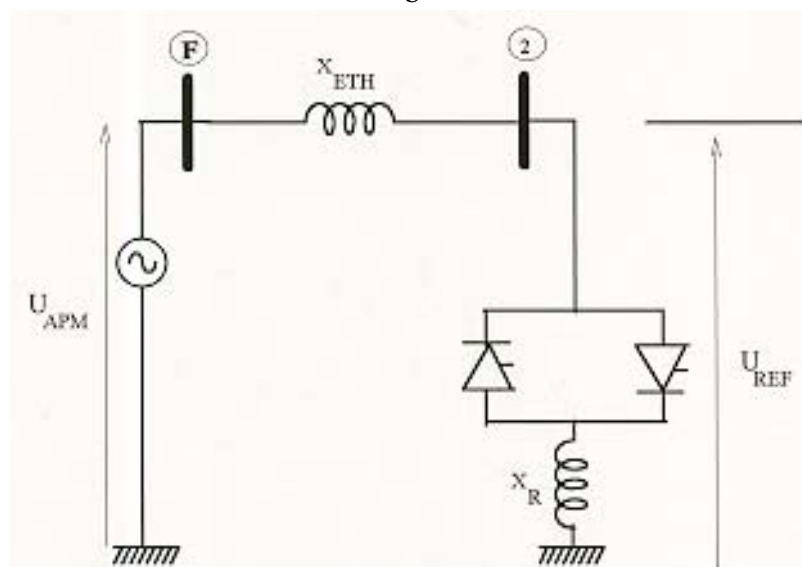
$$U_{REF} = \frac{U_{APM}}{X_{ETH} + X_R} \cdot X_R \quad (11)$$



- a -



- b -



- c -

FIGURA 6 - SEQUÊNCIA PARA O CÁLCULO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA

2 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO 1

Com a finalidade de apresentar alguns dos resultados obtidos escolheu-se o sistema mostrado na FIGURA 7, que corresponde às instalações de um sistema elétrico industrial [1].

O sistema de compensação apresenta as seguintes características:

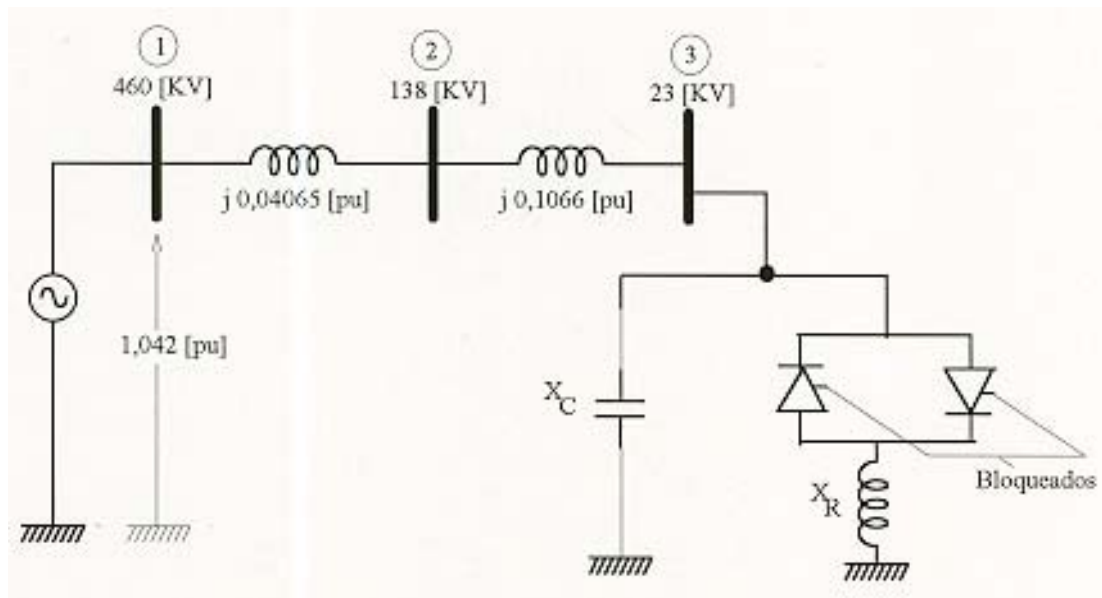
- um banco de reatores de 81 [MVar]
- um banco de capacitores fixos, totalizando 75 [MVar]
- perdas estimadas no compensador, na ordem de 0,6% da potência nominal do banco de reatores.

SOLUÇÃO:

CÁLCULO DE U_{APM} :

Para o cálculo desta tensão (U_{APM}), deve-se supor a condição extrema em que a carga e o reator encontram-se desligados, porém o banco de capacitores permanece em operação. Desprezando-se as resistências, essa situação pode ser representada pelo circuito da FIGURA 7, da qual se pode escrever-se que:

$$U_{APM} = \frac{U_o}{X_C - X_{TH}} \cdot X_C \quad (12)$$



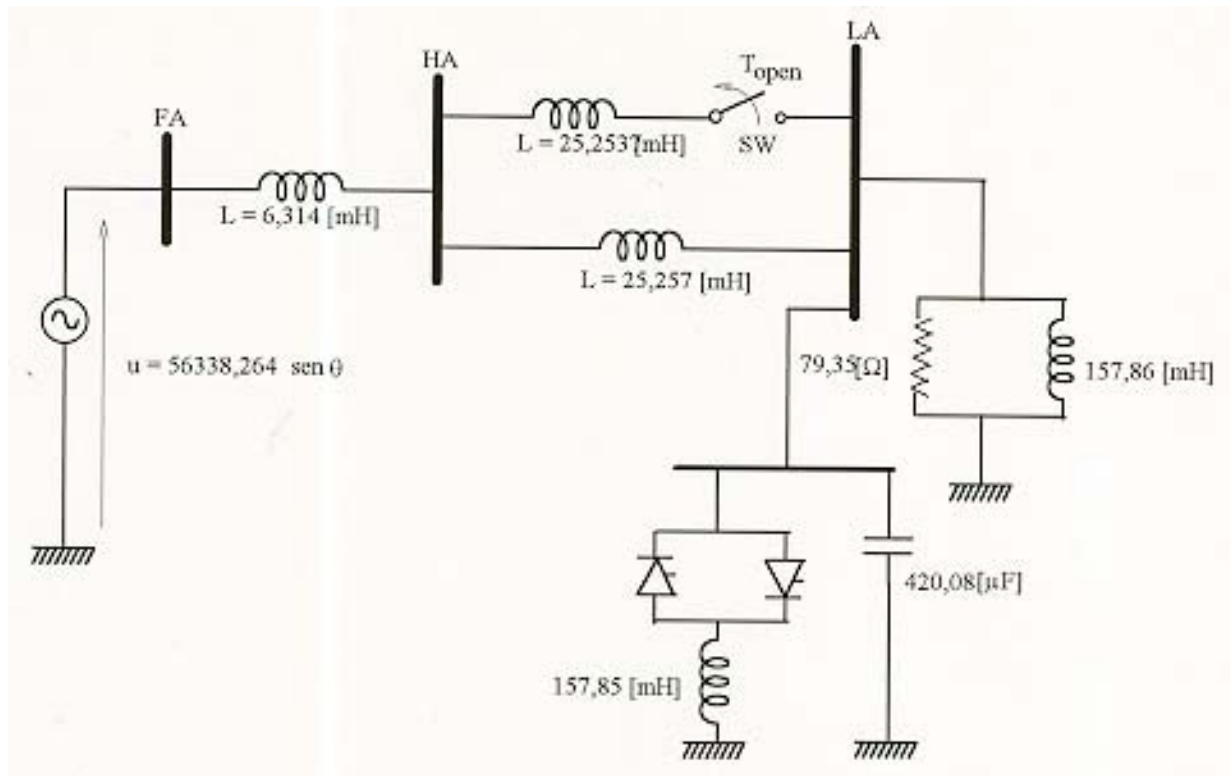


FIGURA 7 - SISTEMA INDUSTRIAL ESCOLHIDO PARA ESTUDO (BASE = 100 [MVA])

a - DIAGRAMA UNIFILAR

b - DIAGRAMA UNIFILAR A SER USADO NA ANÁLISE

Da FIGURA 7.a. tem-se:

$$U_o = 1,042 \text{ [pu]}$$

e

$$X_C = \frac{1^2}{0,75} = 1,335 \text{ [pu]} \quad (\text{reatância do banco de capacitores})$$

$$X_{TH} = 0,04065 + 0,1066 = 0,14725$$

Portanto com base na expressão (12) tem-se:

$$U_{APM} = \left[\frac{1,042 \cdot 1,335}{0,14725 - 1,335} \right] = 1,171 \text{ [pu]}$$

O compensador, segundo as especificações, absorve a potência (na base de 100 [MVA]) de:

$$S_r = P_r + jQ_r = 0,06Q_r + jQ_r = 0,00486 - j0,81 \text{ [pu]} = 81,0015$$

$$Z_{Rpu} = \frac{(U_{pu})^2}{S_{Rpu}^*} = 0,0074 + j1,235 \text{ [pu]}$$

A FIGURA 7.b. é equivalente a FIGURA 7.a. onde entre as barras 2 e 3 colocou-se dois transformadores e ao invés das grandezas que compõe o circuito estarem em [pu] foram passadas para [mH] e [μ F] visando a simulação do circuito em programas de cálculo de transistores.

3 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO 2

Verificar se o compensador utilizado é suficiente para controlar a máxima tensão que pode ocorrer no barramento.

Para resolver este problema, a primeira fase seria calcular o valor de X_R ideal, ou seja, a reatância do reator para $\alpha=90^\circ$, que seja capaz de compensar a máxima tensão do barramento.

A determinação do valor de X_R pode ser feita diretamente da equação (11), fazendo-se que a tensão no barramento onde está o compensador seja de 1.0 [pu].

$$U_{REF} = 1,0$$

Logo, a partir da equação (11) pode-se escrever:

$$U_{REF} \cdot (X_{ETH} + X_R) = U_{APM} \cdot X_R \quad (13)$$

ou ainda com base nas equações (13) e (10) pode-se escrever:

$$X_R = \frac{X_{ETH}}{U_{APM} - U_{REF}} = \frac{\frac{X_{TH} \cdot X_C}{X_C - X_{TH}}}{U_{APM} - U_{REF}}$$

Substituindo-se os valores tem-se:

$$X_R = \frac{0,14725 \cdot 1,333}{1,333 - 0,14725} = 0,9680$$

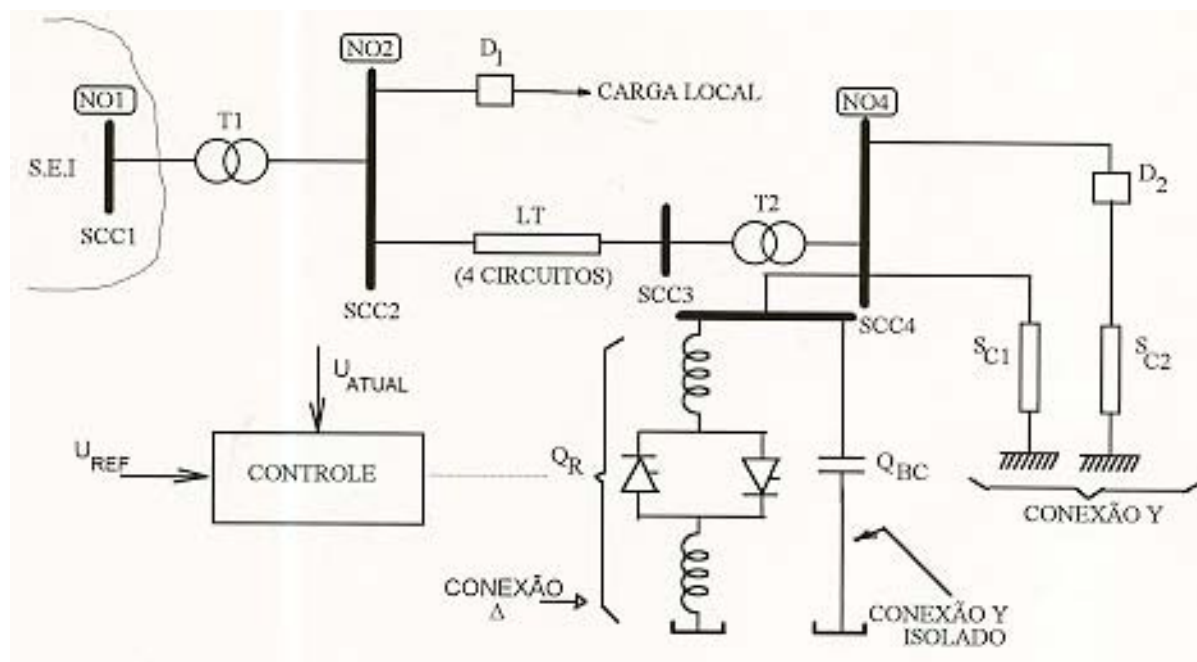
ou seja:

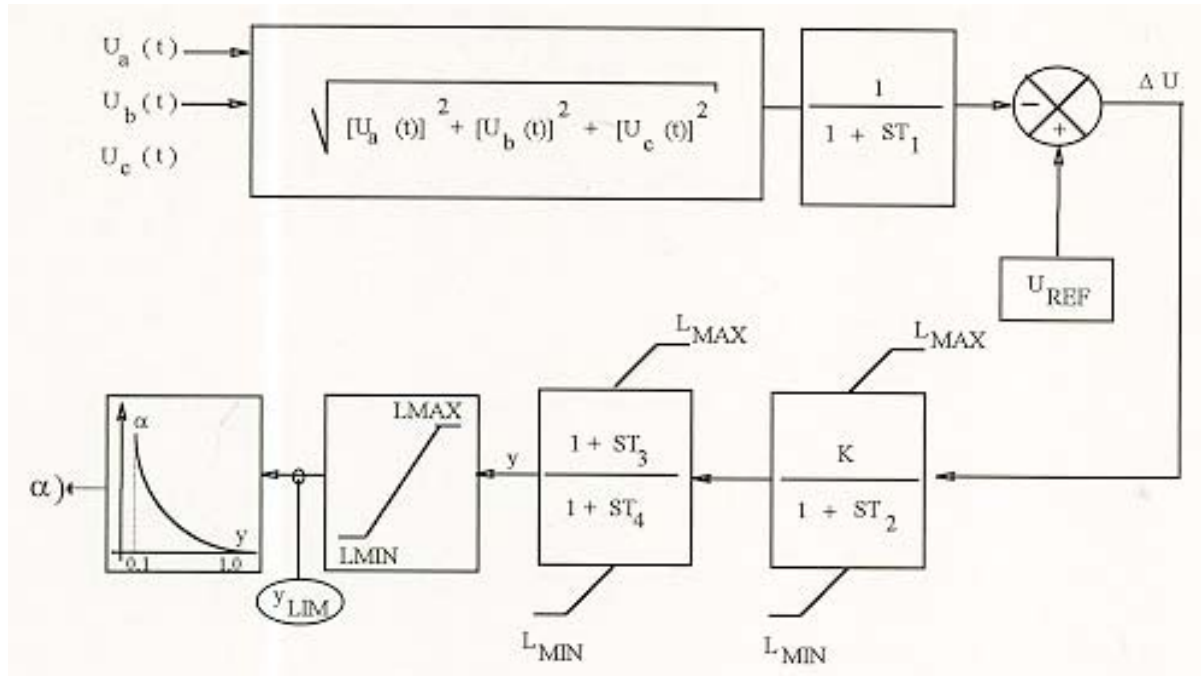
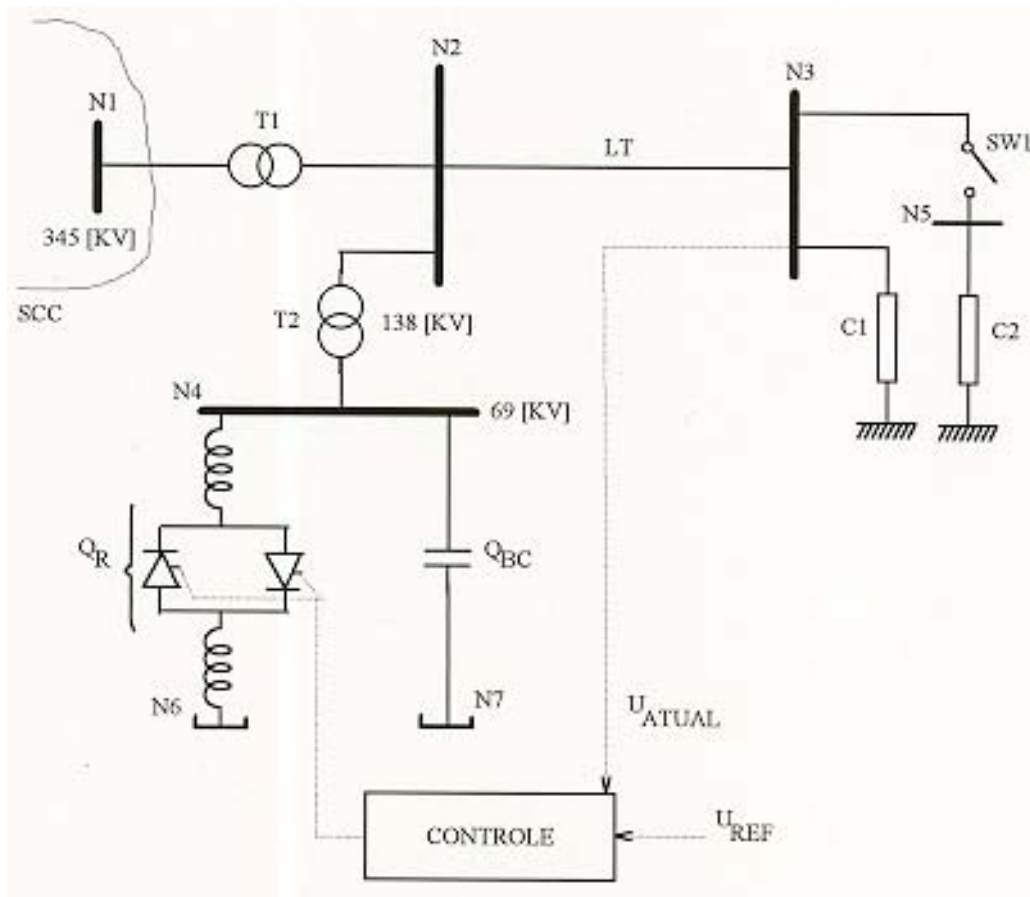
$$Q_R \text{ ideal} = \frac{1^2}{0,968} = 1,033 \text{ [pu]} \cong 103,3 \text{ [MVAr]}$$

É evidente, então, que o reator utilizado, de 81 [MVAr], não será capaz de compensar a máxima tensão a que o barramento pode ficar sujeito.

Referência Bibliográfica

- [1] Análise, modelagem e simulação de fontes e fluxo harmônico em sistemas elétricos. Nilson Luiz Vital Goes - Tese de Mestrado - Escola Federal de Engenharia de Itajubá-EFEI-1981.





Constantes características de um compensador:

$$K = 5,0$$

$$T_1 = 0,001 \quad [\text{Seg}]$$

$$T_2 = 0,04 \quad [\text{Seg}]$$

$T_3 = 0,1$ [Seg]
 $T_4 = 1,0$ [Seg]
 $L_{MAX} = 1,0$ [pu]
 $L_{MIN} = 0,1$ [pu]

