

BC/GSP/12

VI SEMINÁRIO NACIONAL DE
PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO IV

SISTEMAS DE POTÊNCIA

(G S P)

COMPORTAMENTO DOS COMPENSADORES ESTÁTICOS A
TIRISTORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS TRIFÁSICOS
DESEQUILIBRADOS

Autores: Ricardo Ferreira Pinheiro
José Carlos de Oliveira
João Roberto Cogo

Entidade: EFEI

Balneário Camboriú - SC - Brasil
1981

1 - COMO DEVEM SE COMPORTAR OS COMPENSADORES PARA DISTRIBUIR EQUITATIVAMENTE AS CARGAS ENTRE AS TRÊS FASES DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Para fins práticos pode-se considerar como equilibradas as tensões no barramento de acoplamento comum entre a concessionária e o sistema industrial (o P.A.C.). A função do compensador, cuja matriz de admitância nodal trifásica será denotada por $Y_{=C}$, será fazer parecer, sob o ponto de vista do sistema de potência, com que sua carga, constituída pelo conjunto $Y_{=C} + Y_{=L}$, seja equilibrada. Em outras palavras, o compensador deverá se comportar de modo que a superposição da sua matriz de admitância nodal trifásica, com a matriz de admitância nodal trifásica de carga desequilibrada, resulte em uma matriz de admitância equilibrada. A FIGURA 1.1 ilustra um sistema elétrico industrial onde o compensador está conectado em Δ e a carga está representada pela sua conexão Δ equivalente. As tensões na barra de carga serão equilibradas e expressas na forma:

$$\underline{V} = |\underline{V}| \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

onde em (1) tem-se:

\underline{V} - vetor tensões das fases 1, 2 e 3.

$|\underline{V}|$ - módulo das tensões de fases (sistema equilibrado para tensões).

$\alpha = 1 / 120^\circ$.

V_1, V_2 e V_3 - tensões das fases 1, 2 e 3.

Em termos de componentes simétricas, a corrente na carga será dada por;

$$\underline{I}^{(012)} = \underline{\underline{A}}^{-1} \underline{I} = \underline{\underline{A}}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{(0)} \\ I_1^{(1)} \\ I_1^{(2)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

onde na equação (2) tem-se:

$\underline{I}^{(012)}$ - vetor de componentes das correntes de seqüências nula, positiva e negativa

$\underline{\underline{A}}^{-1}$ é a matriz de transformação e é dada pela equação (3).

$$\underline{\underline{A}}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

\underline{I} - vetor das correntes de linha que alimentam a carga.

I_1, I_2 e I_3 - correntes de linha que alimentam as cargas das fases 1, 2 e 3.

$I_1^{(0)}, I_1^{(1)}$ e $I_1^{(2)}$ - componentes de seqüência nula, positiva e negativa das correntes de linha que alimentam a carga da fase 1.

As correntes de linha que alimentam a carga, podem ser calculadas por:

$$\underline{I} = \underline{Y}_L \underline{V} \dots\dots\dots(4)$$

onde:

$$\underline{Y}_L = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \dot{y}_{11} & \dot{y}_{12} & \dot{y}_{13} \\ \hline \dot{y}_{21} & \dot{y}_{22} & \dot{y}_{23} \\ \hline \dot{y}_{31} & \dot{y}_{32} & \dot{y}_{33} \\ \hline \end{array}$$

sendo \dot{y}_{ij} ($i \neq j$) a admitância existente entre as fases i e j da carga, com sinal trocado, e \dot{y}_{ii} a soma das admitâncias conectadas a fase i da carga.

Assim, substituindo (4) em (2), vem:

$$\underline{I}^{(012)} = \underline{A}^{-1} \underline{Y}_L \underline{V} \dots\dots\dots(5)$$

Como nos sistemas de média e alta tensão as cargas e equipamentos são normalmente conectados através de transformadores ΔY , é possível desprezar a componente de corrente de seqüência zero, já que esta não existirá na maioria dos casos. Sendo assim, a componente desequilibrante será apenas a corrente de seqüência negativa. Portanto, a condição necessária para o funcionamento desejado do compensador, isto é, para que o compensador “anule” o desequilíbrio da carga, será tal que, a corrente de linha fornecida pelo sistema de potência seja constituída apenas da componente de seqüência positiva, ou:

$$\dot{I}^{(2)} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

Expandindo (5), levando em consideração que na matriz de admitância nodal $\dot{y}_{ik} = \dot{y}_{ki}$, a condição expressa em (6) conduz a:

$$(\dot{y}_{11} + 2\dot{y}_{32}) + \alpha(\dot{y}_{22} + 2\dot{y}_{13}) + \alpha^2(\dot{y}_{33} + 2\dot{y}_{12}) = 0 \dots\dots\dots(7)$$

com:

$$\dot{y}_{ii} = -\sum_{a=1}^3 \dot{y}_{ia} \text{ e } \dot{y}_{ik} = -\dot{Y}_{ik}$$

Nota-se que \dot{Y}_{ik} é a admitância entre as fases i e k da carga mais o compensador e \dot{y}_{ik} é o elemento “ik” da matriz de admitância nodal. Desta forma a condição de equilíbrio será:

$$\frac{3}{2} \left(\dot{Y}_{12} + \dot{Y}_{13} - 2 \dot{Y}_{32} \right) + j \frac{3\sqrt{3}}{2} \left(\dot{Y}_{12} - \dot{Y}_{13} \right) = 0 \dots\dots\dots (8)$$

Substituindo as admitâncias em função de condutâncias e susceptâncias e equacionando as partes real e imaginária separadamente, vem:

$$\left. \begin{array}{l} G_{12} + G_{13} - 2 G_{23} - \sqrt{3} (B_{12} - B_{13}) = 0 \\ \text{e} \\ \sqrt{3} (G_{12} - G_{13}) + B_{12} + B_{13} - 2 B_{23} = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

O compensador deverá satisfazer as duas condições, expressas em (9), que levarão o sistema elétrico a parecer simetricamente carregado para o sistema alimentador.

2 - COMPENSAÇÃO DE CARGAS MONOFÁSICAS FASE-FASE EM UM SISTEMA TRIFÁSICO

Considere uma carga monofásica aplicada entre as fases 2 e 3 (a escolha é arbitrária) de um sistema trifásico. Como o compensador é puramente reativo, vem que:

$$G_{12} = G_{13} = 0$$

e, portanto, de (9):

$$\left. \begin{array}{l} -2 G_{23} + \sqrt{3} (B_{13}^c - B_{12}^c) = 0 \\ B_{12}^c + B_{13}^c - 2 B_{23} = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

onde o superíndice “c” indica susceptâncias do compensador.

A solução do sistema (10), dá:

$$\left. \begin{array}{l} B_{13}^c = \frac{1}{\sqrt{3}} G_{23} + B_{23} \\ B_{12}^c = B_{23} - \frac{1}{\sqrt{3}} G_{23} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

Com $B_{23}^c = 0$ e as outras susceptâncias do compensador dadas por (11), apenas a componente de corrente de seqüência positiva fluirá para a carga. De (5), esta componente resultará:

$$I^{(1)} = \frac{|\dot{V}_1|}{3} \left| (\dot{y}_{11} + \dot{y}_{22} + \dot{y}_{33}) - (\dot{y}_{12} + \dot{y}_{13} + \dot{y}_{23}) \right| \text{ ou}$$

$$I^{(1)} = \frac{|\dot{V}_1|}{3} \left| \dot{Y}_{12} + \dot{Y}_{23} + \dot{Y}_{31} \right|$$

Substituindo (11), vem:

$$I^{(1)} = \left| \dot{V}_1 \right| \left| G_{23} + j3B_{23} \right| \dots\dots\dots (12)$$

onde:

$I^{(1)}$ - é a corrente de linha

$|\dot{V}_1|$ - módulo da tensão fase-neutro na fase 1 da barra da carga

$G_{23} + jB_{23}$ - admitância da carga entre as fases 2 e 3

$G_{23} + j3B_{23}$ - carga estrela equilibrada equivalente

Aplicada esta correção, para eliminar o desequilíbrio, torna-se agora fácil efetuar a compensação para fazer com que o fator de potência torne-se unitário, e, de (12) pode-se notar que este objetivo será atingido adicionando-se ao compensador uma reatância equilibrada em delta de:

$$B_{f.p.u}^c = -B_{23}$$

Desta forma, o compensador resultará em:

$$\left. \begin{aligned} B_{12}^c &= -\frac{1}{\sqrt{3}} G_{23} \\ B_{23}^c &= -B_{23} \\ B_{31}^c &= +\frac{1}{\sqrt{3}} G_{23} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

A última função, a ser tratada, que também deverá ser desempenhada pelo compensador, é corrigir a regulação de tensão (o efeito do “flicker”). Isto será feito pela inclusão em (13) de um termo adicional cuja demonstração será aqui omitida e que pode ser encontrada na referência (1), e que é aproximadamente dada por:

$$B_d = \frac{1}{3X_1} \left| 1 - \sqrt{a^2 - G_T^2} X_1^2 \right| \dots\dots\dots (14)$$

onde

$$a = \left| \frac{\dot{E}}{\dot{V}} \right|$$

G_T - condutância equilibrada equivalente total

X_1 - reatância por fase do sistema externo de alimentação

E - tensão da fonte

\dot{V} - tensão desejada na barra da carga

3 - COMPENSAÇÃO DE CARREGAMENTO TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO

De forma análoga ao que foi feito para uma carga monofásica entre as fases 2 e 3, é possível determinar as susceptâncias de compensação para correção de desequilíbrio e fator de potência entre as outras duas fases, que serão dadas a seguir. A demonstração será omitida por ser totalmente análoga à desenvolvida para o caso da seção anterior. As expressões obtidas são:

a - Carregamento entre as fases 1 e 2:

$$\left. \begin{aligned} B_{12}^C &= -B_{12} + B_d \\ B_{23}^C &= \frac{G_{12}}{\sqrt{3}} + B_d \\ B_{31}^C &= -\frac{G_{12}}{\sqrt{3}} + B_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

b - Carregamento entre as fases 3 e 1:

$$\left. \begin{aligned} B_{12}^C &= \frac{G_{31}}{\sqrt{3}} + B_d \\ B_{23}^C &= -\frac{G_{31}}{\sqrt{3}} + B_d \\ B_{31}^C &= -B_{31} + B_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

Desta forma, a compensação completa será dada pelas expressões:

$$\left. \begin{aligned} B_{12}^C &= -B_{12} + (G_{31} - G_{23}) / \sqrt{3} + B_d \\ B_{23}^C &= -B_{23} + (G_{12} - G_{31}) / \sqrt{3} + B_d \\ B_{31}^C &= -B_{31} + (G_{23} - G_{12}) / \sqrt{3} + B_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

Estas são, portanto, as susceptâncias necessárias para compensar totalmente sob os pontos de vista de equilíbrio, regulação de tensão e correção de fator de potência, uma carga trifásica desequilibrada.

4 - REQUISITOS DO COMPENSADOR EM TERMOS DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS DAS CORRENTES DE CARGA

Considere-se novamente o sistema industrial ilustrado pela FIGURA 1.1. O vetor das tensões equilibradas no P.A.C. pode ser representado por (1).

Da FIGURA 1.1, pode-se ver que as correntes solicitadas pela carga são dadas por:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1\ell} &= \dot{I}_{12} - \dot{I}_{31} \\ \dot{I}_{2\ell} &= \dot{I}_{23} - \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{3\ell} &= \dot{I}_{31} - \dot{I}_{23} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

Em termos das admitâncias que constituem as cargas, pode-se reescrever (18) como segue:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1\ell} &= V \left| \dot{Y}_{12} (1 - \alpha^2) - \dot{Y}_{31} (\alpha - 1) \right| \\ \dot{I}_{2\ell} &= V \left| \dot{Y}_{23} (\alpha^2 - \alpha) - \dot{Y}_{12} (1 - \alpha^2) \right| \\ \dot{I}_{3\ell} &= V \left| \dot{Y}_{31} (\alpha - 1) - \dot{Y}_{23} (\alpha^2 - \alpha) \right| \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(19)$$

As componentes simétricas destas correntes serão dadas por (2) que, desenvolvida para \underline{I} dada por (19) resulta em:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\ell}^{(0)} &= 0 \\ \dot{I}_{\ell}^{(1)} &= V \left| \dot{Y}_{12} + \dot{Y}_{23} + \dot{Y}_{31} \right| \\ \dot{I}_{\ell}^{(2)} &= -V \left| \alpha^2 \dot{Y}_{12} + \dot{Y}_{23} + \alpha \dot{Y}_{31} \right| \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(20)$$

Desprezando a compensação da regulação de tensão, os critérios de ajuste do compensador em termos de componentes simétricas podem ser assim resumidos:

- 1 - Eliminação das componentes de seqüência negativa;
- 2 - Eliminação da parte reativa das componentes de seqüência positiva, isto é, correção do fator de potência.

Por analogia com (20), pode-se obter para as componentes simétricas das correntes do compensador as seguintes expressões:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_c^{(0)} &= 0 \\ \dot{I}_c^{(1)} &= j V(B_{12}^c + B_{23}^c + B_{31}^c) \\ \dot{I}_c^{(2)} &= -j V(\alpha^2 B_{12}^c + B_{23}^c + \alpha B_{31}^c) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

Dos critérios de ajuste do compensador podem ser tiradas as seguintes equações:

$$\dot{I}_e^{(2)} + \dot{I}_c^{(2)} = 0 \dots\dots\dots (22)$$

$$\text{Im} = \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right| + \dot{I}_c^{(1)} = 0 \dots\dots\dots (23)$$

Como $\dot{I}_\ell^{(2)}$ e $\dot{I}_c^{(2)}$ têm partes real e imaginária (22) pode ser assim dividida:

$$\text{Re} \left| \dot{I}_\ell^{(2)} \right| + \text{Re} \left| \dot{I}_c^{(2)} \right| = 0 \dots\dots\dots (24)$$

$$\text{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(2)} \right| + \text{Im} \left| \dot{I}_c^{(2)} \right| = 0 \dots\dots\dots (25)$$

onde Re e Im indicam, respectivamente, partes real e imaginária dos respectivos fasores:

Substituindo $\dot{I}_c^{(1)}$, $\text{Re} \left| \dot{I}_c^{(2)} \right|$ e $\text{Im} \left| \dot{I}_c^{(2)} \right|$, dadas por (21), em (23), (24) e (25), e resolvendo o sistema resultante para as susceptâncias do compensador, vem:

$$\begin{aligned} B_{12}^c &= \frac{1}{\sqrt{3}V} \left\{ \text{Re} \left| \dot{I}_\ell^{(2)} \right| - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right| - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(2)} \right| \right\} \\ B_{23}^c &= \frac{1}{\sqrt{3}V} \left\{ \text{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(2)} \right| - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right| \right\} \\ B_{31}^c &= \frac{1}{\sqrt{3}V} \left\{ -\text{Re} \left| \dot{I}_\ell^{(2)} \right| - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right| - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(2)} \right| \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

As equações (26) representam, portanto, as susceptâncias de compensação em termos das componentes simétricas de seqüência positiva e negativa da corrente de carga. Nelas pode-se identificar claramente as propriedades da compensação sob o aspecto das componentes seqüenciais. As três susceptâncias de compensação são igualmente proporcionais a fonte imaginária da corrente de seqüência positiva da carga, e são funções diferentes entre si da corrente de carga de seqüência negativa. As contribuições das correntes de seqüência positiva e negativa são independentes. Assim, o circuito que constitui o compensador (ver FIGURA 1.1) pode ser dividido em dois deltas independentes. Um equilibrado que provê a corrente reativa de seqüência positiva, e o outro, desequilibrado, destinado a suprir as necessidades da carga em termos de seqüência negativa. Assim, da fonte só será solicitada corrente ativa de seqüência positiva. A FIGURA 1.2 ilustra este conceito de compensação independente para as seqüências positiva e negativa.

Pelo uso das equações (20) e (26), é possível determinar expressões para as susceptâncias de cada um dos compensadores, que serão:

$$B_{12}^{c(1)} = B_{23}^{c(1)} = B_{31}^{c(1)} = -\frac{1}{3} (B_{12} + B_{23} + B_{31}) \dots\dots\dots(27)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{12}^{c(2)} &= -\frac{2}{3} B_{12} + \frac{1}{3} B_{23} + \frac{1}{3} B_{31} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{31} - G_{23}) \\ B_{23}^{c(2)} &= \frac{1}{3} B_{12} - \frac{2}{3} B_{23} + \frac{1}{3} B_{31} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{12} - G_{31}) \\ B_{31}^{c(2)} &= \frac{1}{3} B_{12} + \frac{1}{3} B_{23} - \frac{2}{3} B_{31} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{23} - G_{12}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(28)$$

Pode-se ver que somando (27) com (28) e acrescentando o termo da regulação de tensão B_d , chega-se a (17).

A introdução do termo correspondente à regulação em (27) e (28), é agora bastante simples. Para isto, em vez de se utilizar (23) como critério de compensação, esta equação deve ser substituída por uma outra que estabeleça queda de tensão nula entre a fonte e o P.A.C. Esta equação será:

$$\operatorname{Re} \left| (\dot{I}_\ell^{(1)} + \dot{I}_c^{(1)}) (R_1 + j X_1) \right| = 0 \dots\dots\dots(29)$$

onde R e X constituem a impedância equivalente por fase do sistema externo “vista” pelo sistema industrial em consideração. Desenvolvendo (29), sabendo-se que $\dot{I}_c^{(1)}$ é puramente imaginária, vem:

$$\frac{R_1}{X_1} R_e \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right| - \operatorname{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right| - I_c^{(1)} = 0 \dots\dots\dots(30)$$

As condições expressas em (24) e (25) continuam as mesmas. Destas duas equações e com auxílio de (30) e com o uso de (21), as susceptâncias de compensação podem novamente ser determinadas de forma semelhante àquela dada em (26). O mesmo resultado pode ser obtida diretamente de (26) pela substituição do

termo $-I_m \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right|$ por

$$\left| (R_1 / X_1) \operatorname{Re} \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right| - \operatorname{Im} \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right| \right|$$

Isto resultará em equações equivalentes às equações (27) e (28), nas quais, as susceptâncias do compensador de seqüência negativa ficarão inalteradas e as do compensador de seqüência positiva serão acrescidas do termo:

$$\frac{R_1}{3X_1} \frac{R_e \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right|}{V}$$

que corresponde a uma outra aproximação do termo B_d já definido na seção anterior. Assim, (27) passará a ser escrita:

$$B_{12}^{c(1)} = B_{23}^{c(1)} = B_{31}^{c(1)} = -\frac{1}{3} \left(B_{12} + B_{23} + B_{31} - \frac{R_1}{X_1} \frac{\operatorname{Re} \left| \dot{I}_\ell^{(1)} \right|}{V} \right) \dots \dots \dots (31)$$

5 - CONCLUSÕES

Expressar as susceptâncias dos compensadores controlados por tiristores em termos das componentes simétricas das correntes de carga, das susceptâncias da carga ou de qualquer outra variável do sistema, é muito importante para o desenvolvimento da estratégia de controle do compensador.

As expressões aqui deduzidas, as quais não constituem necessariamente a estratégia de controle de todos os compensadores, mas dão uma idéia generalizada deste processo, trazem como principal informação a possibilidade de “compensar” desequilíbrios em sistemas elétricos industriais, tornando-os equilibrados sob o ponto de vista da concessionária. Isto, associado à rapidez na resposta destes compensadores, torna-os adequados à compensação de cargas intermitentes como fornos e arco e laminadores. Também é interessante notar que a atuação do compensador não altera a potência ativa fornecida à carga, em condição de desequilíbrio, já que este apenas distribui igualmente entre as três fases do sistema a potência ativa solicitada pela carga.

Muitas vezes, por fatores econômicos, as compensações de potência reativa e de regulação de tensão não são feitas completamente. Equações semelhantes às aqui deduzidas, levando em consideração estes fatores, são simples de serem obtidas e podem ser encontradas na referência (1).

A divisão do compensador em suas unidades destinadas à seqüência positiva e negativa foi bastante elucidativa. É claro que na prática tal divisão não ocorre, pois o sistema de controle do compensador atua de uma forma completa, e não separadamente para as componentes de seqüência positiva e negativa. Entretanto, além do benefício didático trazido por esta metodologia, as expressões por ela obtidas podem dar uma idéia do grau de importância das componentes seqüenciais de corrente do compensador uma em relação à outra.

As expressões encontradas para as susceptâncias do compensador em termos das susceptâncias da carga, são as mesmas pelos dois métodos.

Finalmente, uma outra importante conclusão que pode ser tirada das expressões vistas é o fato de, em alguns casos, a carga solicitar uma compensação capacitiva em uma ou duas fases e indutiva na(s) outra(s). Isto é uma vantagem do compensador do tipo reator controlado por tiristores que, ao contrário de outros compensadores estáticos a tiristores, pode cumprir de forma igualmente satisfatória esta característica.

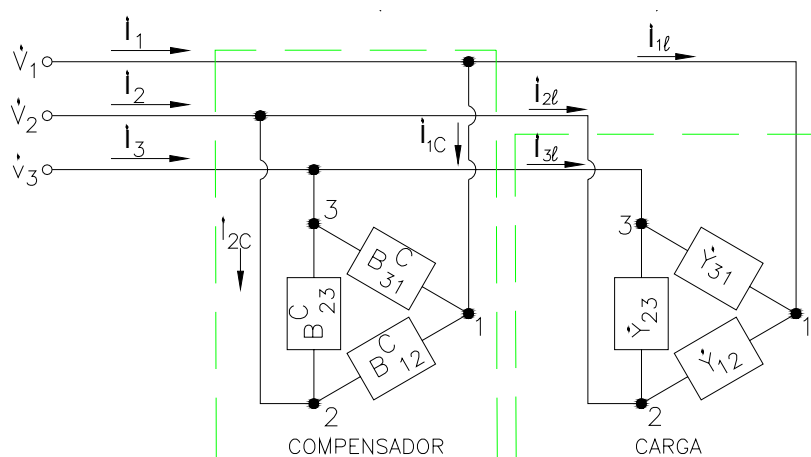


FIGURA 1.1 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA ONDE SÃO VISTOS UMA CARGA (COM SUAS ADMITÂNCIAS) E O COMPENSADOR (COM AS NECESSÁRIAS SUSCEPTÂNCIAS)

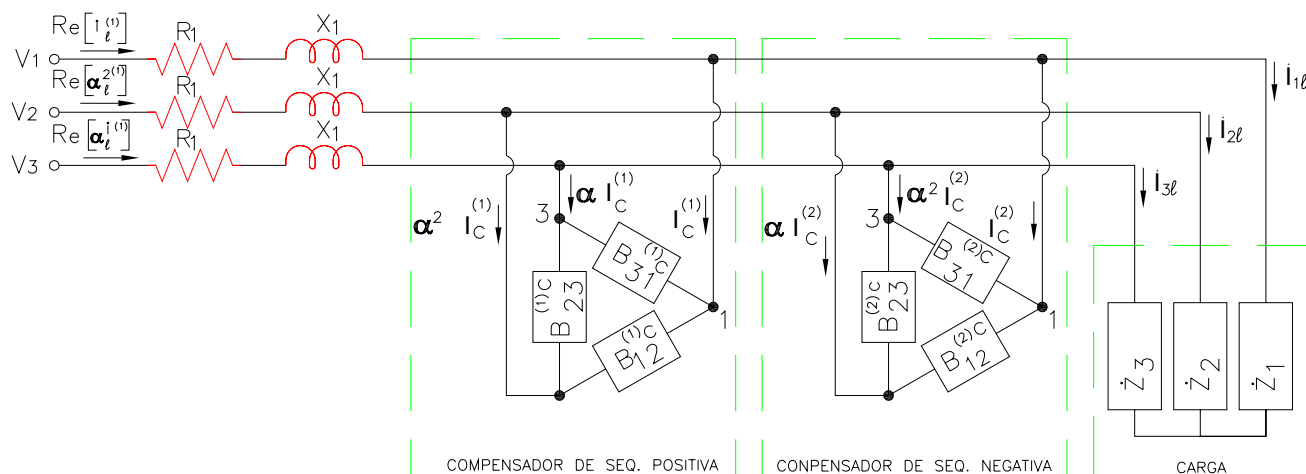


FIGURA 1.2 - REPRESENTAÇÃO DO COMPENSADOR POR SEUS COMPONENTES DE COMPENSAÇÃO DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - PINHEIRO, Ricardo F. Equipamentos Estáticos para a compensação de reativos e desequilíbrios em Sistemas Elétricos. EFEI, Jun. 1980. Tese de Mestrado;
- [2] - WALSH, K.A. Thyristor Controlled Shunt Reactor Compensation of Asymmetrically Loaded Power Systems. UMIST, Out. 1976. Tese de Doutorado.