

# **PEA3504 Laboratório de Qualidade de Energia**

## **Compensação de Desequilíbrio de Carga e Ocorrência de Ressonância na Rede CA - Estudo de Caso**

**Prof. Lourenço Matakas Jr**

Versão 12/Set/2018 (editado pelo prof. Wilson Komatsu)

### **1. Objetivos**

- Verificar os problemas associados à operação de redes com cargas desequilibradas, com reativos;
- Aprender uma técnica passiva de compensação de desequilíbrio de carga;
- Estudo de caso de ocorrência de ressonância na rede CA, e proposta de solução.

Os problemas acima listados serão verificados através de simulações utilizando o programa PSIMCAD v.9.0.

### **2. Operação do Sistema Elétrico com cargas Desequilibradas, e com cargas com baixo Fator de Potência**

Cargas desequilibradas (com elevado conteúdo de sequência negativa e/ou sequência zero), resultam em:

- má utilização do sistema elétrico, com algumas fases apresentando elevados valores eficazes de corrente, enquanto outras operam muito aquém da capacidade nominal;
- desequilíbrio nas tensões do sistema elétrico.

Existem soluções passivas e ativas para a compensação de desequilíbrios de carga e de reativos. Para os desequilíbrios de carga podem-se utilizar arranjos de indutores e capacitores, transformador SCOTT ou conversores estáticos operando como fonte de corrente, inseridos em paralelo com a carga, injetando as correntes de desequilíbrio.

### **3. Compensação de Desequilíbrios de Carga via Inserção de Indutores e Capacitores**

Dada uma carga linear formada por  $R$  e  $X$ , conforme mostrado na figura 1, pretende-se, através de um sistema compensador, transformá-la em uma carga trifásica resistiva e

simétrica. Como primeiro passo, anula-se a potência reativa através de um capacitor (indutor)  $X_{C_{fp}}$  em paralelo com a carga (fig. 2). Num segundo passo conectam-se as reatâncias  $X_{C_{deseq}}$  e  $X_{L_{deseq}}$  de acordo com a figura 3, conseguindo-se o efeito desejado para  $X_{L_{deseq}} = X_{C_{deseq}} = \sqrt{3}R$ .

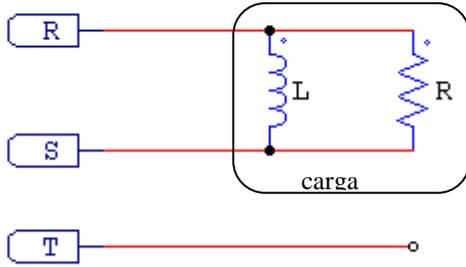


Figura 1: carga monofásica Linear R-L.

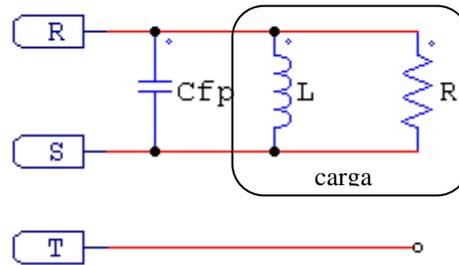


Figura 2: Compensação de fator de potência de carga linear.

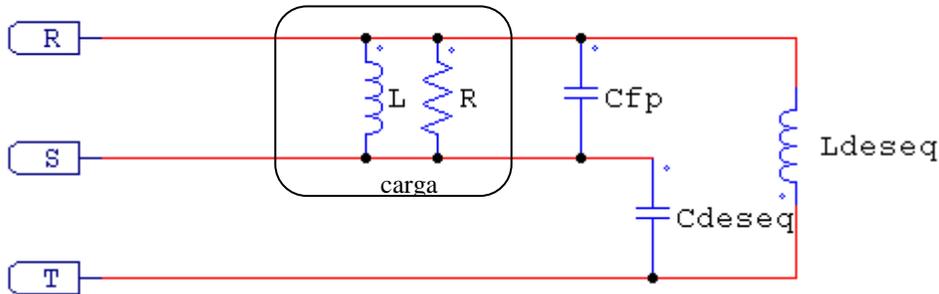


Figura 3: Circuito de compensação de desequilíbrio p/ a carga monofásica linear.

A compensação pode ser facilmente visualizada a partir do diagrama fasorial das tensões e correntes de fase e de linha. **\*\*\*\*Sugere-se que o aluno o faça como exercício.**

Supondo-se tensões fase terra dadas por  $V_r = V|0^\circ$ ,  $V_s = V|-120^\circ$  e  $V_t = V|120^\circ$ , os componentes de sequência positiva e negativa ( $\dot{I}_1$  e  $\dot{I}_2$ ) correspondentes às correntes absorvidas pela carga  $R$  (considerando que  $C_{fp}$  compensa completamente a reatância de  $L$  na frequência da rede) são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_r \\ \dot{I}_s \\ \dot{I}_t \end{bmatrix} \quad \text{onde } \dot{I}_r = -\dot{I}_s = \frac{Ve^{j\pi/6}}{R} \quad \text{e } a = e^{j2\pi/3} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \frac{V e^{j\pi/6}}{R} \begin{bmatrix} (1-a) \\ (1-a^2) \end{bmatrix} \Rightarrow |\dot{I}_1| = |\dot{I}_2| = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V}{R} \quad (2)$$

A parcela  $|\dot{I}_2|$  é compensada por  $L_{deseq}, C_{deseq}$  (**vocês provarão no relatório**). Como resultado, a resistência monofásica original, de valor  $R$ , torna-se equivalente a 3 resistências de valor  $3R$  ligadas em delta conforme mostrado na figura 4.

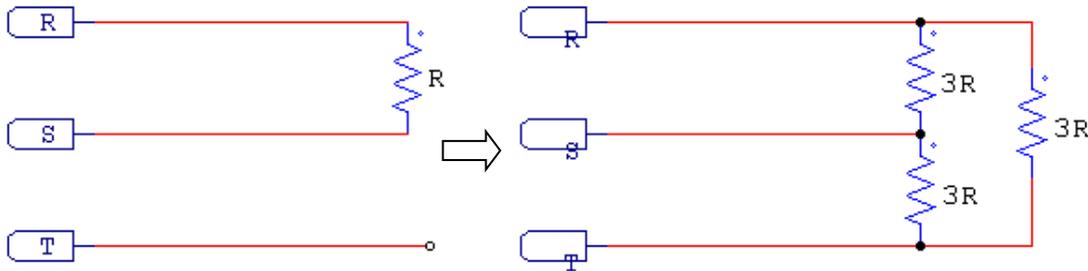


Figura 4: Carga monofásica resistiva, e circuito equivalente desta carga após a compensação de desequilíbrio.

O resultado importante deste item foi mostrar que a corrente de sequência negativa produzida por uma carga resistiva monofásica pode ser anulada com a utilização de elementos reativos, ou seja, sem o consumo de potência ativa (teoricamente, sem considerar as perdas ôhmicas das reatâncias). Caso a carga tenha componente reativa, esta deve ser compensada a priori. O procedimento acima pode ser estendido para uma carga linear desbalanceada qualquer, pelo uso do teorema da superposição.

#### 4. Projeto de um Compensador de Desequilíbrio e Verificação do seu Desempenho

Será considerado o exemplo citado na referência [1], de um forno de indução monofásico a canal de 500kW, alimentado por rede trifásica de 460V (eficaz). A figura 5 mostra o modelo R-L série do forno considerado, com os valores dos parâmetros.



Figura 5: Modelo equivalente R-L série de um forno de indução.

Pedem-se:

- a. **(fazer em casa)** Calcular as correntes de fase do sistema carga  $R$  + compensador (figura 3) e mostrar que ele equivale a 3 resistências de valor  $3R$  conectadas em delta (figura 5). Notar que  $C_{fp}$  compensa completamente a reatância de  $L$  na frequência da rede.
- b. **(fazer em casa)** Mostrar que as correntes absorvidas pelo conjunto  $L_{deseq}$  e  $C_{deseq}$  são de sequência negativa e têm sinal contrário ao componente de sequência negativa correspondente às correntes absorvidas pela resistência de carga  $R$ , mostrado na eq. 2.
- c. Calcular os valores de  $C_{fp}$ ,  $C_{deseq}$  e  $L_{deseq}$ , que compensam completamente os reativos e o desequilíbrio imposto pelo forno de indução. Sugere-se que se calcule o modelo equivalente paralelo (R e L) conforme apresentado na figura 1, a partir de  $R_{carga}$  e  $L_{carga}$ .
- d. Utilizando-se o arquivo **exp5a.psimsch**, inserir os valores calculados no ítem acima e plotar as correntes de linha do sistema compensado, verificando o desempenho do compensador. Como você sabe que calculou corretamente o compensador? Sugere-se plotar as três correntes na rede superpostas em um único gráfico;
- e. Inverter duas das fases verificando se a estratégia de compensação é sensível à sequência de fases. **Provar.**
- f. Variar ligeiramente o valor de  $R$  (p.ex.  $0.5R$  e  $0.8R$ ) verificando a sensibilidade do compensador à variação da carga. Comentar a viabilidade da aplicação prática deste compensador. Tem interesse prático?
- g. O arquivo **exp5b.psimsch**, inclui chaves que conectam o capacitor de correção de FP ( $C_{fp}$ ) em  $t=50ms$ , e ligam o compensador de desequilíbrio em  $t=100ms$ . Plotar as correntes de linha comentando seu comportamento para as três condições: carga desequilibrada com reativos, carga desequilibrada sem reativos e carga compensada. Comentar qual o inconveniente de se trabalhar com cargas com baixo fator de potência. E cargas desequilibradas?

## 5. Verificando o efeito da Impedância de Rede no Compensador de Desequilíbrios

Na figura 6, mostra-se o circuito do arquivo **exp5c.psimsch**, onde se acrescentam dois transformadores, representando a impedância da rede (rede + trafo).

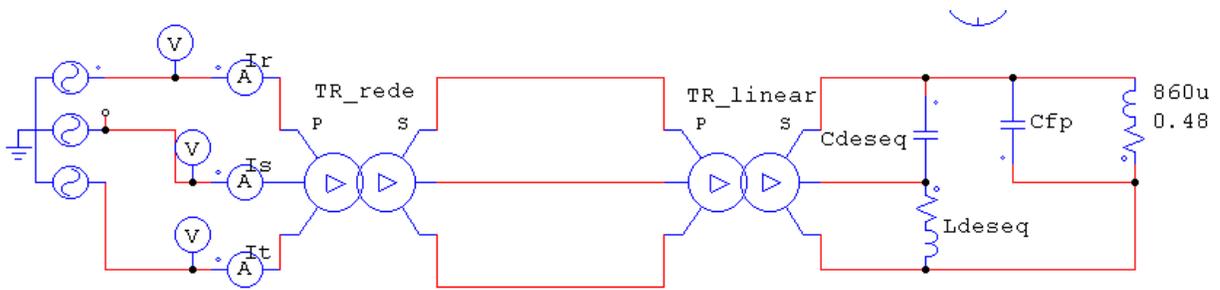


Figura 6: Inclusão da Impedância de rede à carga compensada.

Obtenha as correntes de linha, explicando o que aconteceu. Não existindo cargas não lineares no circuito, explicar a origem dos harmônicos nas correntes de linha. Porque eles aparecem apenas por alguns instantes após a energização do circuito? Porque estes harmônicos não apareceram nos circuitos dos arquivos exp5a e exp5b?

## 6. Ocorrência de Ressonâncias em Redes – Estudo de caso

Conforme visto no item 5, o sistema elétrico junto com a carga e o compensador, possuem varias indutâncias e capacitâncias, que aos pares representam as frequências próprias (pólos) do sistema elétrico. Se a carga possuir harmônicos de corrente com frequência igual a uma das frequências próprias do sistema, estas serão excitadas. Se ocorrer ressonância LC série, existirão caminhos de baixa impedância para determinados harmônicos, resultando em valores elevados de corrente nesta frequência. Se ocorrer ressonância paralela para dada frequência, os harmônicos correspondentes encontrarão um caminho de elevada impedância, resultando em elevados valores de tensão para esta frequência.

Será estudado um caso de ressonância série, ocorrido em uma fundição com um forno de indução a canal com compensador de desequilíbrio identico ao simulado nos ítns anteriores, operando em conjunto com quatro fornos de indução sem canal, cada um com 750kW. Fornos sem canal são constituídos por um retificador trifásico e por um inversor de média frequência, conforme descrito em [1], e mostrado na figura 7.

Neste caso, os indutores e capacitores do sistema elétrico apresentam ressonância série no quinto e sétimo harmônicos, que são coincidentes com os componentes produzidos pelos retificadores trifásicos de seis pulsos.

Simular o arquivo **exp5d.psimsch**, mostrado na figura 8, obtendo três gráficos, um com as correntes de rede, outro com as correntes no ramal que alimenta o forno a canal e

outro com a corrente da fase R do ramo do retificador. Acertar o eixo x para visualizar adequadamente as formas de onda. Comentar os resultados obtidos, explicando a forma de onda e a amplitude das correntes medidas.

b- Ligar apenas o retificador e anotar as correntes de linha

c- ligar apenas a carga linear e medir as correntes de linha.

d- Explicar porque a operação nas condições do item a , com as duas cargas, é inviável.

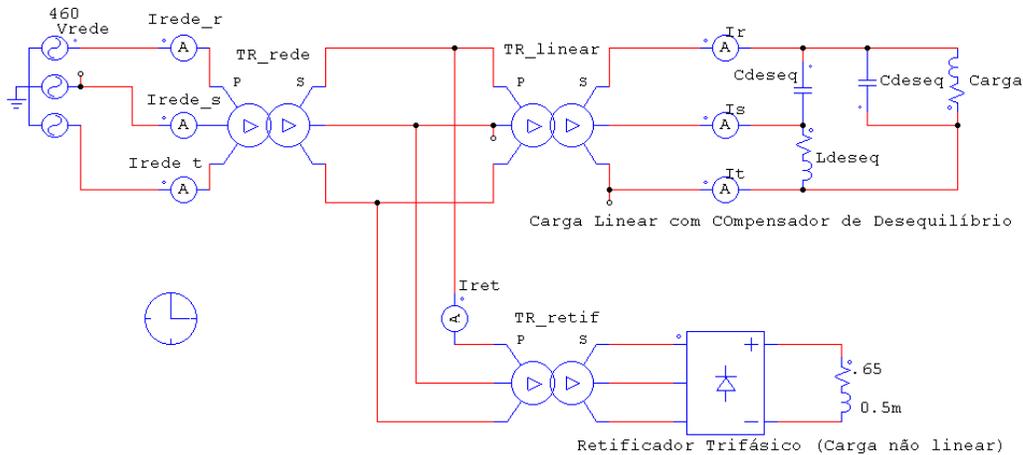


Figura 7: Sistema elétrico com ocorrência de ressonância.

## 7. Solução para o problema de Ressonância

Uma das soluções possíveis, que foi adotada no caso descrito no item 6, é a inserção de reatores ( $L_{x1}$  e  $L_{x2}$ ) em série com os capacitores, visando o deslocamento das frequências de ressonância originais do sistema.

- Utilizando o arquivo **exp6e.psim**, mostrado na figura 8, plotar novamente as correntes de rede, do forno e do retificador, verificando a eficácia da solução proposta.
- Melhorou? Você adotaria esta solução? Porque?
- Teria outras soluções? Quais?

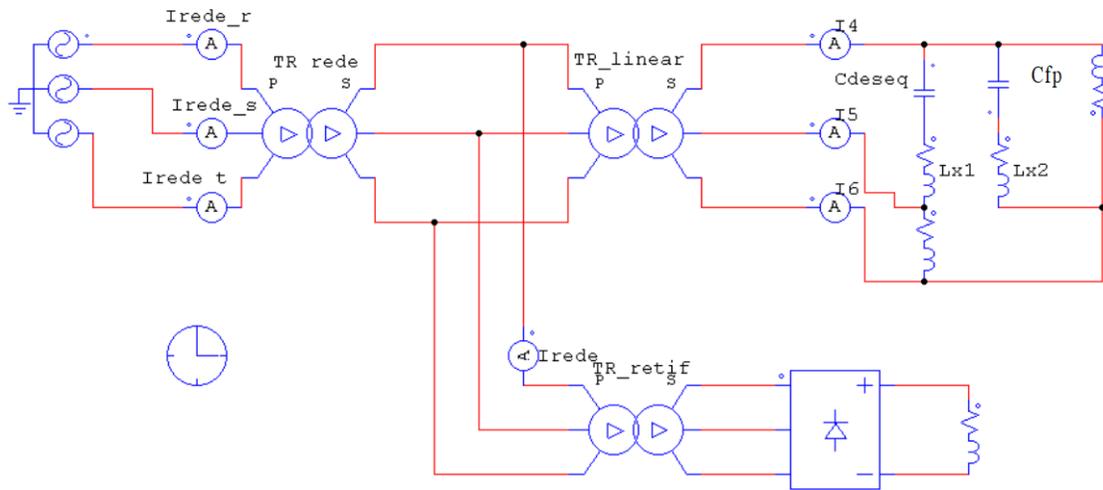


Figura 8: Solução de problema de ressonância pela inserção de indutores ( $L_{x1}$  e  $L_{x2}$ ).

## 8. Bibliografia

- [1] Kaiser; Komatsu; Matakas; Pó; Rossi. “Influência de Conversores Estáticos em fornos a Canal”, 8º Congresso Brasileiro de Automática- Belém , 1990