

PEA3502 LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

RETIFICADORES NÃO CONTROLADOS DE UM CAMINHO

W. KAISER 12/2019

1. OBJETIVOS

Estudo do funcionamento e processo de comutação em retificadores trifásicos de um caminho a diodos.

2. INTRODUÇÃO

Os retificadores não controlados são conversores estáticos utilizados para converter tensões (ou correntes) alternadas em tensão (ou corrente) contínua, cujo valor médio depende da carga e das características do alimentador, ou seja, do número de fases, da amplitude das tensões CA e das impedâncias internas por fase.

Devido à utilização de componentes não lineares (diodos), a corrente absorvida pelos retificadores é não senoidal, introduzindo no alimentador CA componentes harmônicas de corrente que podem, dependendo da potência do retificador, comprometer o funcionamento de outras cargas ligadas àquele alimentador ou até do próprio sistema CA. Da mesma forma, a tensão e a corrente CC contêm ondulações, cuja amplitude pode ser reduzida através da inserção de filtros na entrada (CA) e/ou na saída (CC).

Nesta experiência são realizadas medições de grandezas CA em retificadores trifásicos de 1 caminho, as quais devem ser comparadas com as previsões teóricas obtidas com base na teoria idealizada.

3. DESCRIÇÃO DO ARRANJO DIDÁTICO

O arranjo didático é constituído de três módulos independentes (fonte CA, retificador e carga) que são interligados externamente através de cabos.

O módulo da fonte CA foi concebido para reproduzir um sistema de potência real. É composto de um transformador trifásico com indutores (L_k) externos ligados em série com cada fase. O primário do transformador é alimentado em 220 V e dispõe de sensores de efeito Hall para medição de correntes de linha em uma fase, das correntes de fase e da tensão de linha entre estas fases. Os enrolamentos secundários e terciários são ligados em Y e Δ respectivamente e fornecem tensões trifásicas de linha com valor eficaz igual a 34,6 V. Os indutores externos limitam a corrente de curto-circuito do módulo e simulam a impedância interna de um sistema de potência real para que os efeitos de comutação possam ser visualizados com maior clareza.

O módulo retificador é constituído de duas pontes trifásicas a diodos independentes providos de "shunts" calibrados para medição de formas de onda de corrente.

O módulo da carga é constituído de um indutor ($L=130$ mH e $r = 1,2 \Omega$) e 10 resistores de 10Ω , cuja associação permite a implementação de cargas resistivas e resistivo-indutivas.

4. RETIFICADORES TRIFÁSICOS

Os retificadores trifásicos são utilizados em aplicações de médias e altas potências. A ponte trifásica é a configuração mais difundida em função da sua simetria, modularidade e do bom aproveitamento dos transformadores. Por questões didáticas, nesta experiência será estudado o circuito de um caminho.

No equacionamento dos retificadores é utilizada a simbologia apresentada na seqüência:

- E_o - valor médio da tensão CC em vazio;
- E_{cc} - valor médio da tensão CC em carga;
- E - valor médio da tensão CC normalizada ($E = E_{cc} / E_o$);
- E_m - valor de pico da tensão CA de fase-neutro em vazio;
- X_k - impedância da fonte por fase (reatância de comutação);
- I_{cc} - valor médio da corrente CC na carga;
- I_s - valor de pico da corrente CA de curto-circuito entre duas fases;
- I - valor médio da corrente CC normalizada ($I = I_{cc} / I_s$);
- ΔI - valor de pico a pico da ondulação de corrente CC;
- μ - ângulo de comutação.

4.1. Retificador trifásico de um caminho (3F1C) (3 Pulsos)

Essa configuração é obtida ligando-se a carga entre o ponto de conexão comum dos catodos dos diodos e o neutro do alimentador conforme mostra o esquema da fig. 1.

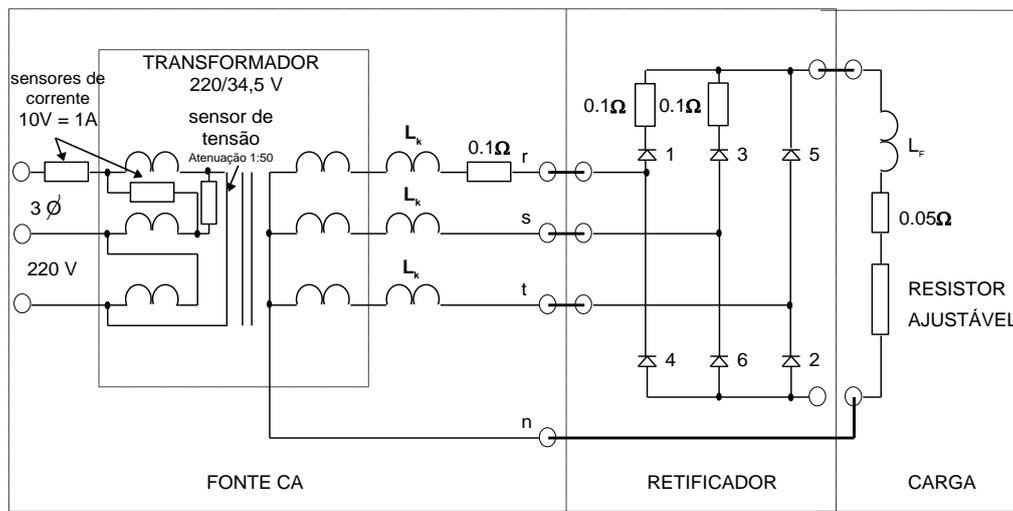


Fig. 1 - Diagrama de ligação dos módulos de fonte CA e da carga para o retificador 3F1C

Um diodo entra em condução quando o potencial do seu anodo supera o potencial de anodo de outro diodo previamente em condução. Durante o processo de transferência de corrente, denominado de comutação, ambos os diodos conduzem simultaneamente, curto-circuitando as respectivas fases do alimentador.

A duração do intervalo de comutação depende: a) da corrente de carga, b) das tensões de fase envolvidas no processo de comutação e c) da reatância da fonte. Quanto maior a corrente de carga, maior será o intervalo de comutação e menor será a tensão na carga. Para uma indutância de filtro elevada, durante a comutação simples o valor instantâneo da tensão retificada é a média aritmética das tensões de fase envolvidas no processo. Terminada a comutação, cada diodo volta a conduzir isoladamente. Nos retificadores de 1 caminho os

enrolamentos secundários do transformador devem necessariamente estar ligados em estrela com o neutro acessível. O valor médio da corrente em cada diodo é um terço do valor médio da corrente na carga. Quando bloqueados, os diodos estão submetidos uma tensão inversa, cuja amplitude máxima corresponde ao valor de pico da tensão de linha ($\sqrt{3} \cdot E_m$).

Admitindo-se diodos ideais, corrente CC constante (indutância de filtro elevada) e o retificador 3F1C operando na região de comutação simples (condução simultânea de no máximo dois diodos) pela teoria idealizada resultam as seguintes relações:

$$E_{cc} = E_{o_{3F1C}} - \left[\frac{3}{2\pi} \cdot X_k \right] \cdot I_{cc} \quad \text{e} \quad E_{o_{3F1C}} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2\pi} \cdot E_m.$$

Adotando-se $E_{o_{3F1C}}$ e $I_s = \frac{\sqrt{3} \cdot E_m}{2 \cdot X_k}$ como valores de base para a tensão e a corrente

CC respectivamente, os valores normalizados para $E = E_{cc} / E_{o_{3F1C}}$ e $I = I_{cc} / I_s$ obedecem as seguintes relações:

$$E = 1 - 0,5 \cdot I \tag{4.1}$$

$$\mu = \cos^{-1}(1 - I) \tag{4.2}$$

$$E = \frac{1 + \cos \mu}{2} \tag{4.3}$$

As equações (4.1), (4.2) e (4.3) são válidas somente no intervalo $0 \leq \mu \leq \pi/2$, no qual ocorre comutação simples. Para $\mu > \pi/2$ as comutações passam a ser múltiplas e o seu equacionamento é complexo. A característica externa do retificador 3F1C até o curto-circuito é apresentada na fig. 2.

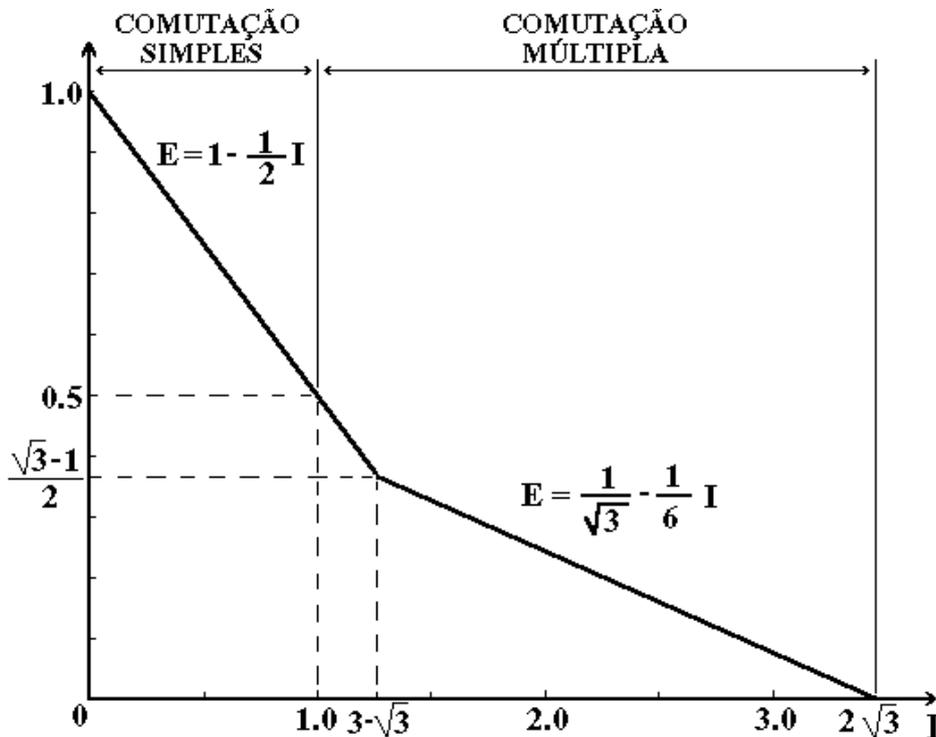


Fig. 2 - Característica E x I completa do retificador 3F1C

A fig. 3 mostra as formas de onda relevantes de um retificador 3F1C a diodos para $\mu = \pi/6$. O espectro da corrente CA absorvida da rede segue a lei de formação $n \cdot p \pm 1$ ($n=1,2,3, \dots$), sendo p o número de pulsos ($p=3$ para o conversor 3F1C) e n a ordem dos componentes harmônicos. Note-se que o espectro da corrente CA independe da conexão dos enrolamentos do transformador.

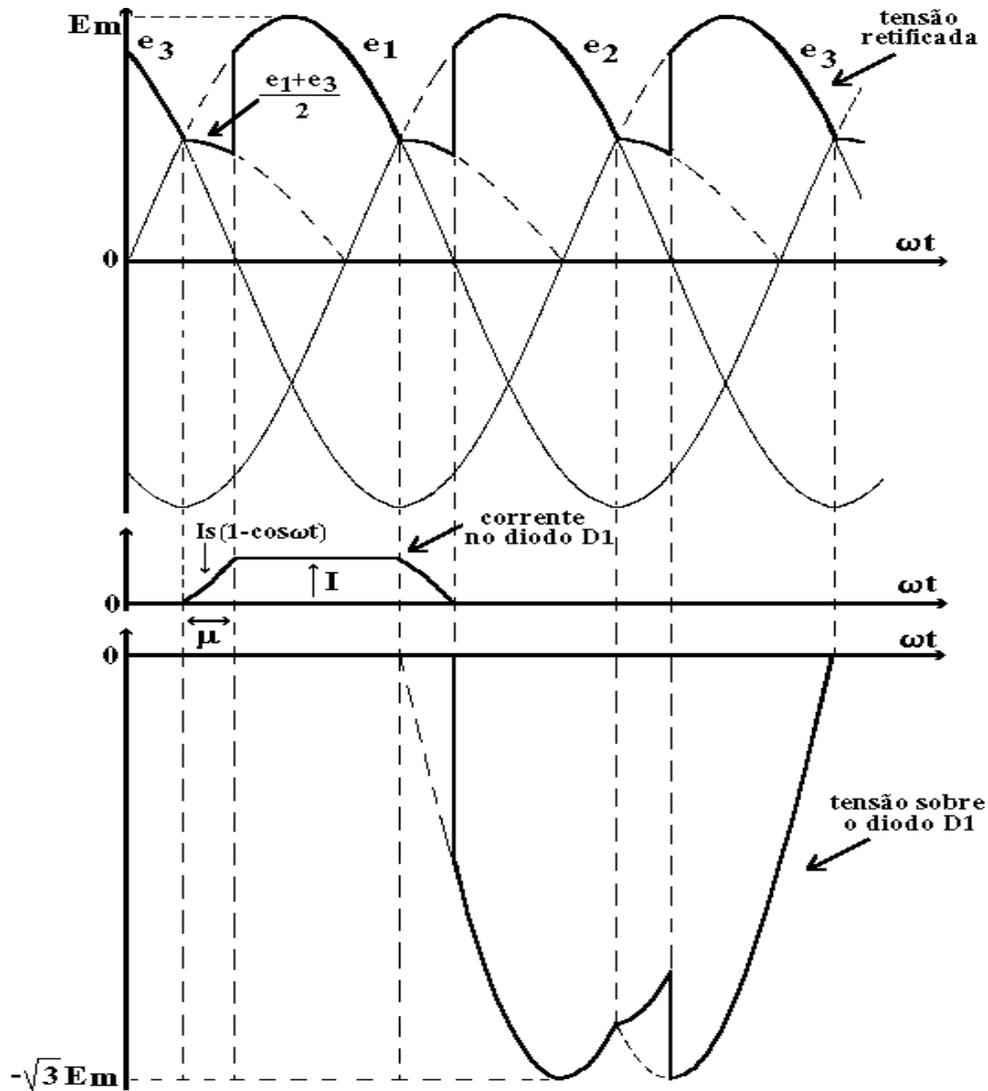


Fig. 3 - Formas de onda do retificador 3F1C para $\mu = \pi/6$

4.2. Indutor de filtro

A indutância de filtro L_F pode ser dimensionada a partir das especificações de ondulação de corrente na carga, impondo um valor nulo para o valor médio da tensão sobre o indutor. Para valores de ondulação corrente CC não muito elevados e desprezando-se os efeitos da comutação, resulta a relação aproximada abaixo para o retificador de um caminho:

$$\Delta I_{3F1C}(\mu = 0) = \frac{0,136 \cdot E_m}{\omega \cdot L_F} \quad (4.4),$$

sendo ω a frequência angular da rede.

Os efeitos da comutação simples podem ser incluídos multiplicando-se os valores de $\Delta I(\mu = 0)$ obtidos pelas expressões simplificadas por um fator de correção $F(\mu)$ (vide fig. 4).

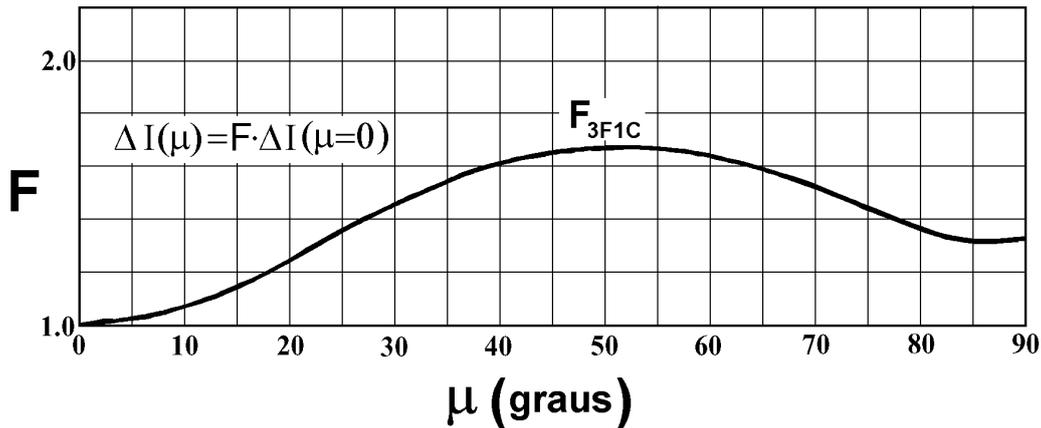


Fig. 4 - Fator de correção $F(\mu)$

5. PARTE PRÁTICA

Na parte prática é realizada a análise do retificador trifásico de um caminho, através de medições, cálculos e comentários sobre os resultados obtidos (em relação ao modelamento).

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA FONTE C.A.

Para uma previsão das características de cada configuração de retificador é necessário determinar o circuito equivalente de Thévenin da fonte CA. Portanto, devem-se obter os valores de pico da tensão de fase em circuito aberto (E_m) e da corrente de curto-circuito (I_s) entre duas fases. O primeiro passo é ligar o módulo da fonte CA na rede trifásica de 220 V.

OBS: i) Quando realizar medições utilizando dois canais, evite conectar as garras de terra de cada uma das pontas em pontos distintos do circuito para evitar um curto-circuito.

ii) Nunca mudar a atenuação da ponta de prova (chave x1 ou x10 no corpo da ponta) quando esta estiver conectada no circuito energizado;

iii) Nas medições sobre "shunts", utilize a ponta com atenuação x1 e conectar a respectiva a garra de terra ao potencial de referência para minimizar ruído.

5.1.1. Tensão em circuito aberto:

- Registrar as formas de onda da tensão entre fase e neutro no secundário (sem carga) e da corrente magnetizante do transformador em uma das fases Determinando seus respectivos espectros harmônicos, THD (Total Harmonic Distortion) e valores de pico.

5.1.2. Corrente de curto-circuito:

- Colocar em curto circuito duas fases no secundário da fonte e medir (utilize o shunt) o valor de pico da corrente de curto circuito.
- Determine o circuito equivalente de Thevenin por fase da fonte trifásica. (A indutância nominal do reator externo ligado a cada fase é de 13 mH).

5.2. RETIFICADOR 3F1C

5.2.1. Com o conjunto desenergizado, ligar os módulos do retificador e da carga seguindo o esquema da fig. 1. Com o multímetro, medir a tensão CC em vazio.

Ligar uma **carga RL** ($L=130$ mH) de modo que o valor da corrente de carga normalizada resulte próximo de $I = I_{cc} / I_s = 0,2$. O valor de R é obtido da equação (4.1) e da Lei de Ohm ($R=E_{cc}/I_{cc}$). Na montagem utilize um valor próximo ao calculado que possa ser obtido por associações série e/ou paralela dos resistores

disponíveis no módulo de carga. O indutor tem uma resistência interna de aproximadamente $1,2 \Omega$.

I - Medições

A) Registrar as formas de onda indicadas abaixo. Para facilitar a visualização, sugere-se adotar a seqüência de medições mostrada na tabela abaixo. Escolha uma escala adequada para poder realizar as medições solicitadas.

Ponta de prova canal 1	Ponta de prova canal 2
Tensão CC na saída do retif. (Ecc)	Corrente CC e sua ondulação – Registre a tensão sobre o resistor de carga ($I_{cc}=V_R/R$)
Tensão de linha V_{RT} do secundário	Corrente de linha - fase R do secundário
Tensão sobre D1	Corrente de linha - fase R do secundário
Corrente no diodo D1	Corrente no diodo D3
Tensão de linha V_{RS} do primário (usando o sensor de tensão)	Corrente de linha - fase R do primário (espectro e THD) usando o sensor de corrente

Obs: A ondulação da corrente na saída deve ser medida c/ o osciloscópio no modo AC.

O ângulo de comutação deve ser medido utilizando o cursor do osciloscópio

B) Com o multímetro, medir os valores médios da tensão e corrente (meça a tensão sobre o resistor de carga) na carga.

II - Análise das medições:

	Valor calculado	Valor medido	Desvio (%)
$I_{cc}(A)$			
$E_{cc}(V)$			
μ (°)			
$\Delta I_{cc}(A)$			

- Comentar os desvios. (Nos cálculos levar em conta a resistência do indutor);
- Quando possível, indicar o ângulo de comutação nos registros efetuados;
- Comentar e explicar as deformações da tensão de linha na entrada do retificador;
- Explicar as distorções observadas na forma de onda da corrente CA no primário.

5.2.2. Refazer medições com uma carga RL ($L=130 \text{ mH}$ e $R=5 \Omega$).

R= 5 Ω	Valor calculado	Valor medido	Desvio (%)
μ (°)			
$E_{cc}(V)$			
$I_{cc}(A)$			

- Com esta carga o retificador a comutação no retificador é simples ou múltipla?
- Comentar e justificar desvios. (Nos cálculos levar em conta a resistência do indutor)

5.2.3. Medir a corrente de curto circuito do retificador. Para tanto retirar o indutor de filtro do circuito, uma vez que a sua resistência ôhmica, embora baixa, pode impor uma tensão não nula na saída do retificador. Calcular a corrente normalizada e comparar com o valor indicado no gráfico da fig. 2. Seja rápido na medição para não danificar o shunt.

RELATÓRIO

O relatório não deverá conter introdução teórica e obedecer à seqüência indicada na parte experimental da apostila. Na determinação dos valores calculados deverão estar explícitos a fórmula e os valores dos parâmetros adotados. Todos os gráficos de formas de onda deverão estar devidamente identificados e apresentar as indicações de ângulos de comutação, ondulação, etc. Além disso, são imprescindíveis comentários sobre eventuais desvios observados em relação às formas de onda previstas pela teoria.