

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PRÉ-REGULADORES DE FATOR DE POTÊNCIA

2.1 Desvantagens do baixo fator de potência (FP) e da alta distorção da corrente

Consideremos aqui aspectos relacionados com o estágio de entrada de fontes de alimentação. As tomadas da rede elétrica doméstica ou industrial possuem uma corrente (RMS) máxima que pode ser absorvida (tipicamente 15A nas tomadas domésticas).

A figura 2.1 mostra uma forma de onda típica de um circuito retificador alimentando um filtro capacitivo. Notem-se os picos de corrente e a distorção provocada na tensão de entrada, devido à impedância da linha de alimentação. O espectro da corrente mostra o elevado conteúdo harmônico, cujas harmônicas excedem as especificações da norma IEC 61000-3-2.

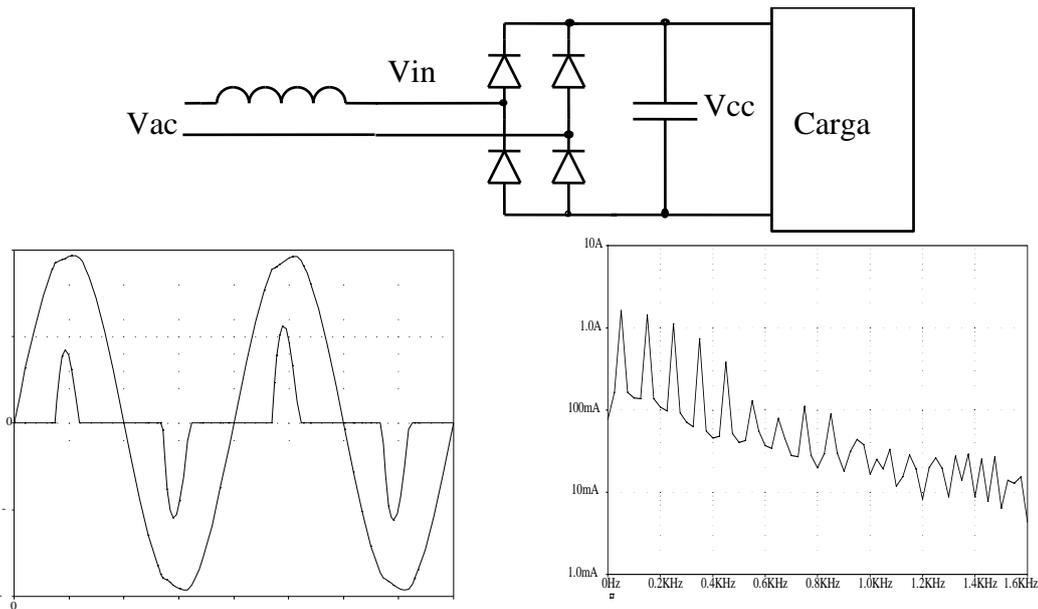


Figura 2.1 Circuito, corrente de entrada e tensão de alimentação (V_{in}) de retificador alimentando filtro capacitivo. Espectro da corrente.

Consideremos os dados comparativos da Tabela I [2.1]

Tabela I - Comparação da potência ativa de saída

	Convencional	PFP
Potência disponível	1440 VA	1440 VA
Fator de potência	0,65	0,99
Eficiência do PFP	100%	95%
Eficiência da fonte	75%	75%
Potência disponível	702 W	1015 W

Nota-se que o baixo fator de potência da solução convencional (filtro capacitivo) é o grande responsável pela reduzida potência ativa disponível para a carga alimentada.

Podem ser citadas como desvantagens de um baixo FP e elevada distorção os seguintes fatos [2.1]:

- A máxima potência ativa absorvível da rede é fortemente limitada pelo FP;
- As harmônicas de corrente exigem um sobre-dimensionamento da instalação elétrica e dos transformadores, além de aumentar as perdas (efeito pelicular);
- A componente de 3ª harmônica da corrente, em sistema trifásico com neutro, pode ser muito maior do que o normal;

- O achatamento da onda de tensão, devido ao pico da corrente, além da distorção da forma de onda, pode causar mau funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede;
- As componentes harmônicas podem excitar ressonâncias no sistema de potência, levando a picos de tensão e de corrente, podendo danificar dispositivos conectados à linha.

2.2 Soluções passivas

Soluções passivas para a correção do FP [2.2] [2.3] [2.4] oferecem características como robustez, alta confiabilidade, insensibilidade a surtos, operação silenciosa. No entanto, existem diversas desvantagens, tais como:

- São pesados e volumosos (em comparação com soluções ativas);
- Afetam as formas de onda na frequência fundamental;
- Alguns circuitos não podem operar numa larga faixa da tensão de entrada (90 a 240V);
- Não possibilitam regulação da tensão;
- A resposta dinâmica é pobre;
- O correto dimensionamento não é simples.

A principal vantagem, óbvia, é a não-presença de elementos ativos.

2.2.1 Filtragem passiva em cargas tipo fonte de corrente

A colocação de um filtro indutivo na saída do retificador (sem capacitor) produz uma melhoria significativa do FP uma vez que é absorvida uma corrente quadrada da rede, o que leva a um FP de 0,90. Como grandes indutâncias são indesejáveis, um filtro LC pode permitir ainda o mesmo FP, mas com elementos significativamente menores [2.2]. Obviamente a presença do indutor em série com o retificador reduz o valor de pico com que se carrega o capacitor (cerca de 72% num projeto otimizado). A figura 2.2 mostra a estrutura do filtro e formas de onda com os respectivos espectros..

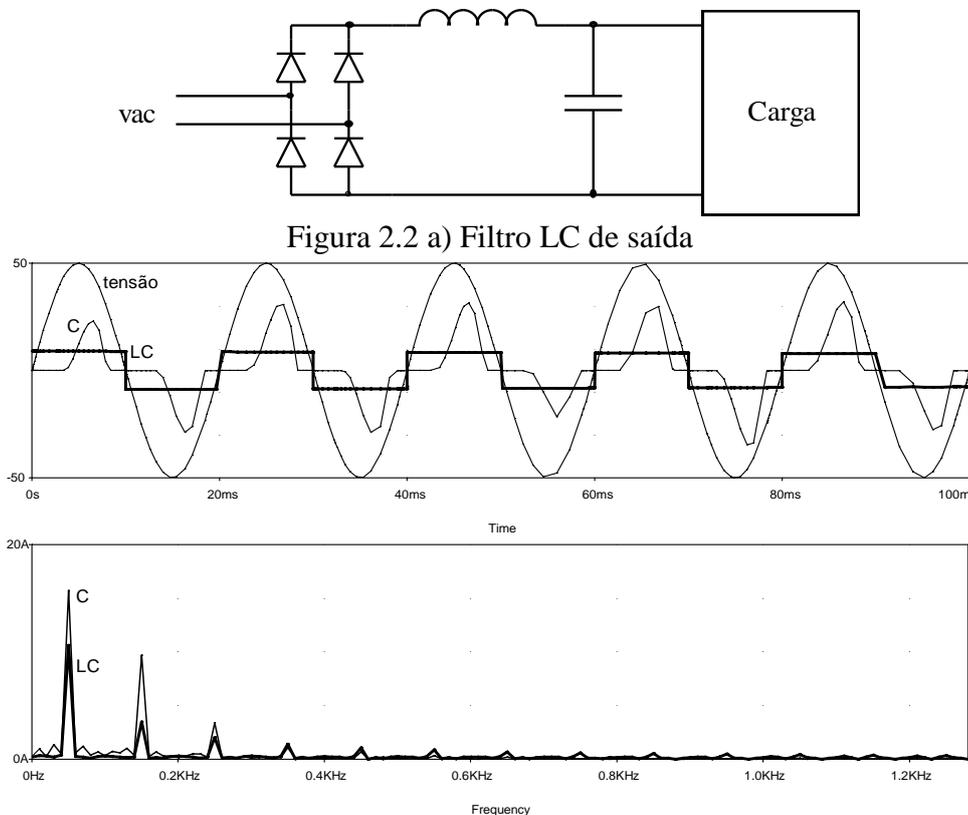


Figura 2.2 a) Filtro LC de saída

Figura 2.2 b) Formas de onda e espectro da corrente de retificador monofásico com filtro capacitivo e com filtro LC (ideal).

Outras alternativas, que não provocam a redução da componente fundamental da tensão empregam filtros LC paralelo sintonizados (na 3^a harmônica) na entrada do retificador [2.3]. Com tal circuito, mostrado na figura 2.3, chega-se a FP elevado (0,95), especialmente pela redução da terceira harmônica.

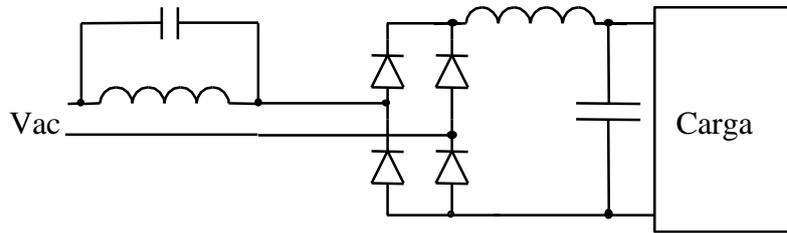


Figura 2.3 a) Filtro LC de entrada, sintonizado na 3^a harmônica

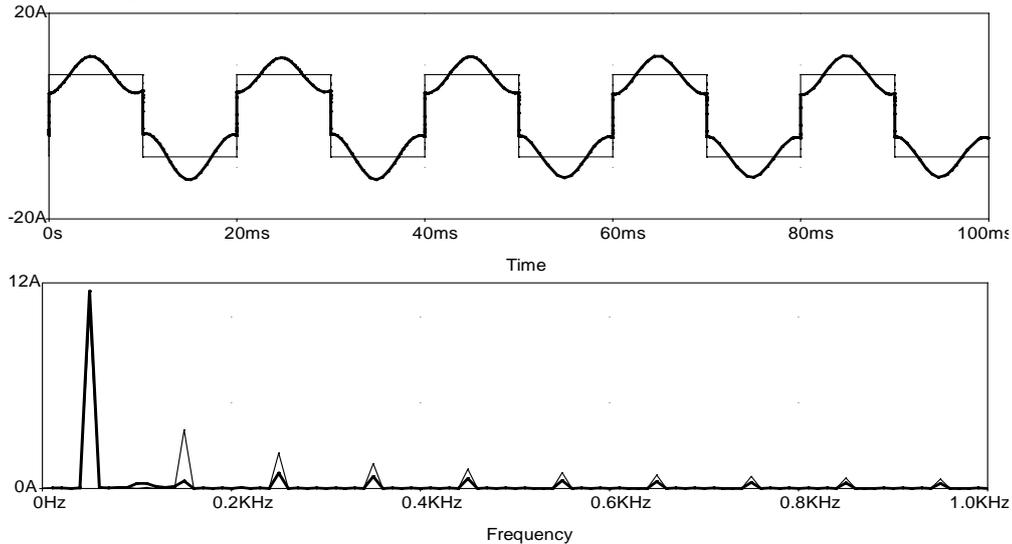


Figura 2.3 b) Correntes na rede e na entrada do retificador e respectivos espectros.

2.2.2 Filtragem passiva em cargas tipo fonte de tensão

Os casos estudados anteriormente consideravam cargas com comportamento de fonte de corrente, que são típicas em situações de acionamento de máquinas, por exemplo. Por outro lado, se consideradas as fontes de alimentação com filtro capacitivo, a tensão na entrada do retificador é imposta pelo capacitor do lado CC durante o intervalo de tempo em que os diodos estiverem em condução ¹. Esta situação é ilustrada pela figura 2.4.

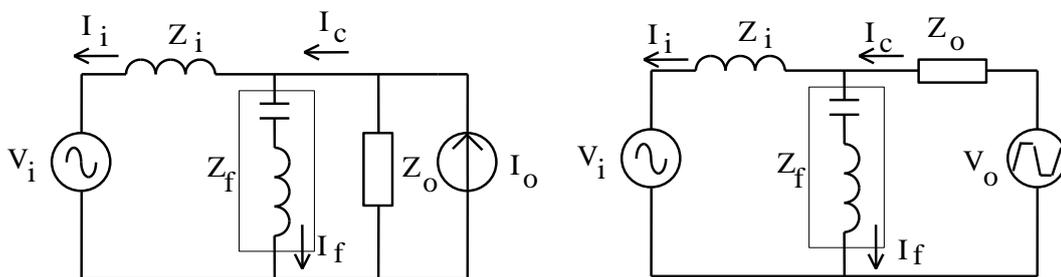


Figura 2.4 Filtro passivo em derivação para cargas tipo fonte de corrente e fonte de tensão.

Da figura 2.4 pode-se verificar que a relação entre a corrente enviada à carga e a corrente da fonte CA é dada por um divisor de corrente. Nota-se aí a conclusão já apresentada, que a eficácia da filtragem depende da impedância da rede. Num caso ideal em que Z_i for zero, não ocorreria filtragem alguma.

¹ F. Z. Peng, G-J. Su and G. Farquharson: "A series LC filter for harmonic compensation of AC Drives". CD-ROM of IEEE PES'99, Charleston, USA, June 1999.

$$\frac{I_i}{I_c} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_i} \quad (2.1)$$

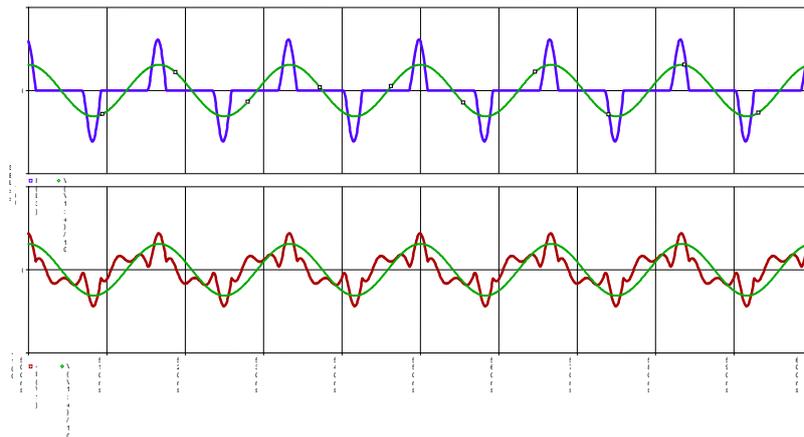
Já no caso de uma carga com comportamento de fonte de tensão, a eficácia do filtro LC, conectado em paralelo com a carga, pode ser expressa por:

$$\frac{I_i}{V_o} = \frac{Z_f}{Z_o Z_i + Z_o Z_f + Z_i Z_f} \quad (2.2)$$

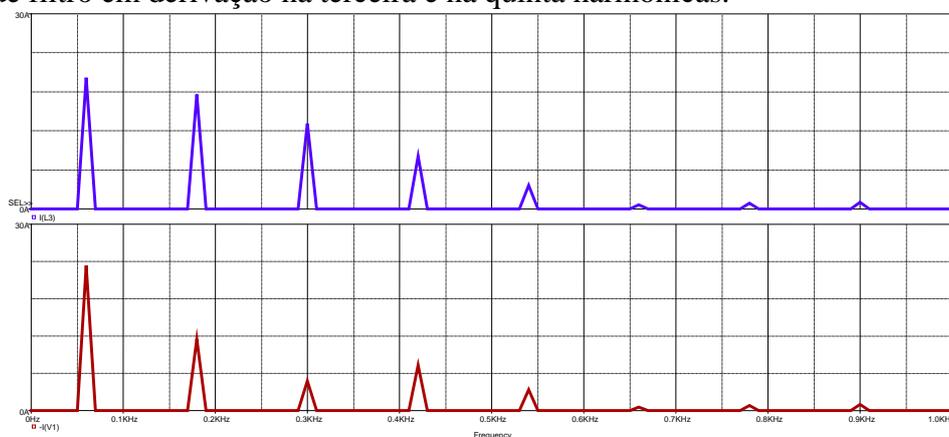
É claro que a compensação depende tanto da impedância da carga quanto da fonte. No entanto, se Z_o for nula (a carga se comporta como uma fonte de tensão ideal), o filtro conectado em paralelo é inútil. De maneira análoga, se a impedância da rede for nula, o efeito é o mesmo.

No caso de filtros sintonizados, o fator de qualidade “Q” é definido como a razão da indutância (ou capacitância) pela resistência na frequência de ressonância. Valores típicos para filtros RLC série, sem amortecimento, está entre 30 e 60. O valor da capacitância do filtro não deve ser muito elevada para evitar o aumento da componente reativa de corrente na fonte. Isso implica em indutâncias relativamente elevadas, o que implica em enrolamentos mais longos e, em consequência, resistências maiores.

A figura 2.25 mostra formas de onda de um retificador monofásico com filtro capacitivo ao qual são aplicados filtros de 3ª e 5ª harmônicas (veja exercício no final do capítulo).



- a) Corrente na entrada do retificador e na fonte (ambas referenciadas à tensão da fonte), com uso de filtro em derivação na terceira e na quinta harmônicas.



- b) Espectro da corrente na entrada do retificador e na fonte, com uso de filtro em derivação na terceira e na quinta harmônicas.

Figura 2.5 Efeito de filtragem em derivação aplicada em retificador monofásico com filtro capacitivo no lado CC.

Quando a impedância da fonte (em 60 Hz) é de $Z_f=0,1+j0,11 \Omega$, tendo os filtros $Q=50$, obtém-se uma melhoria em termos de DHT, que cai de 114% para 64%. A componente fundamental aumenta de 20 para 23 A em virtude do efeito capacitivo dos filtros em 60 Hz. Isso leva o fator de deslocamento da fundamental a se reduzir de 1 para 0,866 (a fundamental está adiantada de 30° em relação à tensão). O fator de potência inicial é de 0,66 e, após a filtragem, se eleva apenas para 0,73.

Pela análise dos espectros pode-se verificar que, embora os filtros estejam sintonizados exatamente nas frequências harmônicas, a redução na corrente é limitada pela relação entre a resistência do ramo do filtro e a impedância do alimentador. Quanto maior for o nível de curto-circuito da rede menor vai ser a eficácia do filtro.

Em tais situações é mais efetivo o uso de filtros conectados em série com a alimentação, numa associação LC paralela, de modo a bloquear a passagem das parcelas das correntes indesejadas, como mostra a figura 2.6. Nesta figura tem-se indicado um filtro sintonizado na terceira harmônica e outro na quinta, incluindo um resistor de amortecimento. Tal resistor, embora reduza a eficácia de filtro da quinta harmônica, garante o amortecimento necessário para as possíveis ressonâncias série que podem ocorrer no circuito.

Resultados de simulação de um sistema alimentando um retificador monofásico com filtro capacitivo estão indicados nas figura 2.7. A redução na componente fundamental, em relação ao caso de filtragem *shunt*, se deve à menor tensão na entrada do retificador, causada pela queda no filtro série e conseqüente menor tensão CC e menor potência na carga. O fator de deslocamento da fundamental é de 0,927 (indutivo) e a DHT se reduz para 13,5%. O fator de potência final é de 0,92.

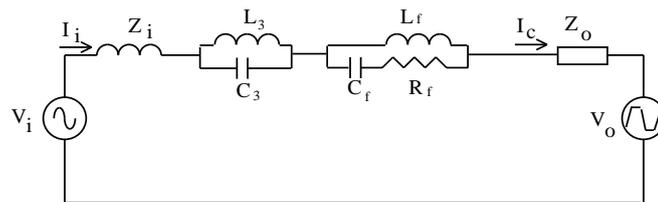
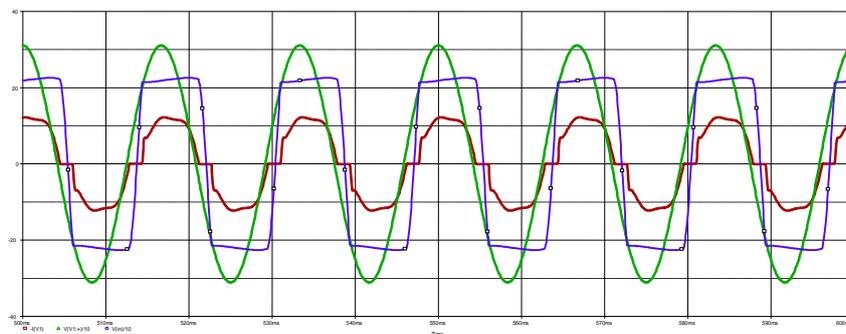
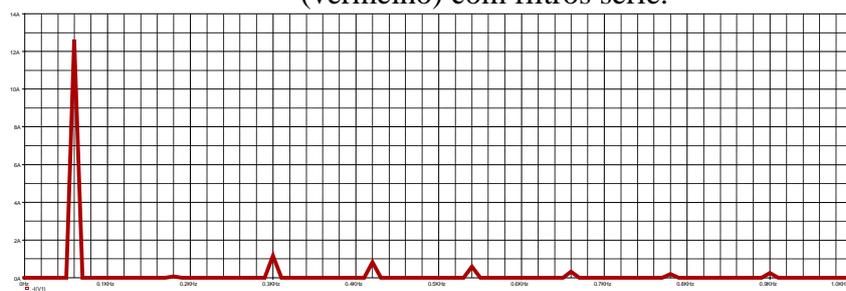


Figura 2.6 Circuito equivalente com filtragem série.



- a) Tensão na fonte (verde), tensão na entrada do retificador (azul) e corrente no circuito (vermelho) com filtros série.



- b) Espectro da corrente na fonte.

Figura 2.7 Formas de onda da corrente de entrada com filtro série e espectro da corrente.

2.3 Soluções ativas

Os pré-reguladores de FP ativos empregam interruptores controlados associados a elementos passivos. Algumas topologias operam o interruptor na frequência da rede (retificada), o que implica no uso de indutores e capacitores dimensionados para baixa frequência. A figura 2.8 mostra as formas de onda referentes a um conversor funcionando desta maneira [2.5]. O interruptor é acionado de modo a iniciar a corrente de linha antecipadamente (em relação a quando aconteceria a carga do capacitor de saída).

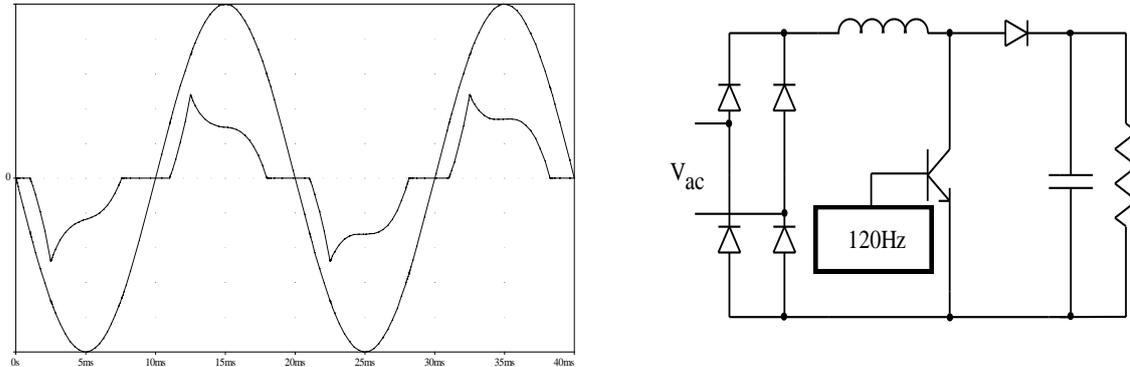


Figura 2.8 Formas de onda e circuito com interruptor controlado na frequência da rede

O emprego de um chaveamento em alta frequência, no entanto, é mais utilizado, uma vez que leva a uma drástica redução nos valores dos elementos passivos (indutores e capacitores) utilizados.

2.3.1 Elementos de armazenamento de energia

A figura 2.9 mostra tensão e corrente senoidais e em fase, características ideais de um PFP. A potência instantânea é também indicada. Usualmente as cargas alimentadas consomem uma potência ativa constante, cujo valor é a média do produto da tensão pela corrente (em 1/2 ciclo da rede). Quando a energia absorvida da rede é superior à consumida pela carga, a diferença deve ser armazenada, de modo que possa ser recuperada no intervalo em que a entrada é menor do que a saída.

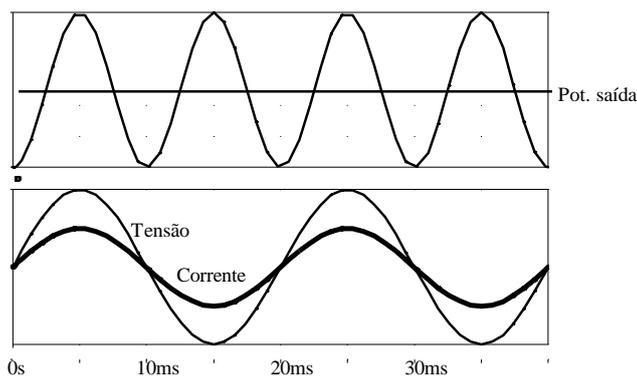


Figura 2.9 Potência instantânea de entrada para tensão e corrente senoidais.

A energia consumida pela carga em 1/4 do período da rede é dada por:

$$W_{dc} = P_{out} \frac{T}{4} \quad (2.3)$$

A energia absorvida da rede no mesmo intervalo é:

$$W_{ac} = \int_0^{T/4} P_{out} \cdot (1 - \sin(2\omega t)) dt = P_{out} \left(\frac{T}{4} - \frac{T}{2\pi} \right) \quad (2.4)$$

A mínima energia a ser armazenada é a diferença entre os 2 valores anteriores:

$$W_{\min} = W_{dc} - W_{ac} = P_{out} \frac{T}{2\pi} = \frac{P_{out}}{\omega} \quad (2.5)$$

A energia pode ser acumulada num indutor ou num capacitor. A mínima indutância é:

$$L_{\min} = \frac{P_{out}}{\omega \cdot I_{pk}^2} \quad (2.6)$$

onde I_{pk}^2 é a corrente de pico pelo indutor.

A mínima capacitância é:

$$C_{\min} = \frac{P_{out}}{\omega \cdot V_{pk}^2} \quad (2.7)$$

onde V_{pk}^2 é a tensão de pico sobre o capacitor.

Note-se que se os valores mínimos fossem utilizados, a energia acumulada nos elementos se esgotaria (por exemplo, a tensão cairia a zero no capacitor). Tal situação, em geral, não é admissível para a carga ligada após o PFP, o que leva à exigência de componentes com valor muito maior do que o mínimo.

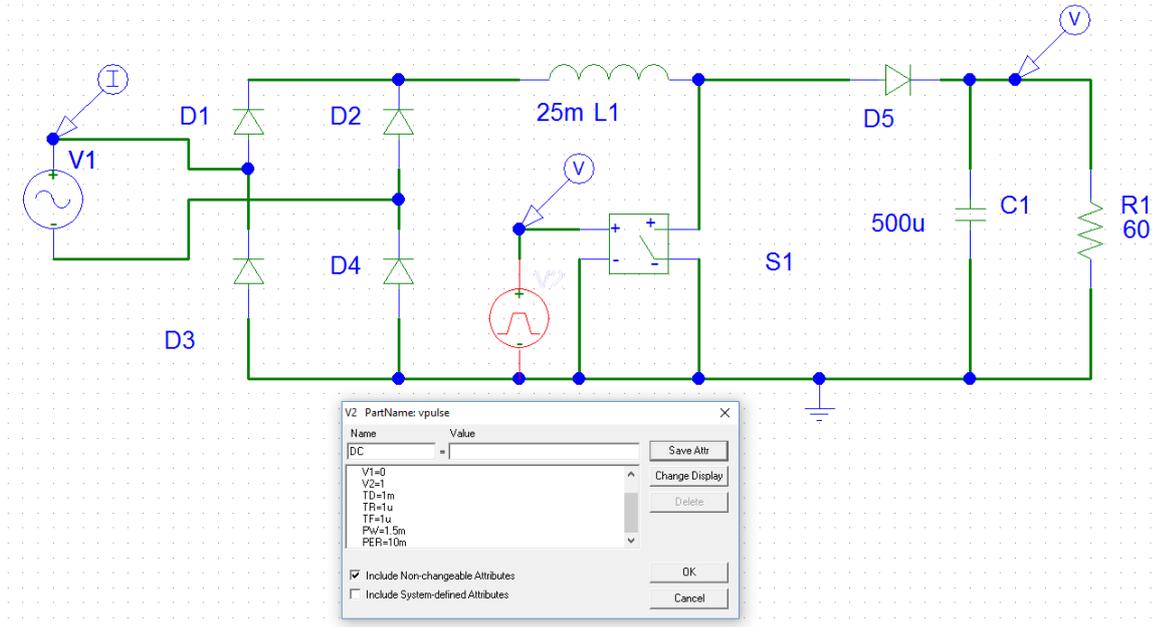
Devido ao elevado valor das indutâncias geralmente necessário para o uso de acumulação indutiva (possível nos conversores abaixador e abaixador-elevador de tensão), tal tipo de solução não é normalmente usada. Desta forma, o estágio de saída dos PFP utiliza capacitores, cuja função é manter razoavelmente constante a tensão em sua saída, mesmo com a elevada variação da tensão de entrada (retificador monofásico). Ou seja, este capacitor deve ser capaz de absorver toda a ondulação em 120Hz.

2.4 Referências Bibliográficas

- [2.1] J. Klein and M. K. Nalbant: “Power Factor Correction - Incentives, Standards and Techniques”. PCIM, June 1990, pp. 26-31
- [2.2] S. B. Dewan: “Optimum Input and Output Filters for a Single-Phase Rectifier Power Supply”. IEEE Trans. On Industry Applications, vol. IA-17, no. 3, May/June 1981
- [2.3] A. R. Prasad, P. D. Ziogas and S. Manlas: “A Novel Passive Waveshaping Method for Single-Phase Diode Rectifier”. Proc. Of IECON ‘90, pp. 1041-1050
- [2.4] R. Gohr Jr. and A. J. Perin: “Three-Phase Rectifier Filters Analysis”. Proc. Of Brazilian Power Electronics Conference, COBEP ‘91, Florianópolis - SC, pp. 281-286.
- [2.5] I. Suga, M. Kimata, Y. Ohnishi and R. Uchida: “New Switching Method for Single-phase AC to DC converter”. IEEE PCC ‘93, Yokohama, Japan, 1993.

Exercícios

1. Simule o circuito abaixo, que é um conversor PFP com comutação em baixa frequência. A tensão de entrada tem 325V de amplitude em 50 Hz. O sinal de comando inicial está indicado na figura. Determine o fator de potência e a DHT nesta condição. Altere o instante inicial e a duração do pulso para tentar melhorar o FP.



2. Simule o circuito abaixo e analise a eficácia dos filtros para minimização de harmônicas e correção do fator de potência. A tensão de entrada é 220 V (valor eficaz), em 60 Hz. Reduza 10 vezes os elementos em série com a fonte e repita a análise.

