



Rectificador em cascata com regulação automática

João Luis Afonso *

Este artigo descreve sucintamente o projecto e a construção de um rectificador em cascata de 4 estágios, 120 KV, do tipo Cockcroft-Walton, com regulação automática da tensão de saída através da comutação da tensão de entrada por dois tiristores em anti-paralelo. O controle em malha fechada é feito pela realimentação do sinal da tensão de saída obtido com um divisor resistivo. A inovação deste trabalho consistiu em utilizar-se não apenas o valor médio da tensão de saída, mas também o seu valor de *ripple*, como informação para o ajuste do ângulo de disparo dos tiristores. Dessa forma, o sistema de controle torna-se mais rápido, pois, diferentemente do valor médio da tensão de saída, o valor do *ripple* varia instantaneamente com a variação da carga aplicada à saída do rectificador em cascata.

1. Introdução

Os rectificadores em cascata são circuitos que além de funcionarem como conversores CA-CC produzem a tensão de saída em um nível superior à tensão de entrada, ou seja, operam simultaneamente como rectificadores e multiplicadores de tensão. Devido a essas características são geralmente usados quando há a necessidade da produção de tensões CC muito altas, com baixas correntes, como no caso de ensaios de efeito corona ou de poluição em isoladores, além de aplicações industriais como pintura electrostática, equipamentos de raios x, precipitadores e filtros electrostáticos, etc.

São possíveis vários arranjos, para os rectificadores em cascata, sendo geralmente do tipo capacitivo, nos quais a potência é transmitida entre os estágios da cascata através de condensadores. Como grande vantagem dos rectificadores em cascata temos o facto de utilizarem componentes (condensadores e díodos) que precisam suportar apenas uma parcela do valor da tensão de saída produzida.

O arranjo escolhido para o rectificador em cascata construído foi do tipo Cockcroft-Walton, pois esta configuração permite uma maior tensão de saída com um menor número de componentes.

2. Estudos, Projecto e Construção

A operação do rectificador em cascata é não linear, e dessa forma as soluções analíticas para o mesmo apresentam resultados satisfatórios apenas dentro de certos limites (*small signal dynamics*). Dessa forma, quando deseja-se estudar o funcionamento do rectificador em cascata de forma rigorosa e para

variadas condições de operação, deve-se recorrer à resolução numérica ou às análises experimentais, que podem ser feitas em um modelo reduzido. Para o desenvolvimento dos estudos efectuados optou-se pela realização de simulações computacionais utilizando-se o programa SPICE e também pela execução de ensaios experimentais em um rectificador em cascata de 4 estágios, 10 KV.

A validação da modelagem utilizada nas simulações computacionais foi feita pela comparação de resultados das simulações com medições efectuadas em ensaios experimentais do modelo reduzido. Para as simulações do rectificador em cascata de 120 KV foi garantida uma modelagem precisa através das seguintes considerações: reactância de dispersão e resistência dos enrolamentos do transformador, curva característica de condução dos díodos, modelagem de cada condensador por um circuito R L C série obtido através de ensaios. As simulações computacionais permitiram obter os seguintes resultados, importantes no projecto do rectificador em cascata:

- Valores máximos possíveis para as correntes nos díodos quando da energização do circuito.
- Correntes nos díodos quando da ocorrência de curto-circuitos no rectificador em cascata.
- Valores máximos das tensões nos componentes e na saída do rectificador em cascata.
- Valores máximos possíveis para as correntes nos díodos quando da energização do circuito.
- Correntes nos díodos quando da ocorrência de curto-circuitos no rectificador em cascata.
- Valores máximos das tensões nos componentes e na saída do rectificador em cascata.- Valor de resistência a ser colocado na saída do rectificador em cascata de forma a evitar-se correntes nos rectificadores e condensadores

* Assistente do Departamento de Electrónica Industrial

maiores do que as suportáveis pelos mesmos.

O rectificador em cascata de 120 kV foi montado em uma estrutura móvel e modular, que através de alterações nas conexões permite a operação nas configurações dadas abaixo. Todos os condensadores têm valores nominais de 4,7 μ F, 30 kV. No caso da operação com 2 estágios os condensadores são colocados em paralelo dois a dois (C1//C3,

A construção das unidades rectificadoras fez-se através da associação série de diodos de avalanche controlada, imersos em óleo isolante dentro de tubos de PVC. O uso de diodos de avalanche controlada evitou a necessidade da utilização de circuitos equalizadores de tensão. Contudo, de forma a otimizar-se a ligação série dos diodos, foram feitos ensaios para determinação das características de bloqueio reverso em todos os diodos, sendo colocados

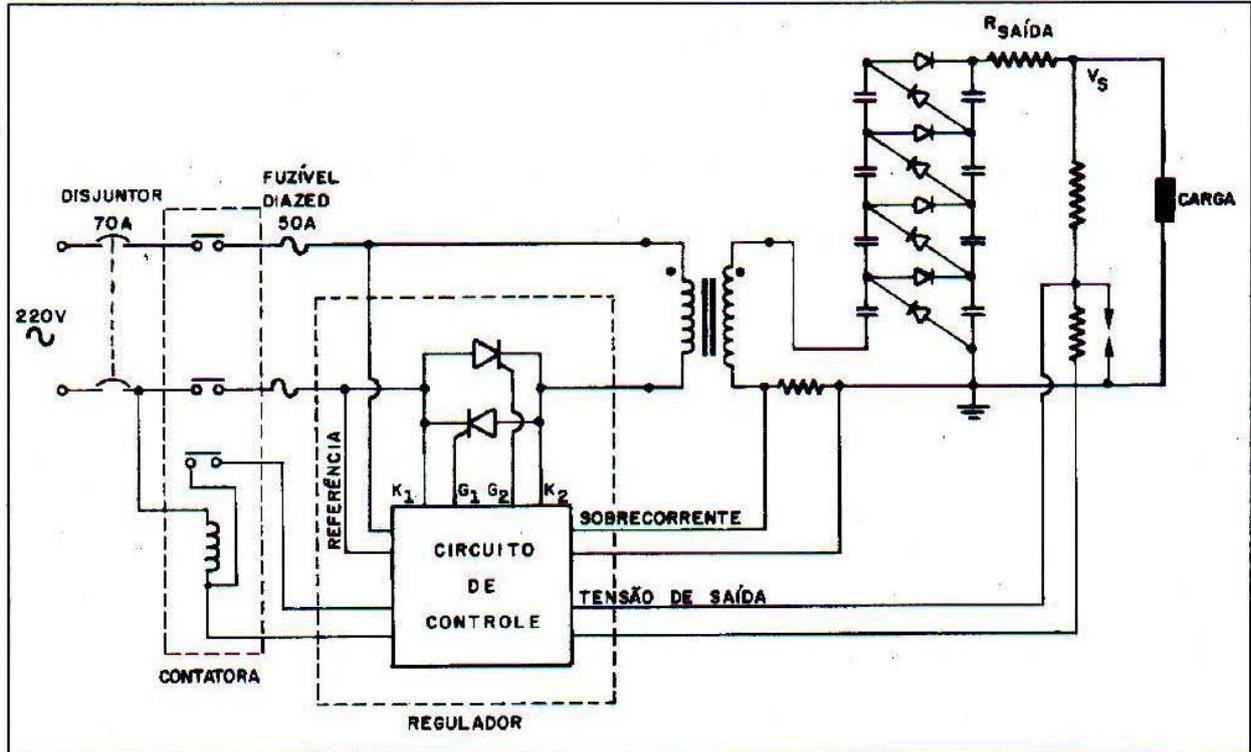


figura 1 - Circuito do rectificador em cascata com regulador a tiristores.

C2//C4, C5//C7 e C6//C8) e no caso da operação com 1 estágio são associados em paralelo quatro a quatro (C1//C3//C5//C7 e C2//C4//C6//C8). Os respectivos valores nominais para operação sem regulador, dados abaixo, foram obtidos a partir das especificações da norma IEC 60-2 que determina os valores máximos admissíveis para ΔV e 2δ como sendo respectivamente iguais a 5% e 10%.

- 4 estágios:	$V_s = 120 \text{ kV}$	$I = 32,5 \text{ mA}$
	$\Delta V = 5\%$	$2\delta = 0,48\%$
- 3 estágios:	$V_s = 85,5 \text{ kV}$	$I = 54,3 \text{ mA}$
	$\Delta V = 5\%$	$2\delta = 0,63\%$
- 2 estágios:	$V_s = 57,0 \text{ kV}$	$I = 212 \text{ mA}$
	$\Delta V = 5\%$	$2\delta = 0,93\%$
- 1 estágio:	$V_s = 28,5 \text{ kV}$	$I = 1150 \text{ mA}$
	$\Delta V = 5\%$	$2\delta = 1,63\%$

Sendo: V_s = tensão de saída

ΔV = variação percentual do valor da tensão média de saída

I = corrente de saída

2δ = valor percentual do ripple da tensão de saída.

em série os diodos com características mais semelhantes. Após construídas as unidades rectificadoras as mesmas foram submetidas a dois testes: teste de capacidade de bloqueio reverso (onde foram sujeitas a uma tensão reversa de 45 KV) e teste de elevação de temperatura com corrente nominal.

3. O Regulador a Tiristores

O regulador a tiristores (Fig. 1) comuta a tensão sinusoidal aplicada ao primário do transformador através de dois tiristores (SCRs) ligados em anti-paralelo, e com isso varia o valor médio da tensão CC à saída do rectificador em cascata. O regulador pode operar em dois modos:

- Malha Aberta: o ângulo de disparo dos tiristores é ajustável pelo operador, permanecendo fixo.
- Malha Fechada: o ângulo de disparo, ajustado pelo operador para a obtenção da tensão de saída desejada, varia automaticamente sempre que houver variação da carga ou da tensão de

entrada, de modo que a tensão de saída se mantenha constante. O controle em malha fechada é feito por um controlador PI (Proporcional-Integral) que tem como realimentação um sinal da tensão de saída.

O circuito de disparo dos tiristores foi implementado a partir do circuito integrado TCA 780, sendo o isolamento entre o andar de potência e o circuito de controle dado por transformadores de pulso operando em uma frequência de 3,5 KHz.

Desenvolveu-se um circuito para inicialização do ângulo de disparo dos tiristores, que faz com que ao energizar-se o rectificador em cascata o ângulo de disparo dos tiristores inicie sempre em 180° , variando lentamente até ao ângulo ajustado. Este procedimento faz com que os condensadores do rectificador em cascata se carreguem suavemente, evitando correntes elevadas que podem ser prejudiciais aos diodos e aos próprios condensadores. Foi ainda implementado um circuito sensor de sobrecorrente, que procede a inibição dos pulsos de disparo dos tiristores a partir do momento em que o valor instantâneo da corrente na entrada do rectificador em cascata assuma um valor superior a um limite previamente ajustado. Este

circuito não evita sobrecorrentes transitórias ou correntes de curto-circuito à saída do rectificador em cascata, que devem ser limitadas por uma resistência colocada à saída do rectificador em cascata, mas faz com que o transformador não mais alimente o rectificador em cascata a partir do semiciclo posterior à identificação do problema.

O máximo valor da tensão média de saída do rectificador em cascata operando com regulador ocorre para um ângulo de disparo dos tiristores em torno de 90° , sendo esse valor de tensão maior do que o obtido para a operação do rectificador em cascata sem regulador. Contudo, a operação com regulador leva a um aumento no valor do *ripple* da tensão de saída. Para ângulos de disparo próximos a zero a tensão de saída é a mesma que se obtém sem o uso do regulador.

Observa-se que a variação da tensão de saída provocada por uma mudança de carga é menor para o rectificador em cascata operando com o regulador a tiristores, mesmo quando a operação do regulador é feita em malha aberta (Fig. 2(a) e (b)). Quando da operação do regulador em malha fechada, a tensão de saída mantém-se constante para variações de carga (Fig. 2(c)) ou da tensão de entrada. A estabilidade do sistema de controle foi comprovada por aplicações e

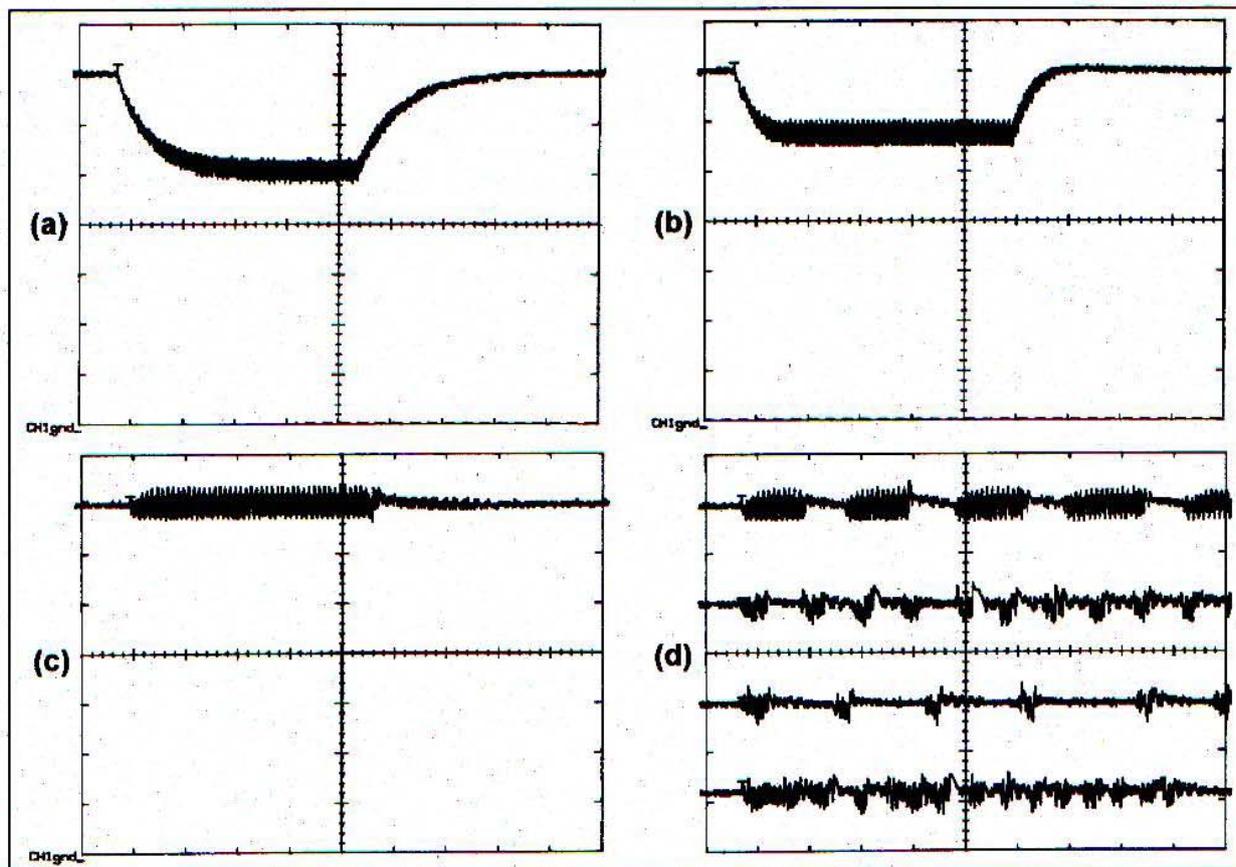


Figura 2 - Comportamento da tensão de saída para aplicação e retirada de uma carga: (a) sem regulador; (b) com regulador operando em malha aberta; (c) com regulador operando em malha fechada. (d) Várias aplicações e retiradas da carga com regulador operando em malha fechada.

retiradas sucessivas de carga, a intervalos variados, tendo o regulador mantido o valor médio da tensão de saída do rectificador em cascata constante (Fig. 2(d)).

A resposta do sistema de controle às variações de carga, uma vez ajustado o ganho proporcional, ocorre no semiciclo da tensão de alimentação imediatamente posterior à variação da carga (Fig. 3(a) e (b)). Isso é conseguido graças à presença da forma de onda do *ripple* da tensão de saída no sinal de referência que gera os ângulos de disparo para os tiristores (Fig. 3(c)). Um *ripple* maior leva a um menor ângulo de disparo, o que ocasiona um aumento no valor da corrente de entrada do rectificador em cascata, e vice-versa.

4. Conclusões

O regulador a tiristores mostra-se eficaz para um ajuste amplo e preciso da tensão de saída de um rectificador em cascata, substituindo com vantagens a utilização de um auto-transformador variável para este fim. A utilização do *ripple* da tensão de saída como parâmetro adicional para o ajuste do ângulo de disparo dos tiristores, de forma a manter-se o valor da tensão

média de saída constante, demonstrou ser uma técnica que torna o controle em malha fechada rápido e estável, além de não acarretar em acréscimo de custo, uma vez que o sinal de *ripple* é obtido juntamente com o sinal do valor médio da tensão de saída.

Referências

- [1] João L. Afonso, "Projecto e Construção de um Rectificador em Cascata com Regulação Automática para Aplicação em Alta Tensão", Tese M.Sc., Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.
- [2] Y. Beauséjour e F.A.M. Rizk, "Feedback-Controlled Cascade Rectifier Source for HV Testing of Contaminated DC Insulators", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-100, n° 7, 1981.
- [3] M. D. Bellar, "Modelagem e Análise de Rectificadores em Cascata Tipo Cockcroft-Walton", Tese M.Sc., Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1989.
- [4] F. A. Chagas, J. C. Barros, J. M. Duque e R. M. Maia, "Rectificador para Ensaio de Poluição em CCAT: Requisitos de Projecto e Dimensionamento", IX SNPTEE, Belo Horizonte, Brasil, 1987.
- [5] N. Hyltén-Cavallius, "High Voltage Laboratory Planning, Secção 9.4, Emile Haefely & Co., 1986

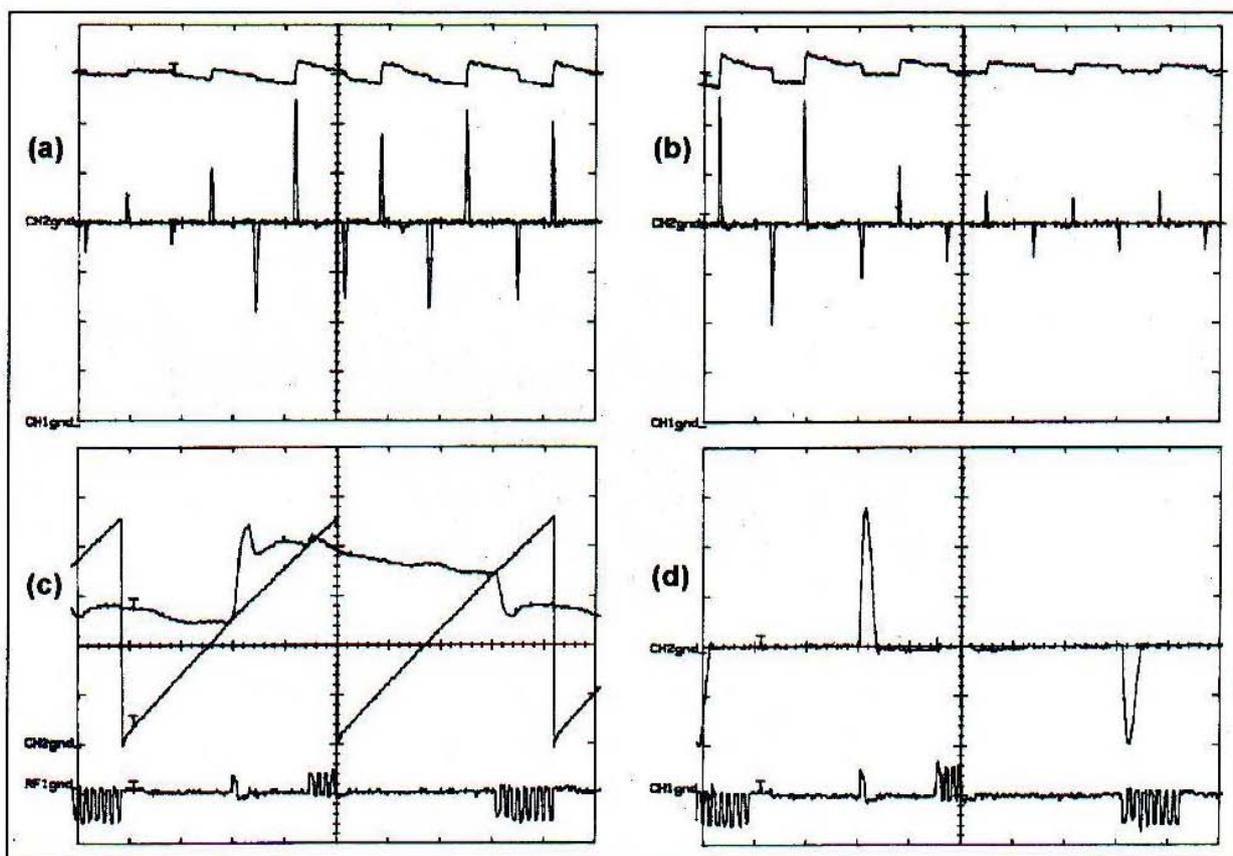


Figura 3 - Tensão de saída e corrente de entrada no rectificador em cascata de 10 KV para operação com o regulador a tiristores: (a) quando do aumento da carga, (b) quando da redução da carga. (c) Tensão dente de serra e tensão de referência para o TCA 780, e pulsos de disparo. (d) Corrente de entrada do rectificador em cascata e pulsos de disparo.