Um inversor Multinível em Corrente para Interconexão de um SMES ao Sistema Elétrico

Sérgio Daher*, Ricardo Silva Thé*, Fernando Antunes* e Ruth Leão**

*Grupo de Processamento de Energia e Controle - GPEC
**Grupo de Sistemas de Energia Elétrica - GSEE
Departamento de Engenharia Elétrica - UFC
Cx. Postal - 6001 Campus do Pici, 60455-760 Fortaleza - Ce - Brasil
Telefone: 55 85 288-9580 Fax: 55 85 288-9574
e-mail: fantunes@dee.ufc.br

Resumo - Neste trabalho é apresentada a versão monofásica de um Inversor Fonte de Corrente (CSI) multinível como uma solução para interfacear um SMES e o sistema elétrico. O inversor é implementado com uma nova célula multinível em corrente que garante a operação do CSI multinível com eliminação de harmônicas na tensão e na corrente de saída sem o uso de modulação em altas frequências ou operação em malha fechada. Neste trabalho estuda-se as estruturas com sete e nove níveis na corrente de saída. Resultados de simulação são apresentados para o CSI ligado ao sistema elétrico.

***Abstract* -** This paper presents a monophase multilevel CSI for interconecting a SMES to the electric system. The inverter is implemented with a new current cell which ensures the CSI to provide harmonic reduction at the output voltage and current without the use of high frequency modulation or closed-loop operation. The seven and nine level structures are analised via simulation results.

1. INTRODUÇÃO

Bobinas supercondutoras de armazenamento de energia (SMES) são sistemas que armazenam energia no campo magnético de uma bobina supercondutora com resistência nula, que pode ser uma fonte de energia por curtos períodos. O interesse pelo sistema SMES visando a qualidade de energia tem crescido porque este sistema pode gerar ou absorver energia ativa e reativa, respondendo rapidamente às necessidades do sistema em situações tais como: controle automático da geração, suprimento da demanda de energia nas horas de pico, melhoria na estabilidade, controle de tensão, etc. [1,2]

Interconectar a bobina supercondutora (sistema cc) ao sistema elétrico (sistema ca), faz-se necessário um condicionador de energia. Os inversores estáticos apresentam-se como uma solução simples e precisa para o condicionador de energia.

Neste trabalho é apresentada a versão monofásica de um Inversor Fonte de Corrente (CSI) multinível como uma solução para interfacear um SMES e o sistema elétrico. O inversor é implementado usando uma célula multinível em corrente apresentada em[3]. O CSI multinível fornece tensões e corrente na saída com eliminação de harmônicas sem o uso de modulação em altas frequências ou operação em malha fechada[4]. Pelo fato de poder operar na frequência fundamental do sistema elétrico (50Hz ou 60Hz), não ficando sujeito a elevadas perdas por chaveamento, o CSI multinível é capaz de operar com altos níveis de potência.

O CSI multinível aqui apresentado é capaz de operar com qualquer nível na corrente de saída, dado que a estrutura apresentada é genérica. Neste trabalho estuda-se as estruturas com sete e nove níveis na corrente de saída. Resultados de simulação são apresentados para o CSI ligado ao sistema elétrico.

2. ESTRUTURA GENÉRICA DO CSI MULTINÍVEL

A figura 1 mostra a estrutura genérica do CSI multinível que é discutido neste trabalho. Essa estrutura é obtida através da conexão de inversores de 3 níveis através de indutores de divisão. Por exemplo, a estrutura de cinco níveis é formada por dois inversores de três níveis e 2 indutores, a de 5 níveis é formada por três inversores e 4 indutores e assim por diante.

As chaves S_n n=1,3,5,7..., são chaves unidirecionais que podem ser implementadas, por exemplo, por GTO's ou por IGBT's em série com um diodo. As chaves S_n e S_{n+1} operam complementarmente. Esta condição garante que sempre haverá um caminho para as correntes que circulam através dos indutores de divisão como também para corrente da fonte de corrente. Portanto, o estado da estrutura é definido completamente dado os estados das chaves pares ou das ímpares.

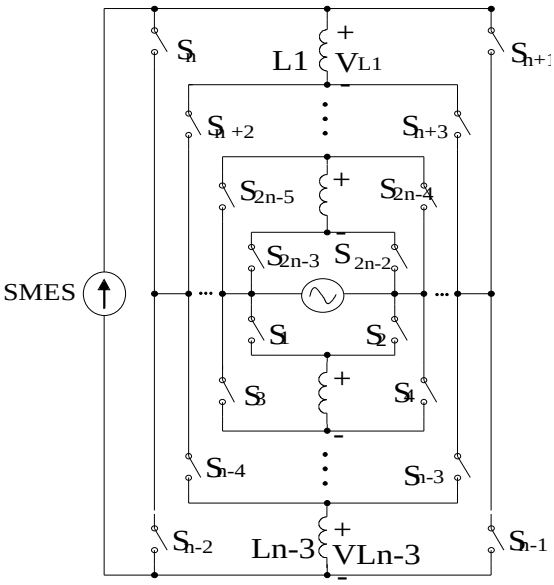

Figura 1 - Estrutura Genérica do CSI Multinível

Ao longo desse trabalho, alguns termos assumem significados específicos. Esses termos são definidos a seguir.

1. Combinação: é chamado de combinação a informação dos estados (aberta ou fechada) das chaves da estrutura em um determinado intervalo de tempo. A representação de uma combinação é feita por um número inteiro positivo cuja representação binária está relacionada com os estados das chaves ímpares da estrutura do CSI. As chaves pares são complementares às chaves ímpares.

2. Sequência: será denominada de sequência um conjunto organizado de combinações.

3. Sequência de Frequência Mínima: será chamada de sequência de frequência mínima a sequência cujas combinações consecutivas diferem de apenas um bit (o estado de uma chave e sua respectiva complementar).

3. PROBLEMA DE CONTROLE

Em geral, um problema de controle é formulado a partir de especificações pré-estabelecidas. Dessa forma, foi definido que o funcionamento do CSI deve seguir as seguintes especificações:

a) A frequência de operação de todas as chaves deve ser igual a frequência fundamental de saída. Isto implica que a estrutura deve ser comandada por uma sequência de frequência mínima.

b) As chaves devem conduzir correntes médias iguais, pois um dos objetivos do CSI é proporcionar a divisão da corrente total através das chaves da estrutura.

c) Espera-se obter um conteúdo harmônico reduzido na corrente de saída. Esta é outra vantagem do CSI que pode ser obtida através da escolha apropriada das larguras dos diversos níveis.

e) A operação da estrutura não deve depender da carga conectada.

Além dessas especificações, existe mais um condição que é necessária ao funcionamento do CSI multinível:

f) A tensão média sobre cada indutor de divisão deve ser nula, caso contrário não será obtido o balanço de corrente entre das chaves da estrutura [4].

Baseando-se nas condições a) - f), têm-se que o CSI deve ser comandado por uma sequência que atende as seguintes especificações:

1 A sequência de chaveamento deve ser uma sequência de frequência mínima.

2. A sequência de chaveamento deve produzir tensões médias nulas em todos os indutores de divisão, para qualquer tipo de carga que esteja conectada.

3. O tempo de condução de cada chave deve ser igual a metade do período da sequência de chaveamento e deve ser independente das larguras dos diversos níveis.

4. O ripple de tensão nos indutores de divisão deve ser o menor possível.

4. SEQUÊNCIAS DE CHAVEAMENTO

Foi desenvolvido um método geral para determinação da s sequências de chaveamento da estrutura de n-níveis mostrada na figura 1. As sequências de chaveamento das estruturas de três e cinco níveis podem ser encontradas por simples inspeção da estrutura. Por outro lado, a determinação das sequências de chavemaneto das estruturas de sete níveis ou mais apresenta maior dificuldade, devido ao grande número de combinações. Nestes casos, o uso de um computador digital se faz necessário para resolver o problema de controle dessas estruturas (o problema de controle consistem em determinar sequências de chaveamento adequadas).

O primeiro passo a seguir deve ser determinar uma tabela que relaciona cada combinação com o nível de corrente obtido na saída e com as tensões sobre cada indutor de divisão.

O próximo passo, após ser montada a tabela de combinações, é procurar as sequências de frequência mínima. Esta procura para as estruturas de sete e nove níveis é praticamente irrealizável sem a ajuda de um computador, pois o número de sequências é extremamente grande. Por exemplo, para a estrutura de sete níveis, 26.244.000.000 sequências possíveis das quais 518,400 são sequências de frequência mínima. Na prática, é necessário um algoritmo bem planejado para selecionar estas sequências.

Depois que as sequências de frequência mínima são determinadas, deve-se determinar o grupo de sequências que atendem as especificações 2, 3 e 4 do item 3.

É importante ainda observar que se uma sequência de um período (período da forma de onda

de saída) não for encontrada, deve-se procurar por sequências maiores. De fato, observou-se que as estruturas de 5, 7 e 9 níveis levam a sequências de 2, 3 e 4 períodos, respectivamente. Ou seja, não é possível encontrar sequências menores que estas que satisfaçam as especificações impostas. Ainda pode-se observar que não existe apenas uma sequência válida para cada estrutura, mas existe um conjunto. O critério final que foi utilizado na determinação das sequências foi o ripple de tensão nos indutores; selecionou-se as sequências que proporcionaram o menor ripple.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Simulações foram realizadas utilizando-se as estruturas de sete e nove níveis, de forma a validar as sequências encontradas. As figuras 2 e 3 mostram os esquema da estruturas de sete e nove níveis, respectivamente. Nessas simulações, foi utilizada uma fonte de corrente de 400A para representar o SMES. A carga utilizada foi uma fonte de tensão senoidal de 300V de pico, representando um barramento infinito. As larguras dos diversos níveis foram selecionadas de acordo com a tabela 1, obtendo-se assim um conteúdo harmônico reduzido na forma de onda da corrente de saída.

A sequência utilizada para comandar a estrutura de sete níveis é mostrada abaixo (sequência de três períodos):

56 57 61 63 47 39 7 5 1 0 32 40
56 60 62 63 31 15 7 6 4 0 8 24
56 58 59 63 55 23 7 3 2 0 16 48

A sequêncis de 4 períodos utilizada para comandar a estrutura de 9 níveis é listada a abaixo:

240 248 252 254 255 239 207 143 15 31 63 127 255 247 243 241
240 244 252 253 255 223 207 79 15 47 63 191 255 251 243 242
240 176 48 32 0 2 3 11 15 13 12 4 0 64 192 208
240 112 48 16 0 1 3 7 15 14 12 8 0 128 192 224

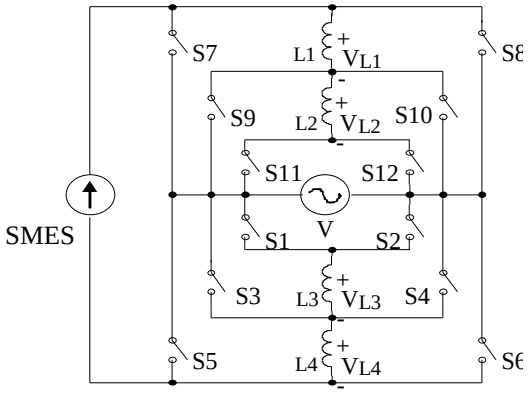

Figura 2 - Estrutura de Sete Níveis

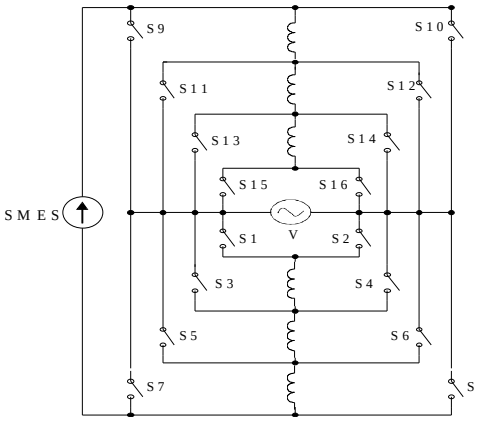

Figura 3 - Estrutura de nove níveis.

A corrente e tensão na saída (mesma do barramento infinito) da estrutura de sete níveis são mostradas na figura 4.

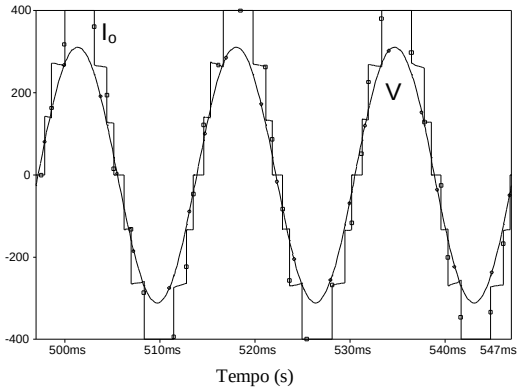

Figura 4 - Tensão e Corrente na Saída da Estrutura de 7 níveis.

Pode-se ver na figura 4 que a corrente e tensão estão em fase, indicando que o SMES está entregando energia ao sistema.

A figura 5 mostra o espectro da corrente na figura 4.

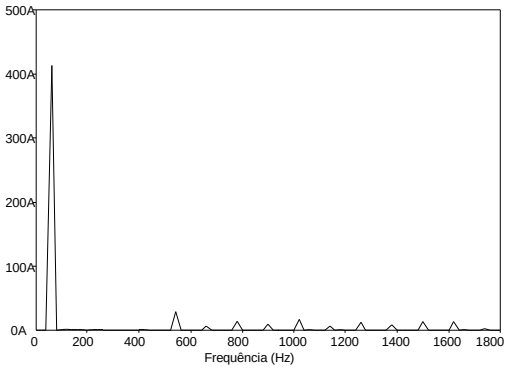

Figura 5 - Espectro da Corrente de Saída do CSI de 7 níveis.

O inversor de nove níveis ligado ao barramento infinito é mostrado na figura 6 e o espectro harmônico da corrente de saída está representado na figura 7. Pode-se observar que a primeira harmônica superior está na frequência de 660Hz, indicando que o inversor de nove níveis elimina até a nona harmônica, quando a largura de cada nível está de acordo com a tabela 1.

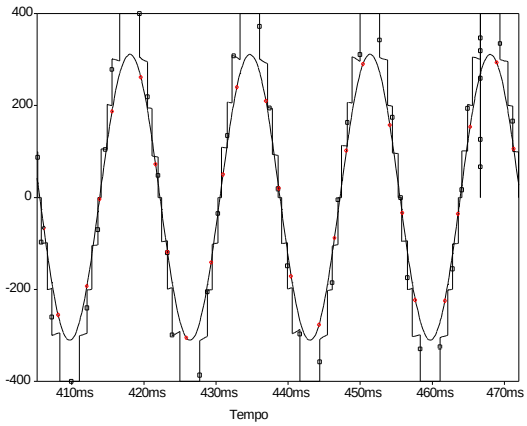

Figura 6 Tensão e Corrente na Saída do Inversor de nove níveis

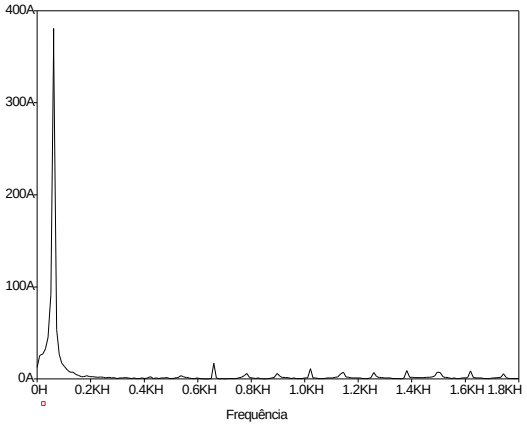

Figura 7 Espectro Harmônico para Corrente de Nove Níveis

A figura 8 mostra o CSI absorvendo potência ativa do sistema e a figura 10 uma situação em que o SMES opera como fonte de reativos.

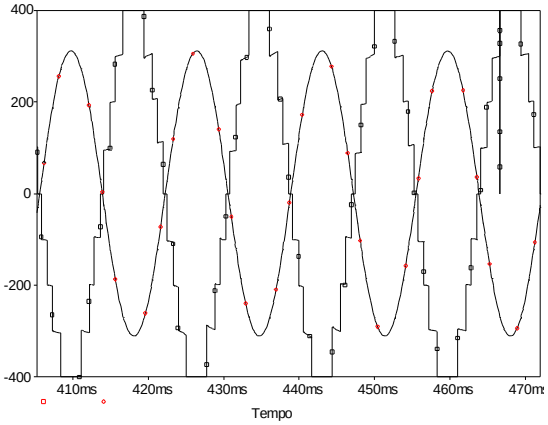

Figura 8 Sistema Elétrico fornecendo Potência ao SMES

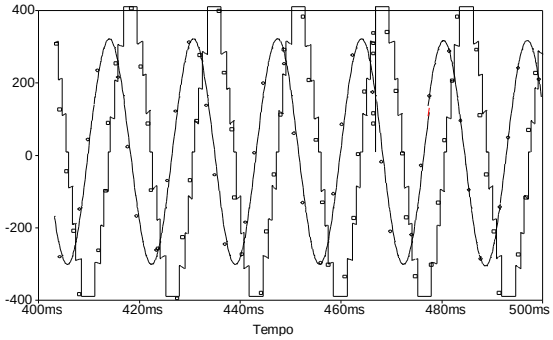

Figura 9 SMES fornecendo Potência Reativa ao Sistema Elétrico

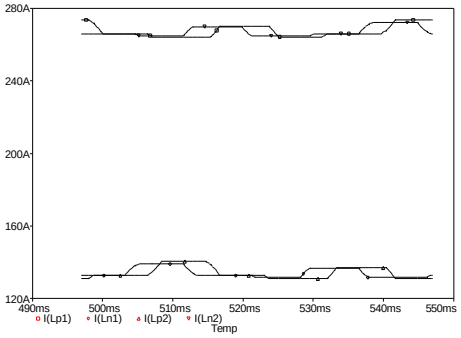

Figura 10 Corrente nas indutâncias de Equilíbrio

6. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou a versão monofásica de um conversor cc-ca para interligar uma bobina semicondutora a um sistema elétrico. A estratégia de chaveamento usada permite que as chaves operem na frequência do sistema, e o fato do conversor ter uma estrutura multinível torna possível a operação do SMES com eliminação de harmônicas da corrente e da tensão de saída, sem o uso de modulação da frequência de chaveamento.

Pelo fato de poder operar na frequência fundamental do sistema elétrico (50Hz ou 60Hz), não ficando sujeito a elevadas perdas por chaveamento, o CSI multinível é capaz de operar com altos níveis de potência.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Amparo à Pesquisa - FUNCAP por apoiar o estudante Sérgio Daher no seu Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Ceará.

8. REFERÊNCIAS

[1] N. S. Choi, J. G. Cho and G. H. Cho, “A general circuit topology of multilevel inverter”, *in Proceedings of the 1991 IEEE PES Conference*, pp. 96-103.

[2] T. A. Meynard and H. Foch, “Multilevel conversion: high voltage choppers and voltage-

source inverters", *in Proc. of the 1992 IEEE PES Conference*, pp. 397-403.

[3] H. Braga e I. Barbi, "A New Technique for Parallel Connection of Commutation Cells: Analysis, Design and Experimentation", *PESC-1995 conference*, pp. 81-86.

[4] Antunes,F. Braga,H and Barbi,I. 'Application of a Generalized Multilevel Current Cell to a Current Source Inverter' IECON'95, Nov./95. Orlando USA

[5] Gavrilovic N.M "Optimal Control of SMES Systems for Maximum Power System Stability and Damping" Electrical Power &Energy System, Vol 17 1995 pp 199-205

[6] Murakami,Y at al "Simultaneous Active and Reactive Power Control of Superconductive Magnetic Energy Storage Using GTO Converter" IEEE Trans. On Power Delivery Vol1 1986

[7] Gavrilovic N.M et al " SMES systems for Transient Stability and Damping Improvement of Power Systems" Proc American Power Conference Vol. 55-1 Chicago, Apr. 1989

[8] P. Bhagwat e V. R. Stefanovic, "Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter", *IEEE Trans. Ind. Appl.* , vol. 1A-19, No. 6, pp. 1057-1069, Nov./Dec. 1983.

A amplitude da k-ésima harmônica (considerando-se Vk =V, k=1,2,..) da forma de onda mostrada na figura 11 é dada por(1)

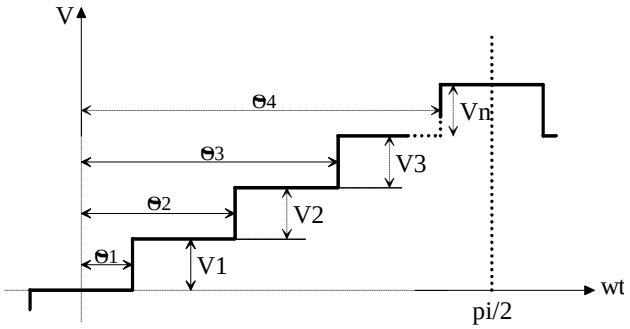

Figura 11 Onda multinível Generalizada

$$e = \frac{4}{\pi} \sum_{n=\text{ímpar}} \frac{\text{sen}(nwt)}{n} \sum_{k=1}^{p} V_k \cos(n\theta_k) \qquad (1)$$

onde p é o número de níveis em ¼ de ciclo..

Se todas as alturas são iguais a V, da eq. (1) conclui-se que a magnitude da k^{th} harmônica é dada por:

$$a_k = \frac{4V}{np} \sum_{k=1}^{p} \cos(nq_k), \text{ k odd} \qquad (2)$$

O CSI aqui abordado possui níveis com iguais alturas. A redução de harmônica é obtida variando-se a largura dos níveis. O número de harmônicas possíveis de serem eliminadas é igual a (n-1)/2, onde n é o número de níveis. O inversor de sete níveis pode eliminar até três componentes harmônicos da corrente de saída, enquanto que o de nove níveis pode eliminar até quatro componentes. As larguras otimizadas para os diversos níveis podem ser calculadas usando um algoritmo de minimização de uma função de várias variáveis. Este procedimento foi usado para reduzir as harmônicas de baixa ordem para os inversores até nove níveis. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 1.

APÊNDICE

Tabela 1: Largura dos Níveis para Redução das Harmônicas de Baixa Ordem

	Largura do Nível(^{o})				Valor da Harmônica(%)							TDH (%)	
Estrutura	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Vh_1	Vh_3	Vh_5	Vh_7	Vh_9	Vh_{11}	V_{h13}	TDH*	TDH**
3-nívies	30.00	-	-	-	100	0.00	20.0	14.3	0.00	9.09	7.69	24.58	27.31
5-níveis	12.00	48.00	-	-	100	0.00	0.00	8.83	0.00	9.09	4.75	8.83	13.53
7-nívies	11.67	26.93	56.1	-	100	0.01	0.00	0.00	7.03	1.54	3.46	7.03	7.98
9-níveis	5.21	22.84	37.1	60.5	100	0.34	0.19	0.58	1.11	4.17	1.68	1.31	4.68

* Considerada até a nona harmônica.

** Considerada até a décima terceira harmônica.