

ANÁLISE CRÍTICA DE DISPOSITIVOS ESTÁTICOS DE COMPENSAÇÃO SÉRIE DE BAIXA TENSÃO COM TRANSFORMADORES SHUNT: CUSTOS VERSUS FUNCIONALIDADE

Bruno Marciano Lopes
PPGEE/UFMG
bmarcianol@yahoo.com.br

Sidelmo M. Silva
HPE – High Power Engineering
sidelmo@ieee.org

Braz J. Cardoso Filho
DEE/UFMG
cardosob@ufmg.br

José A. S. Brito
Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
jbrito@coelba.com.br

Gustavo Travassos
Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
jgtravassos@coelba.com.br

Resumo - Compensadores série têm sido propostos e utilizados com sucesso na proteção de cargas sensíveis contra variações momentâneas de tensão, especialmente em aplicações de média e alta potência. O objetivo deste estudo é avaliar o impacto das especificações do compensador série, tais como profundidade e duração dos afundamentos compensados e capacidade de regular a tensão da carga, nos custos e volume deste. Inicialmente, é realizada uma discussão a respeito da intensidade e frequência dos eventos de qualidade de energia e dos prejuízos a estes associados. Técnicas de projeto de conversores são apresentadas, ressaltando-se particularidades do projeto para operações de curta duração. Tais técnicas são utilizadas em dois projetos, cujas características das cargas são iguais, mas a capacidade de compensação dos dispositivos é distinta, de modo a se avaliar as diferenças em custo, peso e volume dos equipamentos, fornecendo critérios para uma análise objetiva da relação entre custos e funcionalidade.

Palavras-Chave – afundamento de tensão, cálculo de perdas, projeto de conversores, restaurador dinâmico de tensão.

CRITICAL ANALYSIS OF LOW VOLTAGE STATIC SERIES COMPENSATORS: COST VERSUS FUNCTIONALITY

Abstract – Series compensators have been proposed and used successfully on the protection of sensible loads against sudden voltage variations, especially in medium to high power applications. This study evaluates the impact of the series compensator specification, like compensated sag depth and duration, as well as the capacity of regulating the load voltage, on its size and cost. Initially, a discussion on the magnitude and frequency of power quality events and the associated financial losses is presented. Design techniques are then proposed with emphasis on design particularities for short time operation. These techniques are applied in two

Artigo submetido em 2 de junho de 2005. Revisado em 30 de junho de 2005.
Aceito por recomendação do Editor José Antenor Pomilio.

projects that use the same load, but different compensation capacities, in order to evaluate the discrepancies on the cost, weight, and size of the equipment.

Keywords - voltage sag, losses calculation, converter design, dynamic voltage restorer.

I. INTRODUÇÃO

Afundamentos de tensão são definidos como um decréscimo do valor eficaz da componente fundamental da tensão, durante um intervalo que varia entre meio ciclo e 1 minuto [1], e são causados, em sua maioria, por falhas na rede elétrica, partida de grandes cargas e energização de transformadores [2]-[3]. Quando ocorrem, os afundamentos de tensão podem causar o mau funcionamento de equipamentos, causando prejuízos associados à retomada de processos, recondicionamento de materiais, danos em equipamentos, etc. [4]. Tais prejuízos podem chegar a 150 bilhões de dólares em um ano, de acordo com dados levantados nos Estados Unidos [11]. Soluções convencionais, tais como supressores de surto e reguladores de tensão, não são capazes de resolver tais problemas, e sistemas tipo UPS, possuem alto custo de aquisição (\$300,00-\$1000,00/kVA) e manutenção [2].

A tecnologia de dispositivos estáticos de compensação série tem sido usada com sucesso, especialmente em aplicações de média e alta potência [5]-[6]. Encontra-se na literatura uma grande variedade de propostas de topologias e filosofias de operação, e algumas propostas comerciais. Dentre os atuais fabricantes podem ser citados a S&C, detentora da marca DVR [7]; a ABB, com produtos de média e baixa tensão [8]-[9]; a Soft Switching Technologies, com a linha DySC [2]-[10] e a Eaton, com o SRT. Dentre as diversas propostas de funcionalidade, podem ser citadas:

- a capacidade de compensação em termos de duração e profundidade;
- a capacidade de compensar tensões trifásicas desbalanceadas;
- a capacidade de compensar sobretensões e os níveis suportados;
- a capacidade de compensar interrupções;
- a capacidade de regular tensão em regime permanente;
- a capacidade de filtrar harmônicos, etc.

Deve-se observar que dos itens acima citados, apenas os dois primeiros se referem ao problema do afundamento de

tensão. Os demais itens naturalmente agregam valor ao equipamento, mas certamente trazem custo adicional. Mesmo para equipamentos cuja única finalidade seja compensar afundamentos de tensão, a determinação de sua capacidade (profundidade e duração do afundamento) trará impactos sobre seu custo.

O objetivo do trabalho proposto é avaliar quantitativamente os custos associados à capacidade de compensação e à agregação de outras funcionalidades ao equipamento, especialmente em aplicações de baixa tensão. Para tanto, será feita uma discussão a respeito da intensidade e frequência dos eventos de qualidade de energia e dos custos a estes associados. Em seguida é proposta uma topologia para este equipamento, trazendo de forma sucinta seu funcionamento e motivações para sua escolha. Técnicas de projeto são apresentadas. Neste ponto, ficarão evidenciadas as diferenças entre projetos de conversores para operação em regime permanente e conversores para operações de curta duração. As técnicas desenvolvidas são utilizadas no projeto básico de dois equipamentos distintos: o primeiro com capacidade de compensar afundamentos para 65% de curta duração (200 ms) e o segundo com capacidade de compensar afundamentos mais profundos (50%) por 2 s, além de permitir regulação de tensão e bloqueio de harmônicos. Os projetos são comparados do ponto de vista de custo financeiro, peso e volume do equipamento.

II. INTERRUPÇÕES, AFUNDAMENTOS E IMPACTOS ECONÔMICOS

A questão chave na decisão da incorporação de uma solução para eventos de qualidade de energia (afundamentos e interrupções) é o compromisso entre o custo de aquisição e manutenção de compensadores e os prejuízos causados pelos eventos. Deve-se, então, conhecer a frequência de tais eventos, sua profundidade e duração, além de seus impactos no consumidor em questão.

Plantas industriais antigas, que usam equipamentos eletromecânicos menos sofisticados, são normalmente pouco sensíveis a afundamentos. No entanto, interrupções podem acarretar grandes prejuízos. Plantas industriais modernas, com uso intensivo de computadores, controladores digitais e processos industriais sofisticados, por outro lado, são extremamente sensíveis a afundamentos de tensão [1]. Eventos de poucos milissegundos podem causar horas de paralisação no processo e prejuízos enormes [1].

Existem vários estudos que mostram a frequência dos eventos de qualidade da energia classificando-os por sua duração e profundidade. Um estudo realizado em uma fábrica americana alimentada em 13 kV revela que 14 % dos fenômenos registrados eram interrupções, enquanto 86 % eram afundamentos de tensão. Destes, 64 % com amplitude remanescente acima de 65 % e duração abaixo de 200 ms [1]. Estudos realizados pela Eletrotec Concepts, com mais de 300 monitores em diversas plantas, com registros de mais de 6.000.000 de eventos mostram que 92 % destes são afundamentos para até 40 %, e que a maioria deles dura menos de 2 s. Afundamentos para até 50 % representam 85 % dos fenômenos. Apenas 4 % dos eventos foram interrupções de longa duração [2]. Medições realizadas pela COELBA indicaram afundamentos, em sua maioria, de curta

duração (inferiores a 200 ms), mas de profundidade elevada [6]. Por outro lado, estudos feitos pela CEMIG numa região do estado de Minas Gerais, revelam que apenas cerca de 15 % das ocorrências de afundamento duram menos de 200 ms, estando a maioria entre 200 ms e 700 ms. Afundamentos nesta região nunca se revelaram maiores do que para 50% [4].

Fica claro, com as informações supracitadas, que a determinação da capacidade de um compensador (e seu conseqüente custo), bem como os recursos tecnológicos a este atribuídos, dependem de necessidades específicas de cada cliente.

III. TOPOLOGIA PROPOSTA

A fig. 1 apresenta a topologia básica do compensador série proposto [5]-[6]. A fig. 2 apresenta um modelo equivalente por fase desta topologia. As tensões de compensação são injetadas diretamente nos capacitores dos filtros de saída dos conversores. O equipamento tem capacidade de compensar componentes de seqüência zero da tensão da rede, uma vez que são utilizados conversores monofásicos em cada fase. Tendo em vista uma tecnologia de baixo custo, nenhum armazenamento de energia é utilizado, sendo a energia injetada pelos conversores proveniente da própria rede em falta, através dos transformadores “shunt” e retificadores trifásicos. A escolha de entrada trifásica para os conversores permite a compensação de afundamentos monofásicos e bifásicos profundos. Chaves CA a tiristores podem conduzir continuamente a corrente de carga, sendo desligadas apenas na ocorrência de afundamentos. Isso permite a operação com alta eficiência em condições normais e redução dos custos dos conversores, como será visto na seção IV.

São propostos na literatura, e existem no mercado, compensadores que usam transformadores como elementos de injeção da tensão complementar. O inconveniente desta alternativa é a potência nominal destes transformadores, da ordem de duas vezes a potência injetada [5], o que torna tais elementos caros e pesados. Em aplicações em média tensão, o uso de tais transformadores pode ser justificado pela necessidade da elevação da tensão proveniente do(s) conversor(es), uma vez que estes operam usualmente a tensões inferiores às da rede.

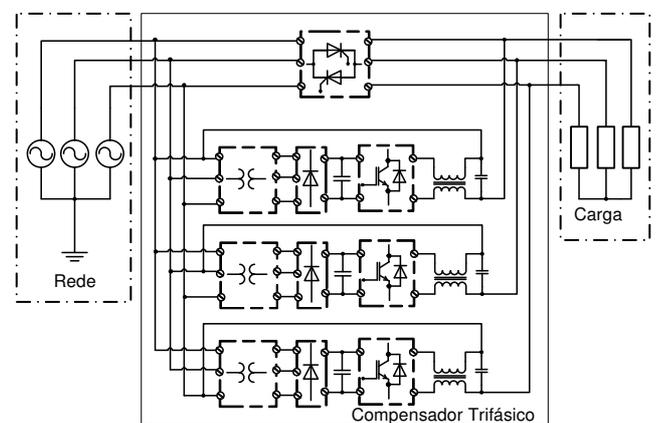


Fig. 1 Diagrama simplificado da topologia do compensador

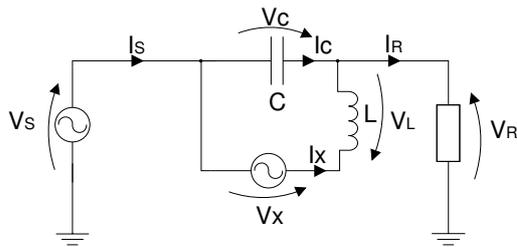


Fig. 2 Modelo equivalente por fase

IV. TÉCNICAS DE PROJETO

Neste tópico serão apresentadas técnicas que permitem o projeto dos elementos do compensador proposto, especialmente os componentes dos conversores. Serão evidenciadas diferenças entre projetos para operação em regime permanente e para operações de curta duração.

A. Determinação da Carga Vista pelo Conversor

Para o projeto adequado dos conversores do compensador, deve-se conhecer a carga vista por este nos piores cenários, do ponto de vista de amplitude de corrente, tensão, e potência ativa injetada. Um modelo equivalente por fase do sistema, como o apresentado na fig. 2, pode ser utilizado neste estudo. Neste modelo são representados a rede, a carga, os elementos do filtro e o inversor. É possível verificar os piores cenários variando-se as condições da carga (tensão, corrente, e fator de potência) e da rede (amplitude da tensão pós-falta e salto de fase). Um critério de dimensionamento do filtro é apresentado em [6].

B. Metodologia de Cálculo de Perdas e Projeto Térmico de Inversores de Frequência

Esta metodologia permite a determinação dos módulos IGBTs e arranjo dissipador a serem utilizados em um projeto. A fig. 3 ilustra o modelo elétrico equivalente para o comportamento térmico dos elementos de um conversor. Este modelo pode ser utilizado na obtenção das temperaturas para uma dada condição de operação. A fig. 3a apresenta a temperatura de junção T_j do n -ésimo componente (IGBT ou diodo do inversor ou diodo do retificador) do m -ésimo módulo, em relação à temperatura da base do módulo em que o componente se encontra. Os parâmetros térmicos do modelo são fornecidos pelo fabricante e podem estar representados por frações contínuas ou frações parciais (fig. 3a e fig. 3b). Para a definição da temperatura de cada módulo e do dissipador de calor, em relação à temperatura ambiente, o modelo da fig. 3c é utilizado. Os parâmetros R_{ch} e C_{ch} referem-se às bases dos módulos e os parâmetros R_{hs} e C_{hs} referem-se ao dissipador de calor. Para se obter as perdas no inversor de frequência, sua operação é simulada, obtendo, para um ciclo da frequência fundamental, as formas de onda das correntes nos IGBTs e diodos do inversor. Estas formas de onda variam em função do fator de potência, índice de modulação, frequência de chaveamento e tipo de modulação do conversor. As perdas instantâneas são, então, calculadas pelo cruzamento das correntes instantâneas com as curvas de tensão de condução e energias de chaveamento, obtidas dos catálogos dos fabricantes dos semicondutores de potência. Uma vez determinadas as perdas, as temperaturas são

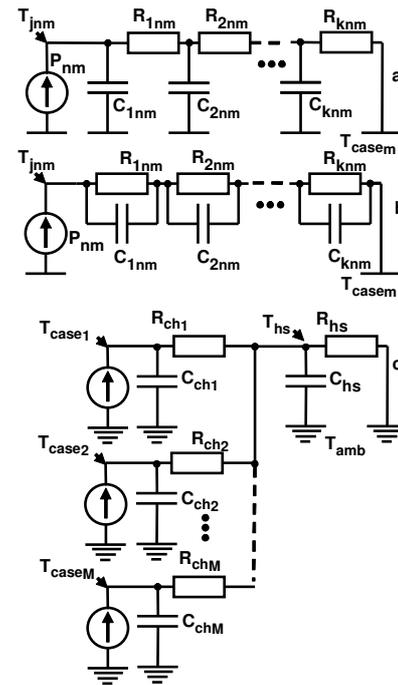


Fig. 3 Modelo para cálculo das temperaturas de dispositivos e dissipadores de calor

calculadas utilizando-se o modelo térmico apresentado na fig. 3. Esta metodologia é apresentada em detalhes em [12].

Em projetos convencionais de inversores, com operação sob carga em regime permanente, é usual a utilização de dissipadores com ventilação forçada ou refrigerados a água. Nestes sistemas a temperatura máxima do dissipador é mantida entre $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a temperatura dos componentes semicondutores entre $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pode-se mostrar que um inversor projetado para ciclos de operação muito curtos, além de não precisar de dissipador de calor, pode ter a capacidade de seus componentes minimizados. Para comprovar esta informação, basta saber que a massa da base de um módulo IGBT $600\text{ V} / 300\text{ A}$ é de aproximadamente 100 g de liga de alumínio, o que lhe atribui uma capacitância térmica de cerca de $85\text{ J} / ^{\circ}\text{C}$. Para aquecer esta base em apenas $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ em 200 ms , seria necessária uma perda nos dispositivos do módulo de cerca de 4000 W . Além disso, as constantes de tempo térmicas das bases destes módulos são da ordem de centenas de milissegundos, de modo quase não há transferência de energia térmica do módulo para o meio durante a operação, o que torna o dissipador dispensável. O fato da temperatura do dispositivo, antes da entrada em operação, ser a própria temperatura ambiente permite uma maior variação da temperatura em suas camadas mais internas, o que contribui para o seu dimensionamento reduzido.

C. Modelo de Simulação

Para a escolha adequada do banco de capacitores do barramento CC, do transformador trifásico de entrada e da ponte retificadora, optou-se pelo uso de um modelo de simulação do conversor, desenvolvido em *Simulink*®, apresentado na fig. 4. Neste modelo, a impedância vista pelo inversor é representada por uma carga RL, os capacitores do barramento por um circuito RC e o transformador de entrada

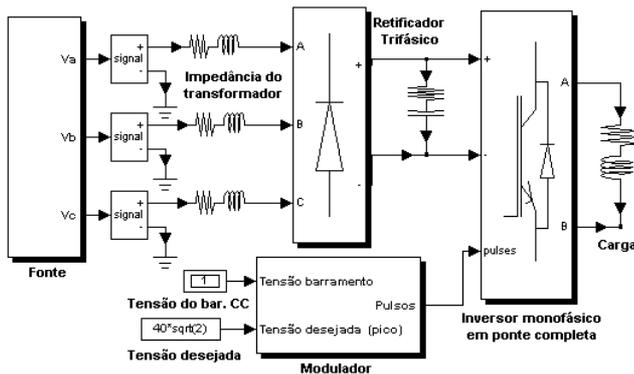


Fig. 4 Modelo de simulação do conversor monofásico

por uma fonte ideal seguida de uma impedância. O modelo é bastante completo do ponto de vista do comportamento elétrico de todos os componentes do conversor. Neste, afundamentos de tensão e sua compensação são simulados e a operação do inversor inclui a modulação PWM empregada, a saber, comparação seno-triangular de três níveis.

D. Determinação dos Capacitores do Barramento CC

A escolha dos capacitores do barramento CC deve atender simultaneamente a quatro critérios básicos: tensão máxima do barramento, capacitância necessária, resistência série equivalente (ESR) máxima e corrente eficaz máxima vista pelos capacitores. No contexto de compensadores de tensão, a tensão máxima do barramento CC depende da máxima tensão a ser injetada, que ocorre justamente em afundamentos profundos, onde a tensão fornecida pelo transformador de entrada é mínima. De modo a compensar tais afundamentos, a relação de espiras do transformador de entrada deve ser ajustada. Em condições normais de tensão da rede, a tensão dos capacitores se eleva ao seu valor máximo. Portanto, a tensão do barramento CC será tanto maior quanto maior for o nível do afundamento a ser compensado e maior o custo associado, não só aos capacitores, quanto a todos os elementos do conversor.

Em projetos de conversores convencionais, a capacitância do barramento CC é escolhida de modo a reduzir a ondulação da tensão, provocada pelas componentes de alta frequência da corrente do conversor, a níveis aceitáveis. No caso de conversores com inversores monofásicos de ponte completa, existe ainda uma forte pulsação de corrente de 2º harmônico, cujas conseqüentes ondulações de tensão devem ser suavizadas. O ponto de operação onde esta componente da corrente é maior é aquele em que é maior o produto entre a amplitude da corrente de carga e o índice de modulação do inversor. Neste ponto de operação, observa-se ainda a maior corrente eficaz vista pelos capacitores. No caso do compensador, a capacitância total do barramento CC pode ainda ser escolhida de modo a se armazenar uma pequena quantidade de energia, aumentando a capacidade de compensar afundamentos profundos de pequena duração. A escolha da máxima ESR é devida à máxima queda de tensão permitida no barramento CC devido à passagem da corrente de carga por seus terminais.

Dentre os critérios de escolha dos capacitores, a corrente eficaz é normalmente a mais limitante na atual tecnologia de capacitores eletrolíticos, comumente usados em barramentos

CC. Muitas vezes são selecionados bancos onde a capacitância total é muito maior do que a necessária, de modo a se atingir a capacidade necessária de corrente CA. Este critério está associado à temperatura de operação e à vida útil dos capacitores. Considerando compensadores cuja operação do conversor seja de curta duração, tais capacitores operarão sempre à temperatura ambiente, e a demanda sob carga durante toda a vida útil não ultrapassará algumas dezenas de segundos. Isso faz com que estes possam operar com correntes muito superiores às suas especificações nominais, o que traz reduções significativas no custo do barramento. Naturalmente, a capacidade de corrente dos capacitores deve ser avaliada a partir de dados de fabricantes ou obtidos através de ensaios.

E. Determinação do Transformador de Entrada

A escolha da potência nominal de transformadores de entrada de conversores de operação contínua advém da potência ativa drenada pela carga. Em operação de curta duração, devido às elevadas constantes de tempo térmicas deste equipamento, este critério é pouco relevante. Por outro lado, a impedância de dispersão destes transformadores deve ser escolhida de modo a não haver quedas de tensão muito elevadas durante o afundamento de tensão, garantindo níveis de tensão acima do mínimo necessário no barramento CC. A impedância do transformador deve ser dimensionada em função da sua relação de espiras e da capacitância do barramento, sempre tendo em vista a minimização de custos. Estes três elementos determinam a tensão do barramento durante o afundamento.

F. Determinação da Ponte Retificadora

De posse das definições dos elementos do transformador e do barramento CC, o modelo de simulação apresentado pode ser útil na determinação da ponte retificadora. Através deste, obtém-se a corrente instantânea dos diodos. De forma similar ao projeto do inversor, uma tabela de consulta com a característica $v \times i$ dos diodos é utilizada para se obter as perdas instantâneas dos componentes. Utilizando-se o modelo térmico apresentado, é possível determinar as temperaturas envolvidas para um dado conjunto retificador-dissipador e validar o projeto. Da mesma forma que no projeto de inversores, operações de curta duração dispensam o uso de dissipadores e permitem o uso de semicondutores com área total de silício reduzida.

G. Passos do projeto

O projeto de um conversor é um processo iterativo, uma vez que diversas grandezas envolvidas estão correlacionadas. A seguir encontra-se o procedimento adotado para o projeto dos conversores:

- Utilizando o modelo equivalente por fase apresentado, descobrir os cenários mais críticos do ponto de vista de amplitude de corrente, máxima injeção de tensão e potência ativa, tanto em modo de operação contínua (quando aplicável) quanto em curta duração;
- Especificar módulos semicondutores e arranjos dissipadores para o inversor, e verificar desempenho térmico através das técnicas apresentadas. Neste ponto a única variável importante não conhecida para o cálculo das perdas

é a tensão do barramento CC, que deve ser estimada adequadamente;

- Usando o modelo de simulação no pior cenário encontrado, definir simultaneamente a relação de espiras do transformador, sua impedância de dispersão e a capacitância do barramento CC. Neste ponto, conhecimento dos custos e dimensões de tais componentes é importante, uma vez que existem infinitas soluções;

- Especificar os módulos para o retificador e verificar sua adequação térmica;

- Definir componentes comerciais para todo o conversor e refazer os passos anteriores, refinando os resultados e confirmando a adequação do projeto;

H. Outros elementos

Outros elementos presentes em compensadores, tais com contadores, chaves seccionadoras, barramentos, indutores e capacitores dos filtros podem ter seu custo reduzido, aproveitando a operação de curta duração. Assim como para a escolha daqueles já mencionados, a capacidade de corrente dos dispositivos deve ser avaliada, a partir de dados de fabricantes ou através de ensaios.

A fig. 5 apresenta um diagrama simplificado da topologia

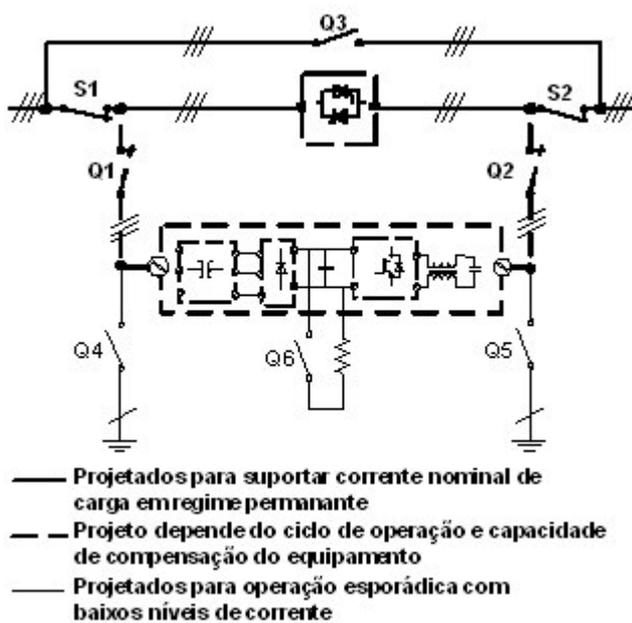


Fig. 5 Diagrama simplificado da topologia proposta, incluindo os elementos de manobra e seccionamento

TABELA I

Especificações Básicas dos Compensadores Projetados

Parâmetro	Projeto I	Projeto II
Potência da carga	300kVA	300kVA
Tensão da carga	440V	440V
Fator de potência da carga	0.92(ind.)-1	0.92(ind.)-1
Profundidade do afundamento compensado*	65% (3Φ)	50% (3Φ)
Duração máxima do afundamento **	0.2s	2s
Salto de fase máximo	30°	30°
Faixa de regulação de tensão	-	85%-115%
Frequência de chaveamento	5kHz	5kHz

* para compensação plena

** no pior cenário

proposta, incluindo os elementos de manobra e seccionamento. Os elementos representados em linha tracejada, dentre eles os contadores Q1 e Q2, além dos condutores que conectam os conversores, podem ter suas dimensões significativamente reduzidas em operações de curta duração, o que implica em importante redução de custos, conforme será verificado na seção V.

V. ANÁLISE DOS PROJETOS

Utilizando as técnicas descritas na seção anterior, projetos de dois conversores foram realizados para uma mesma característica de carga. O primeiro destes (Projeto I), com capacidade de compensar afundamentos para 65% de curta duração (200ms), foi dimensionado considerando os dados de afundamentos obtidos pela COELBA [6]. Um protótipo em escala real, denominado D²iPS (Dispositivo Dinâmico de Proteção Série) está sendo montado nas dependências do Laboratório de Aplicações Industriais – LAI/UFMG. O segundo (Projeto II) é capaz de compensar afundamentos mais profundos (50% por 2s), além de permitir regulação de tensão e bloqueio e harmônicos. Estas características foram escolhidas de modo a ilustrar o impacto do aumento da capacidade do compensador e da operação em regime contínuo no volume, peso e custo do compensador projetado. As especificações básicas dos compensadores encontram-se na tabela I.

A tabela II apresenta o projeto básico dos conversores dos compensadores, onde as diferenças entre os projetos ficam evidenciadas. É muito importante, neste momento, salientar algumas características e limitações do estudo que será apresentado:

- Ambos os projetos foram realizados de modo a minimizar os custos dos equipamentos e, sempre que possível, utilizou-se os mesmos componentes comerciais;

- De modo a facilitar a comparação dos projetos e a generalização dos resultados, todos os valores de peso, volume e custo foram normalizados;

- Por se encontrar em fase avançada de desenvolvimento nas dependências do LAI/UFMG, os valores apresentados para o Projeto I são bastante precisos. Alguns valores apresentados para o Projeto II, no entanto, são obtidos por algum tipo de extrapolação, que serão relatadas, sempre que utilizadas.

Pela tabela II, verifica-se a não necessidade de arranjos dissipadores no Projeto I, enquanto que o Projeto II os prevê. No Projeto II, foi necessário o triplo de módulos de IGBT e de diodos retificadores, além da maior capacidade de corrente dos últimos. No projeto dos transformadores e capacitores do barramento CC, verificou-se uma elevação em cerca de 40% na capacitância total necessária. A capacidade de regulação de tensão, com injeção de potência ativa, levou ao aumento de 100% na potência nominal do transformador, enquanto que a capacidade de compensar afundamentos mais profundos forçou a redução da impedância à metade. As indutâncias e capacitâncias do filtro são as mesmas para ambos os projetos. No entanto, a operação em regime permanente traz aumento significativo no peso e no custo dos indutores.

Dentre outros itens do conversor que possuem diferenças de custo, peso e volume, não apresentados na tabela, podem

TABELA II
Projeto Básico dos Conversores do Compensador

	Projeto I	Projeto II
Módulos IGBT	Dispositivos de 1200 V; capacidade de corrente de acordo com a metodologia apresentada em III.B. Utilização de 1 módulo de IGBT 1200 V / 300 A com 2 chaves por braço de inversor, totalizando 6 chaves.	Dispositivos de 1200 V; capacidade de corrente de acordo com a metodologia apresentada em III.B. Utilização de 3 módulos de IGBT 1200 V / 300 A em paralelo por braço, totalizando 18 chaves.
Retificador	Dispositivos de 1200 V; capacidade de corrente de acordo com a metodologia apresentada em III.F. Um módulo ponte trifásica 1200 V / 160 A por conversor, totalizando 3 módulos sem dissipador de calor.	Dispositivos de 1200 V; capacidade de corrente de acordo com a metodologia apresentada em III.F. Três módulos 1200 V / 260 A com dois diodos cada, por conversor, totalizando 9 módulos em um mesmo dissipador de calor
Arranjo Dissipador	Não é necessário. Construção em chapa metálica.	Um dissipador para cada braço de IGBT (3 módulos), com dimensões de 210 mm x 170 mm e um dissipador com as mesmas características para todos os módulos das pontes retificadoras, com um ventilador axial por dissipador.
Barramento CC	Utilização de capacitores de 400V / 0,56 mF; 50 unidades por conversor em configuração série / paralelo 2 / 25, totalizando 150 unidades.	Utilização de capacitores de 400V / 0,56 mF; 72 unidades por conversor em configuração série / paralelo 2 / 36, totalizando 216 unidades.
Transformadores	Tensão nominal de 440 V / 440 V, configuração estrela-delta; transformador de 10 kVA com 2% de impedância; 1 transformador trifásico por conversor, totalizando 3 unidades.	Tensão nominal de 440 V / 440 V, transformador de 20 kVA com 2% de impedância; 1 transformador trifásico por conversor, totalizando 3 unidades.
Filtros	Único capacitor de filme metalizado de 400 V / 1.1 mF, e indutor de 0,015 mH / 60 A rms e 860 A de pico.	Dois capacitores em série de filme metalizado de 400 V / 0.56 mF, e indutor de 0,015 mH / 460 A rms e 860 A de pico.

ser citados os capacitores de desacoplamento dos IGBTs, cujo número necessário é três vezes maior no Projeto II; a espessura das chapas de cobre e dimensões dos barramentos; e alguma miscelânea de montagem. Dentre elementos com mesma especificação encontram-se os *gate-drivers* e outros componentes. A fig. 6 apresenta os custos relativos dos componentes dos conversores, e a fig. 7 apresente as massas relativas de seus componentes. Ambos encontram-se normalizados em relação aos valores totais obtidos para o Projeto I. Verifica-se que o custo e o peso total dos conversores do Projeto II são cerca de duas vezes maior que aqueles do Projeto I.

Para se avaliar o custo total do equipamento, é necessário incluir os custos dos elementos de medição e controle, manobra e seccionamento, chaves CA, gabinete, elementos estruturais, cabos, alimentação de circuitos auxiliares, montagem, etc. Dentre estes elementos, possuem custo independente do projeto, o aparato de medição e controle e as chaves CA. Estes elementos juntos respondem por aproximadamente 13% do custo total do equipamento produzido conforme o Projeto I.

Dentre os elementos de manobra e seccionamento (vide fig. 5), possuem as mesmas especificações em ambos os projetos o seccionador telecomandado Q3, as chaves seccionadoras manuais S1 e S2, e os contatores de aterramento e descarga dos barramentos CC Q4 - Q6. As especificações dos contatores Q1 e Q2, no entanto, apresentam diferenças significativas. No Projeto II são previstos níveis de corrente da ordem da corrente nominal da carga, fluindo continuamente por estes dispositivos. No Projeto I, por outro lado, a corrente flui por tais elementos por apenas 200 ms. Esta diferença faz com que o custo total dos elementos de manobra e seccionamento, previstos no Projeto II, seja quase duas vezes maior que aquele previsto para o Projeto I.

Os custos ainda não citados (montagem, gabinete, elementos estruturais, cabos, etc.) representam cerca de 40% dos custos totais do Projeto I. Estima-se que, devido às

dimensões dos conversores projetados, o volume do gabinete necessário para o compensador previsto pelo Projeto II seja cerca de 50% maior do que aquele previsto considerando o Projeto I. Considerando que o custo dos elementos supracitados seja proporcional ao volume do compensador, o custo final considerando o Projeto II é aproximadamente 70% maior que o custo previsto para o Projeto I. Mesmo considerando que estes custos fossem iguais (o que naturalmente não é verdade), o custo final considerando o Projeto II seria 50% maior. A fig. 8 apresenta os custos estimados em peças e montagem dos compensadores. A tabela III apresenta um pequeno resumo mostrando as funcionalidades dos equipamentos projetados, juntamente com peso, custo e volume estimados.

VI. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma discussão a respeito da intensidade e frequência dos eventos de qualidade de energia e dos custos a estes associados, onde se verificou que a frequência e severidade de tais fenômenos, bem como seus impactos econômicos, variam bastante, considerando diferentes regiões e tipos de consumidor. Verifica-se, portanto, que a determinação da capacidade de um compensador (e seu conseqüente custo), bem como os recursos tecnológicos a este atribuídos, dependem de necessidades específicas de cada cliente.

Uma topologia para o dispositivo estático de compensação série foi apresentada, trazendo de forma sucinta seu funcionamento e motivações para sua escolha. Esta topologia, encontrada com pequenas variações na literatura, extrai energia da própria rede em falta, o que dispensa elementos armazenadores de energia. Além disso, possui capacitores, e não transformadores, como elementos de injeção da tensão complementar. Esta topologia mostra-se atrativa em aplicações de baixa tensão.

Técnicas de projeto foram apresentadas. Foram evidenciadas as diferenças entre projetos de conversores para

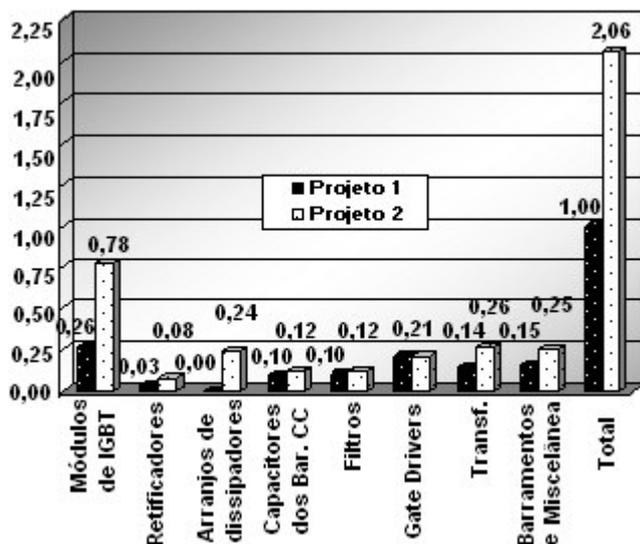


Fig. 6 Custos dos componentes dos conversores, normalizados em relação aos valores totais obtidos para o Projeto I

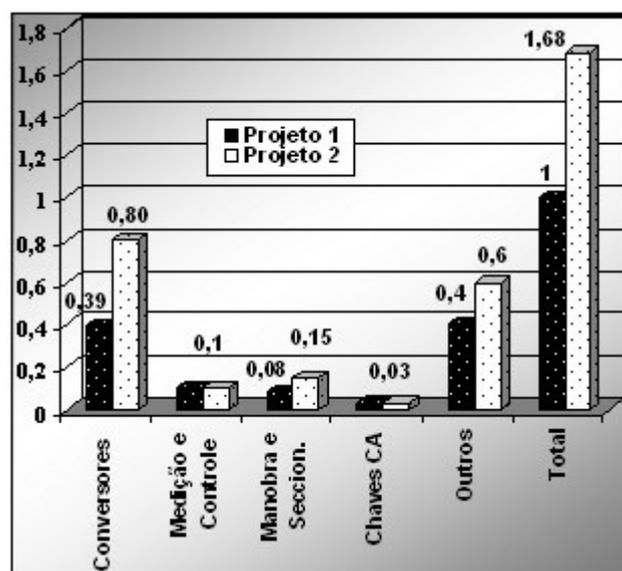


Fig. 8 Custos dos componentes do compensador, normalizados em relação aos valores totais obtidos para o Projeto I

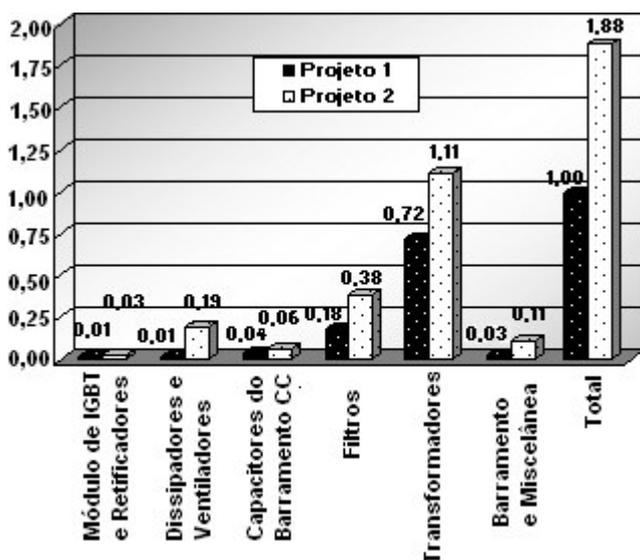


Fig. 7 Pesos dos componentes dos conversores, normalizados em relação aos valores totais obtidos para o Projeto I

operação em regime permanente e conversores para operações de curta duração.

As técnicas de projeto desenvolvidas foram utilizadas no projeto básico dos conversores de dois equipamentos com capacidade compensação distintos. Dentre eles, um prevê operação contínua dos conversores, de modo a permitir regulação de tensão e bloqueio de harmônicos, enquanto o outro opera apenas em fenômenos de curta duração. Verificou-se que a diferença entre os regimes de operação propostos traz grandes diferenças no custo, peso e volume dos equipamentos. Além do tempo de operação, o aumento da tensão máxima injetada mostrou trazer impactos significativos, especialmente nos custos e peso dos elementos passivos dos conversores.

TABELA III

Funcionalidades dos Equipamentos Projetados e Estimativas de Peso, Volume e Custos Totais

Parâmetro dos conversores	Projeto I	Projeto II
Profundidade do afundamento máximo (%)	65 (3Φ)	50 (3Φ)
Duração máxima do afundamento (s)	0,2	2
Faixa de regulação de tensão (%)	-	85 - 115
Valores estimados		
Peso total dos conversores (pu)	1,0	1,88
Volume total do compensador (pu)	1,0	1,5
Custo total dos conversores (pu)	1,0	2,06
Custo total do compensador (pu)	1,0	1,68

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. J. Melhorn, T.D. Davis and G. E. Beam, "Voltage sags: their impact on the utility and industrial customer", *IEEE Trans. Industry Application*, vol. 34, no. 3, May/June 1998.
- [2] W. E. Brumsickle, R. S. Schneider and G. A. Luckjiff, "Dynamic sag correctors: cost-effective industrial power line conditionin", *IEEE Trans. Industry Application*, vol. 37, no. 1, January/February 2001.
- [3] C. J. Huang, S. J. Huang and F. Pai, "Design of dynamic voltage restorer with disturbance-filtering enhancement", *IEEE Trans. Power Eletronics*, vol. 18, no. 5, September 2003.
- [4] S. M. Silva, "Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão", *dissertação de mestrado*, UFMG, 1999.
- [5] S. M. Silva, S. E. da Silveira, et. al., "Three-phase dynamic voltage compensator with reduced switch-count and absence of energy storage system", *In proceedings of IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, October 2003. Salt Lake City, USA.
- [6] S. M. Silva, A. S. Reis, et. al., "Design and development of a 440V/300kVA voltage sag compensator with absence series transformers", *VI Induscon*, Brasil, 2004.

- [7] N. H. Woodley and L. Morgan, "Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, no. 3, July 1999.
- [8] P. Daehler and R. Affolter, "Requirements and solutions for dynamic voltage restorer, a case study", *IEEE* 2001.
- [9] P. K. Steimer, "Power electronics building blocks – a platform based approach to power electronics", *IEEE* 2003.
- [10] D. Divan, A. Bendre, et. al., "Dual source dynamic sag correctors – a cost effective topology for enhancing the reality of dual source systems", *IEEE* 2003.
- [11] D. Divan, "Utility reliability metrics for new E-conomy processes", *página da internet: "www.softswitch.com"*.
- [12] B. M. Lopes, S. M. Silva and B. J. C. Filho, "Power loss estimation in static power converters", *VI Induscon*, Brasil, 2004.

DADOS BIOGRÁFICOS

Bruno Marciano Lopes recebeu o título de técnico em eletrônica Industrial pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), em 1997, e foi graduado como Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em 2003. É aluno de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG e é integrante do Laboratório de Aplicações Industriais (LAI) desta instituição, onde atua em pesquisa e desenvolvimento de conversores estáticos para acionamentos elétricos e aplicados a sistemas de energia. Atualmente, trabalha na divisão de tecnologias de automação da ABB, exercendo a função de engenheiro de aplicação de produtos de baixa tensão e instrumentação.

Sidelmo Magalhães Silva é engenheiro eletricista formado em 1997, pela Universidade Federal de Minas Gerais. Obteve o título de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica, pela UFMG em 1999 e 2003, respectivamente.

De outubro de 2001 a agosto de 2002, trabalhou no Departamento de Desenvolvimento de Produtos da ABB Switzerland, em Turgi, na Suíça, tendo exercido as funções de engenharia de projeto e controle no desenvolvimento de protótipos de conversores estáticos para sistemas de energia elétrica.

Sidelmo M. Silva é co-fundador do Laboratório de Aplicações Industriais – LAI/UFMG, onde atua como responsável técnico por projetos de aplicações de eletrônica de potência em sistemas de energia e qualidade da energia elétrica.

Sidelmo M. Silva é Diretor Executivo e sócio-fundador da HPE – High Power Engineering Ltda, empresa especializada em soluções para aplicações de eletrônica de potência em sistemas de energia, qualidade da energia e sistemas de acionamento elétrico.

Autor de mais de 20 artigos em congressos nacionais, internacionais e revistas, Sidelmo M. Silva possui interesse nas áreas de aplicações de eletrônica de potência em sistemas de energia, qualidade da energia elétrica, projeto e desenvolvimento de conversores estáticos de alta potência e

sistemas de controle digital para condicionadores de energia elétrica.

Braz J. Cardoso Filho recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista (Medalha Lúcio dos Santos) e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Brasil, respectivamente em 1987 e 1991. Doctor of Philosophy – Ph. D. – em Engenharia Elétrica pela University of Wisconsin – Madison, EUA, em 1998, onde desenvolveu suas atividades de pesquisa integrado ao WEMPEC – Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium, UW-Madison. Vinculou-se ao corpo docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da UFMG em 1989, onde atualmente exerce atividades de ensino e pesquisa nas áreas de eletrônica de potência e máquinas elétricas. É o fundador (2000) e coordenador do Laboratório de Aplicações Industriais do Depto. Engenharia Elétrica da UFMG, que desenvolve atividades de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e consultoria nas diversas áreas de aplicação da eletrônica de potência e máquinas elétricas. É co-fundador (2004) da HPE – High Power Engineering Ltda., que atua na área de soluções e inovação tecnológica em eletrônica de potência para os setores de energia elétrica, aplicações industriais e acionamentos elétricos. Desde 2003 participa do Comitê Científico e Tecnológico da WEG S.A. É membro do IEEE e autor e co-autor de mais de 70 publicações em periódicos e conferências internacionais e nacionais nas suas áreas de atuação. É co-inventor em uma patente internacional na área de conversores estáticos industriais para médias tensões.

José Antonio de Souza Brito é graduado em engenheiro eletricista pela Universidade Federal da Bahia, em 1982, nas opções eletrotécnica e eletrônica, pós-graduado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, em 1990, no Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos, engenheiro eletricista da Coelba desde 1982, gestor do setor de estudos especiais do sistema elétrico, desde 1995, gerente do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Empresa, desde 1999, responsável por todos os estudos relacionados com a qualidade da forma de onda da tensão de fornecimento, representante da Coelba junto ao ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) nos grupos de discussão dos Procedimentos de Rede e representante da Coelba junto à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) nos grupos de discussão dos Procedimentos de Distribuição.

Gustavo Travassos Aguiar da Silva é graduado em engenheiro eletricista pela Universidade Federal da Bahia, em 2002, na opção eletrotécnica, pós-graduado pela Universidade de Salvador - UNIFACS, em 2003, no Curso de Sistemas de Automação Industrial, engenheiro eletricista da ECOLUZ, no período de 2002 a 2003, onde trabalhou na área de Eficiência Energética, e da Coelba desde 2003, no setor de estudos especiais do sistema elétrico, onde atua nas áreas de Qualidade da Energia Elétrica e de estudos de conexão de geradores.