

TOPOLOGIA HÍBRIDA TRIFÁSICA A TRÊS FIOS PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE GERAÇÃO BASEADOS EM GERADOR DE INDUÇÃO AUTOEXCITADO

Celso B. Tischer, Lucas G. Scherer, Robinson F. de Camargo

Departamento de Processamento de Energia Elétrica, Grupo de Eletrônica de Potência e Controle

Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, RS – Brasil

cbtischer@gmail.com, lgscherer@gmail.com, robinson.camargo@gmail.com

Resumo - Este artigo propõe uma nova topologia híbrida trifásica a três fios para a regulação da amplitude das tensões de saída de sistemas de geração isolados baseados em geradores de indução autoexcitados. A topologia proposta é composta por bancos de capacitores comutáveis e compensador estático de distribuição (DSTATCOM). A vantagem da topologia proposta é a redução da potência do DSTATCOM, se comparada com a topologia que utiliza somente o DSTATCOM. A partir da modelagem matemática do sistema, considerando a topologia híbrida, é proposto um algoritmo de controle de conexão dos bancos de capacitores e controle do DSTATCOM de forma a garantir a interação entre ambos. Resultados de simulação e experimentais são apresentados com o intuito de validar a nova topologia e comprovar seu desempenho na regulação da amplitude das tensões.

Palavras-Chave – Banco de Capacitores Comutáveis, Compensador Estático de Distribuição, Gerador de Indução Autoexcitado, Regulação de Tensão, Topologia Híbrida.

HYBRID THREE-PHASE THREE-WIRE TOPOLOGY FOR VOLTAGE REGULATION APPLIED IN SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR BASED SYSTEMS

Abstract – This paper proposes a new three-phase three-wire hybrid topology for voltage amplitude regulation in stand-alone generation systems based on self-excited induction generators. The proposed topology is composed by switchable capacitor banks and a distribution static compensator (DSTATCOM). The advantage of the proposed topology is the reduction of the rated power of the DSTATCOM, if compared to the topology that uses only the DSTATCOM. From the mathematical modeling of the system considering the hybrid topology, it is proposed an algorithm to control capacitor banks connections and DSTATCOM control, in order to guarantee the good interaction between them. Simulation and experimental results are obtained in order to validate the new topology and prove its performance in voltage amplitude regulation.

Artigo submetido em 19/09/2014. Revisado em 16/03/2015. Aceito para publicação em 16/03/2015 por recomendação do Editor Henrique Braga.

Keywords - Distribution Static Compensator, Hybrid Topology, Self-excited Induction Generators, Switched Capacitor Banks, Voltage Regulation.

I. INTRODUÇÃO

As tecnologias de geração usualmente aplicadas em sistemas isolados, com exceção dos sistemas solares fotovoltaicos, são dependentes de geradores elétricos. O gerador assíncrono de indução, ou simplesmente gerador de indução (GI), apresenta características desejadas para sistemas de geração aplicados em locais isolados. Características como robustez, autoproteção contra sobrecarga e reduzida manutenção conferem confiabilidade ao sistema [1]-[3], além de custo reduzido [4].

Por outro lado, a qualidade da energia fornecida pelo GI depende de sistemas adicionais de compensação dedicados à regulação da amplitude e frequência das tensões de saída, uma vez que essas grandezas são dependentes das características das cargas alimentadas pelo gerador [5]. A regulação da amplitude das tensões do GI está associada ao balanço de potência reativa do sistema, já a frequência das tensões geradas está associada à relação entre potência ativa gerada e potência ativa consumida [1] e [6].

Em [7] é apresentada uma classificação dos sistemas de controle para regulação de tensão, todos aplicados ao controle do balanço da potência reativa. Dentre as topologias destacam-se:

i) O esquema de regulação de tensão com compensação paralela baseado no uso de reator com núcleo saturável [8]. Neste esquema, o banco de capacitores é dimensionado para condição extrema de compensação de potência reativa, ou seja, gerador a plena carga sendo esta indutiva, enquanto que o reator com núcleo saturável compensa a potência reativa capacitiva em condições que não a de plena carga indutiva.

ii) Os esquemas de regulação de tensão baseados em interruptores semicondutores, seja em compensação série ou paralela, seguem no geral o mesmo princípio que é o controle do balanço da potência reativa do sistema a partir da comutação de elementos capacitivos e/ou indutivos. As topologias divergem apenas na natureza do elemento comutado e na tecnologia do interruptor semicondutor [9].

iii) As topologias que sugerem a comutação de cargas reativas, sendo elas capacitivas ou indutivas, apresentam a vantagem de não injetarem componentes em alta frequência no sistema e apresentarem baixas perdas por comutação,

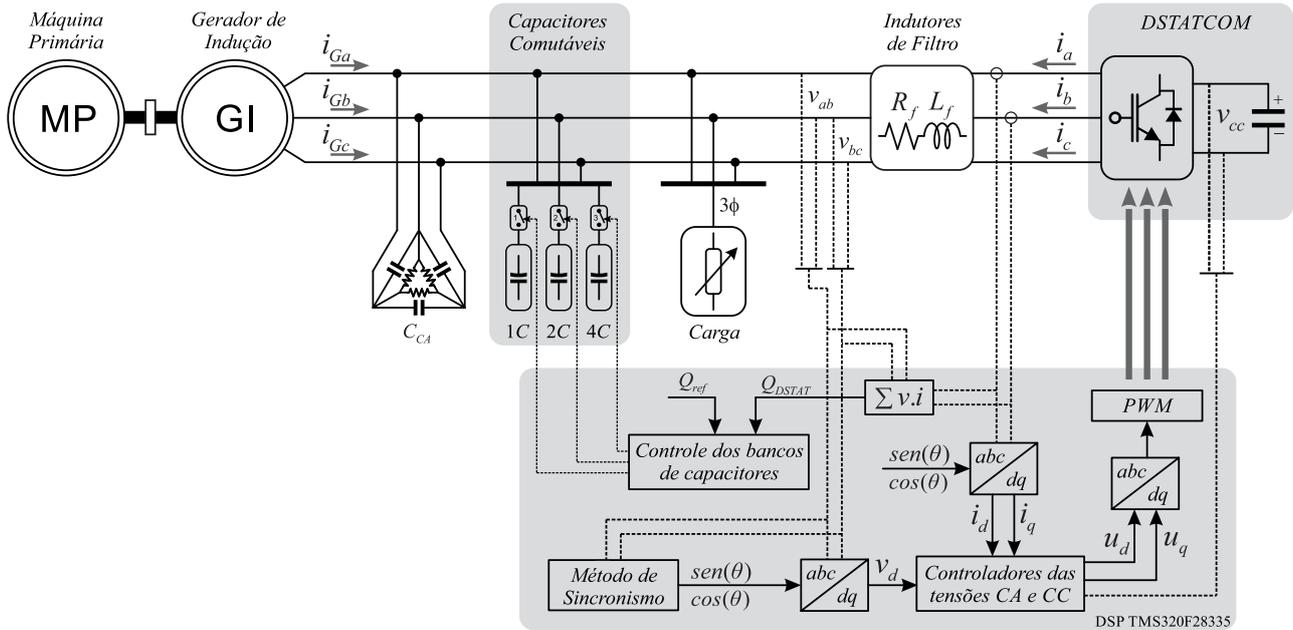


Fig. 1. Diagrama esquemático do sistema e topologia proposta para a regulação de tensão em GIAE.

porém o controle da tensão terminal ocorre em nível discreto, prejudicando sua exata regulação [4].

iv) As topologias que propõem a comutação em alta frequência dos interruptores semicondutores, ajustando o ângulo de disparo das chaves de acordo com a potência reativa a ser compensada, oferecem ajuste periódico e adequado da tensão terminal com a desvantagem de impor perdas elevadas de comutação e injeção de distorções em alta frequência no sistema [10]-[13].

v) As topologias que fazem uso de compensadores estáticos de reativos seguem o princípio do controle de tensão pela injeção de correntes reativas no sistema, geradas por um DSTATCOM conectado em paralelo com o barramento de tensão [14]-[18].

Com base nas topologias apresentadas na literatura, este artigo propõe uma nova topologia híbrida para regulação da amplitude das tensões do gerador de indução auto-excitado (GIAE). A topologia híbrida considera um sistema trifásico a três fios, sendo formada por um banco de capacitores comutáveis, C_{CM} , e um DSTATCOM conectados em paralelo ao barramento, demonstrado na Figura 1. A comutação dos C_{CM} é controlada por um algoritmo desenvolvido para operar em conjunto com o sistema de controle do DSTATCOM.

Não é objetivo deste artigo tratar da regulação da frequência das tensões geradas, podendo esta ser realizada a partir do controle da máquina primária [3] ou a partir de cargas controladas conectadas ao barramento trifásico do sistema ou barramento CC do DSTATCOM [1] e [19].

O artigo está organizado da seguinte forma: a modelagem do sistema de geração isolado é descrita na seção II; a seção III apresenta o sistema de controle da topologia híbrida; o projeto dos bancos de capacitores comutáveis é descrito na seção IV; por fim, na seção V são apresentados resultados de simulação e experimentais para demonstrar o desempenho da nova topologia híbrida.

II. MODELAGEM DO SISTEMA DE GERAÇÃO ISOLADO

Para o projeto do sistema de controle, é necessária a obtenção dos modelos matemáticos que relacionam as variáveis a serem controladas com as respectivas variáveis de controle. Nesse caso, as variáveis a serem controladas são: a tensão nos terminais do GIAE, as correntes CA e tensão do barramento CC do DSTATCOM.

A topologia híbrida de regulação de tensão pode ser representada através de um diagrama conforme mostrado na Figura 1, composto por um barramento trifásico, no qual estão conectados o GIAE, o banco de capacitores de excitação (C_{CA}), os C_{CM} e o DSTATCOM conectado através de um filtro indutivo.

A obtenção dos modelos matemáticos é realizada a partir do modelo simplificado, composto pelas tensões nos terminais do GIAE (v_{ab} e v_{bc}), consideradas como fontes de tensões senoidais e equilibradas, pelo capacitor associado ao barramento CC do DSTATCOM, assumido como fonte de tensão ideal, juntamente com os elementos passivos do sistema (capacitores e filtro de saída do DSTATCOM), conforme é mostrado no circuito equivalente da Figura 2.

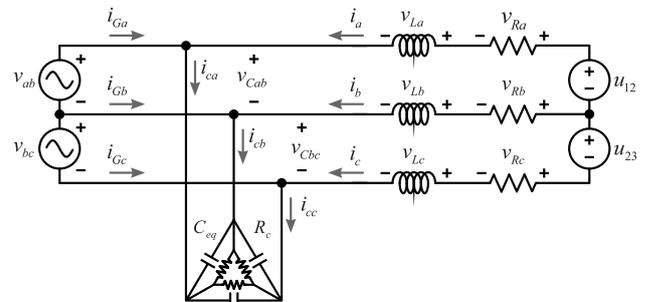


Fig. 2. Circuito equivalente utilizado para obter as equações da planta.

Com base na Figura 2, fazendo uso das leis de *Kirchhoff*, desprezando as indutâncias do GI e realizando as devidas transformações em coordenadas síncronas [3], é possível representar o sistema em espaço de estados, conforme as seguintes equações:

$$\dot{\mathbf{x}}_{dq}(t) = \mathbf{A}_{dq} \mathbf{x}_{dq}(t) + \mathbf{B}_{dq} \mathbf{u}_{dq}(t) + \mathbf{F}_{dq} \mathbf{w}_{dq}(t) \quad (1)$$

onde:

$$\mathbf{x}_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u}_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w}_{dq} = \begin{bmatrix} i_{Gd} \\ i_{Gq} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{dq} = \begin{bmatrix} \frac{R_f}{L_f} & -\omega & \frac{Z_{base}}{L_f} & 0 \\ \omega & \frac{R_f}{L_f} & 0 & \frac{Z_{base}}{L_f} \\ \frac{1}{C_{eq}Z_{base}} & 0 & \frac{1}{C_{eq}R_c} & -\omega \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}Z_{base}} & \omega & \frac{1}{C_{eq}R_c} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{dq} = \frac{Z_{base}}{L_f} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{dq} = \frac{1}{C_{eq}Z_{base}} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

onde,

L_f - indutor de filtro.

R_f - resistência associada aos indutores de filtro.

R_c - resistência associada a carga.

v_d, v_q - tensões nos terminais do GIAE em eixos dq .

i_d, i_q - correntes do DSTATCOM em eixos dq .

u_d, u_q - sinais de controle do DSTATCOM em eixos dq .

i_{Gd}, i_{Gq} - correntes do GIAE em eixos dq .

$C_{eq} = C_{CA} // C_{CM}$ - capacitância equivalente da associação paralela do C_{CA} com os C_{CM} .

$Z_{base} = V_{base}^2 / S_{base}$ - impedância de base.

As funções de transferência utilizadas para o projeto dos controladores que relacionam as correntes do DSTATCOM são obtidas a partir das equações em espaço de estados. Assim, a função de transferência em coordenadas síncronas dq que relacionam as correntes de saída i_d e i_q com as variáveis de controle u são dadas por:

$$G_{i_d}(s) = G_{i_q}(s) = \frac{i_d}{u_d} = \frac{i_q}{u_q} = \frac{Z_{base}(L_f s + R_f)}{L_f^2 s^2 + 2L_f R_f s + L_f^2 \omega^2 + R_f^2} \quad (2)$$

A função de transferência que relaciona a tensão nos terminais do GIAE, v_d , com a corrente, i_q , em coordenadas síncronas, é dada por:

$$G_{v_d}(s) = \frac{v_d}{i_q} = - \frac{(L_f^2 (s^2 + \omega^2) + 2L_f R_f s + R_f^2)}{(C_{eq}^2 R_c^2 (s^2 + \omega^2) + 2C_{eq} R_c s + 1)} \times \frac{C_{eq} R_c^2 \omega}{(L_f s + R_f) Z_{base}^2} \quad (3)$$

A função de transferência que relaciona a tensão do barramento CC do DSTATCOM com a corrente de eixo direto i_d é determinado a partir do balanço de potência entre o barramento CC e o GIAE [3], é dada por:

$$G_{v_{cc}}(s) = \frac{v_{cc}}{i_d} = - \frac{2/C_{cc}}{s} \frac{v_d}{v_{base}} \quad (4)$$

onde C_{cc} é capacitância do barramento CC.

A seguir será descrito o sistema de controle da topologia híbrida.

III. SISTEMA DE CONTROLE DA TOPOLOGIA HÍBRIDA

Para o controle da topologia híbrida de regulação de tensão, foi desenvolvido um sistema de controle digital que abrange os sinais adquiridos das tensões nos terminais do GIAE, das correntes CA e tensão CC do DSTATCOM como entradas, e os sinais de comando dos interruptores do DSTATCOM e de comutação dos C_{CM} como saídas, conforme detalhado na Figura 1.

O DSTATCOM atua com características de elemento capacitivo e compensa potência reativa positiva do sistema quando as tensões de saída do gerador de indução são menores que a tensão de referência. Por outro lado, o DSTATCOM atua com características de um elemento indutivo e compensa potência reativa negativa do sistema quando as tensões nos terminais do GIAE são maiores que o valor desejado.

Os C_{CM} atuam de forma a compensar a maior parte da potência reativa capacitiva requerida pelo gerador de indução e cargas aplicadas. Este efeito proporciona a redução da potência reativa a ser processada pelo DSTATCOM quando o mesmo atua com características de elemento capacitivo. Desta forma, o controle de comutação dos bancos tem como base a potência reativa processada pelo DSTATCOM. Quando o DSTATCOM opera com características de um elemento indutivo, os C_{CM} são desconectados.

A. Controle do DSTATCOM

O DSTATCOM é conectado aos terminais do GIAE através de indutores que, juntamente com o banco de capacitores de excitação, compõem um filtro passa baixa de segunda-ordem, que promove a redução de harmônicos de alta frequência produzidos pelo DSTATCOM.

O sistema de controle do DSTATCOM é desenvolvido em coordenadas síncronas dq , sendo esta uma prática usual para tais aplicações, uma vez que o problema de rastreamento é modificado para um problema de regulação, o que torna possível o uso de controladores do tipo proporcional-integral (PI) para regular as variáveis de interesse.

Quatro malhas compõem o sistema de controle do DSTATCOM, duas malhas internas dedicadas ao controle das correntes trifásicas do DSTATCOM e duas malhas externas de tensão para ajuste das referências de corrente das malhas internas em função das tensões nos terminais do GIAE e da tensão do barramento CC do DSTATCOM. O controle das quatro malhas é realizado através de controladores PI.

Para o projeto dos controladores PI utilizados no controle das variáveis de interesse aplicados ao DSTATCOM, foi empregado o procedimento descritos em [3], com o objetivo de obter erro nulo em regime permanente. Neste projeto, o acoplamento entre os eixos d e q é desprezado e neste caso o sistema em questão é considerado como dois sistemas *single input single output* (SISO).

Na Figura 3 é apresentado o diagrama de blocos simplificado do sistema de controle do DSTATCOM. O erro entre a tensão do barramento CC (v_{cc}) e seu valor de referência (v_{cc}^*) é a entrada de um controlador PI, que gera a corrente de referência no eixo d (i_d^*). A corrente do DSTATCOM no eixo d (i_d) controla o fluxo de energia ativa e, portanto, esta malha de controle afeta diretamente o nível de tensão do barramento CC.

De forma similar, o erro entre a tensão nos terminais do GIAE no eixo d (v_d) e seu valor de referência (v_d^*) é o sinal de entrada de outro controlador PI, que gera a corrente de referência no eixo q (i_q^*). A corrente do DSTATCOM no eixo q (i_q) controla o fluxo de energia reativa, influenciando na amplitude das tensões geradas.

Os sinais de erro entre as referências de corrente obtidas das malhas externas de tensão e as correntes medidas são os sinais de entrada para controladores PI da malha interna de corrente, os quais geram como saída as ações de controle (u_d e u_q). Tais ações de controle são transformadas para coordenadas estacionárias para geração dos sinais de modulação por largura de pulso (PWM).

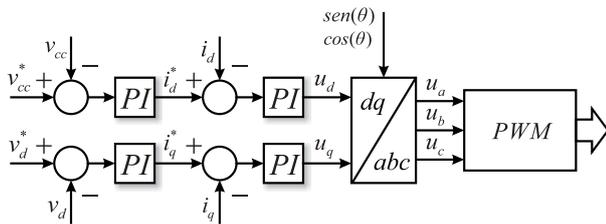


Fig. 3. Diagrama de blocos do sistema de controle do DSTATCOM.

B. Controle de Comutação dos Bancos de Capacitores

O controle de comutação dos bancos de capacitores é realizado por meio de um algoritmo, desenvolvido para gerar os sinais de comutação aplicados às contatoras que interligam cada banco de capacitores aos terminais do GIAE.

Para o funcionamento do algoritmo é primordial a determinação do número de bancos de capacitores que se pretende adicionar ao sistema (n_c). Tal opção estabelece a quantidade de combinações possíveis proporcionada pela associação paralela entre os bancos de capacitores.

O projeto dos C_{CM} segue uma progressão geométrica, de modo que a razão de progressão entre dois bancos de capacitores consecutivos seja o mesmo [20]. Desta forma é possível manter um padrão gradual de compensação da potência reativa.

Pode-se citar como exemplo a utilização de três bancos de capacitores ($n_c=3$), denominado como: 1C, 2C e 4C, conforme Figura 4, onde a razão de progressão entre os bancos de capacitores é definida como 2 e C é a capacitância estabelecida no projeto dos bancos de capacitores, que será apresentado na próxima seção.

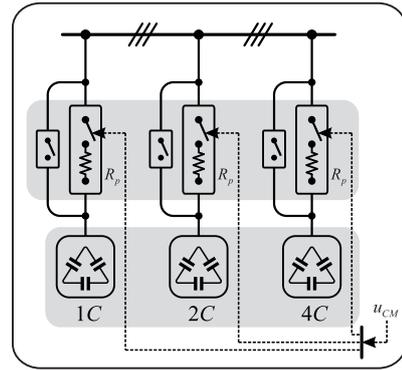


Fig. 4. Sistema de comutação dos C_{CM} .

A comutação dos bancos de capacitores é realizada a partir de contatoras, que permitem associar os bancos de capacitores a partir dos sinais de controle para a compensação de potência reativa.

Para $n_c=3$ utilizando-se da progressão geométrica no projeto das capacitâncias dos bancos de capacitores, o número de combinações possíveis para a associação paralela entre os bancos, é dado pela soma dos termos da progressão geométrica [20], através da equação:

$$N_{np} = a_1 \frac{q^{n_c} - 1}{q - 1} = 1 \frac{2^3 - 1}{2 - 1} = 7 \quad (5)$$

onde,

N_{np} - número de combinações possíveis.

a_1 - número do primeiro elemento.

q - razão de progressão.

Na Tabela I verifica-se a seqüência de combinações (N_n) para $n_c=3$, com a respectiva combinação de bancos de capacitores que o algoritmo deverá acionar através dos sinais de controle de comutação (u_{CM}).

TABELA I
Seqüência de combinações

N_n	1	2	3	4	5	6	7
u_{CM}	1C	2C	1C+2C	4C	1C+4C	2C+4C	1C+2C+4C

Os sinais de controle para comutação dos bancos de capacitores gerados pelo algoritmo são determinados com base no fluxo da potência reativa processado pelo DSTATCOM, denominado como Q_{DSTAT} .

Esta potência reativa é calculada utilizando as medições dos sinais de tensão dos terminais do GIAE e das correntes do DSTATCOM, através da equação:

$$Q_{DSTAT} = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{ab} i_c + v_{bc} i_b + v_{ca} i_a) \quad (6)$$

Por meio de um fluxograma é possível explicitar os passos lógicos que compõem um algoritmo. Neste caso, a Figura 5 demonstra os passos lógicos do algoritmo desenvolvido para a topologia proposta, apresentando quatro etapas de operações, sendo elas:

1) *Instrução de condição inicial*: Nesta estrutura o valor absoluto da potência reativa processada pelo DSTATCOM ($|Q_{DSTAT}|$) é avaliado por uma constante declarada como

potência reativa de referência (Q_{ref}). Tal constante é definida pelo valor real da potência reativa que o banco de capacitores de capacitância C compensa no sistema de geração. Para a condição tem-se:

- Se o valor absoluto da variável Q_{DSTAT} possuir um valor maior ou igual a Q_{ref} indica que o segundo bloco de instruções será executado.
- Se a condição for avaliada como falsa o algoritmo não executa nenhuma instrução.

2) *Laço de condição de rastreamento:* O objetivo desta etapa é verificar o intervalo a que $|Q_{DSTAT}|$ pertence. Para isto um vetor Q com $N_{np}+1$ elementos foi criado com valores múltiplos de Q_{ref} , conforme equação:

$$Q_i = [1Q_{ref}, 2Q_{ref}, \dots, N_{np}Q_{ref}, (N_{np} + 1)Q_{ref}] \quad (7)$$

onde Q_i contém todos os valores graduais de potência reativa que o conjunto de C_{CM} pode compensar.

Nesta etapa, a estrutura de decisão faz o uso de um conectivo lógico, o operador \underline{e} (AND) lógico, que permite a união de duas expressões na avaliação do problema. Para que a condição seja verdadeira, ambas as expressões têm que satisfazer as sentenças. Se uma das sentenças não ocorrer, a condição como um todo é falsa.

Utilizando-se um laço de repetição PARA é realizado o rastreamento de verificação de $|Q_{DSTAT}|$ da seguinte forma:

- PARA “ i ” (variável contadora) DE “1” (valor inicial) ATE “ N_{np} ” (valor final) com PASSO “1” (valor de incremento) FAÇA: Se $|Q_{DSTAT}|$ é maior ou igual que Q_i \underline{e} se $|Q_{DSTAT}|$ é menor que Q_{i+1} o laço de repetição é interrompido indicando que o terceiro bloco de instruções será executado e o valor da variável contadora i é salvo para compor uma operação.
- Se uma das sentenças não ocorrer é realizado o incremento da variável contadora i até quando a condição como um todo for verdadeira.

3) *Instrução de condição de operação:* Nesta estrutura a variável Q_{DSTAT} é avaliada como positiva ou negativa para determinar a sequência de combinação adequada para a compensação de potência reativa. Caso Q_{DSTAT} for positivo demonstra que o DSTATCOM está atuando com característica de elemento capacitivo necessitando aumentar o valor de N_n . Se Q_{DSTAT} for negativo demonstra que o DSTATCOM está atuando com característica de elemento indutivo necessitando reduzir o valor de N_n , assim:

- Se Q_{DSTAT} possuir um valor maior que zero, será realizado a soma da sequência de combinação (N_n) anterior já estabelecida pelo algoritmo, se existir, com a variável contadora i , resultando em uma nova sequência de combinação, que determina os sinais de controle para comutação dos bancos de capacitores. A próxima condição verifica se o número da nova sequência N_n é maior que o número de combinações possíveis N_{np} . Caso a sentença for verdadeira, N_n será igual N_{np} , caso contrário o próximo passo será executado sem alteração de N_n .
- Se Q_{DSTAT} possuir um valor menor que zero, será realizada a subtração de N_n anterior com a variável

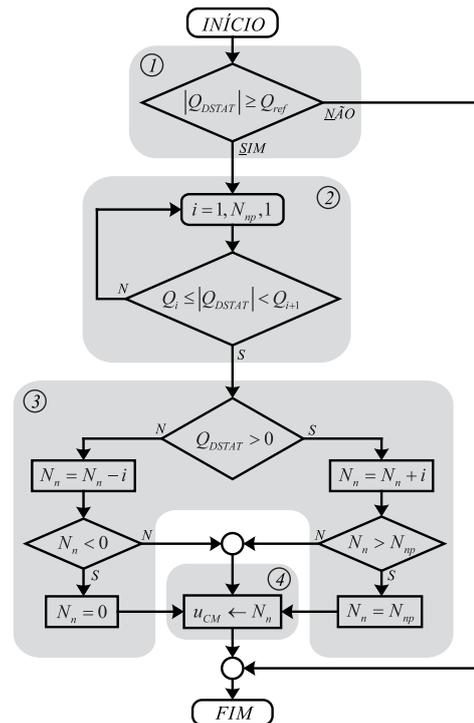


Fig. 5. Fluxograma do algoritmo desenvolvido para o controle de comutação dos bancos de capacitores.

contadora i , resultando em um novo valor de N_n . Esta operação poderá gerar uma sequência de combinação negativa, neste caso N_n será igual a zero, caso contrário o próximo passo será executado sem alteração de N_n .

4) *Instrução de conversão final:* Nesta etapa é realizada a conversão de base da sequência de combinação determinado pelo algoritmo. Tal operação converte N_n de base decimal para base binária. O número de bits gerados na conversão é proporcional ao número de bancos n_c utilizados, sendo que cada bit denomina um sinal de controle de comutação (u_{CM}) dedicado a uma contadora que interliga o banco de capacitores aos terminais do GIAE.

O bit menos significativo corresponde ao banco de capacitores de menor capacitância, conforme exemplos apresentados na Figura 6.

Para a conexão de bancos de capacitores a um barramento com tensão variável, é importante considerar uma etapa de pré-carga dos capacitores para evitar picos de corrente ocasionados pela derivada elevada de tensão.

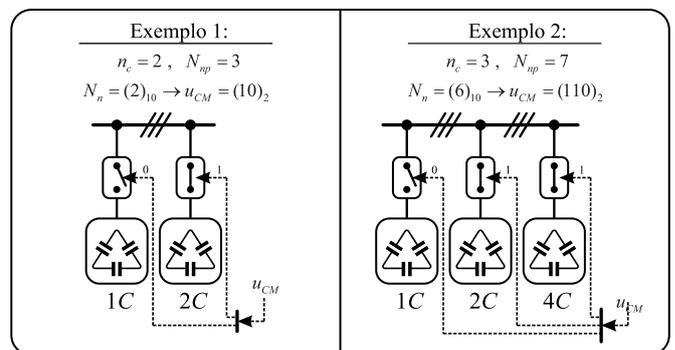


Fig. 6. Exemplos de conversão de base de N_n e esquema de acionamento fazendo o uso de dois ou três bancos de capacitores.

Resistores de pré-inserção (R_p) conectados em série com os terminais dos capacitores são utilizados para evitar picos de corrente nos instantes que os bancos são conectados aos terminais do GIAE através de uma contatora, conforme mostrado na Figura 4. Na sequência, uma segunda contatora é acionada, curto-circuitando e removendo as resistências de pré-inserção do circuito.

IV. PROJETO DOS BANCOS DE CAPACITORES COMUTÁVEIS

O projeto dos C_{CM} segue uma progressão geométrica com base na capacitância C . Esta capacitância é determinada a partir dos valores limites de tensão estabelecidos pela resolução normativa dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 da ANEEL [21], que estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica – QEE. Esta norma define os níveis de tensão eficaz em regime permanente, sendo que a tensão no ponto de entrega ou conexão, obtido por meio de medição, é classificada em adequada, precária ou crítica, conforme apresentado na Tabela II.

TABELA II
Níveis de tensão eficaz em regime permanente conforme PRODIST – Módulo 8

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$201 \leq V_L \leq 231$
Precária	$189 \leq V_L \leq 201$ ou $231 \leq V_L \leq 233$
Crítica	$189 > V_L$ ou $233 < V_L$

A amplitude da tensão nos terminais do GIAE depende do valor da C_{CA} , da carga conectada, e da velocidade da máquina primária. Com o acréscimo de carga, considerando a velocidade da máquina primária constante e a capacitância fixa ocorre um decréscimo na tensão gerada, necessitando de outra fonte de energia reativa para sua regulação.

Deste modo, o valor da capacitância C é obtido analisando a potência reativa necessária (Q_C) para que, o GIAE sustente a amplitude da tensão regulada quando a tensão gerada atinge o limite inferior estabelecido pelo PRODIST da tensão de atendimento “Precária”. Esta análise é realizada pela conexão de uma carga nos terminais do GIAE.

Assim, o valor da capacitância C é dado por:

$$X_{CA} = \frac{(V_n)^2}{Q_C}, C = \frac{1}{\omega X_{CA}} \quad (8)$$

onde,

- X_{CA} - reatância capacitiva.
- V_n - tensão nominal de geração.
- Q_C - potência reativa de compensação.
- C - capacitância dos capacitores comutáveis.
- ω - velocidade angular na frequência de operação.

Com a obtenção do valor da capacitância C e utilizando-se da progressão geométrica, conforme exemplo descrito na seção anterior, são definidas as capacitâncias para os demais C_{CM} .

A adição de um banco de capacitores em um sistema elétrico pode ser representada em forma geométrica como a soma de dois triângulos de potências que demonstra a compensação de energia reativa [22], como exemplo mostrado na Figura 7.

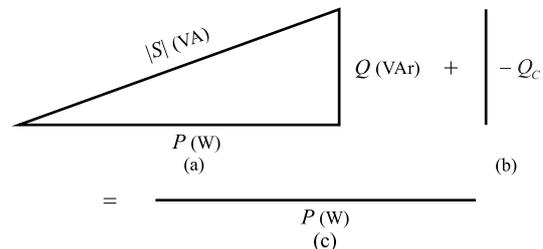


Fig. 7. (a) Triângulo de potências de um sistema. (b) Triângulo de potências para um capacitor Q_C . (c) Soma dos triângulos de potências em (a) e (b).

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

O sistema de geração mostrado na Figura 1 foi simulado no software Matlab®, considerando parâmetros do protótipo desenvolvido em laboratório do sistema de geração e da topologia híbrida proposta na obtenção dos resultados experimentais. Para a implementação do sistema de controle, foi utilizado um processador digital de sinais (DSP) de ponto flutuante modelo TMS320F28335.

A Tabela III apresenta os parâmetros do Gerador de Indução e do Banco de Capacitores de Excitação, enquanto que a Tabela IV mostra os parâmetros do DSTATCOM, Filtros de Saída e Banco de Capacitores Comutáveis (C_{CM}).

A Tabela V apresenta os ganhos proporcionais e integrais dos controladores PI no domínio do tempo discreto, no qual, a discretização foi realizada pelo método *First-Order Hold* (FOH).

TABELA III
Parâmetros do Gerador de Indução e Banco de Capacitores de Excitação

Parâmetros	Valores
Potência do GIAE	$P_n = 5$ CV
Tensões de linha do GIAE	$V_n = 220$ V (rms)
Velocidade rotórica	$n = 1730$ rpm
Frequência	$f = 60$ Hz
Inércia do rotor	$J = 0,034$ kg.m ²
Fator de potência	FP = 0,81
Capacitor de excitação	$C_{CA} = 40$ μF (cada)

TABELA IV
Parâmetros do DSTATCOM, Filtros de Saída e Banco de Capacitores Comutáveis

Parâmetros	Valores
Corrente do DSTATCOM	$I = 20$ A (rms)
Capacitor do barramento CC	$C_{cc} = 4700$ μF/900 V
Filtros de saída	$L_f = 2,5$ mH $R_f = 0,03$ Ω
Frequência de chaveamento	$f_c = 10$ kHz
Capacitor comutáveis	$1C = 6$ μF (cada) $2C = 12$ μF (cada)

TABELA V
Parâmetros dos Controladores PI

Parâmetros	Valores
Ganhos PI da malha de controle V_{cc}	$KP_d = -2,881$ $KI_d = -0,8605$
Ganhos PI da malha de controle v_d	$KP_q = -1,8258$ $KI_q = -0,9989$
Ganhos PI das malhas de controle interna	$KP_d = KP_q = 0,4673$ $KI_d = KI_q = -0,9097$

Os parâmetros do controlador PI que compõem a malha externa de controle em função da tensão v_d são projetados desconsiderando os C_{CM} .

Esta simplificação é justificada pela resposta em frequência considerando os parâmetros do sistema, mostrada na Figura 8, que demonstra a pequena influência que C_{CM} provoca na planta $G_{vd}(s)$. O ganho em magnitude utilizando dois C_{CM} é considerado desprezível comparado com a dinâmica que considera apenas os capacitores de excitação.

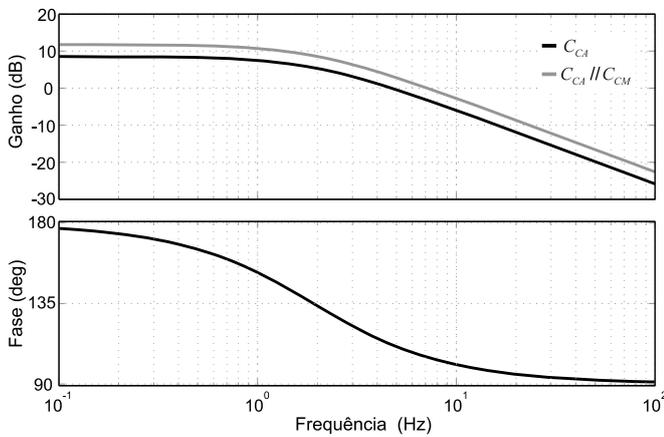


Fig. 8. Resposta em frequência de G_{vd} em malha aberta.

Para obtenção dos resultados de simulação e resultados experimentais, foram utilizados dois bancos de capacitores para compor o grupo de capacitores comutáveis. Desta forma, para $n_c = 2$ tem-se $N_{np} = 3$.

Para acionamento dos C_{CM} , Q_{ref} é definida através da potência reativa que o banco de capacitores com capacitância C compensa no sistema de geração. O banco de capacitores comutáveis, C , é avaliado em $6 \mu\text{F}$, definido para regular a amplitude da tensão quando a mesma estiver em 189 V e o sistema necessita de 300 VAR para sustentar a tensão nos terminais do GIAE regulada, de tal forma que Q_{ref} foi definida como 300 VAR .

Para a desconexão dos C_{CM} da topologia híbrida, Q_{ref} é definido como -100 VAR , no qual o DSTATCOM opera com características de um elemento indutivo.

A definição da capacitância do segundo banco de capacitores é determinada pela progressão geométrica com razão de progressão igual a 2, de tal forma que se $1C$ é igual a $6 \mu\text{F}$, $2C$ é igual a $12 \mu\text{F}$.

Com o objetivo de demonstrar o comportamento do sistema de geração isolado frente a nova topologia híbrida proposta, uma série de cargas resistivas são conectadas e desconectadas nos terminais do GIAE. São empregadas quatro cargas trifásicas com potências de 600 W , totalizando em uma potência igual a $2,4 \text{ kW}$.

A. Resultados de Simulação

Para verificar o sistema de controle da topologia proposta, quatro cargas resistivas são conectadas aos terminais do GIAE de maneira sucessiva. As conexões ocorrem em 2 s , 6 s , 10 s e 14 s respectivamente. De modo semelhante as cargas são desconectadas do sistema nos instantes de 18 s , 22 s , 26 s e 30 s .

A Figura 9 apresenta a potência reativa processada pelo DSTATCOM (Q_{DSTAT}), os sinais de controle para comutação dos bancos de capacitores $1C$ e $2C$, a tensão nos terminais do GIAE no eixo d (v_d) e seu valor de referência (v_d^*), a corrente do DSTATCOM no eixo d (i_d) e seu valor de referência (i_d^*), a corrente do DSTATCOM no eixo q (i_q) e seu valor de referência (i_q^*) e a tensão no barramento CC (v_{cc}) com seu valor de referência (v_{cc}^*).

Ainda na Figura 9, a faixa superior apresenta a potência da carga conectada durante todo o processo de simulação (0 W , ..., $2,4 \text{ kW}$, ..., 0 W), sendo possível acompanhar qual a potência de carga está em um intervalo de tempo específico.

Verifica-se que Q_{DSTAT} permanece na faixa de 300 VAR e -100 VAR a medida que ocorrem as variações de carga, resultado decorrente da atuação do algoritmo de controle dos C_{CM} , que garante a comutação de $1C$ e $2C$ quando Q_{DSTAT} ultrapassa a referência de 300 VAR e -100 VAR .

Percebe-se ainda que, v_d , i_d , i_q e v_{cc} seguem suas respectivas referências mesmo sob a variação de carga, sendo que v_d^* é igual a 220 V e v_{cc}^* é igual a 450 V , já as correntes i_d^* e i_q^* dependem das respostas das malhas externas para serem geradas.

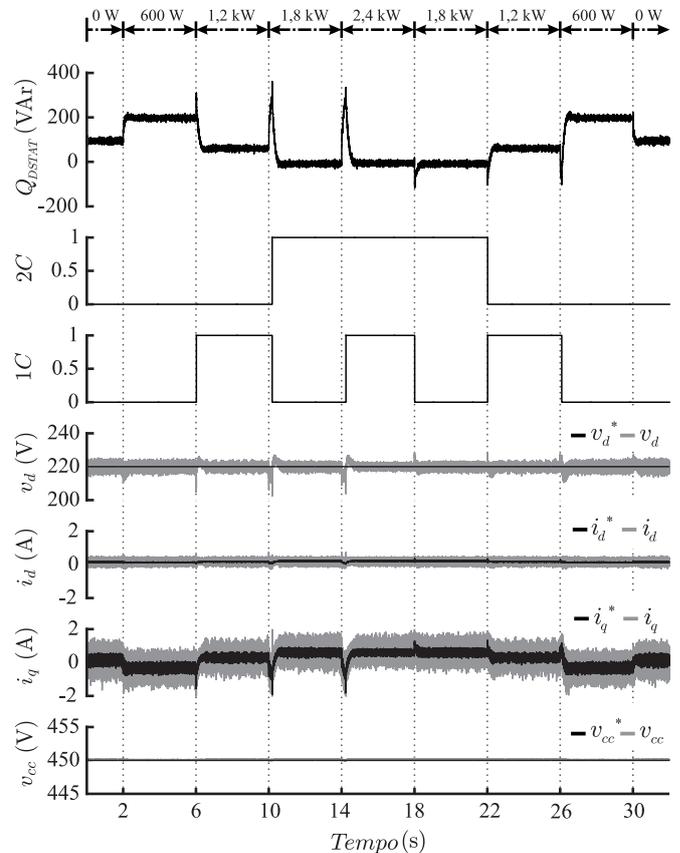


Fig. 9. Resultados de simulação. Resposta do sistema às variações de cargas resistivas com atuação do DSTATCOM e C_{CM} .

B. Resultados Experimentais

Para a obtenção dos resultados experimentais dois ensaios foram realizados com o propósito de validar a topologia híbrida trifásica a três fios. Os procedimentos de ensaio para obtenção do comportamento das variáveis são semelhantes aos aplicados em simulação, de tal forma que o número de cargas utilizadas e o tempo de conexão e desconexão destas são os mesmos.

Os resultados apresentados na Figura 10 foram obtidos com a atuação completa do sistema de controle da topologia híbrida, utilizando-se do DSTATCOM para regulação de tensão nos terminais do GIAE e da tensão do barramento CC e os C_{CM} para compensação de energia reativa no sistema.

De modo semelhante aos resultados de simulação apresentados, Q_{DSTAT} permanece na faixa de intervalo definida pela referência Q_{ref} , que garante através do algoritmo a comutação dos C_{CM} quando Q_{DSTAT} alcança as referências definidas, e neste caso a corrente i_q não ultrapassa o valor de 2 A. A corrente i_d corresponde à potência ativa consumida pelo DSTATCOM para compensar as perdas do conversor e para manter a tensão do barramento CC regulada. Os sinais de controle para comutação dos C_{CM} podem ser observados nos gráficos 1C e 2C.

Os resultados apresentados na Figura 11 foram obtidos sem a atuação dos C_{CM} no sistema. Desta forma, o controle para a regulação de tensão nos terminais do GIAE é realizada exclusivamente pelo DSTATCOM.

A Figura 11 apresenta a potência reativa processada pelo DSTATCOM (Q_{DSTAT}), a tensão nos terminais do GIAE no

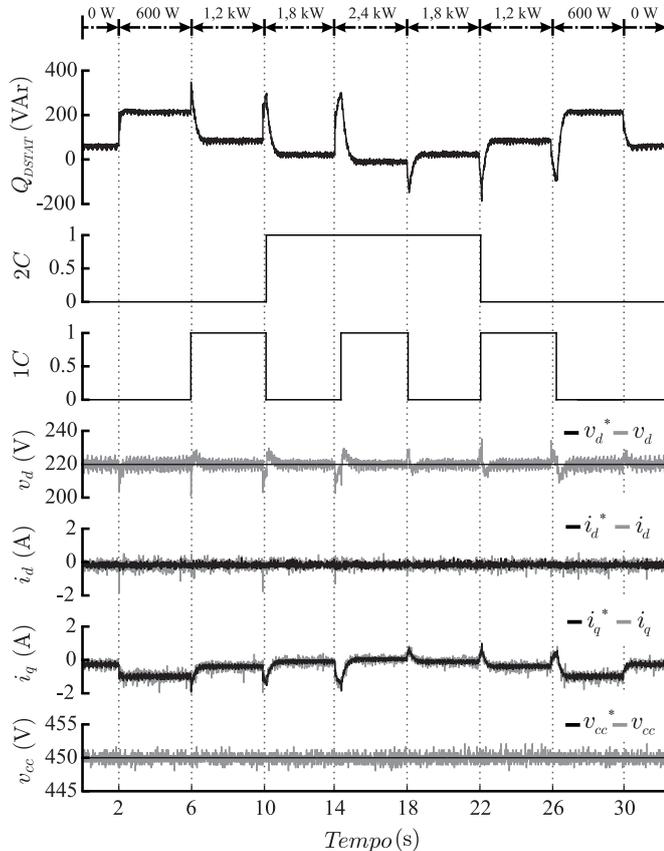


Fig. 10. Resultados experimentais. Resposta do sistema às variações de cargas resistivas com atuação do DSTATCOM e C_{CM} .

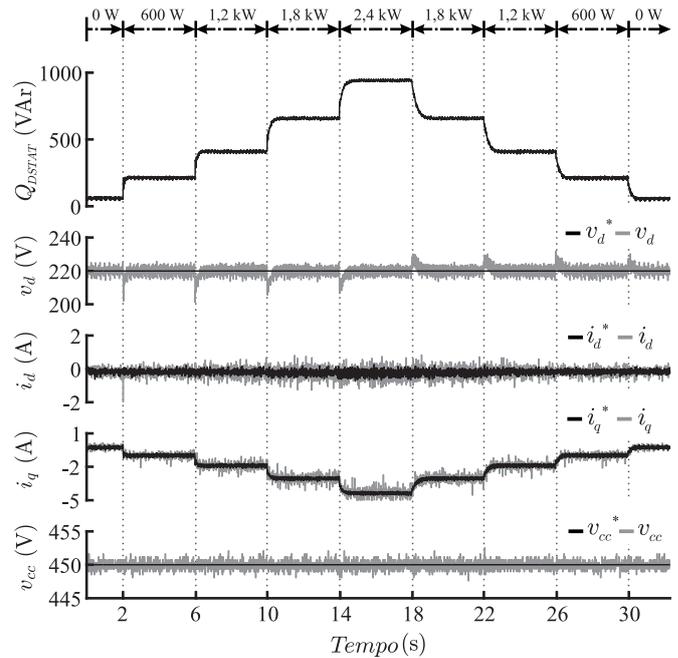


Fig. 11. Resultados experimentais. Resposta do sistema às variações de cargas resistivas com atuação do DSTATCOM, sem C_{CM} .

eixo d (v_d) e seu valor de referência (v_d^*), a corrente do DSTATCOM no eixo d (i_d) e seu valor de referência (i_d^*), a corrente do DSTATCOM no eixo q (i_q) e seu valor de referência (i_q^*) e a tensão no barramento CC (v_{cc}) com seu valor de referência (v_{cc}^*).

Pode ser observado que no decorrer do ensaio realizado a potência reativa processada pelo DSTATCOM aumenta, alcançando 1 kVar quando quatro cargas de 600 W (cada) são conectadas aos terminais do GIAE. Em consequência, a corrente i_q que controla o fluxo de energia reativa do sistema também aumenta, alcançando uma amplitude de corrente de 5 A. As variáveis v_d , i_d , e v_{cc} permanecem constante sem modificações na variação de carga.

A Figura 12 apresenta as tensões de linha sob variação de carga. Neste ensaio ocorre a conexão e posterior desconexão de uma carga de 600 W resistiva aos terminais do GIAE. Já a Figura 13 exibe o detalhe das tensões em regime permanente, após a conexão das cargas resistivas com potência igual a 2,4 kW, apresentando um desempenho satisfatório para os controladores projetados.

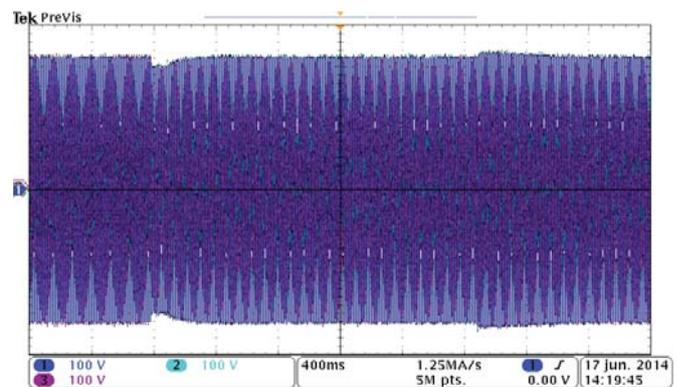


Fig. 12. Resultado experimental. Resposta do controle de tensão à uma variação de carga - Conexão e desconexão de carga resistiva de 600 W.

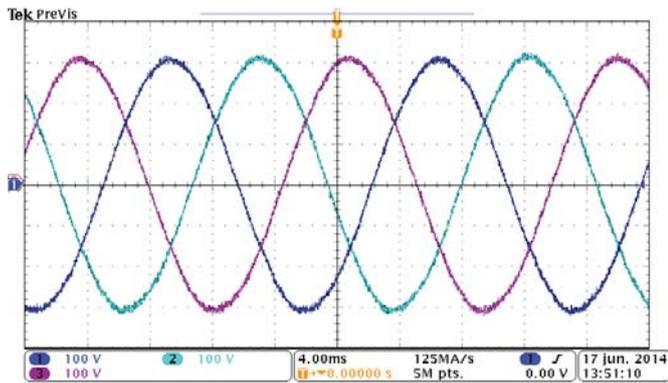


Fig. 13. Resultado experimental. Comportamento das tensões de linha com carga resistiva de 2,4 kW conectada aos terminais do GIAE.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo propôs uma nova topologia híbrida a três fios para regulação de tensão aplicada em micro centrais de geração que utiliza gerador de indução autoexcitado operando de forma isolada. A topologia híbrida considera um sistema trifásico, formado por bancos de capacitores comutáveis e um DSTATCOM ambos conectados em paralelo com GIAE.

A topologia proposta tem como vantagem a regulação de tensão mais adequada se comparada com a topologia que emprega apenas bancos de capacitores comutáveis. Além disso, comparando os resultados experimentais obtidos para a topologia híbrida e para a topologia que utiliza somente o DSTATCOM, a topologia híbrida proposta reduz em torno de 50% da potência reativa processada pelo DSTATCOM, o que pode significar a redução do custo global do sistema de regulação.

A partir dos resultados de simulações e experimentais, conclui-se que a topologia híbrida proposta apresenta desempenhos satisfatórios tanto em regime transitório como em regime permanente na regulação de tensão, para condições diversas de carga resistiva trifásica equilibrada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPq projeto N° 477166/2013-0 pelo suporte financeiro e ao Grupo de Eletrônica de Potência e Controle pelos conhecimentos adquiridos.

REFERÊNCIAS

[1] E. N. Marra; J. A. Pomílio, "Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bidirectional Converter for Rural Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, v. 35, n. 4, 1999.

[2] C. Rech, R. F. Camargo, M. Campos, F. Salvadori, V. G. Leandro and J. C. Bolacell, "Impacto de métodos de sincronismo no desempenho de geradores de indução auto-excitados", Controle & Automação - SBA, vol.19, n° 04, pp. 475-485, 2008.

[3] L. G. Scherer, R. F. de Camargo, "Controle de Frequência e Tensão de Micro Centrais Hidrelétricas que Utilizam Geradores de Indução Auto-Excitados com

Emprego da Modelagem Não-linear de Turbinas Hidráulicas", Eletrônica de Potência – SOBRAEP, vol.17, n° 4, pp. 690-701, Set./Nov. de 2012.

- [4] H. C. Rai; A. K. Tandan, S. S. Murthy, B. Singh, "Voltage regulation of self-excited induction generator using passive elements", IEEE Conference of Electric Machine Drives, p. 240–245, 1993.
- [5] M. G. Simões, F. A. Farret, "Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 1ª Ed., 2004.
- [6] D. E. Basset and M. F. Potter, "Capacitive excitation for induction generators", AIEE Transactions, v. 54, p. 540–545, 1935.
- [7] Y. K. Chauhan, S. K. Jain, B. Singh, "A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, v. 46, n. 2, Mar/Apr. 2010.
- [8] S. M. Alghuwainem, "Steady state analysis of an induction generator self-excited by a capacitor in parallel with a saturable reactor", IEEE Electric Machinery Power System, v. 26, n. 6, p. 617–625, July 1998.
- [9] E. C. Quispe, R. D. Arias, and J. E. Quintero, "A new voltage regulator for self-excited induction generator-design, simulation, and experimental results", in Proc. IEEE Conf. Elect. Mach. Drives, 1997, pp. TB3/7.1.
- [10] M. A. Al-Saffar, E. C. Nho, and T. A. Lipo, "Controlled shunt capacitor self-excited induction generator", in Conf. Rec. 33rd IEEE IAS Annu. Meeting, Oct. 12–15, 1998, vol. 2, pp. 1486–1490.
- [11] D. K. Jain, A. P. Mittal, and B. Singh, "Advanced controlled series compensated self-excited induction generator", in Proc. Int. Conf. Power Electron., Drives Energy Syst. Ind. Growth, Jan. 8–11, 1996, vol. 2, pp. 707–712.
- [12] T. Ahmed, O. Noro, E. Hiraki, and M. Nakaoka, "Terminal voltage regulation characteristics by static Var compensator for a 3-phase self-excited induction generator", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 4, pp. 978–988, Jul./Aug. 2004.
- [13] T. Ahmed, K. Nishida, M. Nakaoka, "A Novel Stand-Alone Induction Generator System for AC and DC Power applications", IEEE Transactions on Industry Applications, v. 43, n. 6, p. 1465-1474, 2007.
- [14] B. Singh, L. B. Shilpakar, "Analysis of a novel solid state voltage regulator for a self-excited induction generator", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, v. 45, n. 6, p. 647–655, Nov. 1998.
- [15] S. C. Kuo, L. Wang, "Analysis of voltage control for a self-excited induction generator using a current-controlled voltage source inverter (CC-VSI)", IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, v. 148, n. 5, p. 431–438, Sep. 2001.
- [16] B. Singh, S. S. Murthy, S. Gupta, "STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generator feeding nonlinear loads", IEEE Transaction on Industrial Electronics, v. 53, n. 5, p. 1437–1452, Oct. 2006.
- [17] H. R. Karshenas, A. Abdolahi, "Analysis of a voltage regulator for self-excited induction generator employing current-type static compensator", in Proc. Int. Conf. Elect. Comput. Eng., 2001, vol. 2, pp. 1053–1058.

DADOS BIOGRÁFICOS

- [18]N. Martins, G. C. D. Sousa, “Controle “Fuzzy” do Gerador de Indução Trifásico para Micro Centrais Hidrelétricas”, SOBRAEP Revista de Eletrônica de Potência, v. 12, n. 2, p. 137-146, Julho de 2007.
- [19]V. Rajagopal, B. Singh, G. K. Kasal, “Electronic load controller with power quality improvement of isolated induction generator for small hidro power generation”, IET Transaction on Renewable Power Generation, v. 5, n. 2, p. 202-213, 2011.
- [20]M. Hazewinkel, Encyclopaedia of Mathematics, Supplement III, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [21]ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST – Módulo 8, disponível em http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_4.pdf, acessado em 15 de agosto de 2014.
- [22]J. W. Nilsson, S. A. Riedel, Electric Circuits, Prentice Hall, 8ª Edição, 2008.

Celso Becker Tischer, Possui graduação (2011) em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul e mestrado (2013) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) com ênfase em Processamento de Energia Elétrica. Atualmente, é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM. Entre suas áreas de interesse destacam-se: controle de máquinas, eletrônica de potência, gerador de indução autoexcitado, regulação de tensão. É membro da SOBRAEP.

Lucas Giuliani Scherer, Possui graduação (2007) e mestrado (2012) em Engenharia Elétrica pela UFSM com ênfase em Processamento de Energia Elétrica. Atualmente, é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM. Entre suas áreas de interesse destacam-se: controle de máquinas, eletrônica de potência, gerador de indução autoexcitado, regulação de tensão e frequência. É membro da SOBRAEP.

Robinson Figueiredo de Camargo, Possui graduação (2000), mestrado (2002) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela UFSM com ênfase em Processamento de Energia Elétrica. Foi professor e coordenador do Curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI e professor do mestrado em Modelagem Matemática. Atualmente, é professor e Chefe do Departamento de Processamento de Energia Elétrica. É também professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM. Entre suas áreas de interesse destacam-se: pequenas centrais hidrelétricas, métodos de sincronização de conversores, retificadores PWM trifásicos e filtros ativos de potência. É membro da SOBRAEP.