

CONVERSOR MULTINÍVEL EM CASCATA SIMÉTRICO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE SUPORTABILIDADE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM TURBINAS EÓLICAS

FERNANDA CARNIELUTTI, BENHUR TESSELE, JEAN DE PARIS, JORGE MASSING, HUMBERTO PINHEIRO*

*Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil

Email: fcarnielutti@yahoo.com, benhurzi@gmail.com, jeanmdp.92@gmail.com,
jorgemassing@gmail.com, humberto.ctlab.ufsm.br@gmail.com

Abstract— This paper describes the implementation of a symmetrical cascaded multilevel converter used for fault-ride-through tests of grid-connected wind turbines. The converter emulates the main faults that can occur in power systems, with no significant impact on the grid during the tests. The proposed system is comprised of three control levels: a human interface, a central unit and local controllers in each power cell. Each power cell is composed of a back-to-back single-phase full-bridge converter, measurement circuits and a *Digital Signal Processor*, DSP. The central controller is a DSP that generates the voltage references for the cells and synchronizes them to the central timer. The human-machine interface is accomplished by means of a *Raspberry Pi*. Experimental results are shown to demonstrate the operation of the converter during low-voltage-ride-through tests.

Keywords— Multilevel converters, Wind turbines, Low-voltage-ride-through tests.

Resumo— Este artigo descreve a implementação de um conversor multinível em cascata simétrico, utilizado para testes de suportabilidade a afundamentos de tensão em turbinas eólicas conectadas à rede. O conversor emula as principais faltas que ocorrem em sistemas de potência, sem impactar significativamente a rede durante a realização dos testes. O sistema é composto de três níveis de controle: uma interface homem-máquina, um controlador central e controladores locais em cada célula. Cada célula é composta por um conversor *back-to-back* de ponte completa monofásico, circuitos de medida e um *Digital Signal Processor*, DSP. O controlador central é um DSP que gera as referências de tensão e de sincronismo para as células. A interface homem-máquina é feita através de uma *Raspberry Pi*. Resultados experimentais são apresentados, a fim de demonstrar a operação do conversor durante ensaios de afundamento de tensão.

Keywords— Conversor multinível, Turbinas eólicas, Teste de suportabilidade a afundamento de tensão.

1 Introdução

Com o constante aumento do percentual de energia elétrica gerada por turbinas eólicas, operadores de sistemas de potência ao redor do mundo estão começando alterar seus Códigos de Rede, requerendo a participação destas no controle do sistema de potência ao qual estão conectadas, de forma tal que seu comportamento dinâmico se assemelhe ao máximo ao de geradores síncronos convencionais. Atualmente, a maior parte das turbinas comercializadas possuem conversor de potência parcial ou plena, permitindo operação com velocidade variável e participação no controle do sistema de potência (Gabe, 2012).

Entre os requisitos de operação apresentados em alguns Códigos de Rede, podemos citar compensação de potência reativa, controle primário de frequência e suportabilidade a afundamentos de tensão, sendo este último um dos mais importantes (M. Altin, 2010) (National Grid U.K., 2014), (VDEW, 2007), (ONS, 2009), (Energinet, 2010). Durante certos tipos de faltas na rede, a turbina eólica deve permanecer conectada, e, em alguns casos, fornecer suporte de reativos para ajudar no restabelecimento do sistema. Como exemplo, a Fig. 1 traz a curva de suportabilidade

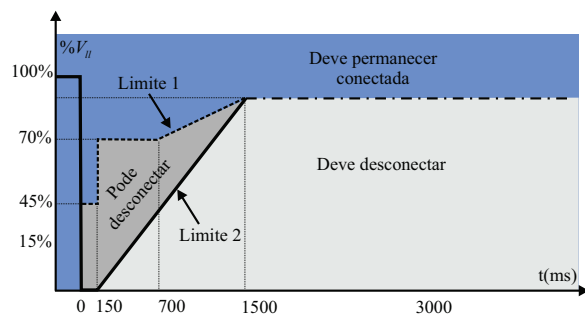


Figura 1: Curva de suportabilidade a afundamentos de tensão do Código de Rede alemão (VDEW, 2007).

a afundamentos de tensão referente ao Código de Rede alemão (VDEW, 2007). Os eixos horizontal e vertical representam, respectivamente, o tempo e a amplitude da máxima tensão de linha da rede.

Na Fig. 1, a falta ocorre no instante $t=0$. Desde que as tensões de linha pertençam à área azul, a turbina eólica deve permanecer conectada à rede. Entre os limites 1 e 2, a turbina pode desconectar, se houver instabilidades no sistema. Na área cinza clara, a turbina deve obrigatoriamente desconectar da rede elétrica. Note que,

durante um intervalo de 150ms, mesmo com tensão nula, a turbina deve permanecer conectada. Os demais Códigos de Rede apresentam requisitos semelhantes, com curvas de suportabilidade a afundamentos de tensão adequadas às características específicas do sistema de potência em questão.

Desta forma, fabricantes de turbinas eólicas devem testar e certificar a capacidade de seus equipamentos de satisfazer estes requisitos. Emuladores de faltas na rede usando um conjunto inversor/retificador de dois níveis já foram apresentados na literatura (Miguel García-Gracia, 2009),(Gabe, 2012). Contudo, esses conversores necessitam de filtros LC pesados na saída. Devido às limitações de conversores de dois ou três níveis, interações e ressonâncias indesejadas entre os controladores da turbina eólica e o filtro de saída do emulador de rede podem ocorrer. Como conversores multiníveis reduzem as distorções nas tensões de linha de saída, os filtros LC podem ser reduzidos ou até mesmo eliminados, mitigando as possíveis interações indesejadas do emulador com a turbina eólica sob teste.

Neste contexto, este artigo descreve a implementação de um protótipo de um conversor multinível em cascata simétrico, para ser usado como emulador de faltas para testes de suportabilidade a afundamentos de tensão em turbinas eólicas que serão conectadas à rede elétrica. O conversor é capaz de emular as principais faltas que ocorrem em sistemas de potência reais (faltas simétricas, assimétricas e *phase jump*)(Kundur, 1994), podendo também emular a impedância da rede no ponto de conexão da turbina. O conversor proposto possui três células monofásicas por fase, sendo cada uma composta por um retificador em ponte completa no lado da rede, um barramento CC e um inversor em ponte completa na saída, como mostrado na Fig. 2. O controle do sistema é subdividido em três níveis: uma interface homem-máquina, uma unidade central e controladores locais em cada célula, como visto na Fig. 3. Cada um dos níveis de controle da Fig. 3 será descrito separadamente na próxima Seção.

2 Descrição do Sistema Proposto

Esta Seção apresenta a descrição do conversor multinível em cascata simétrico, bem como dos controladores e dos protocolos de comunicação implementados entre as diferentes partes do sistema. O fluxograma do algoritmo geral de controle é mostrado na Fig. 4, e será descrito em maiores detalhes nas próximas Subseções.

2.1 Interface Homem-Máquina (IHM)

Para implementação do nível mais alto de controle, foi utilizada uma *Raspberry Pi*. Através de uma IHM, a RPI recebe as informações do ensaio,

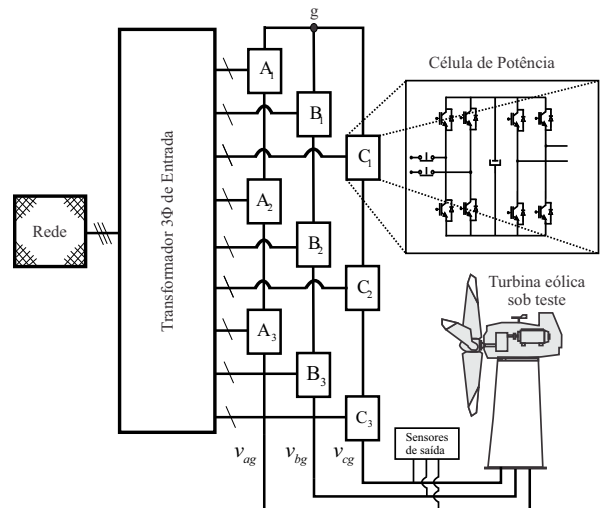


Figura 2: Rede, conversor multinível em cascata simétrico e turbina eólica sob teste.

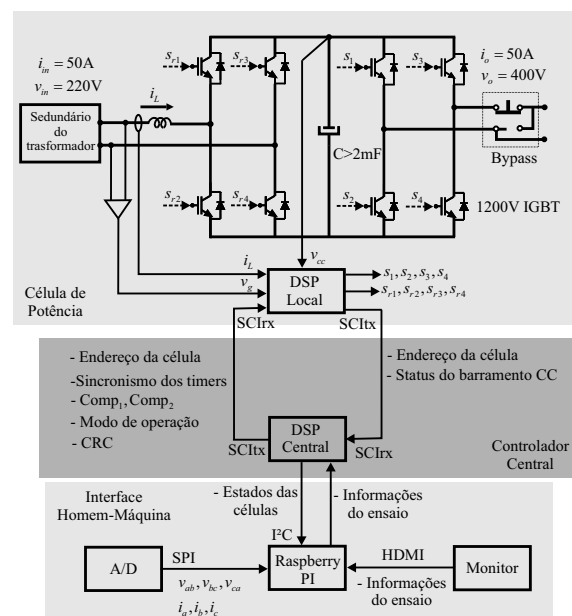


Figura 3: Controle e protocolos de comunicação.

e as repassa para o DSP central, por meio de um protocolo de comunicação implementado no barramento I²C (*Inter-Integrated Circuit*). O pacote de dados enviado contém a amplitude das componentes de sequência positiva, negativa e zero de tensão antes e durante a falta; frequência da rede; tempo total de ensaio; tempo da falta, ângulo e tipo de falta. Com estes dados, o DSP central calcula as referências de tensão para as três fases do conversor, atualiza a modulação e sincroniza as células. Durante o ensaio, a RPI também faz a aquisição das tensões e correntes de fase no equipamento sob teste. Após o término do ensaio, a RPI recebe do DSP central a informação sobre se o ensaio foi realizado com sucesso.

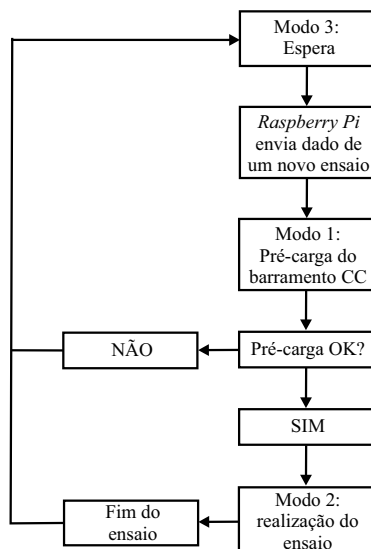


Figura 4: Algoritmo geral de controle.

2.2 Controlador Central

O controlador central foi implementado utilizando um *Digital Signal Processor* (DSP) TMS320F28335 da *Texas Instruments*, e se comunica com as células por meio de um canal bidirecional de fibra óptica. Como este DSP possui três interfaces seriais do tipo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), optou-se por utilizar as três células de uma mesma fase se comunicando com a mesma UART do DSP. Após receber da RPI as informações do ensaio, o DSP central entra no Modo 1 e envia às células um comando para que seus retificadores realizem a pré-carga dos barramentos CC, enquanto os inversores permanecem inibidos. Após um intervalo de pré-carga definido, as células verificam a tensão dos seus barramentos, e enviam um pacote para o DSP central, contendo seu endereço e status do seu barramento. Se as tensões de todos os barramentos CC estiverem corretas, o modo de operação muda de pré-carga, Modo 1, para execução do ensaio, Modo 2.

No Modo 2, o DSP central calcula os comparadores para os braços dos inversores das células por meio da técnica de modulação apresentada em (Carnielutti et al., 2012). Além do pacote de dados, o DSP central envia um *byte* adicional de CRC (*Cyclic Redundancy Check*), para verificar se os dados não foram corrompidos durante o envio. O DSP central opera com frequência de 12kHz, enquanto as células comutam com duas frequências: o controle do barramento CC é feito em 12kHz, enquanto os inversores comutam em 2kHz. Desta forma, os pacotes apresentam uma defasagem, como visto na Fig. 5, onde é mostrada a portadora do DSP central e das três células da fase *a*. O mesmo se aplica às demais fases. As portadoras dos inversores da mesma fase apresentam uma defasagem de 60° entre si, caracte-

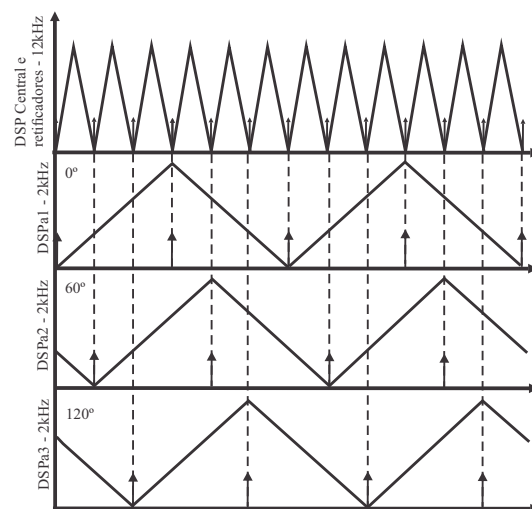


Figura 5: Portadora do DSP central em 12kHz e portadoras para os inversores das três células da fase *a*, com defasagem de 60°.

terizando modulação do tipo *Phase-Shift*, e cancelando o primeiro grupo de harmônicas presentes na saída de cada célula.

Quando o ensaio é finalizado, o DSP central entra em Modo 3, e envia às células um comando para inibir o retificador e o inversor, e, à RPI, a informação sobre se o ensaio foi realizado com sucesso. Após, entra em modo de espera, até que a RPI envie um pacote com informações para a realização de um novo ensaio.

2.3 Controladores Locais

Como o retificador é totalmente controlado, optou-se por utilizar um controlador local em cada célula, implementado por meio de um DSP TMS320F28335. Optou-se por esta arquitetura, porque, se o controle fosse centralizado, demandaria o envio de muitas variáveis locais ao DSP central (medidas das tensões e correntes), bem como o envio pelo DSP central dos valores dos comparadores para as chaves semicondutoras dos retificadores locais, fazendo com que a comunicação e o controle se tornassem mais complexos. Desta forma, cada DSP local é responsável pelo controle do retificador e pela modulação PWM do inversor.

Primeiramente, o DSP central envia um comando para que as células entrem no Modo 1, de pré-carga do barramento CC. A descrição do controlador do barramento CC é apresentada na próxima Subseção. Após o período de pré-carga, as células enviam ao DSP central seu endereço e estado e, caso todas as células estejam operacionais, o modo de operação do conversor é alterado para o Modo 2, e o inversor é acionado.

No modo 2, cada célula recebe do DSP central, na sua interrupção associada, um pacote de dados com o endereço da célula a que o pacote se

destina, os comparadores Comp_1 e Comp_2 para as chaves s_1 e s_3 do inversor (lembrando que s_2 e s_4 são complementares a, respectivamente, s_1 e s_3), o sinal de sincronismo das portadoras e o CRC. Quando do recebimento de um pacote, primeiramente a célula verifica os *bytes* de endereço e de CRC. Se ambos estiverem corretos, as portadoras do retificador (12kHz) e do inversor (2kHz) são sincronizadas ao DSP central.

Por fim, quando do término do ensaio, o DSP central envia às células um pacote com o Modo 3, e tanto o inversor quanto o retificador são inibidos. Assim como o DSP central, todos os DSPs locais entram em modo de espera, até que a RPI envie informações para um novo ensaio.

2.4 Controle do Barramento CC das células

O controle da tensão do barramento CC, v_{cc} , é realizado pelo controlador local, com frequência de amostragem de 12kHz. O diagrama de blocos do controle é mostrado na Fig. 6. Um sinal proporcional ao quadrado de v_{cc} passa por um filtro *notch* discreto, sintonizado para rejeitar frequências em torno de 120Hz. A malha externa de tensão é composta por um controlador PI com *anti-windup*, resultando na ação de controle u_{pi} . A tensão da rede no secundário do transformador, v_g , é medida e o sinal de sincronismo é obtido a partir de dois filtros passa-baixa discretos de segunda ordem. A saída dos filtros é então normalizada, resultando em v_{gf} (de Camargo, 2006). A referência de corrente i_{ref} é obtida como a multiplicação de u_{pi} e v_{gf} .

A malha interna de corrente foi implementada com um controlador do tipo proporcional, que transforma o erro de corrente e_{i_g} na ação total de controle u . Esta última passa por um modulador, onde é escalonada a fim de assumir valores entre 0 e TPER (valor máximo da portadora do DSP), resultando nos comparadores Comp_{sr_1} e Comp_{sr_2} para os interruptores sr_1 e sr_3 do retificador (sr_2 e sr_4 são complementares a, respectivamente, sr_1 e sr_3).

3 Resultados Experimentais

Esta Seção traz resultados experimentais, visando demonstrar a operação do gerador de afundamentos de tensão proposto. A Fig. 7 mostra o conversor, com as nove células de potência e a unidade central, quem contém a IHM e o DSP central. Na Figura 8, podem ser vistas novamente as células, e o transformador de entrada com múltiplos secundários.

São apresentados aqui ensaios emulando alguns dos principais tipos de faltas que podem ocorrer em sistemas elétricos de potência. Um equipamento sob teste foi conectado à saída do conversor multinível, por meio de um filtro LC,

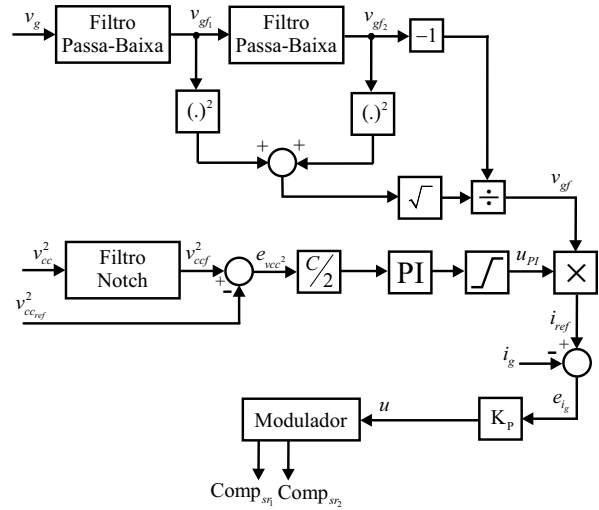


Figura 6: Diagrama de blocos do controle do barramento CC das células de potência.

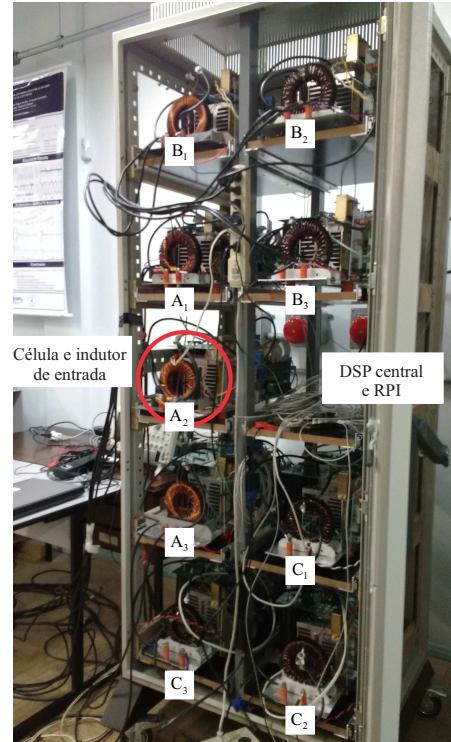


Figura 7: Protótipo experimental, com as nove células de potência e a unidade central.

com $L = 0,9\text{mH}$ e $C = 15\mu\text{F}$. Os barramentos CC das células foram regulados em 100V. O índice de modulação m nos intervalos de pré e pós falta foi igual a 0,9. As amplitudes das tensões de fase durante as faltas são calculadas de acordo com (Gabe, 2012). O tempo de pré-carga dos barramentos CC foi definido como 5s. Após esse intervalo, o DSP aciona os inversores das células, caso todas estejam com seus barramentos CC regulados na tensão desejada, e o ensaio começa a ser executado. Para estes resultados, o ensaio teve duração total de 3s e, na metade deste tempo, a

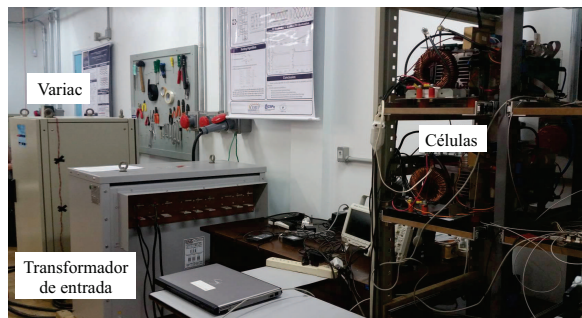


Figura 8: Protótipo experimental, mostrando as células e o transformador de entrada.

falta na rede foi emulada, durando 1,5s.

A Fig. 9 mostra as três correntes no primário do transformador e a tensão do barramento CC de uma das células da fase *a*, durante a execução de um ensaio completo (pré-carga dos barramentos CC, ensaio e emulação da falta) para uma falta Tipo B (1ϕ fase-terra). Pode-se ver claramente o pouco impacto que o conversor exerce sobre a rede, pois durante os transitórios de entrada de carga (quando o inversor é acionado após o período de pré-carga dos barramentos CC) e de início e fim de falta (durante a execução do ensaio), as correntes não excedem seus valores nominais, bem como os transitórios são limitados. Além disso, pode-se ver o bom desempenho do controle do barramento CC, que atua rapidamente para regular a tensão durante os eventos transitórios. As Figs. 10 e 11 mostram, respectivamente, as tensões de fase na saída do conversor multinível e no equipamento sob teste, mostrando as transições de início e fim da falta. Ainda, as Figs. 12, 13 e 14 mostram as mesmas formas de onda para uma falta Tipo C (2ϕ fase-fase). Nas Figs. 11 e 14, pode-se ver que as tensões no equipamento sob teste são praticamente senoidais.

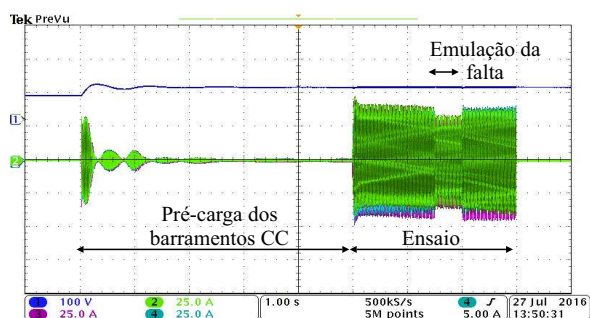


Figura 9: Correntes trifásicas no primário do transformador e tensão do barramento CC de uma célula para falta Tipo B (1ϕ fase-terra), mostrando o ensaio completo.

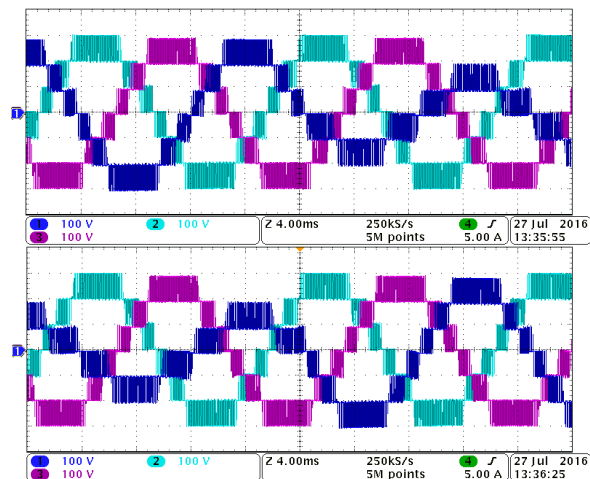


Figura 10: Tensões de fase multinível na saída do conversor, mostrando os transitórios de início e fim da falta, para falta Tipo B (1ϕ fase-terra).

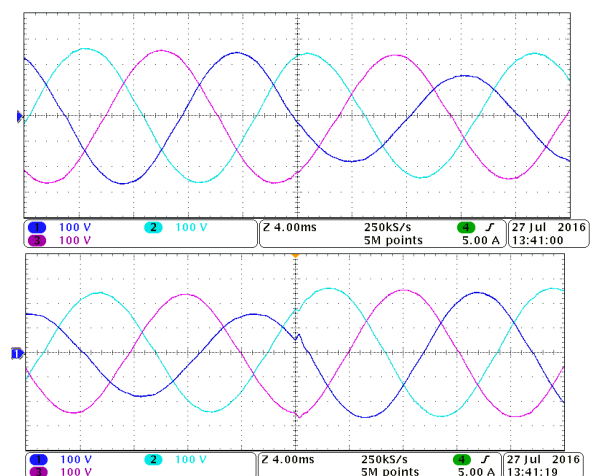


Figura 11: Tensões de fase no equipamento sob teste, mostrando os transitórios de início e fim da falta, para falta Tipo B (1ϕ fase-terra).

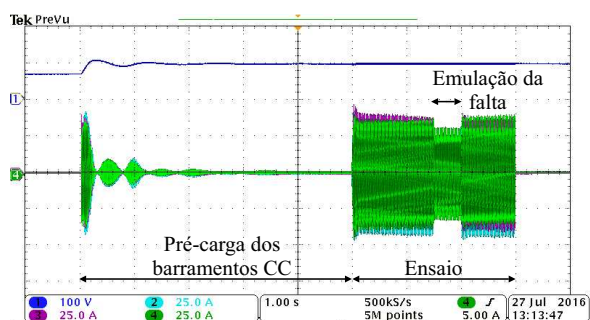


Figura 12: Correntes trifásicas no primário do transformador e tensão do barramento CC de uma célula para falta Tipo C (2ϕ fase-fase), mostrando o ensaio completo.

4 Conclusões

Este artigo apresentou a implementação de um conversor multinível em cascata simétrico para

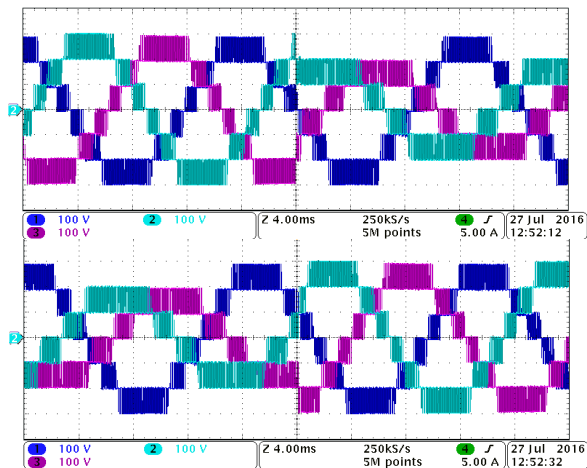


Fig. 13: Tensões de fase multinível na saída do conversor, mostrando os transitórios de início e fim da falta, para falta Tipo C (2ϕ fase-fase).

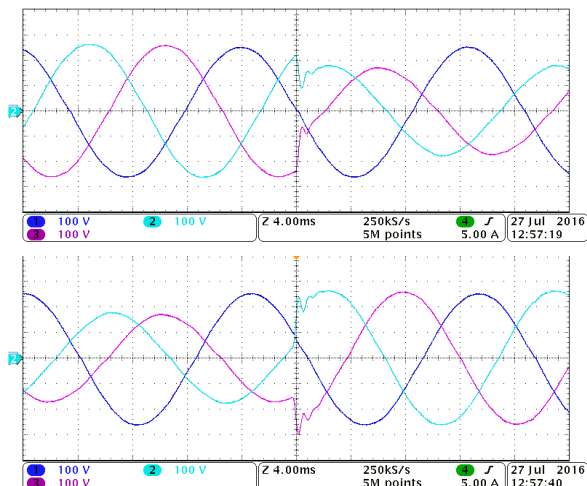


Fig. 14: Tensões de fase no equipamento sob teste, mostrando os transitórios de início e fim da falta, para falta Tipo C (2ϕ fase-fase).

testes de suportabilidade a afundamentos de tensão em turbinas eólicas conectadas à rede elétrica. O conversor pode emular as principais faltas que ocorrem em sistemas de potência, sem impacto significativo na rede, como mostrado nos resultados experimentais. O sistema proposto é formado por uma interface homem-máquina, uma unidade central e controladores locais em cada célula. As células são compostas de um conversor em ponte completa *back-to-back* monofásico, circuitos de aquisição e condicionamento de sinais e um *Digital Signal Processor* (DSP) que controla a tensão do barramento CC por meio do retificador e implementa a modulação do inversor. O controlador central é um DSP que sincroniza todas as células e gera as referências de tensão para os inversores, de acordo com as infor-

mações do ensaio passadas pela IHM, composta por uma *Raspberry Pi* e um monitor. Protocolos de comunicação foram implementados para cada subunidade do sistema. Resultados experimentais foram apresentados, mostrando o bom funcionamento do conversor e sistema de controle implementados, com impacto mínimo tanto sobre a rede como sobre o equipamento sob teste.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Maria - UFSM e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

Referências

- Carnielutti, F., Pinheiro, H. and Rech, C. (2012). Generalized carrier-based modulation strategy for cascaded multilevel converters operating under fault conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **59**(2): 679–689.
- de Camargo, R. F. (2006). *Método de Sincronização Aplicado a Conversores PWM Trifásicos*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria.
- Energinet (2010). Energinet denmark - technical regulation 3.2.5 for wind power plants with a power output greater than 11kw, www.energinet.dk.
- Gabe, I. J. (2012). *Análise e Controle de Aerogeradores com Conversor Pleno Durante Afundamentos de Tensão*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill.
- M. Altin, Ö Göksu, R. T. P. R. B. B. J. L. H. (2010). Overview of recent grid codes for wind power integration, *12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, pp. 1152–1160.
- Miguel García-Gracia, M. Paz Comech, J. S. D. L.-A. O. A. (2009). Voltage dip generator for wind energy systems up to 5mw, *Applied Energy* **86**(4): 565–574.
- National Grid U.K. (2014). The grid code 2014, www.nationalgrid.com.
- ONS (2009). Operador nacional do sistema - procedimentos de rede 2009, www.ons.org.br.
- VDEW (2007). Networks and system rules of the german transmission system operators, vdn-e.v. beim vdw - transmission code 2007, www.vdn-berlin.de.