

ESTRATÉGIA DE CONTROLE E INICIALIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE

RODRIGO OLIVEIRA*, IVO BARBI†, TELLES LAZZARIN†, RAFAEL ECKSTEIN†, LUCAS BÚRIGO†

* *CEFET-MG Campus Timóteo*
Rua Dezenove de Novembro, n. 121, Centro-Norte
Timóteo, Minas Gerais, Brasil

† *UFSC - Campus Reitor João David Ferreira Lima*
Rua Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

Emails: rgaiba@timoteo.cefetmg.br, ivobarbi@gmail.com, tellesbl@gmail.com,
eckstein.rafael@gmail.com, lrochaburigo@gmail.com

Abstract— This paper proposes a startup and operating procedure of a power converter for a small-scale wind turbine application, in a grid connected system. In this generation system, a permanent magnet synchronous generator is driven by a three-phase induction machine, in laboratory, like a horizontal axis small-scale wind turbine, and controlled by a very simple, cheap and robust power converter. This structure requires some care during the initialization process and some protections to avoid undesired transients. The main goal is the operating process design to reduce the stresses on the electrical and mechanical parts. The proposed control strategy was tested in a 1kW wind turbine and experimental results are given to illustrate the performance.

Keywords— Control strategy, Power converter, Small-scale wind turbine.

Resumo— Este trabalho apresenta os procedimentos de inicialização e operação de um conversor estático de potência, desenvolvido para aplicações em turbinas eólicas de pequeno porte, conectadas à rede elétrica. No sistema de geração estudado, uma máquina síncrona trifásica a ímãs permanentes é acionada por uma máquina de indução trifásica, em laboratório, nos mesmos moldes de uma turbina eólica de pequeno porte. A potência ativa produzida pelo sistema de geração eólico é controlada pelo conversor de potência implementado, que possui três características marcantes, resumidas em: simplicidade de projeto, baixo custo de fabricação e robustez, reduzindo significativamente a necessidade de manutenção. O principal objetivo deste trabalho é a definição das rotinas de inicialização e operação, para reduzir estresses nas partes elétricas e mecânicas do sistema. A estratégia de controle proposta foi testada em uma bancada experimental de 1kW, onde resultados experimentais são apresentados para ilustrar e validar o desempenho do sistema de geração.

Palavras-chave— Conversor de potência, Estratégia de controle, Turbina eólica de pequeno porte.

1 Introdução

Nos últimos anos e em todo o mundo, a energia eólica esteve sempre em destaque dentre as fontes alternativas de energias renováveis, devido principalmente ao enorme potencial disponível para produção de energia elétrica (Nguyen and Lee, 2012).

No Brasil, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), conforme descrito no Decreto nº 5.025 de 2004, foi instituído com o objetivo de aumentar a participação de empreendimentos concebidos com base em fonte eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN). Além disto, o intuito dessas ações foi no sentido de promover a diversificação da Matriz Energética Brasileira, buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais.

Outro grande incentivo dado, com objetivo aumentar a utilização da energia eólica produzida em pequenas instalações, foi obtido com a aprovação, no dia 17 de abril de 2012, da Resolução Normativa nº 482, pela a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece as con-

dições mínimas para o acesso aos sistemas de distribuição de energia elétrica (Aneel, 2012). Neste cenário favorável, desde a criação do PROINFA e, posteriormente, com os sucessivos leilões de compra e venda, a energia eólica vem aumentando a sua participação na Matriz Energética Brasileira.

As turbinas eólicas comerciais se dividem basicamente em dois grupos, sendo turbinas eólicas de grande ou pequeno porte (Carranza et al., 2011). No Brasil, devido a fatores como tecnologia eminentemente importada, número reduzido de fabricantes, custo elevado e falta de mão de obra nacional, existem pouquíssimas instalações que utilizam a energia eólica em aplicações de pequeno porte. É importante ressaltar que o elevado custo do conversor de potência está inviabilizando a utilização de sistemas eólicos de pequeno porte em larga escala (Eckstein et al., 2014).

Diante disto, este trabalho apresenta uma proposta de projeto de um conversor de potência, tendo como premissas básicas a simplicidade do projeto, robustez e baixo custo, permitindo com isso, contribuir para diminuir o atraso científico, tecnológico e comercial na questão de fontes alternativas de pequeno porte.

2 Descrição do Sistema

Em sistemas eólicos de pequeno porte, a grande maioria das aplicações utilizam uma máquina síncrona a ímãs permanentes (PMSG), para converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica. De acordo com Kortabarria et al. (2010), existem três principais configurações de conversores de potência comumente empregados no processamento da energia elétrica. A primeira, apresentada na Figura 1, utiliza apenas um retificador passivo e um inversor, agregando simplicidade e baixo custo, porém, penalizando a eficiência do sistema de geração, uma vez que não é realizado o rastreamento do ponto de máxima potência.

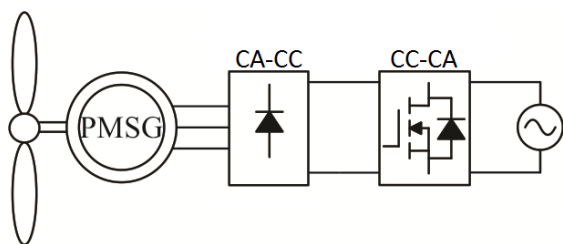


Figura 1: Topologia com retificador passivo conectado a um inversor.

A segunda configuração mais empregada utiliza um retificador passivo, um conversor CC-CC, para obtenção do rastreamento do ponto de máxima potência e controle da tensão do barramento CC, e também um inversor para conexão com a rede, conforme apresentado na Figura 2. Esta solução é uma alternativa intermediária, no que diz respeito aos custos e complexidade de controle, e tem como desvantagem a necessidade de um banco de capacitor adicional, em comparação com a primeira opção (Stabile et al., 2010).

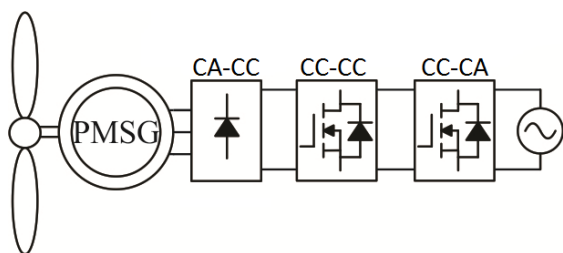


Figura 2: Topologia com retificador passivo, conversor CC-CC e um inversor.

A configuração mais complexa e que também possui maior custo, devido ao elevado número de dispositivos semicondutores ativos empregados, é apresentada na Figura 3. A grande vantagem desta configuração, conhecida como *back-to-back*, é a baixa distorção harmônica da corrente injetada na rede, assim como a possibilidade de total controle das variáveis do sistema de geração, uma vez que possibilita um fluxo de potência bidirecional.

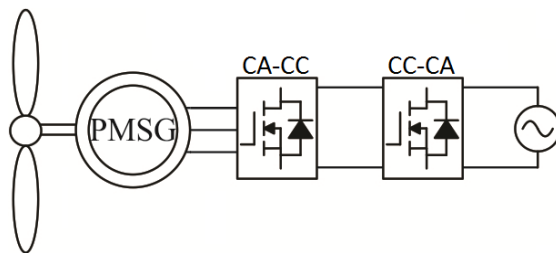


Figura 3: Topologia com conversor reversível.

Devido aos custos elevados, a topologia com conversor reversível é mais empregada em sistemas eólicos de grande porte (Kortabarria et al., 2010).

2.1 Sistema proposto

No que diz respeito ao estágio de processamento de energia, do sistema de geração eólico de pequeno porte, é proposto neste trabalho uma solução que possa ser implementada de maneira simples, que possua um número reduzido de interruptores que operem com chaveamento em alta frequência, possibilitando com isso o desenvolvimento de um conversor com um custo menor e menos suscetível a falhas. Desta forma, é apresentado na Figura 4 a proposta desenvolvida neste trabalho, sendo que nesta configuração foi utilizado um retificador passivo na configuração como ponte de Graetz, um conversor *Buck* e um inversor *Push-pull* com entrada em corrente.

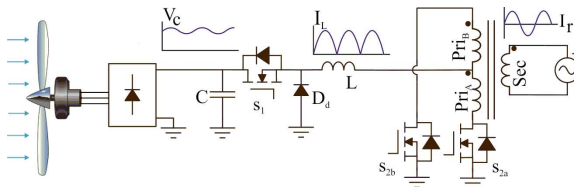


Figura 4: Topologia proposta do conversor.

A retificação da tensão alternada produzida pela máquina síncrona a ímãs permanentes, que equipada o sistema de geração de pequeno porte, é realizada através de uma ponte com seis diodos, sendo a escolha deste componente realizada em função da robustez que é agregada ao sistema de geração (Stabile et al., 2010).

O conversor *Buck* implementado tem, basicamente, duas funções no sistema proposto, sendo: (i) controlar a tensão do barramento CC e, com isso, permitir o rastreamento para a operação no ponto de máxima potência (MPPT); (ii) produzir uma corrente com formato senoidal retificado para injeção no inversor *Push-pull*.

A injeção de corrente alternada na rede elétrica, com formato senoidal, é realizada através do inversor *Push-pull*, que opera com entrada em corrente e está sincronizado com a mesma. Adicionalmente, é obtido o isolamento galvânico entre a

rede elétrica e a saída do conversor *Buck*. As principais vantagens da utilização desta topologia de inversor são: (i) baixa frequência de chaveamento e, conseqüentemente, baixas perdas de comutação nos dispositivos semicondutores; (ii) operação simplificada em malha aberta, onde, em cada semiciclo, apenas um semicondutor é acionado por vez, dependendo apenas do semiciclo da tensão da rede elétrica.

2.2 Princípio de operação

A análise dos estágios topológicos de funcionamento do conversor proposto é descrita em função dos semiciclos positivo e negativo da rede elétrica. Durante os dois semiciclos da rede o conversor *Buck* opera em modo contínuo de condução, com chaveamento na frequência de 24kHz. O inversor *Push-pull* também opera em modo de condução contínuo, porém, com comutação na frequência da rede (60Hz). Desta forma, tem-se dois estados topológicos para cada semiciclo da rede. As Figuras 5(a) e 5(b) ilustram o fluxo de corrente para o semiciclo positivo da tensão da rede, onde se observa a fase de armazenamento de energia no indutor (S_1 fechado) e a fase de entrega da energia armazenada no indutor (S_1 aberto), respectivamente. As Figuras 5(c) e 5(d) também representam os estágios de armazenamento e entrega de energia do indutor, porém no semiciclo negativo da tensão.

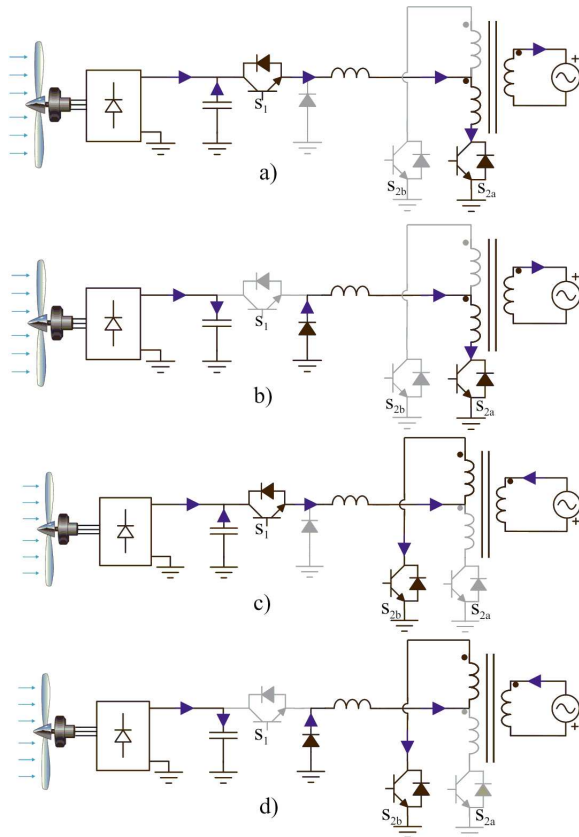


Figura 5: Estágios topológicos de operação.

Neste momento, é importante ressaltar que a grande vantagem de se utilizar o conversor *Buck* é devida ao fato de que quando a chave S_1 está aberta, tem-se o isolamento entre o barramento CC e o inversor *Push-pull*, o que agrega uma extrema facilidade de controle do sistema de geração. Adicionalmente, pode-se citar a necessidade de apenas um banco de capacitor em todo o sistema de geração.

3 Estratégia de controle

Outra grande vantagem do conversor de potência desenvolvido neste trabalho está relacionada com a estratégia de controle necessária para o correto funcionamento do sistema de geração, onde se fez necessário apenas duas malhas de controle em cascata e, conseqüentemente, são necessárias apenas duas medições de grandezas elétricas, para operação em malha fechada (Orlando et al., 2013).

A malha interna é implementada através do controle de corrente no indutor (I_L) e a malha externa é responsável pelo controle da tensão do barramento CC (V_c), sendo que para cada uma das malhas foi utilizado um controlador proporcional-integral (PI). A Figura 6 apresenta as malhas de controle implementadas na estratégia adotada.

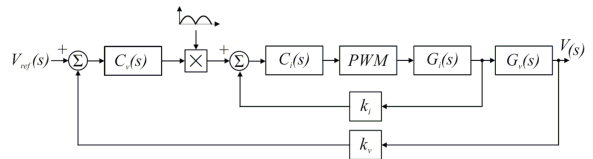


Figura 6: Estratégia de controle.

onde $C_v(s)$ é o controlador de tensão do barramento CC, $C_i(s)$ é o controlador de corrente do indutor, PWM é o ganho do modulador, $G_i(s)$ é o modelo da planta de corrente, $G_v(s)$ é o modelo da planta de tensão, k_i é o ganho do sensor de corrente e k_v é o ganho do sensor de tensão.

As plantas da malha de corrente do indutor e malha de tensão do barramento CC foram modeladas conforme apresenta a Equação 1 e a Equação 2, respectivamente.

$$G_i(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (1)$$

$$G_v(s) = \frac{1}{Cs} \quad (2)$$

onde L e R são valores de indutância e resistência interna do indutor, respectivamente, e C é o valor da capacitância do barramento CC.

A sintonia dos controladores foi realizada através da obtenção das funções de transferência em malha fechada da planta de corrente e tensão, empregando a metodologia de alocação de polos. Destaca-se ainda a necessidade de um bloco de multiplicação da saída do controlador de tensão

por uma senóide retificada, para que a corrente no indutor e, consequentemente, a corrente injetada na rede pelo inversor tenha formato senoidal. A estratégia de controle foi implementada em um processador digital de sinais, DSP-f28335, da fabricante *Texas Instruments*.

4 Sistema de Proteção

Com o objetivo de garantir operação segura do sistema de geração, mesmo em condições de velocidade de vento acima da velocidade nominal de projeto, foi desenvolvido um circuito de proteção do barramento CC. Essa proteção atua de maneira independente das demais partes do sistema de geração, sendo que o valor de tensão do barramento CC é monitorado a cada instante e a proteção é acionada em estágios, garantindo que a tensão do barramento CC não ultrapasse o valor máximo definido neste projeto (110V).

A proteção do barramento CC consiste, basicamente, de chaves estáticas e resistores conectados em série, totalizando cinco possíveis estágios de operação. A lógica de acionamento de cada estágio é definida por um circuito de comando com histerese, onde são definidos os valores mínimos e máximos de tensão suportados, permitindo que cada estágio possa, de forma individual, sair ou entrar em condução, respectivamente. Os valores mínimos e máximos das bandas de histerese, definidos inicialmente para cada estágio, são comparados com a medição da tensão do barramento CC, que é utilizada como referência para acionamento de cada um dos estágios de operação.

5 Resultados Experimentais

A Figura 7 apresenta o *hardware* desenvolvido durante esse trabalho de pesquisa, para obtenção dos resultados experimentais, onde estão concentrados o conversor de potência, o sistema de proteção e o controlador digital DSP.

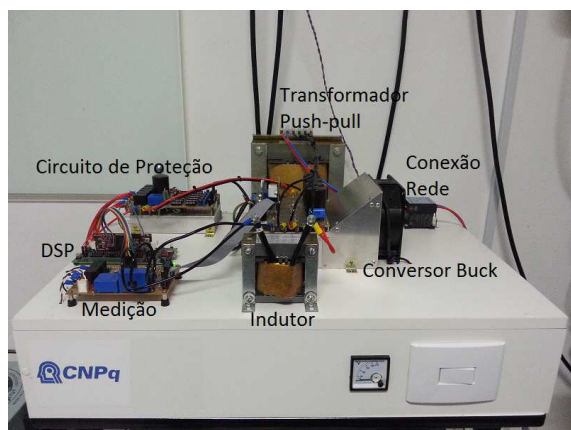


Figura 7: *Hardware* desenvolvido para obtenção dos resultados experimentais.

Importante ressaltar que foi desenvolvido uma placa de condicionamento de sinais, para adequação das grandezas controladas aos níveis de entrada do conversor A/D do DSP. Além das medições de corrente do indutor e tensão do barramento CC, também foi realizada a medição da tensão da rede, para implementação de um circuito *Phase-Locked Loop* (PLL) monofásico, para possibilitar a sincronização com a rede e utilizar como referência para orientação da estratégia de controle (Sun et al., 2010). Os principais parâmetros da bancada são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados da bancada experimental.

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência nominal	1	kW
Tensão Primário	33	V
Tensão Secundário	220	V
Indutor	480	uH
Resistência série	10	mΩ
Banco de capacitores	4500	uF
Banco de resistores	1500	W

Inicialmente, foi analisada a malha de controle de corrente do indutor, onde foram realizados vários ensaios para verificar o comportamento transitório e em regime permanente desta malha de controle. A Figura 8 apresenta, no CH1, a corrente medida no indutor durante uma variação em rampa na referência de controle. Pode-se observar que o valor da corrente no indutor varia de zero até o valor máximo, aproximadamente 17A de pico, em uma rampa com duração de seis segundos. No CH2 pode ser visualizado o impacto na tensão do barramento CC, onde se observa uma pequena redução da tensão, à medida em que se aumenta o valor de corrente drenada do barramento CC. Adicionalmente, a corrente injetada na rede é mostrada no CH3, nos mesmos moldes da corrente do indutor, com variação em rampa de zero até o valor nominal.

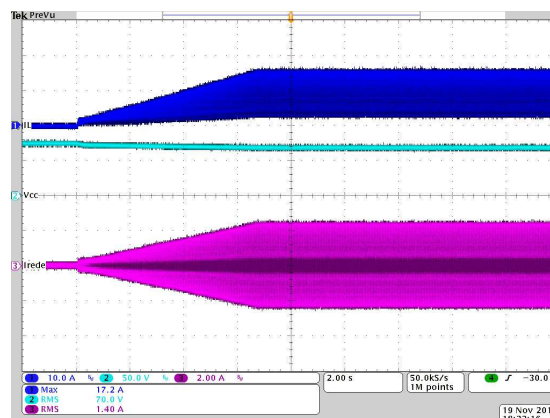


Figura 8: Transitório de corrente do indutor. CH1: Corrente I_L (10A/div) - CH2: Tensão V_c (50V/div) - CH3: Corrente da rede (2A/div).

Para avaliação da malha de controle de tensão do barramento CC foi realizada uma variação em rampa, com amplitude de 10V e duração de seis segundos, como apresentado na Figura 9. A tensão do barramento CC estava sendo mantida controlada em 62V e após a variação na referência de tensão do barramento CC, a mesma se manteve constante em 72V, conforme apresentado no CH4. A corrente injetada na rede e a corrente controlada do indutor são apresentadas no CH1 e CH2, respectivamente, onde se observa uma significativa diminuição nos seus valores, proporcionando menor despacho de energia, devido à necessidade do aumento de tensão no barramento CC.

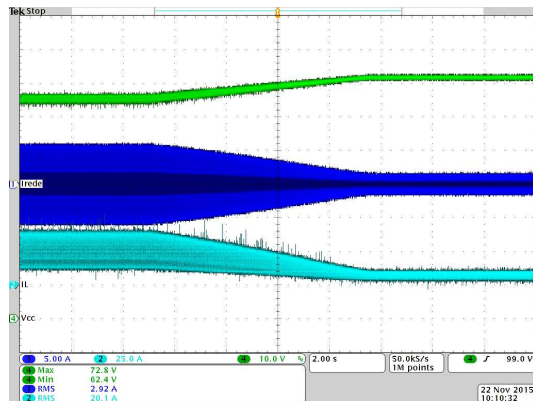


Figura 9: Transitório de carga do barramento CC. CH1: Corrente da rede (5A/div) - CH2: Corrente I_L (25A/div) - CH4: Tensão V_c (10V/div).

O processo de controle da tensão do barramento CC é finalizado com a redução da referência da tensão, sendo o valor inicial de 72V e o valor final de 62V, conforme apresentado na Figura 10. Observa-se, neste caso, que as correntes medidas, no CH1 e CH2, aumentam o seu valor, injetando cada vez mais potência na rede e, consequentemente, descarregando o barramento CC.

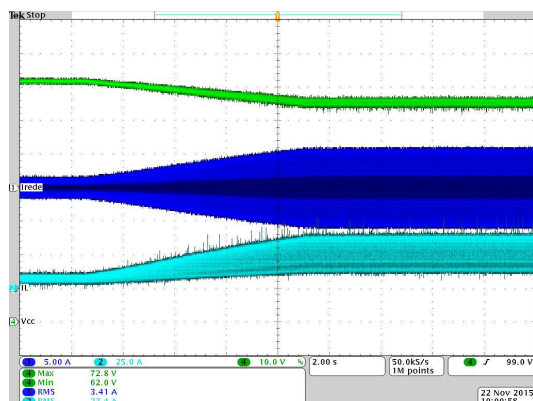


Figura 10: Transitório de descarga do barramento CC. CH1: Corrente da rede (5A/div) - CH2: Corrente I_L (25A/div) - CH4: Tensão V_c (10V/div).

Uma das contribuições de trabalho está voltada para a implementação de uma estratégia de

inicialização, que possa acontecer de maneira segura e suave, evitando estresses nas partes mecânicas e elétricas. Desta forma, o processo de inicialização foi sequenciado e configurado para que cada etapa possa acontecer em ordem cronológica, sendo: (i) aceleração da turbina eólica, (ii) carregamento do barramento CC, (iii) conexão com a rede elétrica e (iv) habilitação das malhas de controle. A Figura 11 ilustra os dois primeiros passos do processo, onde pode-se observar claramente a variação da tensão do barramento CC no CH4, em função do aumento de velocidade da turbina eólica apresentado no CH3. As correntes da rede e no indutor, apresentadas no CH1 e CH2, são iguais zero, uma vez que o sistema de geração se encontra desconectado da rede.

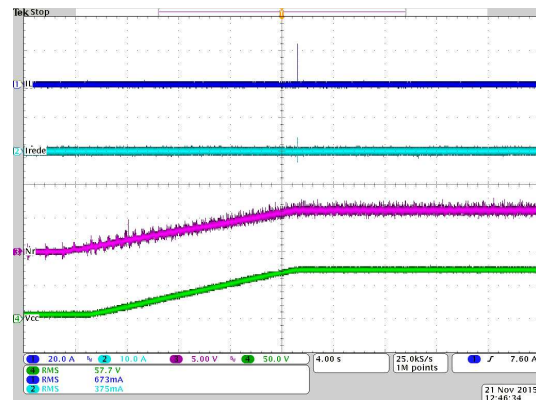


Figura 11: Carga do barramento CC sem conexão com a rede. CH1: Corrente I_L (20A/div) - CH2: Corrente da rede (10A/div) - CH3: Velocidade N_t (500rpm/div) - CH4: Tensão V_c (50V/div).

Se a velocidade do gerador continuar a aumentar e a tensão do barramento CC atingir níveis que podem danificar a conversor, o circuito de proteção é acionado, conforme apresenta a Figura 12.

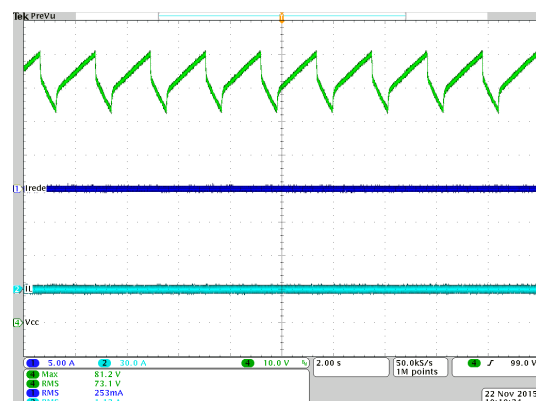


Figura 12: Acionamento da proteção do barramento CC sem conexão com a rede. CH1: Corrente da rede (5A/div) - CH2: Corrente I_L (30A/div) - CH4: Tensão V_c (10V/div).

Importante ressaltar que neste momento o sistema de geração estava desabilitado para conexão

com a rede, permitindo com isso uma análise do processo de aceleração da turbina e carga do barramento CC, assim como, do acionamento do circuito de proteção contra sobretensões.

O processo de conexão com a rede foi projetado para acontecer de maneira suave, evitando-se transit rios indesejados de corrente. Assim, uma vez que a turbina eólica é posicionada no vento, a aceleração do gerador e o carregamento do barramento CC acontecem imediatamente, como apresentado, no CH3 e CH4 da Figura 13, respectivamente. Com isso, caso os parâmetros da rede elétrica estejam dentro dos limites determinado na norma de acesso ao sistema de distribuição, o sistema recebe o comando de habilitar conexão com a rede elétrica. Neste momento, o circuito PLL identifica o ângulo de tensão da rede elétrica e com o comando de habilitação, a conexão com a rede acontece com o fechamento do contator principal. Em seguida, as malhas de controle de tensão e corrente são habilitadas e o controle da corrente do indutor é iniciado, assim como, é iniciada a injeção de corrente na rede elétrica, conforme apresentado no CH1 e CH2 da Figura 13, respectivamente.

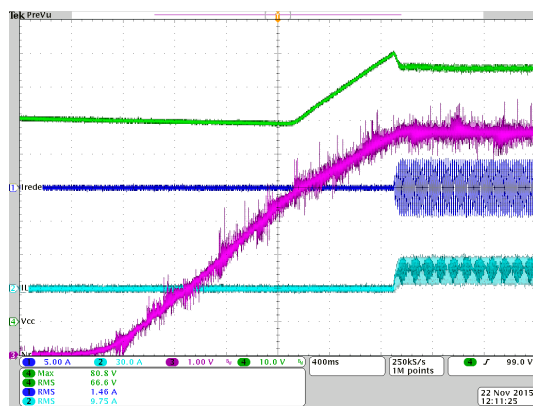


Figura 13: Instante de conexão do sistema na rede. CH1: Corrente da rede (5A/div) - CH2: Corrente I_L (30A/div) - CH3: Velocidade N_r (100rpm/div) - CH4: Tensão V_c (10V/div).

6 Conclusões

Este trabalho apresentou uma proposta de projeto, controle e inicialização de um conversor de potência, para aplicação em sistemas eólicos de pequeno porte. A grande vantagem desta topologia é o reduzido número de componentes de eletr nica, onde se tem apenas uma chave pulsando em alta frequência, o que reduz a possibilidade de falhas, os custos e permite ainda a utilização de uma estratégia de controle simples.

Os resultados experimentais apresentados ilustraram o correto funcionamento das malhas de controle, permitindo o fornecimento de energia elétrica com simplicidade e segurança. Destaca-se o processo de inicialização implementado, que

permitiu início suave de fornecimento de potência ativa para a rede elétrica, evitando-se estresses nas partes elétricas e mecânica do sistema.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao CNPq pelo suporte financeiro concedido para realização do trabalho (processo: 150423/2015-2).

Referências

- Aneel (2012). *Resolução Normativa n. 482*, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf.
- Carranza, O., Figueres, E., Garcer , G., Ortega, R. and Velasco, D. (2011). Low power wind generation system based on variable speed permanent magnet synchronous generators, *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, IEEE, pp. 1063–1068.
- Eckstein, R.H., Lazzarin, T. B. and Barbi, I. (2014). Proposed power and control system for small scale wind turbines connected to the grid, *3rd Ren. Power Gen. Conf.*, pp. 1–6.
- Kortabarria, I., Ibarra, E., de Alegr , I. M., Andreu, J. and Ascarza, A. (2010). Power converters used in grid connected small wind turbines: Analysis of alternatives, *5th IET Inter. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives*, IET, pp. 1–6.
- Nguyen, T. H. and Lee, D.-C. (2012). A novel current control scheme of grid converters for small PMSG wind turbines under grid voltage distortion, *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, IEEE, pp. 1–6.
- Orlando, N. A., Liserre, M., Mastromauro, R. A. and Dell'Aquila, A. (2013). A survey of control issues in PMSG-based small Wind-Turbine systems, *IEEE Trans. on Industrial Informatics* 9(3): 1211–1221.
- Stabile, A., Cardoso, A. J. M. and Boccaletti, C. (2010). Efficiency analysis of power converters for urban wind turbine applications, *Inter. Conf. on Sustainable Energy Technologies*, IEEE, pp. 1–6.
- Sun, X., Zhang, Q., Ren, B. and Zhong, Y. (2010). A novel digital phase-locked loop for distributed grid-connected power generation systems under unbalanced and distorted utility conditions, *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, IEEE, pp. 813–817.