

Aplicação de Algoritmos PLL Digital para Obtenção de Sinais de Referência em Retificadores Trifásicos PWM: Resultados de Simulação⁽¹⁾

Flabio Alberto Bardemaker Batista⁽²⁾; Alexsandro Gehlen⁽³⁾; Carlos Henrique Illa Font⁽⁴⁾.

Resumo Expandido

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos do Campus Florianópolis para o Edital Universal de Pesquisa nº 12/2013/PRPPGI da PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO.

⁽²⁾ Professor; INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA; Florianópolis, Santa Catarina; flabio@ifsc.edu.br.

⁽³⁾ Estudante; INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA;

⁽⁴⁾ Professor; UNIVERSIDADE FEDERAL TECNOLÓGICA DO PARANÁ; Ponta Grossa, Paraná.

RESUMO: Para a utilização de retificadores PWM (Pulse Width Modulation) trifásicos com elevado fator de potência em sistemas com geradores eólicos de frequência variável são empregadas técnicas de geração de sinais de referência sincronizados com as tensões de entrada. Os algoritmos PLL (Phase Locked Loop) possibilitam a obtenção de sinais sem distorções, que acompanham as variações de frequência da rede de alimentação. Neste trabalho, propõe-se o estudo de algoritmos PLL digital para obtenção de sinais de referência em retificadores trifásicos PWM visando sua implementação via processadores de sinais digitais (DSPs). Estes algoritmos são testados através da simulação digital de um retificador PWM conectado ao sistema que representa o modelo de um aerogerador comercial onde serão simuladas condições de variação da velocidade de giro do eixo do alternador. Com isto, pretende-se o que o sistema de controle do retificador faça que sejam drenadas correntes senoidais em fase com as tensões do alternador. Os resultados de simulação permitem que se verifique a integração das diferentes partes do sistema e que sejam comprovadas as características de elevado fator de potência, baixa taxa de distorção harmônica das correntes de entrada.

Palavra Chave: Métodos de Sincronismo; Conversores CA-CC; Qualidade de Energia.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de circuitos retificadores trifásicos com elevado fator de potência tem merecido grande atenção por parte de engenheiros e pesquisadores da área de eletrônica de potência (BATISTA, 2010; BATISTA, 2012; FRIEDLI, 2011).

Nestes estudos procura-se a melhoria de desempenho em características como: fator de potência, rendimento, densidade de potência, regulação da tensão de saída, esforços de tensão e corrente nos semicondutores, etc.

No que se refere ao fator de potência (FP), os retificadores convencionais apresentam distorções nas correntes drenadas da rede e um reduzido fator de potência.

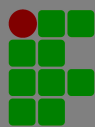
Por outro lado, nos retificadores com elevado fator de potência (PFC) que utilizam a modulação por largura de pulso ("Pulse Width Modulation" -

PWM), o comando adequado dos interruptores nos retificadores PWM permite a obtenção de correntes de entrada praticamente senoidais e em fase com as tensões de alimentação e reduzidas taxas de distorção harmônica.

Em sistemas que utilizam aerogeradores, estes retificadores contribuem para o aumento do rendimento do alternador e utiliza-se um menor número de conversores para a adequação da energia a ser armazenada nos bancos de baterias.

Em estudos anteriores de retificadores PWM, verificou-se a necessidade de técnicas mais confiáveis para a obtenção do sinal de referência para os circuitos de controle de retificadores PWM (Almeida, 2012; Batista, 2006).

Os algoritmos PLL (Phase Locked Loop) possibilitam a obtenção de sinais sem distorções, que acompanham as variações de frequência do sinal fornecido pela fonte de alimentação (GOMES, 2007; ORTMANN, 2008; ANANI, 2011).



Neste trabalho, tem-se como objetivo geral o estudo de algoritmos PLL digital para obtenção de sinais de referência em retificadores trifásicos PWM.

Estes algoritmos são testados através da simulação digital de um retificador PWM conectado ao sistema que representa o modelo de um aerogerador comercial onde serão simuladas condições de variação da velocidade do vento e de giro do eixo do alternador.

II. METODOLOGIA

Para o estudo da aplicação de algoritmos PLL digital para obtenção de sinais de referência em retificadores trifásicos PWM e a implementação do protótipo do conversor de potência considera-se as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica sobre retificadores PWM e algoritmos PLL digital;
- Definição de parâmetros e especificações de desempenho para o sistema;
- Projeto e simulação do algoritmo de geração de referência;
- Projeto e simulação do estágio de potência do conversor;
- Definição de esquemático, Elaboração de layout e montagem das (PCIs) ;
- Análise de dispositivos de controle digital
- Estudo de técnicas de controle digital;
- Elaboração de programas de controle do conversor;
- Ensaios do conversor;
- Documentação e redação do resumo e artigo final.

Inicialmente propõe-se o estudo sobre algoritmos PLL digital e uma revisão sobre retificadores PWM e sistemas de geração eólica. Neste estudo serão analisados e propostos algoritmos para a geração de sinais de referência para o sistema de controle de um retificador PWM utilizado em um sistema de geração eólica.

Depois, é realizada a escolha de parâmetros e especificações de desempenho para o sistema. Definidos estes itens, define-se a técnica a ser empregada e parte-se para o projeto e simulação do algoritmo de geração de referência.

Na sequência, será realizada a definição de esquemático, a elaboração de layout e montagem das placas de circuito impresso (PCIs) visando o condicionamento de sinais do sistema de geração de referência e sua integração ao estágio de potência do conversor. Em paralelo é realizada a análise de dispositivos de controle digital.

Em uma próxima etapa, são elaborados de programas para a realização dos algoritmos PLL e de controle do conversor, sendo testadas estas técnicas integradas com o estágio de potência do conversor.

Em uma etapa final, serão realizados ensaios com todo sistema e analisados os parâmetros de desempenho do sistema, bem como a documentação e redação de artigos.

Com estas avaliações poderão ser feitas correções principalmente no que se refere aos critérios de velocidade de resposta do algoritmo PLL, fator de potência e perdas no alternador.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura sistema para implementação do protótipo do retificador PWM com correção de fator de potência é representada pelo diagrama em blocos da Figura 1.

Neste diagrama identifica-se as principais partes componentes do sistema como: o estágio de potência, os circuitos de sensoriamento de tensão e corrente, as fontes auxiliares, os transformadores de sincronismo, os circuitos de comando dos interruptores de potência (drivers) e o controlador de sinais digitais (DSC).

Nesta figura, também observa-se a presença do circuito de condicionamento de sinais, responsável pelo tratamento e distribuição dos sinais das diferentes partes do sistema.

A Figura 2 mostra o estágio de potência do retificador a ser implementado, juntamente com os sistemas de controle e modulação do conversor.

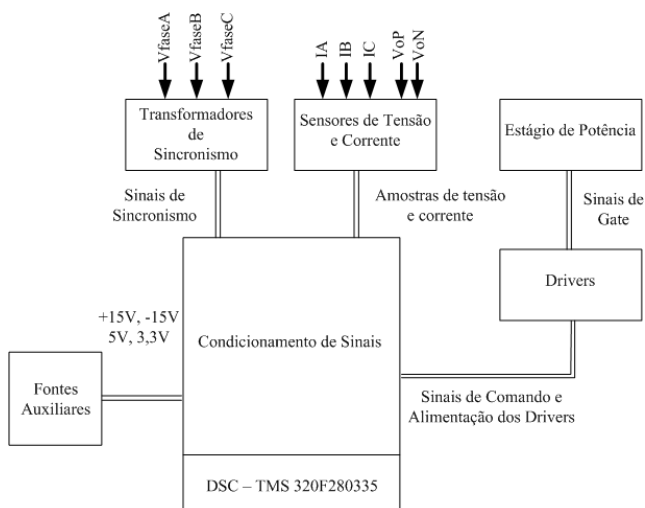


Figura 1 – Diagrama em blocos do retificador PWM.

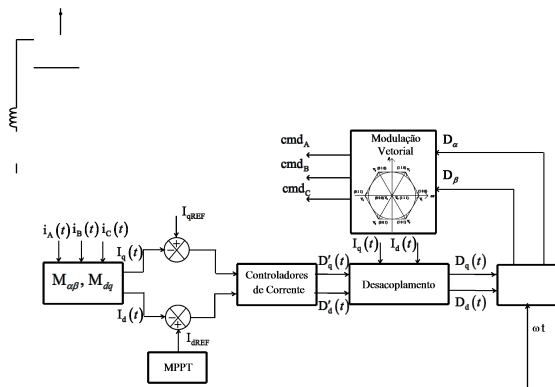


Figura 2 – Estágio de potência do retificador trifásico PWM e sistemas de controle e modulação.

Observa-se na Figura 2 a presença do bloco DPLL que é utilizado para gerar a base de tempo para as funções trigonométricas utilizadas no controle vetorial para a realização das transformações de Park e Clark ($M_{\alpha\beta}$ e M_{dq}), bem como na definição de setores da modulação vetorial (BATISTA, 2006).

Neste sistema, a corrente de referência de eixo direto pode ser imposta, ou definida através de um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência do gerador eólico (TIBOLA, 2009).

Resultados de Simulação

Para a simulação do sistema foi utilizado o software simulador de circuitos para eletrônica de potência e aplicações em energia elétrica PSIM®.

Inicialmente, verificou-se a integração do algoritmo PLL com o retificador unidirecional, sendo a estrutura implementada para o algoritmo PLL e a geração de funções trigonométricas apresentada na Figura 3 (ORTMANN, 2008).

Na Figura 4 e na Figura 5 são apresentados os principais resultados da simulação do estágio de potência do retificador PWM juntamente com o algoritmo PLL.

Observa-se na Figura 4 que o sinal de sincronismo gerado pelo PLL está em fase com o sinal da fase A em aproximadamente sete ciclos.

Verifica-se pelas formas de onda da corrente e da tensão de entrada em uma das fases que a corrente possui formato praticamente senoidal após alguns ciclos da obtenção do sincronismo.

Neste caso, o sistema opera com reduzida taxa de distorção harmônica (0,55 %) e elevado fator de potência (0,9997).

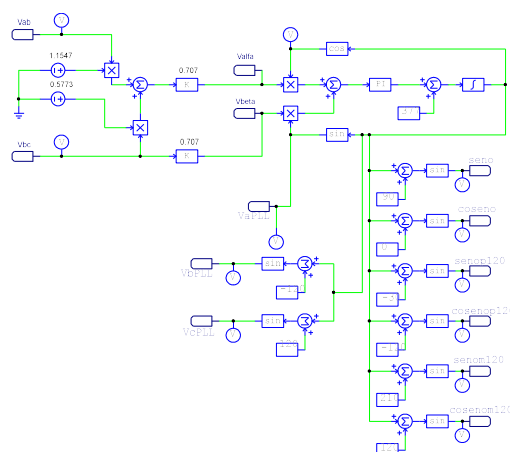


Figura 3 – Estrutura do PLL e funções trigonométricas

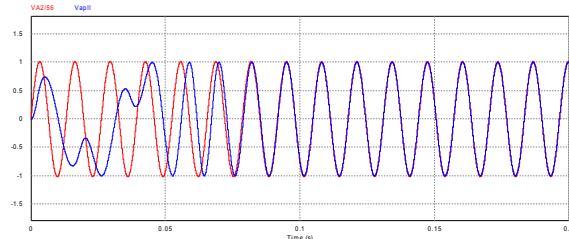


Figura 4 – Tensão da fase A e sinal de sincronismo.

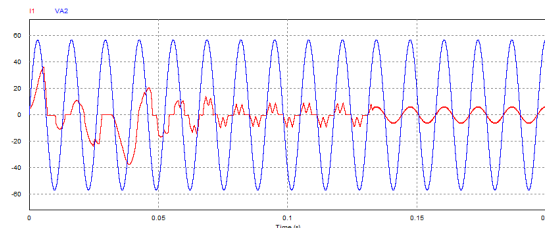


Figura 5 – Tensão e corrente em uma das fases do retificador PWM.

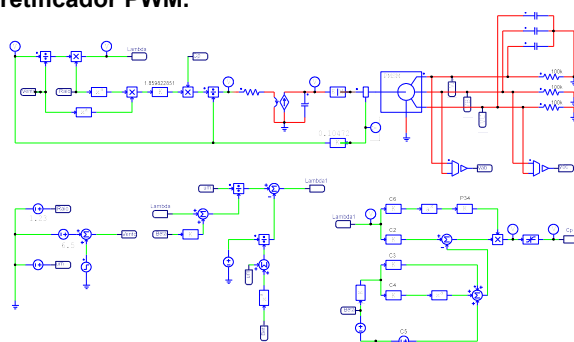


Figura 6– Tensão e corrente em uma das fases do retificador PWM.

A modelagem do gerador eólico a ser utilizado foi baseada no equacionamento apresentado por TIBOLA, 2009, sendo que sua implementação no simulador é mostrada na Figura 6.

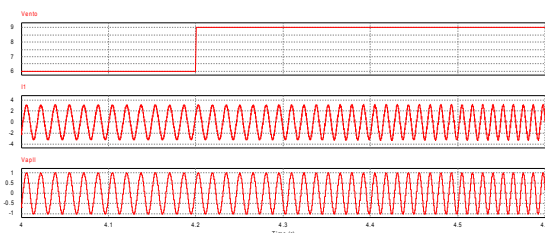


Figura 7 – Tensão e corrente em uma das fases do retificador PWM.

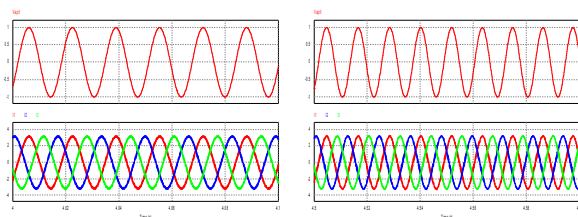


Figura 8 – Detalhes do sinal de sincronismo.

Na figura 7 é apresentado o comportamento do sistema completo utilizando o modelo alternador do gerador eólico para a geração dos sinais de alimentação.

Observa-se o comportamento das correntes de entrada e do sinal de sincronismo para um degrau de velocidade do vento de 6 m/s para 9 m/s aplicado no instante $t = 4,2$ s.

Na Figura 8 tem-se o detalhe do sinal do sincronismo antes e após este transitório, onde observa-se a variação de frequência.

IV. CONCLUSÕES

Até o presente momento foram realizadas as tarefas de revisão bibliográfica, definição de parâmetros e especificações de desempenho para o sistema, projeto e simulação do estágio de potência do conversor, projeto dos controladores digitais e simulação do sistema completo.

Estes resultados permitem que se verifique a integração das diferentes partes do sistema e que sejam comprovadas as características de elevado fator de potência, baixa taxa de distorção harmônica das correntes de entrada, bem como a eficiência do algoritmo de sincronismo com a utilização do PLL.

Como atividades também realizadas têm-se a definição de esquemático, elaboração de layout da placa de condicionamento de sinais, da placa com sensores de corrente e do estágio de potência.

Restam ainda para serem desenvolvidas as atividades de elaboração de programas de controle do conversor com o processador de sinais digitais e os ensaios do protótipo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Florianópolis (Edital Universal de Pesquisa nº 12/2013/PRPPGI) e à FAPESC (Chamada Pública 04/2012 - T.O. 11.340/2012-9) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, B. R. Sistema de Controle Digital para WECs de Eixo Vertical. **Fortaleza, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica**, Universidade Federal do Ceará, 2012.

ANANI, N. et al, Synchronization of a Single-Phase Photovoltaic Generator with the Grid. **IEEE International Conference On Computer as a Tool**, 2011, PP. 1 – 4.

BATISTA, F. A. B., Modulação Vetorial Aplicada a Retificadores Trifásicos PWM Unidirecionais. **Florianópolis, Tese De Doutorado Em Engenharia**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

BATISTA, F. A. B., BARBI, I. Space vector modulation for two-level unidirectional PWM rectifiers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 25, 2010, pp. 178-187, 2010.

BATISTA, F. A. B. ; ILLA FONT, C. H., Proposal of Three-phase Two-level Unidirectional SEPIC PWM Rectifiers with High Power Factor, In: **X Conferência Internacional de Aplicações Industriais**, Fortaleza. INDUSCON 2012, v. X. p. 01-06, 2012.

FRIEDLI, T., KOLAR, J.W., The essence of three-phase PFC rectifier systems, in **IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)**, pp. 1 – 27, 2011.

GOMES, C. E. M., Controle Digital de um Condicionador de Tensão Alternada Usando PLL para a Obtenção do Sinal de Referência. **Florianópolis. Dissertação De Mestrado Em Engenharia Elétrica**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

ORTMANN, M. S., Filtro Ativo Trifásico com Controle Vetorial Utilizando DSP: Projeto e Implementação. **Florianópolis. Dissertação De Mestrado Em Engenharia Elétrica**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

TIBOLA, G. S., Sistema Elétrico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência. **Florianópolis. Dissertação De Mestrado em Engenharia Elétrica**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.