



CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



SIMULAÇÃO DE SINCRONIZAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA HIDRÁULICA A PARTIR DA TÉCNICA DE PLL

Joelson Lopes da Paixão

Mestrando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria

Email: joelson.paixao@hotmail.com

José Oizimas Junior

Mestrando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria

Email: oizimas@gmail.com

Mauro Fonseca Rodrigues

Doutorando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria

Email: mauro.rodrigues@gmail.com

Resumo. *O incentivo e o crescente aumento de geradores de energia com micro e minigeração de energia, principalmente após a Resolução 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), aumentou a probabilidade de pequenas fontes hidráulicas também serem inseridas nas novas condições de geração de energia elétrica desta resolução. Assim, o objetivo deste artigo é estudar as técnicas que envolvem o sistema PLL – Phase Locked Loop – aplicado numa geração de energia com fonte hidráulica, onde o acoplamento de sinais será ótico. Com isso, será apresentada a base das Transformadas de Clarke e Park e um sistema simulado em ambiente computacional, Simulink, para verificar a possibilidade de sincronização do sistema e suas condições de manter-se dessa forma.*

Palavras-Chave: *Sincronização de geração distribuída, Método PLL, Simulações de sincronismo.*

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, assim como em muitos outros países, o sistema elétrico, se desenvolveu de modo unilateral. Isto é, com centros geradores, linhas de transmissão e redes de distribuição. Nesta topologia de sistema, toda a energia é gerada em usinas (sejam elas

hidrelétricas, termelétricas, nucleares, etc) e transportada até os centros de consumo através de linhas de transmissão [1]. Este sistema está consolidado e, até então, funciona muito bem. No entanto, os meios de geração, assim como as diretrizes relacionadas à geração vêm evoluindo a nível mundial, e este cenário começa a passar por profundas modificações.

Neste novo sistema, será muito comum a presença de geração distribuída. Seja esta no formato de usinas eólicas, fotovoltaicas, de biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, entre outras [2]. Assim, nesse trabalho objetiva-se a implementação teórica do processo de sincronização de um gerador hidráulico com o sistema elétrico. Para a sincronização de máquinas, existem muitas técnicas conhecidas e bastante difundidas. No entanto, aqui procura-se abordar uma nova técnica de sincronização através do conceito de *Phase Locked Loop* (PLL) ou Malha Travada em Fase.

A partir deste conceito, procura-se colocar em fase o gerador hidráulico com o sistema elétrico. Quando os dois estiverem com as fases casadas, o PLL faz o travamento do laço, mantendo o novo sistema (gerador + rede elétrica) sincronamente acoplados. O laço ou malha após travado em fase, faz com que o sistema se mantenha sincronizado [3].



2. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO PLL

Existem vários tipos de PLL, de acordo com a forma de implementação, pode ser dividido em *hardware* PLL e *software* PLL. Por aplicações pode ser dividido em PLL trifásico e PLL monofásico. E quanto à estrutura de controle pode ser classificado em PLL de malha aberta e PLL de malha fechada [4].

Em teoria, o algoritmo PLL proporciona o travamento de um sinal externo (U), em fase, com um sinal de referência (U_{PLL}). A ideia para sincronizar o sinal externo (correspondente a uma GD) com o sinal de referência (correspondente à rede elétrica) é de que quando ambos sinais estiverem em fase, ou então, com uma pequena diferença angular entre eles, o vetor girante da GD (U) se projete sobre o vetor da rede (U_{PLL}). Através da Transformada de Park, obtêm-se as tensões de eixo direto e em quadratura de ambos os sinais. Para que estes sinais estejam em fase e, conseqüentemente, sincronizados, a diferença entre os ângulos do PLL e do sinal externo deve ser zero. Isto é, $\theta \approx \theta'$. Quando isto ocorre, a projeção da tensão de quadratura do sinal externo tende a zero, e a tensão de eixo direto do U_{PLL} (rede) e do sinal externo (GD) são iguais [4]. A representação gráfica deste processo é explicitada na Fig. 1.

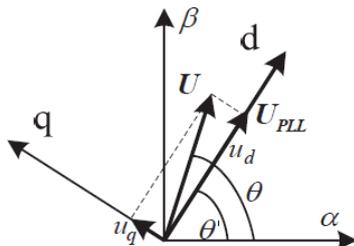


Figura 1: Diagrama do princípio de operação do PLL [4].

Matematicamente, o processo de sincronização pode ser expresso conforme a Eq. (1). Adotando $\phi = \theta - \theta'$, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \\ \Delta V_o \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta') \\ \sin(\theta - \theta') \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Quando a diferença entre o ângulo do PLL e da GD (ϕ) é pequena ou próxima de zero, tem-se que $\sin(\theta - \theta') \approx (\theta - \theta')$, sendo os ângulos expressos em radianos. Portanto, pode-se afirmar que, para um sistema trifásico equilibrado, quando o PLL está travado/sincronizado a componente de eixo em quadratura se reduz a zero ($\sin(0^\circ) = 0$); e a componente do eixo direto vai a um ($\cos(0^\circ) = 1$). Enquanto os sistemas não estão sincronizados ou há uma pequena defasagem, a componente de eixo em quadratura da GD é linearmente proporcional ao erro (diferença de fases) [4]. De modo que: $\Delta V_q =$

$$\sqrt{2/3} V_{line}(\theta - \theta') = V_m(\theta - \theta').$$

3. PROPOSTA DE TOPOLOGIA PLL PARA A SINCRONIZAÇÃO

O objetivo do controle do PLL é fazer com que as tensões da rede e da GD entrem em fase, para que os sistemas possam então ser interconectados. A topologia de controle escolhida, e que deve ser aplicada no algoritmo PLL, visa anular a diferença entre as tensões de eixo direto da rede (U_d^*) e da GD (U_d) [5].

A Figura 2 apresenta a topologia criada no ambiente de simulação computacional. Nessa estrutura inicialmente é feita a captação da tensão da fonte da rede, bloco GRID defasagem 0° , aplicadas as transformadas anteriormente apresentadas e inserido o sinal resultante num controlador PID que realizará o realinhamento, pois sua outra entrada está



recebendo o sinal oriundo da fonte GD, chamada de GD defasagem 30° , no bloco correspondente. Em ambos casos, o sinal resultante refere-se às tensões de eixo direto

(Vd) que devem estar casadas, para efetivar o sincronismo. A constante proporcional (P) foi configurada em 180, a integral em 3200 e a derivativa em 1, conforme indicação de [6].

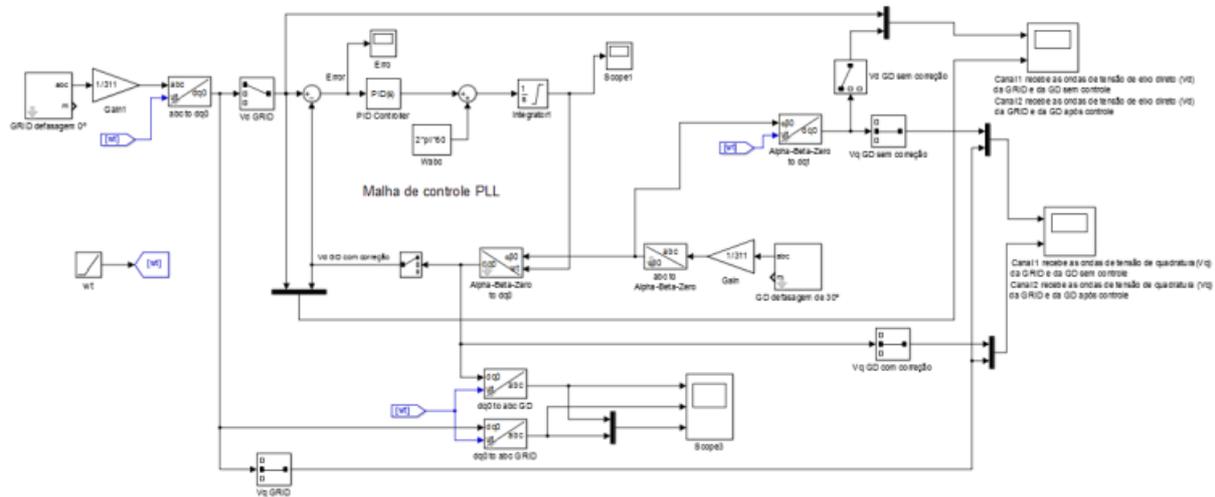


Figura 2: Topologia completa de simulação.

Posteriormente, um integrador faz a junção dos sinais e realimenta o sistema de sinal da GD para inserir a correção e criar o sincronismo entre as duas fontes. Este integrador possui uma referência circular $2\pi f$, para fonte senoidal que o prende aos 60 Hz da rede, de forma a manter o sistema sem desvios de frequência.

3.1. GD com fonte hidráulica

A fonte hidráulica apresenta uma grande inserção na matriz de energia elétrica brasileira. Os pequenos aproveitamentos dessa energia significam, em sua maior parte, pequenos problemas ambientais e baixa ocupação de área para alagamento. Assim, é importante que ela seja corretamente sincronizada com a rede devido, principalmente, aos seus geradores serem em corrente alternada e dependerem do sincronismo para manter a estabilidade do sistema.

O algoritmo PLL pode ser implementado em um microcontrolador do tipo PIC, DSP,

ARM, etc. Sendo que os sinais de tensão são lidos no microcontrolador após passarem pelo circuito de isolamento. No microcontrolador é implementado o algoritmo PLL, responsável pela sincronização. A ilustração esquemática do processo de sincronismo pode ser vista na Fig. 3.

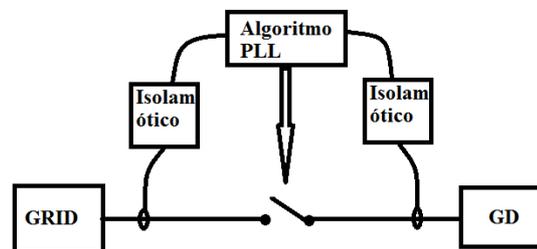


Figura 3: Esquema do processo de sincronismo entre a rede e a GD.

Quando o algoritmo PLL fizer o travamento em fase das tensões da rede e da GD, as duas fontes podem ser interligadas. Dessa forma, a aplicação do PLL para sincronizar rede e gerador deve estar



associada aos controladores locais da GD de forma a criar um ambiente totalmente controlado.

4. RESULTADOS E AVALIAÇÃO

Percebe-se que a defasagem previamente definida está presente em 30° . Após passar pelo sistema proposto PLL a defasagem é totalmente eliminada. Fazendo com que as tensões de eixo direto da tanto da GRID como da GD sejam iguais a 1, em valor por unidade (pu). Convém ressaltar que defasagens maiores ou menores obtiveram o mesmo resultado de saída.

Quando a rede e a GD apresentarem tensões de eixo direto são igual a um, e as tensões em quadratura forem iguais a zero, significa que as mesmas estão sincronizadas. Esse resultado é mostrado na Fig. 4, onde é feita a transformada de Park ($dq0$) para o eixo trifásico (abc), das tensões da GRID, da GD após a correção e da GRID e da GD corrigidas juntas.

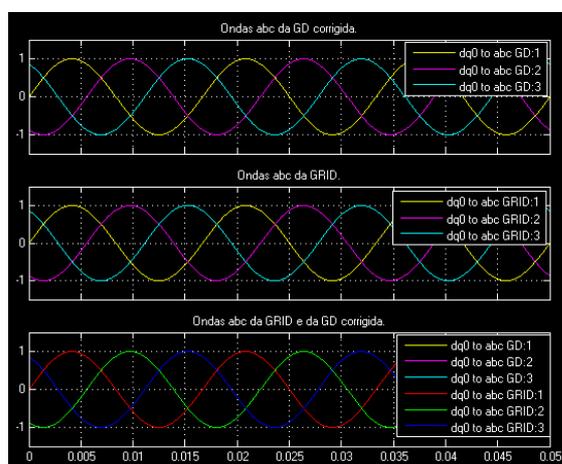


Figura 4: Ondas de tensão abc da GRID, da GD e de ambas juntas após a correção.

5. REFERÊNCIAS

- [1] N. KAGAN, C. C. B. OLIVEIRA e E. J. ROBBA, Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, 2010.
- [2] L. L. Santos, L. Canha, D. Bernardon e R. Pressi, "Methodology for Long-Term Forecasting to Insertion of DG in Distribution Systems," *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, p. 6, 2015.
- [3] A. A. BONATO, "Sistema inteligente para previsão de carga multinodal em sistemas elétricos de potência," Ilha Solteira/SP, 2010.
- [4] D. Z. a. P. G. D. Xie, "Research on Phase-Locked Loop Control and Its Application.," *IEEE*, pp. 818-821, 2016.
- [5] M. L. P. R. A. Teodorescu, "PLL Algorithm for Power Generation Systems Robust to Grid Voltage Faults.," *IEEE*.
- [6] J. P. ARRUDA, "Métodos de sincronização de conversores em sistemas de geração distribuída.," Recipe/PE, 2008.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme observado nas simulações executadas o controle PLL é efetivo no sincronismo de sistemas trifásicos. Sendo assim, imprescindível para inserção da GD na rede elétrica, principalmente em baixa tensão, pois dispensa sincronismo local podendo escravizar a fonte na rede primária do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Esse fator aumenta a confiabilidade na integração dos sistemas e vem propiciando a inserção de microgeração e minigeração na rede de distribuição de energia. O desenvolvimento do país nas últimas décadas, aliado ao aumento da dependência da energia elétrica pelo ser humano, tornam o conhecimento profundo dos SEPs um fator essencial, além de obrigatório.