

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Sistema de Geração com Microturbina a gás

AUTORES:

Victor Felipe Moura Bezerra Melo, Cursino Brandão Jacobina

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

SISTEMA DE GERAÇÃO COM MICROTURBINA A GÁS

Abstract

In this work it is discussed an electric energy generation system using a gas microturbine. Each part that composes the system is taken into account. The power electronics converters and their switching mechanism are mentioned, as well as the Pulse Width Modulation (PWM) strategy. Currents in the generation and load circuits have their values controlled by modified-PI controllers while the turbine speed and DC-link voltage are controlled by PI controllers. The way this control system is designed is discussed. The “feed-forward” control strategy is pointed out. Simulation results are presented.

Introdução

Atualmente o planeta passa por um processo de mudança, em escala global, do modo de pensar, agir e produzir. Agora todas as nações se preocupam em produzir e crescer de forma sustentável, ou seja, sem agredir o meio ambiente. Nesse contexto, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias tanto de geração quanto de utilização da energia de forma a causar cada vez menos impacto ao ambiente.

O desenvolvimento do projeto de um “Sistema de Geração com Microturbinas a Gás” se dá como parte dessa nova tendência global e nacional, e um novo tipo de geração surge, a chamada *Geração Distribuída* (GD). Esse tipo de geração tem como objetivo o abastecimento energético de comunidades pequenas, mercados locais ou regionais, por exemplo, sem a necessidade de acessar o sistema de transmissão.

Os sistemas GD se caracterizam pela baixa potência de geração e pela utilização de fontes renováveis de energia e baixa emissão de poluentes. Dentre as tecnologias utilizadas em GD estão as centrais eólicas, utilização de painéis solares e as microturbinas a gás.

Do ponto de vista da indústria do petróleo e gás, com a descoberta de novos reservatórios de petróleo cada vez mais desafiadores do ponto de vista de perfuração e prospecção e, muitas vezes, em lugares remotos, os equipamentos utilizados para realização dessas tarefas necessitarão de mais energia para que se consiga perfurar poços de profundidades cada vez maiores e sob maiores pressões.

O desenvolvimento de um sistema de geração de energia elétrica de menor porte é de extrema importância já que nem sempre será possível ter um abastecimento da rede elétrica convencional para os motores de indução utilizados na perfuração de poços para extração de petróleo, por exemplo, além de toda a energia demandada nas instalações que circundam o poço como iluminação etc. Dessa maneira, um sistema de geração de fácil transporte e instalação utilizando microturbinas a gás se torna de grande interesse para essa aplicação.

Metodologia

1. Sistema de geração

Primeiramente, a turbina não faz parte do sistema que engloba geração, conversor CA-CC-CA, e carga, além dos controladores de corrente na carga e na geração e o controlador de tensão no barramento CC. O sistema completo de geração é visto na figura 1. Dessa forma temos que:

$$\begin{aligned} e_{s1} &= E_s \cos(\omega_m t) & e_{g1} &= E_g \cos(\omega_m t) \\ e_{s2} &= E_s \cos(\omega_m t - 120^\circ) & e_{g2} &= E_g \cos(\omega_m t - 120^\circ) \\ e_{s3} &= E_s \cos(\omega_m t - 240^\circ) & e_{g3} &= E_g \cos(\omega_m t - 240^\circ) \end{aligned}$$

Em seguida mostraremos o papel dos conversores e dos sistemas de controle dentro do sistema de geração, descrevendo como se dá o funcionamento de cada um deles. Então, faremos o acoplamento da turbina ao sistema e discutiremos como isso tudo é implementado na ferramenta de simulação utilizada.

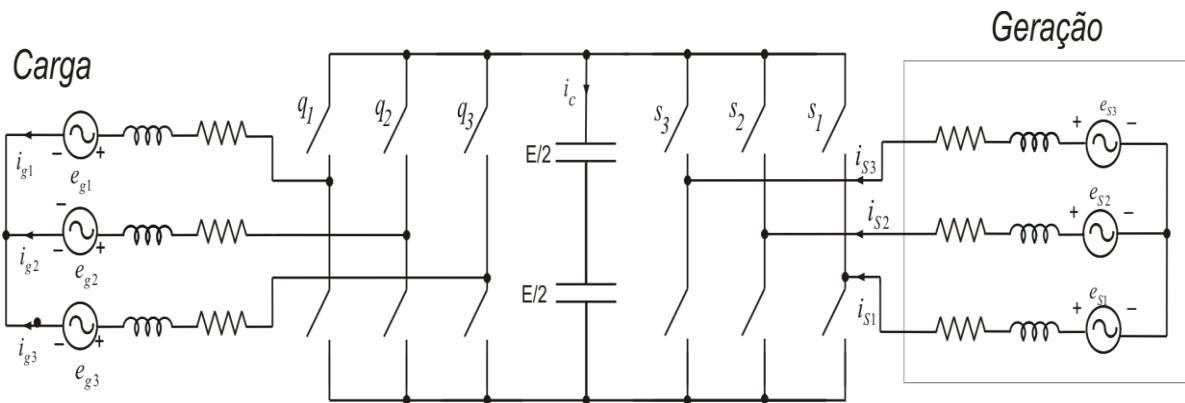


Figura 1. Sistema completo que engloba geração, conversor CA-CC-CA e carga.

1.1 Conversores

Os conversores são compostos de chaves IGBT, que permitem a condução bidirecional da corrente, dependendo do seu estado (aberto ou fechado). Os instantes nos quais as chaves estão abertas ou fechadas são determinados utilizando a técnica chamada *Pulse Width Modulation* (PWM), através da qual as tensões de pólo de referência (tensões desejadas na entrada e saída do conversor CA-CC-CA) nas três fases são comparadas a uma portadora triangular que oscila a uma frequência de 10kHz. Assim, obteremos tensões chaveadas na entrada e na saída do conversor, porém seu valor médio será o mesmo das tensões de pólo de referência.

O conversor CA-CC-CA permite o acoplamento do sistema de geração a uma carga ou à rede elétrica, mesmo que suas frequências de operação sejam diferentes. Ou seja, retificando as tensões na geração e assegurando uma tensão constante através do barramento CC, é permitido um fornecimento à carga de uma tensão de amplitude e frequência desejadas. O valor constante da tensão no barramento é assegurado através de um controlador PI, garantindo que toda a potência gerada é consumida pela carga.

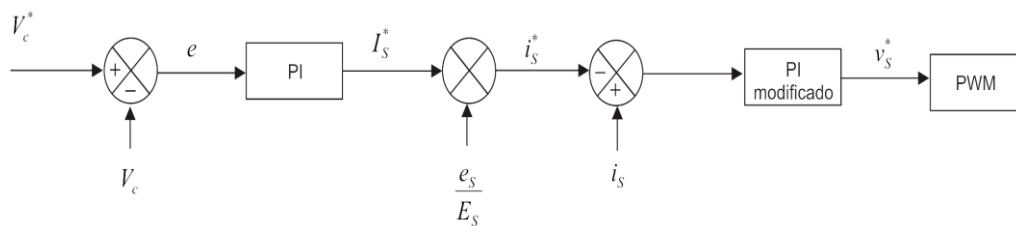
1.2 Sistemas de controle

Os controladores presentes no sistema são os controladores de corrente na carga e na geração e o controlador de tensão no barramento. O tipo de controlador utilizado é o Proporcional-Integral (PI) que tem como característica garantir erro zero em regime permanente. Como as correntes são alternadas senoidais, utiliza-se o PI modificado, também chamado de PI de dupla sequência (descrito em [1]).

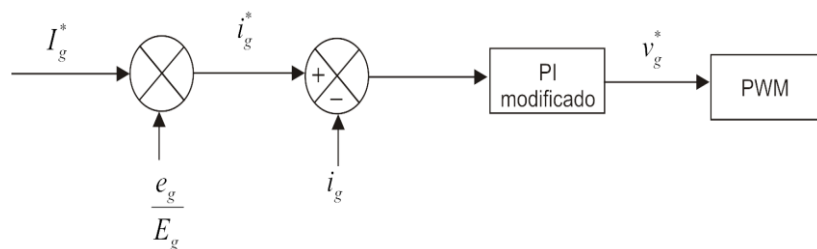
O sistema de controle na geração está ilustrado na figura 2 (a) e funciona da seguinte maneira: A tensão instantânea V_c no barramento é realimentada e o erro entra no controlador PI. A saída desse controlador é a amplitude da corrente de referência I_s^* da geração. De forma a garantir um fator de potência unitário, ou seja, que a corrente e tensão estejam em fase, a amplitude da corrente de referência é multiplicada por uma função senoidal de amplitude unitária e de mesma fase que cada uma das fases das tensões da geração, obtendo assim as três correntes de referência (i_s^* na figura). As correntes instantâneas nas três fases (i_s na figura) são realimentadas e o erro entra no PI modificado. As saídas do controlador são as tensões de pólo de referência que são utilizadas na realização do PWM.

O sistema de controle de corrente na carga funciona da mesma maneira, mas a amplitude da corrente na carga é determinada pela demanda de potência a ser consumida. O seu funcionamento é ilustrado através da figura 2(b).

Na figura 2 (a) podemos ver o diagrama de blocos que representa o sistema de controle da geração com os controladores PI de tensão do barramento e PI modificado de corrente. Vale salientar que o erro na entrada do controlador de corrente é dado por $e_i = i_s - i_s^*$. Isso acontece porque quando a corrente instantânea está abaixo da corrente de referência (erro negativo), a tensão de pólo de referência deve ser diminuída, de forma aumentar a diferença de potencial sobre a impedância da geração, aumentando assim a corrente.



(a)



(b)

Figura 2. Sistema de controle (a) da geração e (b) da carga.

O sistema completo foi simulado no ambiente de simulação PSIM. Os controles e o PWM foram implementados através dos blocos programáveis presentes no PSIM chamados de DLL. A linguagem de programação utilizada é a linguagem C.

1.3 Acoplamento da turbina

Posteriormente, a turbina foi introduzida ao sistema, de forma a deixá-lo mais completo e realista, como ilustrado na figura 3. Isso é obtido fazendo com que a amplitude das tensões na geração E_s seja diretamente proporcional à velocidade angular de giro da turbina, ou seja, $E_s = k\omega_m$, onde k é uma constante. A turbina é representada por uma função primeira ordem com constante de tempo $T=2s$, conforme proposto em [2]. O modelo da máquina elétrica considerado é um modelo simplificado representado por uma impedância e uma fonte de tensão em cada fase, como foi utilizado até o presente momento. Logo, as tensões na geração passam a ser:

$$e_{s1} = k\omega_m \cos(\omega_m t)$$

$$e_{s2} = k\omega_m \cos(\omega_m t - 120^\circ)$$

$$e_{s3} = k\omega_m \cos(\omega_m t - 240^\circ)$$

O cálculo da velocidade é feito através da resolução da equação mecânica da máquina elétrica, dada por $c_m - c_e - F_m \omega_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt}$, onde c_m é o conjugado mecânico fornecido ao eixo mecânico da máquina elétrica pela turbina, c_e é o conjugado elétrico, F_m é o coeficiente de atrito da máquina, e J_m é o seu momento de inércia. A resolução dessa equação é realizada através de um método de integração numérica em um bloco programável DLL.

Com a introdução da turbina ao sistema, mais um controlador deve ser projetado: o controlador PI de velocidade de giro. A figura 3 ilustra como funciona o controle de velocidade.

Nesse sistema mais completo com a presença da turbina, de modo a obter um controle efetivo de todas as variáveis que devem ser controladas, uma compensação chamada de “feed-forward” foi feita. Essa compensação consiste em impor em determinados pontos do sistema os valores desejados ou calculados para cada ponto. Dessa maneira, os controles agirão de modo, somente, a corrigir pequenos erros. Por exemplo, pelo balanço de potência, o valor desejado na saída do PI de tensão do barramento é $I_s^* = 30A$. Logo, nós impomos esse valor nesse ponto do sistema e o controlador não mais precisa gerar esse valor, mas sim corrigir pequenas variações de modo a manter o valor constante. A figura 4 ilustra a utilização do “feed-forward” na saída no controlador de tensão no barramento. A técnica também foi utilizada na saída do PI de velocidade onde o valor do conjugado mecânico desejado, obtido também através do balanço de potência, é imposto de modo a melhorar e facilitar o controle da velocidade:

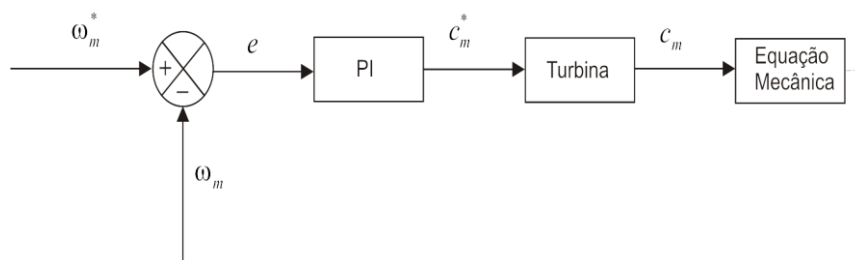


Figura 3. Sistema de controle da velocidade de giro do eixo da turbina.

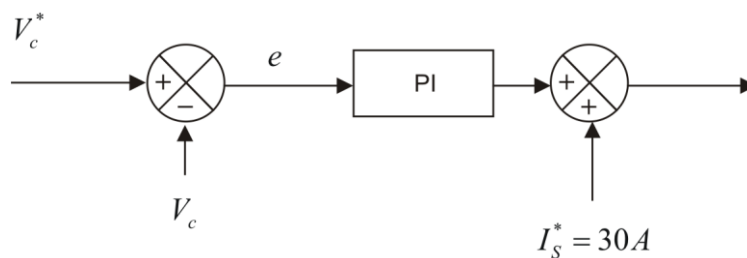


Figura 4. Realização da técnica Feed-forward na saída do controlador de tensão no barramento.

Resultados e Discussão

Os resultados do sistema com a inclusão da turbina serão mostrados. Será então discutida a eficiência dos controladores de tensão no barramento CC, de velocidade da turbina e de corrente na geração e na carga.

A tabela abaixo apresenta os valores das variáveis presentes no sistema:

Tabela II – Valores dos parâmetros utilizados quando do acoplamento da turbina ao sistema.

Parâmetro	Definição	Valor
R	Resistência do enrolamento	1Ω
L	Indutância do enrolamento	$0,027\text{ H}$
C	Capacitância do barramento	$0,5\text{ F}$
c_m	Conjugado mecânico	$19,19\text{ N.m}$
V_c^*	Tensão de referência no barramento	200 V
E_g	Amplitude da tensão na carga	50 V
E_s	Amplitude da tensão na geração	130 V
I_s^*	Amplitude da corrente de referência na geração	30 A
I_g^*	Amplitude da corrente de referência na carga	35 A
K_{PI}	Ganho proporcional do controlador de corrente	$6,75$
K_{II}	Ganho integral do controlador de corrente	2500
K_{PV}	Ganho proporcional do controlador de tensão no barramento	$0,5$
K_{IV}	Ganho integral do controlador de tensão no barramento	5
ω_m^*	Velocidade de referência de giro da turbina	377 rad/s
k	Constante de proporcionalidade	$0,3448$
K_{PV}	Ganho proporcional do controlador de tensão no barramento	$0,05$
K_{IV}	Ganho integral do controlador de tensão no barramento	$0,5$
$K_{P\omega}$	Ganho proporcional do controlador de velocidade	$0,25$
$K_{I\omega}$	Ganho integral do controlador de velocidade	$0,025$
J_m	Momento de inércia da máquina	$0,1$
F_m	Coefficiente de atrito da máquina	$0,1$

Temos os seguintes resultados para tensão no barramento e para a velocidade da turbina:

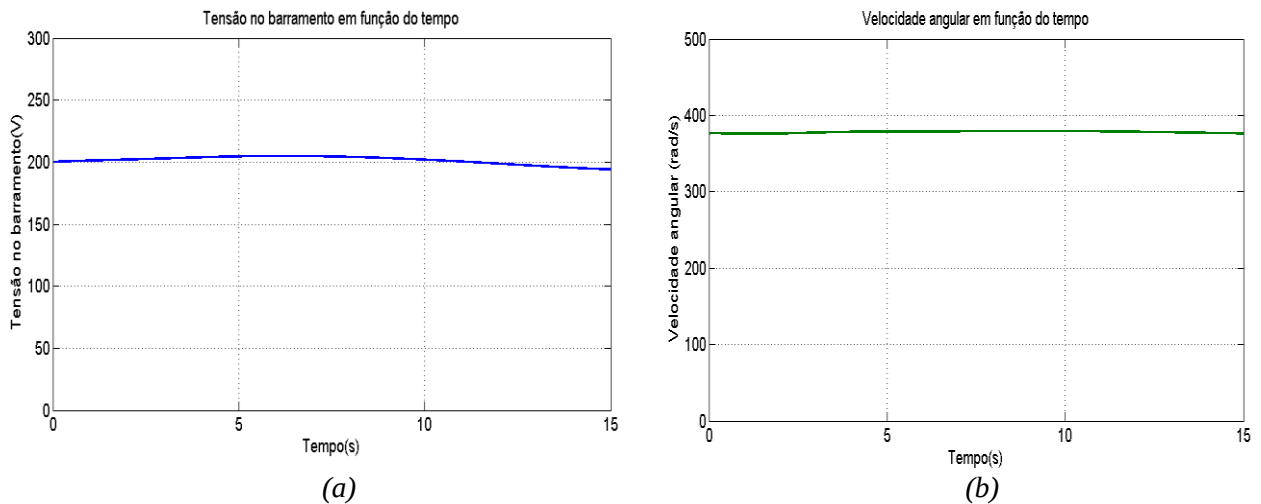


Figura 5. Tensão no barramento (a) e velocidade (b) em função do tempo para o sistema com turbina acoplada.

Através da figura 5(a) se pode ver que, durante os *quinze segundos* de simulação, a variação do valor da tensão no capacitor é de $\pm 2,5\%$ em torno do valor de referência $V_c^* = 200V$. Conclui-se então que a tensão no barramento está controlada.

Através da figura 5(b) é visto que, durante os *quinze segundos* de simulação, o valor da velocidade de giro da turbina e, conseqüentemente, do eixo da máquina elétrica a ela acoplada, oscila entre $+0,6\%$ e $-0,3\%$ em torno do valor de referência $\omega_m^* = 377 \text{ rad/s}$. Dessa forma, conclui-se que o controle da velocidade é efetivado.

Já para as correntes temos:

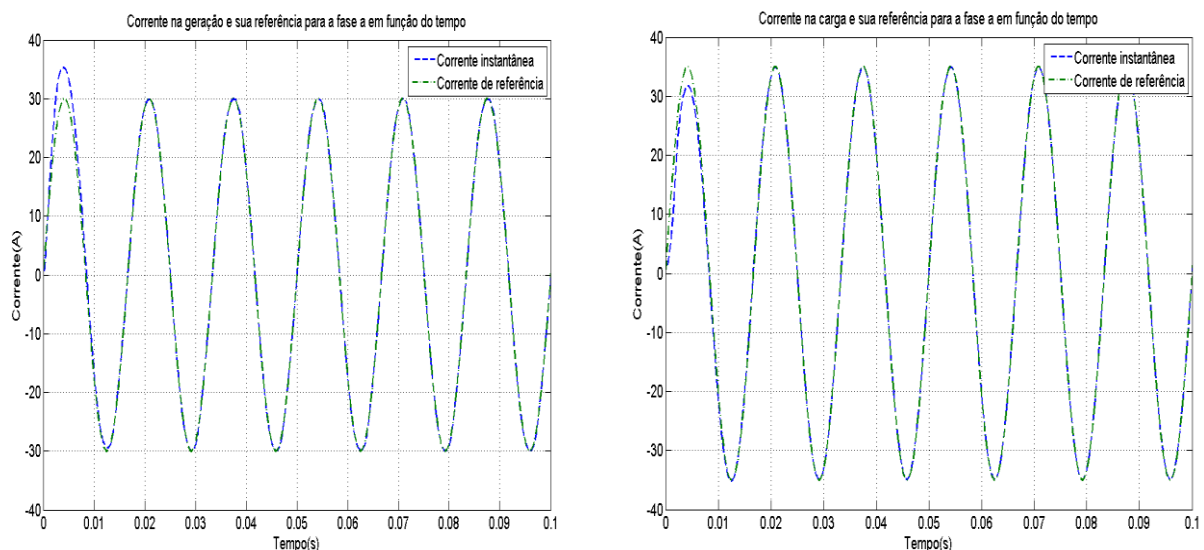


Figura 6. Corrente na fase a da geração (a) e da carga (b) em função do tempo para o sistema com turbina acoplada.

Na figura 6(a) temos a corrente na fase *a* da geração até 0,1s dos quinze segundos de simulação. Nota-se que a corrente instantânea acompanha a referência, caracterizando a eficácia do controle.

A corrente na carga até 0,1s de simulação é vista na figura 6(b). Assim como acontece para a corrente na geração, a corrente na carga também segue a sua referência, mostrando que o controle é realizado.

Conclusões

O sistema completo de geração foi estudado e simulado. Os sistemas e estratégias de chaveamento do conversor trifásico e de controle de tensão no barramento, corrente na geração e na carga e velocidade do eixo da turbina foram apresentados e discutidos.

Com o acoplamento da turbina, ou seja, fazendo a amplitude das fontes de tensão da geração dependentes da velocidade de giro, para que o controle fosse alcançado, a utilização da estratégia “feed-forward” foi apresentada. Ela consiste em impor, em determinados pontos do sistema (saídas dos controladores), certos valores que ajudam na atuação dos controladores, que passam a agir de forma a corrigir pequenas variações. Adotando essa medida, os sistemas de controle se mostraram eficazes.

Agradecimentos

Agradecemos à ANP pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- [1] C. B. Jacobina, M. B. de R. Correa, R. F. Pinheiro, E. R. C. da Silva, a. M. N. Lima, Modeling and control of unbalanced three-phase systems containing PWM converters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 6, pp.1807-1816, November/December 2001.
- [2] R.H.Lasseter, Control of Distributed Resources, *Bulk Power System Dynamics and Control IV - Restructuring*, August 24-28, Santorini, Greece.