

BOMBA CENTRÍFUGA OPERANDO COMO TURBINA E MOTOR DE INDUÇÃO COMO GERADOR PARA PEQUENOS APROVEITAMENTOS DE POTENCIAL HÍDRICO

Reginaldo BARBOSA FERNANDES (1); Roberto ALVES BRAGA JÚNIOR (2); Aberto COLOMBO (3); Giovanni FRANCISCO RABELO (4) *.

(1) Cefet-Bambuí; (2) Ufla; (3) Ufla; (4) Ufla

RESUMO

Este trabalho buscou avaliar uma unidade geradora alternativa para micro centrais hidrelétricas, utilizando bomba centrífuga funcionando como turbina e motor de indução operando como gerador. Foram utilizados dois conjuntos motobomba, um funcionando como turbina-gerador e o outro funcionando como bomba ligada a um inversor de frequência, a fim de simular diferentes condições de altura e vazão. Utilizaram-se como cargas elétricas, cargas resistivas. Os resultados obtidos apresentaram rendimentos superiores a 60%, em diversas simulações de carregamento do gerador.

Palavras-chave: Bomba funcionando como turbina, gerador de indução, micro central hidrelétrica.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da geração de energia elétrica no Brasil na última década não tem acompanhado o crescimento da demanda, o que tem criado uma situação crítica, levando ao risco de interrupções no fornecimento.

A falta de uma política de investimento do Estado em novas fontes geradoras de energia tem obrigado o governo federal a adotar uma política que visa incentivar a transferência dos novos investimentos para a iniciativa privada. Além desta política, o governo tem trabalhado no incentivo à expansão da matriz energética por meio de fontes alternativas, dentre elas os pequenos aproveitamentos. Uma dessas linhas adotadas pelo Estado tem o objetivo principal de ampliar a geração de energia elétrica de forma descentralizada. Neste caso, as principais fontes geradoras são: a energia obtida por meio da biomassa, a energia eólica e a implantação de pequenas centrais hidrelétricas.

Em 2002, por meio do Ministério das Minas e Energia, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA, destinado a oferecer incentivos à implantação de centrais geradoras de energia em pequena escala e de forma regional.

Apesar do esforço desenvolvido, ainda existe um forte obstáculo econômico, representado pelo elevado custo de implantação dessas alternativas

de geração. No caso da implantação de uma microcentral hidrelétrica, o grande custo está relacionado com as unidades geradoras, representadas pelo conjunto turbina gerador.

Visando reduzir estes custos, foram desenvolvidos estudos e pesquisas propondo a utilização de conjuntos turbinas geradores alternativos, os quais podem ser equipados com microturbinas do tipo Michel Banki, Pelton ou até mesmo com bombas funcionando como turbina.

A utilização de bomba centrífuga funcionando como turbina (BFT) e motor de indução operando como gerador (GI), vem sendo proposta como uma unidade geradora alternativa para instalação em microaproveitamentos hidrelétricos em pequenas propriedades rurais. Isso se deve, principalmente, ao baixo custo de investimento, à simplicidade, à robustez e à baixa manutenção. Uma grande vantagem do gerador de indução, comparado com o gerador síncrono, é a simplicidade na manutenção, podendo ser reparado em pequenas oficinas, até mesmo em comunidades rurais isoladas.

Portanto o objetivo deste trabalho é avaliar os parâmetros elétricos de um conjunto motobomba operando como turbina gerador.

* reginaldo@cefetbambui.edu.br.

2. DESENVOLVIMENTO

Pereira (2003) afirma que é possível a máquina de indução funcionar como gerador isolado de qualquer rede elétrica, desde que exista algum dispositivo conectado aos seus terminais para fornecer a potência reativa Q , solicitada pelo gerador e por qualquer carga conectada. Se a velocidade da máquina é mantida constante, a magnitude da tensão terminal depende do valor da capacitância e da carga conectada em seus terminais. Entretanto, se a capacitância é mantida fixa, a tensão decresce com o aumento da carga. Por outro lado, a frequência síncrona (de saída) varia não somente com a velocidade da máquina, mas também com a carga e a própria capacitância de excitação. Uma montagem em que tal energia é fornecida por um banco de capacitores está ilustrada na Figura 1.

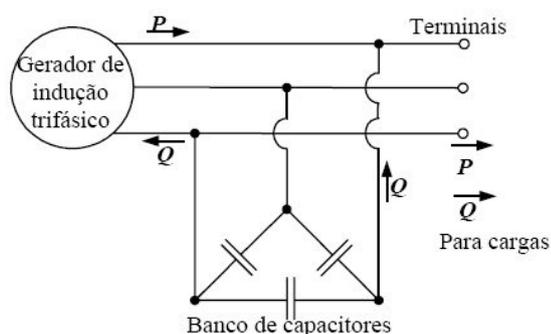


Figura 1 - Gerador de indução operando isoladamente com um banco de capacitores para suprir a potência reativa Q
Fonte: Pereira (2003)

Segundo Braga (2002), o fluxo de potência reativa não é invertido quando a máquina de indução opera como gerador. A potência reativa necessária para produzir o campo magnético não pode ser fornecida pela máquina primária, nem pelo rotor em gaiola de esquilo. Assim, a máquina de indução somente opera fornecendo potência ativa se conectada a uma fonte externa de potência reativa.

Lopes (2003) afirma que, para dimensionar o banco de capacitores para o funcionamento da máquina de indução como gerador auto-excitado, o ideal é conhecer a curva de magnetização do motor e, então, determinar a reatância capacitiva necessária à auto-excitação do gerador. Isso pode ser fornecido pelo fabricante ou levantado em laboratório. Porém, na falta da curva de magnetização, o banco de capacitores para o funcionamento do motor de indução como

gerador pode ser determinado pela potência aparente, sem carga, da máquina operando como motor. O banco calculado por meio dessa segunda maneira tem valor muito próximo ao calculado pela curva de magnetização e viabiliza o uso de máquinas onde a curva de magnetização não é conhecida. Logo:

$$\sum S_{sem-carga} = \sqrt{3} * V_{linha} * I_{linha} \quad [Eq.01]$$

$$\sum Q = \sum S_{sem-carga} \quad [Eq.02]$$

$$Q_{fase} = \frac{Q}{3} \quad [Eq.03]$$

$$V_{fase} = \frac{V_{linha}}{\sqrt{3}} \quad [Eq.04]$$

$$I_{fase} = \frac{Q_{fase}}{V_{fase}} \quad [Eq.05]$$

$$X_{C_{fase}} = \frac{V_{fase}}{I_{fase}} = \frac{1}{2} * \pi * f * C \quad [Eq.06]$$

Assim, o valor da capacitância por fase será de:

$$C = \frac{I_{fase}}{2 * \pi * f * V_{fase}} \quad [Eq.07]$$

Em que:

$S_{sem-carga}$ = é a potência aparente trifásica com o motor sem carga;

Q_{fase} = é a potência reativa por fase.

Conforme Smith (2001), deve-se considerar também o tipo de conexão com que a máquina irá trabalhar. Assim têm-se: estrela ou delta, trifásico ou monofásico.

Obtém-se, dessa forma, o cálculo da capacitância para excitação a vazio.

No entanto, avaliou-se a operação do conjunto gerador quanto aos parâmetros de eficiência e qualidade da energia proveniente da conexão BFT-GI, operando isoladamente da rede elétrica.

2.1. Material e Métodos

Para realização dos testes dos parâmetros elétricos tensão, frequência e rendimento foi

utilizado o conjunto BFT-GI especificado abaixo:

- BFT – marca KSB ETA 80-20; 1750 rpm; $Q=60 \text{ m}^3/\text{h}$ e $H=15 \text{ mca}$; GI – marca Eberle; 3ϕ ; 3 CV; 220/380 V; 9,0/5,2 A; $\text{Cos}\phi=0,78$; $\eta=81,7\%$.

Estes são os dados de placa dos equipamentos fornecidos pelo fabricante.

Foi montada, no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), a seguinte configuração experimental: um conjunto motobomba funcionando como bomba, sendo que, a saída de água desse conjunto foi acoplada na saída de água de outro conjunto motobomba funcionando assim em reverso, ou seja, como turbina e gerador. As cargas elétricas foram inseridas nesse gerador e chaveadas de acordo com o andamento do experimento. O conjunto motobomba funcionando como bomba foi ligado à um inversor de frequência para simular diferentes condições de altura manométrica e vazão

O acompanhamento dos parâmetros tensão, frequência e rendimento foram realizados a partir da excursão da carga.

A excursão da carga foi representada por correntes de 0,5 a 8,0 A.

Todos os ensaios foram realizados com o gerador operando isolado de uma rede elétrica, acionando carga constante com fator de potência unitário.

Foram utilizados os seguintes equipamentos: o gerador de indução trifásico e a BFT citados no início desse tópico; inversor de frequência Weg; conjunto motobomba de 100 cv funcionando como bomba (motor – 100 cv, 220/380/440/760 V, 243/141/122 A, 3540 rpm, 3Φ , 60 Hz. Bomba – KSB 100-20, $Q=160 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=80 \text{ mca}$, 3530 rpm - dados de placa fornecidos pelo fabricante) ligada ao inversor de frequência; medidor de vazão digital, manômetro analógico, multímetro digital, tacômetro digital, voltímetro analógico, medidor de frequência analógico, painel de cargas resistivas, painel de lâmpadas, banco de capacitores, cabos e conexões elétricas e o sistema hidráulico instalado para alimentação da BFT utilizando tubos PVC e aço. Estes equipamentos pertencem ao Laboratório de Hidráulica e de Eletricidade da UFLA.

O gerador de indução foi acoplado a BFT por meio de duas polias, uma afixada no eixo da BFT

e outra no eixo do gerador, interligadas por uma borracha.

Os terminais elétricos do gerador foram conectados em delta, 220 V. Utilizou-se, neste experimento, um painel de cargas resistivas e capacitivas. Estas cargas foram chaveadas de acordo com a necessidade durante o experimento. As cargas capacitivas foram utilizadas para a magnetização do gerador de indução. As cargas resistivas foram conectadas aos terminais do gerador e chaveadas de acordo com o andamento do experimento. Foram utilizados também, como cargas resistivas, dois painéis de lâmpadas.

O conjunto moto-bomba de 100 cv, ligado ao inversor de frequência, foi utilizado para simular vazão e altura de queda disponível, de acordo com a necessidade das cargas.

Inicialmente, ajustaram-se a vazão e a pressão e calculou-se a capacitância para que se obtivesse, nos terminais do gerador, uma tensão de linha de 220V à frequência de 60Hz a vazio, ou seja, todas as cargas desligadas. Nessa etapa, foram coletados os seguintes dados: capacitância necessária para a magnetização do gerador a vazio, tensão de linha, vazão, pressão, rotação, frequência elétrica e corrente de linha solicitada pelas cargas (nesta condição igual a zero). Posteriormente, por meio do painel de cargas, inseriram-se nos terminais do gerador cargas resistivas. Como era esperado, o nível de tensão e a frequência caíram devido à frenagem provocada pela inércia das cargas, conseqüentemente resultando na redução da velocidade do gerador.

Por meio do inversor de frequência ligado ao conjunto moto-bomba utilizado para o acionamento da BFT, ajustou-se um novo par vazão x pressão para se elevar a velocidade da BFT até que o gerador de indução fornecesse 220 V, a 60 Hz, às cargas. Nessa condição, foram coletados os novos valores de capacitância, tensão de linha, vazão, pressão, rotação, frequência e correntes de linha drenadas pela carga. Em seguida, foram inseridas novas cargas, repetindo-se o processo, até atingir aproximadamente 13 A de corrente fornecida pelo gerador de indução.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cálculo da capacitância necessária para a excitação do gerador a vazio, foi utilizado o método proposto por Lopes (2003).

Dados de placa do motor: 3 cv; 2200 W; 220/380 V; 9,0/5,2 A; h=81,7%; Cos f=0,78.

$$S = \sqrt{3} * V_L * I_L = \sqrt{3} * 220 * 9 = 3425 \text{ [VA]}$$

$$P = S * \cos \phi = 3425 * 0,78 = 2671 \text{ [W]}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{3425^2 * 2671^2} = 2144 \text{ [Var]}$$

Por fase, tem-se que a potência reativa será:

$$Q_f = \frac{2144}{3} = 715 \text{ [Var]}$$

Para ligação em delta, tem-se:

$$V_f = V_L$$

$$I_f = \frac{Q_f}{V_f} = \frac{715}{220} = 3,25 \text{ [A]}$$

Pode-se definir, então, a capacitância por fase:

$$C = \frac{I_f}{2 * \pi * f * V_f} = \frac{3,25}{2 * 3,14 * 60 * 220} = 39 \text{ [\mu F]}$$

Os parâmetros elétricos obtidos no ensaio do gerador de indução alimentando carga resistiva constante, operando isoladamente da rede elétrica, encontram-se no tabela 1. As grandezas elétricas tensão e corrente são valores de linha.

As cargas e a capacitância para magnetização foram inseridas de acordo com a disponibilidade do painel. A velocidade foi medida utilizando-se um tacômetro digital. Media-se a velocidade quando o voltímetro indicava uma tensão de linha de 220 V, a uma frequência mais próxima possível de 60 Hz.

As capacitâncias foram inseridas por meio do chaveamento dos capacitores diretamente no painel. As correntes para as cargas foram medidas utilizando-se um alicate amperímetro.

Tabela 1 – Parâmetros elétricos obtidos no gerador de indução operando isolado da rede elétrica

| Tensão de linha [Volts] | Corrente de linha [Ampères] | Capacitância [Micro Faraday] | Frequência [Herz] | Rotação [rpm] |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------|---------------|
| 220 | 0,00 | 35 | 58 | 1735 |
| 220 | 0,95 | 35 | 58,5 | 1756 |
| 220 | 1,95 | 35 | 59 | 1792 |
| 219 | 2,87 | 40 | 57 | 1732 |
| 219 | 3,89 | 40 | 58 | 1773 |
| 220 | 5,80 | 45 | 57,5 | 1779 |
| 220 | 7,61 | 50 | 58 | 1801 |
| 220 | 8,81 | 55 | 57 | 1792 |
| 220 | 9,57 | 55 | 58 | 1828 |
| 220 | 10,81 | 60 | 59 | 1870 |
| 219 | 12,35 | 65 | 58,5 | 1890 |
| 220 | 13,68 | 70 | 59,5 | 1945 |

A capacitância calculada anteriormente, necessária para a magnetização do gerador sem carga, foi de 39 μ F. Nota-se, no tabela 1, que, experimentalmente, foi necessário utilizar um banco de 35 μ F por fase. O banco de capacitores que foi utilizado no experimento possuía opção de

variar a capacitância somente de 5 em 5 μ F. No entanto, quando inseriu-se um valor de 40 μ F por fase, mantendo-se a velocidade constante, a tensão terminal elevou-se acima de 220 V, o que não era desejado para a alimentação das cargas. Por isso, foi inserida uma capacitância de 35 μ F

por fase e ajustada a velocidade do conjunto até obter-se a tensão terminal de 220 V por fase, a uma frequência próxima de 60 Hz. Outro ponto relevante é que os valores dos capacitores informados pelo fabricante apresentaram variação de + ou – 10% em torno do valor nominal. E, conforme a literatura, o ideal para determinar-se a capacitância para excitação é por meio da curva de magnetização da máquina de indução.

Observou-se também que, com o aumento da carga, para manter a tensão terminal de 220 V e frequência próxima de 60 Hz, foi necessário aumentar a capacitância e também o par vazão x pressão. Ainda por meio dos dados do tabela 1 pode ser observado o comportamento da rotação do conjunto em função do aumento da carga. Observa-se que a frequência depende diretamente da rotação. Tomando-se como base as 3 primeiras linhas da tabela, nota-se que o aumento da carga não justificou um aumento da capacitância para manter a tensão nos terminais do gerador; em contrapartida foi necessário aumentar a velocidade para manter a reatância capacitiva.

4. CONCLUSÕES

Os parâmetros elétricos, tensão, corrente e frequência, mostraram-se equivalentes quando o gerador alimentou diferentes níveis de cargas.

A eficiência do conjunto BFT-GI testado representou uma alternativa tecnicamente viável para instalação em pequenos aproveitamentos de potencial hídrico, quando comparado com turbinas e geradores convencionais.

REFERÊNCIAS

BRAGA, A.V. **Modelagem, Ajuste e Implementação de um Sistema de Controle de Tensão para o Gerador de Indução**. 2002. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

LOPES, R. E. **Grupos geradores de baixa potência acionados por bombas funcionando como turbina**. 2003. 131p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MARTINEZ, C. B. **Micro Centrais Hidrelétricas para o Meio Rural**. 1987

PEREIRA, V. M. **Estudo e modelagem dinâmica de gerador de indução acionado**

por máquina de combustão interna com controle de tensão e de frequência por meio de inversor PWM. 2003. 158 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RESENDE, J. T. **Operação isolada e interligada do gerador de indução**. 1994. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá.

SMITH, N. **Motors as generator for micro-power**. London, 2001.

WILLIAMS, A. **Pumps as turbines: a user's guide**, London, 1995.