

Regulação de Velocidade do Gerador Síncrono num Sistema de Aproveitamento Hidroeléctrico

D.D. Almeida e J.P.S. Catalão

Departamento de Engenharia Electromecânica

Universidade da Beira Interior

Caçada Fonte do Lameiro – Covilhã

Telf: +351 275 329 914; fax: +351 275 329 972;

e-mail: dda83@hotmail.com; catalao@ubi.pt

Resumo — Nesta comunicação é descrito um sistema de aproveitamento hidroeléctrico integrado em válvulas redutoras de pressão (VRP). Para este sistema é analisada a regulação de velocidade do gerador síncrono em três situações distintas: operação do gerador isoladamente, em paralelo com uma rede infinitamente forte e em paralelo com outro gerador semelhante.

1. Introdução

Quando numa rede de distribuição a pressão estática ultrapassa o máximo regulamentar, ou quando nas condutas se pretende reduzir o valor da pressão, nomeadamente por razões de ordem construtiva, qualidade das tubagens, elementos de ligação e acessórios, é necessário a aplicação de dispositivos redutores de pressão. Nesta circunstância é usual recorrer-se à aplicação de VRP.

As VRP do ponto de vista hidráulico são dispositivos que originam uma perda de carga localizada, dissipando através do corpo da válvula a energia contida no fluido. Considerando que grande parte destes dispositivos funcionam de forma ininterrupta, é de todo o interesse o desenvolvimento de um sistema que permita aproveitar a energia dissipada nas válvulas [1].

A *Valcon*, empresa que produz e comercializa a gama de válvulas hidráulicas de controlo *FLUCON200*, está a desenvolver um dispositivo que consiste na integração de uma turbina no interior da VRP, de forma a aproveitar uma parcela da energia dissipada [2].

Do ponto de vista hidráulico, o dispositivo desenvolvido deve garantir as mesmas condições de regulação de pressão das VRP. Na óptica do gerador síncrono utilizado para converter a energia mecânica contida no eixo da turbina, é importante garantir a regulação de velocidade do dispositivo de modo a regular as condições de saída do gerador.

A empresa apresenta ainda um sistema de regulação de velocidade inovador que actua sobre o conjunto obturador da válvula, controlando a abertura/fecho da mesma. Este apresenta uma característica de regulação distinta, relativamente aos mecanismos de governo tipicamente utilizados. Por esta razão a sua aplicabilidade é analisada em detalhe, sendo contempladas três situações distintas: a

operação do gerador isoladamente, em paralelo com uma rede infinitamente forte e em paralelo com outro gerador semelhante. Nesta comunicação é descrita a viabilidade do sistema nas três situações enunciadas.

2. Válvula Redutora de Pressão

A válvula do tipo globo actuada por diafragma é a mais utilizada para fazer regulação de fluido, como acontece nas VRP. Esta é constituída pelo corpo de forma globular, pela tampa e pelo conjunto do diafragma, parte móvel, Fig.1. O conjunto do diafragma, é constituído pela haste que suporta todo o conjunto; obturador, disco macio existente na caixa do obturador; cone de regulação que suporta o obturador; diafragma que separa a pressão de operação na tampa da zona de passagem; batente do diafragma e porca de fixação que fixa todo o conjunto na haste. O conjunto móvel é guiado na parte superior pelo guia da haste, e na parte inferior pelo centro da sede, de forma a permitir deslocamento vertical da haste. O guia da haste e a sede são elementos fixos da válvula. O conjunto obturador (obturador e caixa do obturador), quando suportado pela sede fecha a válvula. Existe ainda uma mola que permite fechar a válvula na ausência de caudal.

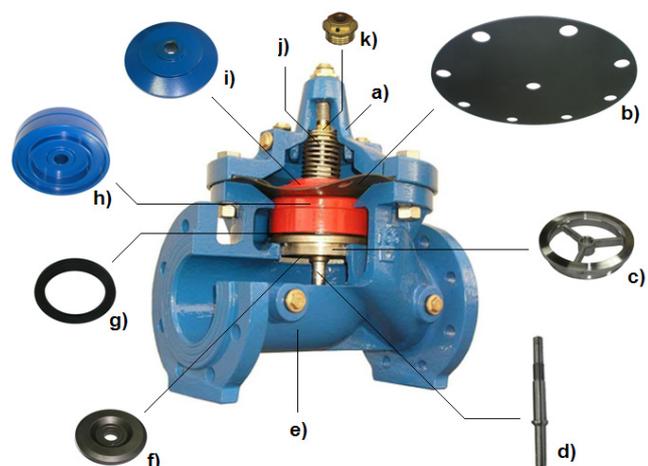


Fig.1. Válvula globo *FLUCON200*: a) tampa, b) diafragma, c) sede, d) haste, e) corpo, f) cone de regulação, g) obturador, h) caixa do obturador, i) batente do diafragma, j) mola, k) guia.

As VRP permitem fazer redução proporcional, se o gradiente de pressão entre montante e jusante da válvula é constante, ou diferencial, se a pressão regulada a jusante não depende das flutuações de pressão a montante. A redução diferencial é ainda constituída pelo sistema piloto, que permite ao utilizador definir a pressão de saída.

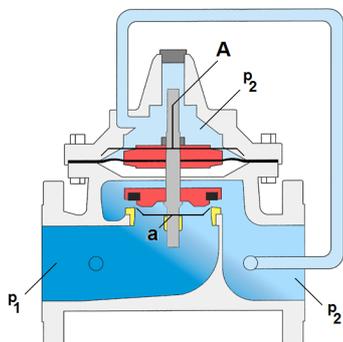


Fig.2. VRP proporcional.

A válvula proporcional é constituída por uma dupla câmara: a superior onde o diafragma actua o controlo da válvula, e a inferior onde o obturador e a sede permitem a abertura/fecho da mesma, Fig.2. A parte jusante da câmara inferior com a pressão p_2 está ligada por um canal à câmara de controlo. A pressão a montante p_1 é aplicada na base da superfície de fecho (conjunto obturador) de área “a”, a pressão p_2 é aplicada no topo da superfície de fecho de área “a”, e no diafragma de área “A”. Quando a água circula na válvula, as forças no eixo da parte móvel estão compensadas, ou seja, as forças de abertura da válvula são iguais às forças de fecho:

$$F_{abertura} = F_{fecho} \Leftrightarrow p_1 a = p_2 a + p_2 A \Leftrightarrow p_2 = \frac{p_1}{R} \quad (1)$$

A pressão p_2 é o resultado da pressão p_1 dividido pela constante R , designada por razão de redução, que representa a relação entre as áreas.

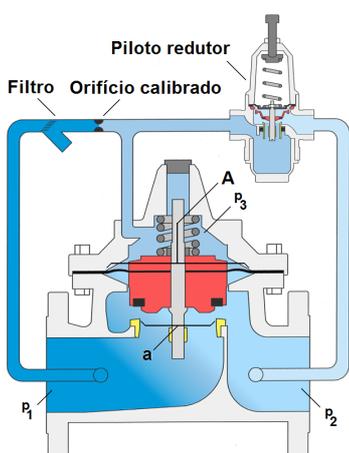


Fig.3. VRP diferencial.

Quando a válvula está fechada, o conjunto obturador encosta na sede, de forma a bloquear a passagem de fluido. Neste caso, o equilíbrio de forças no eixo não se verifica, dado que parte da força é suportada pela sede.

As VRP proporcional e diferencial são muito idênticas. A principal diferença consiste na utilização de um sistema piloto para controlar a pressão no interior da câmara de controlo. Na válvula principal, a diferença prende-se com a existência de uma câmara única e a utilização de uma mola, que permite o fecho da válvula na situação de ausência de caudal, Fig.3.

Apesar das diferenças descritas, o princípio de funcionamento das VRP proporcional também se aplica para estas válvulas. Em sistema modulante, as forças responsáveis pela abertura da válvula são iguais às forças de fecho:

$$F_{abertura} = F_{fecho} \Leftrightarrow p_1 a + p_2 (A - a) = p_3 A + F_{mola} \quad (2)$$

O sistema piloto é constituído pelo filtro, um orifício calibrado que reduz drasticamente o valor da pressão de p_1 para p_3 , e o piloto redutor que abre ou fecha em função da pressão a jusante. O sistema piloto é colocado em paralelo com a válvula principal de acordo com a Fig.3. Existe ainda uma ligação desde a câmara de controlo da válvula, até ao canal que liga o orifício calibrado ao piloto redutor.

O fluido ou circula através do piloto redutor na direcção de jusante, ou circula no canal que dá acesso à câmara de controlo, contribuindo para a sua pressurização. É ainda possível haver circulação desde a câmara de controlo até ao piloto redutor, despressurizando a câmara.

O piloto redutor é uma válvula, de menor dimensão, sensível às oscilações de pressão a jusante. Quando a pressão aumenta, o piloto redutor fecha ligeiramente, assim a circulação de fluido dá-se preferencialmente pelo canal da câmara de controlo. Se a oscilação de pressão for negativa, o piloto abre ligeiramente, facilitando a passagem de fluido através dele. Assim, o fluido circula da câmara de controlo para jusante, passando pelo piloto redutor, dando-se a despressurização da câmara.

Quando o piloto redutor permanece fechado o fluido no sistema piloto permanece estático; nesta situação particular, o orifício calibrado não origina perdas, assim a pressão a montante é transmitida para a câmara de controlo, $p_1 = p_3$. Esta é uma característica importante que garante a perfeita vedação da válvula principal, já que a pressão na câmara de controlo atinge o valor máximo possível.

O sistema de regulação de velocidade proposto pela empresa consiste na substituição do piloto redutor por um piloto eléctrico que é regulado por um *encoder* que envia um sinal digital em função da velocidade do eixo da turbina. Por exemplo, quando o *encoder* mede uma velocidade de rotação superior à velocidade de referência do piloto eléctrico, este fecha, impossibilitando a passagem de fluido através dele. Assim, a câmara de controlo pressuriza e consequentemente a válvula fecha ligeiramente, reduzindo a velocidade de rotação do eixo. O sistema permite fixar a velocidade de rotação da turbina num valor constante.

A utilização do piloto redutor e do regulador de velocidade é incompatível, i.e., os sistemas não podem ser utilizados

em simultâneo, dado que ambos actuam sobre o mesmo conjunto obturador para controlar a pressão a montante ou a velocidade de rotação da turbina.

3. Controlo do Gerador Síncrono

O gerador síncrono pode ser controlado por meio de duas forças, a corrente de excitação I_{exc} e o binário mecânico M_{mec} . Variando uma destas forças, variam as quatro grandezas: potência activa P , potência reactiva Q , tensão nos terminais V_a e frequência f [3-9].

Genericamente, o gerador síncrono pode ser representado por um sistema de duas entradas e quatro saídas. Do ponto de vista do sistema, o ideal seria ter o número de entradas igual ao número de saídas, para que cada entrada controlasse uma e apenas uma das saídas, não influenciando as restantes. No gerador síncrono esse controlo não é possível, acontece que variando uma das entradas as quatro saídas são afectadas, ou seja, o controlo é iterativo. As entradas podem afectar as saídas em diferentes proporções, dependendo do tamanho da estrutura (rede) e do sistema (gerador).

As melhores condições de não-iteração ocorrem quando o tamanho da estrutura é muito superior ao sistema, ou seja a rede é infinitamente forte. Este tipo de rede tem uma grande inércia relativamente ao gerador, pelo que a variação da entrada relativa ao momento M_{mec} não produz uma variação significativa na velocidade do sistema, ou seja na frequência f . Por outro lado, a corrente de excitação I_{exc} não afecta a tensão nos terminais V_a .

O sistema referido anteriormente fica reduzido a duas entradas e duas saídas. As grandezas f e V_a são impostas, estando fora do controlo das entradas do sistema. As condições de não-iteração, são praticamente satisfeitas, a corrente de excitação I_{exc} , afecta a potência reactiva Q , enquanto o momento M_{mec} afecta a potência activa P . Note-se que as relações entre I_{exc} e P são desprezáveis, o mesmo sucede entre M_{mec} e Q .

Outra situação extrema diz respeito à utilização de um único gerador a alimentar uma carga. Neste caso, a potência activa e reactiva fornecidas são impostas pela carga, sendo P e Q constantes. As duas entradas do sistema I_{exc} e M_{mec} , controlam as duas saídas V_a e f , respectivamente. É necessário ter em conta que, não havendo mecanismos de governo a controlar o sistema, uma variação da carga altera todas as grandezas, excepto I_{exc} que sem regulação de tensão é constante.

Considerando que a carga aplicada aos terminais do gerador funciona com uma dada frequência normalizada, é importante garantir o valor da grandeza constante. Para permitir que a frequência seja constante, é essencial a utilização de um regulador de velocidade.

Na situação em que dois geradores semelhantes estão ligados em paralelo, a potência P_{total} e Q_{total} solicitada pela carga, corresponde à potência total fornecida pelo par de geradores:

$$P_{total} = P_{carga} = P_{ger1} + P_{ger2} \quad (3)$$

$$Q_{total} = Q_{carga} = Q_{ger1} + Q_{ger2} \quad (4)$$

Esta característica é análoga à operação do gerador isoladamente; a única diferença consiste no facto de, quando existe um único gerador, toda a potência solicitada pela carga é fornecida por este.

Havendo mais do que um gerador a alimentar a mesma carga, surge uma questão importante relacionada com o controlo de cada gerador, para definir qual a parcela de energia que cada um fornece à carga. Por outro lado, como a rede constituída pelos dois geradores não é infinitamente forte, qualquer variação numa das máquinas é sentida pela outra; neste sentido, a análise torna-se mais complexa relativamente aos casos anteriores.

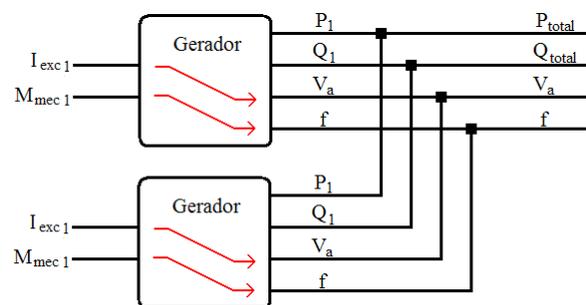


Fig.4. Ligação de dois geradores semelhantes em paralelo.

Analisando o esquema da Fig.4, as saídas P_{total} e Q_{total} são impostas pela carga aplicada, as entradas I_{exc1} e I_{exc2} controlam V_a , as entradas M_{mec1} e M_{mec2} controlam a frequência f . Em relação às potências reactivas Q_1 e Q_2 , estas podem variar em função de I_{exc1} e I_{exc2} , esta é uma condição que requer o estudo da regulação de tensão utilizada. Da mesma forma, as potências activas P_{ger1} e P_{ger2} , podem variar em função de M_{mec1} e M_{mec2} , condição que depende da regulação de velocidade.

4. Regulação de Velocidade

Quando uma carga é ligada ao gerador, suposto em vazio, com tensão e velocidade nominal, a corrente no induzido I_a , dá lugar a um binário resistente M_{res} , no eixo da máquina síncrona. Este tem sentido oposto ao do movimento, pelo que, tende a desacelerar o rotor. Dado que a frequência é proporcional à velocidade do rotor, a mesma vai baixar. Este efeito é corrigido aumentando o binário motor da máquina primária. Ao aumento do binário motor corresponde um aumento da potência mecânica.

Em termos energéticos, a potência activa fornecida pelo gerador, igual à potência activa requerida pela carga, é assegurada pela máquina primária que aumenta o binário mecânico desenvolvido para compensar o aumento do binário resistente, M_{res} . Este desiderato é na prática assegurado por reguladores de velocidade. Regulando a velocidade é possível controlar a potencia mecânica P_{mec}

que é necessário desenvolver para compensar o binário resistente M_{res} .

Os reguladores de velocidade actuam de modo a manter a velocidade do dispositivo praticamente constante e linear, independentemente da potência fornecida pelo gerador. Na verdade, os reguladores de velocidade não fixam o valor da velocidade, estes permitem um pequeno decréscimo da velocidade do dispositivo à medida que aumenta a potência fornecida, como se verifica na Fig.5.

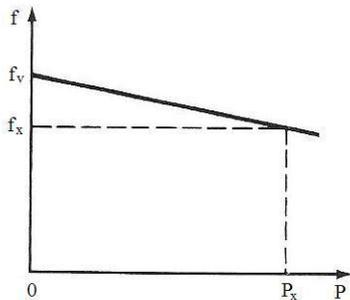


Fig.5. Controlo da frequência-potência activa, feita através do regulador de velocidade convencional.

O declive da recta (SD) é de aproximadamente 2 a 4%, podendo ser determinado pela equação:

$$SD = \frac{f_v - f_x}{f_x} \cdot 100\% \quad (5)$$

A frequência f_v , representa o valor da grandeza em vazio, f_x é a frequência num ponto genérico x. Os reguladores de velocidade, através de um *set point*, permitem ajustar a frequência f_v .

5. Regulação de Velocidade em VRP

O sistema de regulação de velocidade proposto pela empresa é uma excepção do modelo descrito anteriormente, dado que as características de regulação são absolutamente lineares. Ou seja, a velocidade do sistema é mantida constante independentemente da potência solicitada pela carga, a inclinação é de 0%. É importante nestas condições analisar as diferenças de comportamento do sistema.

Na situação em que o gerador opera isoladamente, a inclinação característica do regulador tipo não apresenta qualquer vantagem relativamente ao regulador desenvolvido pela empresa. Apesar de a inclinação do regulador tipo não afectar significativamente a frequência ao ponto de poder danificar ou alterar o rendimento das cargas, o regulador desenvolvido permite uma linearidade absoluta da grandeza. Neste sentido, esta regulação de velocidade é vantajosa relativamente à anterior.

Estando o gerador ligado em paralelo com uma rede infinitamente forte, a tensão aos terminais V_a e a frequência f são constantes, independentemente da solicitação de potência feita pela carga, ou da potência gerada pela máquina primária. Tendo em conta que o

sistema de produção de energia em estudo é muito pequeno, relativamente a grandes centrais que têm maior influência no controlo dos valores de frequência e tensão da rede, não se justifica a utilização de mecanismos de governo, sejam eles de regulação de velocidade ou tensão.

Na operação entre dois geradores semelhantes, para compreender a estabilidade do sistema constituído pelo regulador de velocidade da empresa, analise-se primeiramente o esquema da Fig.6. Este representa duas válvulas reductoras *FLUCON200* com turbina integrada, que constituem as máquinas primárias MP1 e MP2, ligadas aos geradores 1 e 2 conectados a uma carga comum. Os reguladores de velocidade são designados pelas siglas RV1 e RV2.

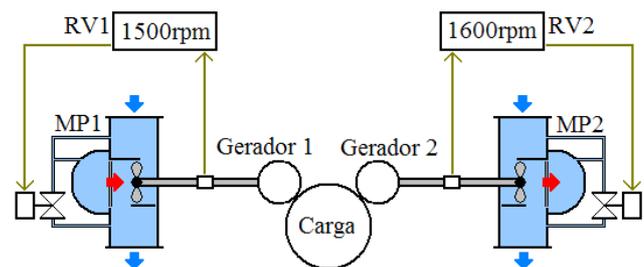


Fig.6. Regulação de velocidade em VRP.

Inicialmente considere-se que, apenas o gerador 1 está conectado à carga e que RV1 está regulado para manter o sistema com velocidade de rotação de 1500rpm. Posteriormente, é sincronizado a este dispositivo o gerador 2, que tendo em conta as condições necessárias para o sincronismo tem que ter a mesma velocidade, $RV2=1500rpm$. Nesta situação, o gerador 2 apenas flutua na rede, não fornecendo para já qualquer potência à carga, $P_{ger2}=0$ e $P_{ger1}=P_{carga}$.

Para que o gerador 2 forneça potência à carga, é necessário aumentar o *set point* do regulador RV2, por exemplo para 1600rpm. Situação em que a válvula 2 abre, de modo a aumentar o binário fornecido e assim impor a velocidade estipulada. Por outro lado, RV1 sente a velocidade do sistema aumentar, relativamente ao seu valor de referência. Assim, este actua no sentido de fechar a válvula 1, para reduzir a velocidade do sistema.

Conclui-se que, sendo a frequência de todo o sistema uma só, é impossível satisfazer as condições de ambos os reguladores de velocidade. sempre que os valores de referência sejam distintos. O sistema global é instável, porque se a velocidade do sistema 1 e 2 não for exactamente a mesma, uma das máquinas primárias tende a ser inutilizada pela outra.

Com base no raciocínio anteriormente descrito, a válvula 2 abre cada vez mais, enquanto a válvula 1 fecha. Tendo em conta a maneira como o sistema converge, veja-se qual a situação final do mesmo. São três as situações possíveis, seguindo o exemplo, uma hipótese é no final a válvula 2 estar completamente aberta e a válvula 1 não fechar totalmente. Neste caso o sistema funciona com velocidade de 1500rpm, velocidade imposta pelo regulador RV1. Outra hipótese, é a válvula 1 estar completamente fechada e a válvula 2 não abrir totalmente, sendo a velocidade de

1600rpm imposta por RV2. Na terceira e última situação, as duas válvulas estão na situação limite e oposta. No exemplo, estando a válvula 1 completamente fechada, se a válvula 2 não tiver capacidade para impor a velocidade de 1600rpm, esta abre completamente sem alcançar o valor de referência. Ou então, estando a válvula 2 completamente aberta, se a válvula 1 não tiver capacidade para impor a velocidade de 1500rpm, esta fecha completamente. Em qualquer dos casos, o estado final corresponde à terceira situação. No final, a velocidade do sistema será um valor contido entre 1500 e 1600rpm.

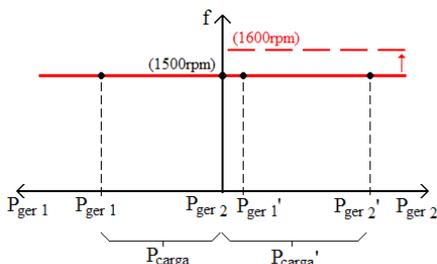


Fig. 7. O gerador 2 abre totalmente e o 1 fecha parcialmente, velocidade final 1500rpm.

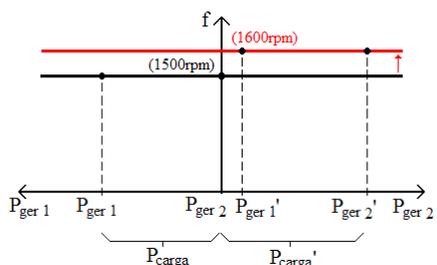


Fig. 8. O gerador 1 fecha totalmente e o 2 abre parcialmente, velocidade final 1600rpm.

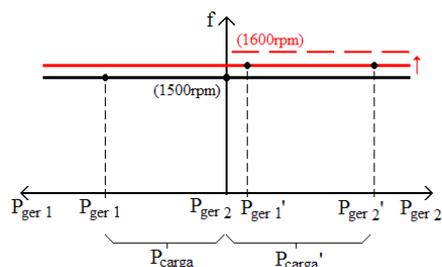


Fig. 9. O gerador 2 abre totalmente e o 1 fecha totalmente, velocidade final entre 1500rpm e 1600rpm.

De acordo com o exemplo, as características frequência-potência activa correspondentes a estas situações, são as representadas nas Fig. 7, 8 e 9, respectivamente. Genericamente, a alteração de RV2 tende a impor a velocidade de 1600rpm ao sistema, enquanto o gerador 1 fica total ou parcialmente inutilizado. Assim, a potência requerida pela carga é fornecida pelo gerador 2. Do ponto de vista do gerador 2, o gerador 1 é mais uma carga que este tem que suportar para manter a velocidade de 1600rpm; assim, o gerador 2 tem que gerar maior binário relativamente à situação inicial.

Na Fig. 7 o gerador 2 abre totalmente e o gerador 1 fecha parcialmente, situação a velocidade final imposta é 1500rpm. Note-se que, embora a velocidade seja imposta por RV1, é o gerador 2 quem fornece energia à carga. Na Fig. 8 o gerador 2 abre parcialmente e o gerador 1 fecha totalmente, a velocidade final imposta é 1600rpm. Na Fig. 9 um dos geradores abre e outro fecha totalmente, sendo a velocidade final um valor intermédio ao estipulado pelos dois reguladores de velocidade. Conclui-se que, depois de sincronizados dois dispositivos de geração de energia, o sistema no qual se aumenta o *set point* do regulador de velocidade, será aquele que passa a fornecer energia à carga, independentemente de qual a velocidade final do sistema.

6. Conclusões

Relativamente ao controlo do binário mecânico, o sistema proposto pela empresa apresenta vantagens. Além de ser economicamente viável, permite uma regulação linear mantendo constante o valor da velocidade de rotação da turbina. Note-se que, os reguladores de velocidade tradicionais apresentam uma característica igualmente linear, no entanto com um declive de 2 a 4%, de modo que ao aumento da potência corresponde uma ligeira diminuição da velocidade de rotação. Na operação do gerador em paralelo com uma rede infinitamente forte, a tensão aos terminais e a frequência são impostos pela própria rede. Neste caso particular, a corrente de excitação e o binário mecânico actuam sobre a potência reactiva e activa fornecidas. Nesta situação não se justifica o controlo destes parâmetros, pois a ordem de grandeza das potências é muito pequena relativamente às características da rede. Esta é a única situação em que é possível conciliar a redução de pressão diferencial e o controlo da velocidade da turbina. O controlo da operação entre geradores semelhantes é tradicionalmente conseguido através de mecanismos de governo com declives característicos. Nos reguladores de velocidade, é este declive que permite ajustar o funcionamento entre o par de geradores. Com base na análise feita conclui-se que não é possível substituir a solução convencional pelo regulador de velocidade desenvolvido pela empresa, caracterizado por um declive de 0%. Este apresenta instabilidade, no sentido em que as válvulas tendem para situações limite e opostas. Pelas razões descritas, o dispositivo desenvolvido pela empresa integrado com o sistema piloto para fazer redução de pressão diferencial é adequado para ser aplicado em paralelo com uma rede infinitamente forte. O sistema permite fazer o aproveitamento energético em válvulas redutoras de pressão, sendo a energia produzida posteriormente vendida à rede pública.

Referências

- [1] Maria Helena A. G. Soares José G. Soares Amaro Maria Helena Escudeiro de Sousa. *Manual de Saneamento Básico*. Direcção Geral de Recursos Naturais, madeira & madeira edição, 1991.

- [2] *Catálogo Valcon*. Empresa de Válvulas Hidráulicas de Controlo, 2008/2009.
- [3] Zia A. Yamayee Juan L. Bala. *Electromechanical Energy Devices and Power Systems*. John Wiley & Sons, 1994.
- [4] Sen Paresh Chandra. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, 1986.
- [5] Stephen J. Chapman. *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, 2 edição, 1985.
- [6] Irving I. Kosow. *Máquinas Eléctricas e Transformadores*. Editora Globo, 8 edição, 1972.
- [7] José Pedro Sucena Paiva. *Redes de Energia Eléctrica: Uma Análise Sistemática*. IST Press, 2ª edição, 2007.
- [8] M. Kostenko L. Piotrovski. *Máquinas Eléctricas – Volume II*. Edição Lopes da Silva, 1979.
- [9] Olle I. Elgerd. *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Eléctrica*. McGraw-Hill, 1976.