



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 02 7616
Tópico: Aplicação de Novas Tecnologias

REFINAMENTO NA QUALIDADE DA FREQUÊNCIA EM SISTEMAS ISOLADOS, ATRAVÉS DE UM ALÍVIO DE CARGA CONTROLADO

CÉSAR AUGUSTO PORTOLANN

JORGE MÁRIO CAMPAGNOLO

CEFET-PR

UFSC

RESUMO

Em áreas elétricas isoladas, as frequências mínima e residual costumam ter grandes magnitudes, caracterizando uma frequência de pouca qualidade para o sistema. É apresentada uma técnica que pode ser usada para restringir estas grandezas em melhores níveis. O seu princípio é produzir um alívio de carga controlado, nos eventos de desbalanço de potência, onde a reserva girante primária, disponível para os reguladores de velocidade, é substituída por uma potência estática de carga, com constante de tempo desprezível. Na ocorrência de subfrequências, faz-se uma redução automática, instantânea e distribuída em cargas pré-estabelecidas, conduzindo a menores desvios de frequência.

PALAVRAS-CHAVE

Controle de carga-frequência, frequência mínima, frequência residual, fator de amortecimento, controle direto de carga.

1.0 INTRODUÇÃO

É bem conhecido que em um sistema elétrico, a perda de uma unidade geradora, ou um degrau de carga provocam desvios na frequência, como pode ser observado na Figura 1. Em pouco mais de 1s, período em que não há resposta dos reguladores de velocidade (RV), a frequência cai a uma taxa muito grande e atinge um nível mínimo (frequência mínima). Na sequência, as saídas das turbinas respondem aos controles dos

RV, e a frequência se recupera a um valor estável, mas em um nível reduzido (frequência residual).

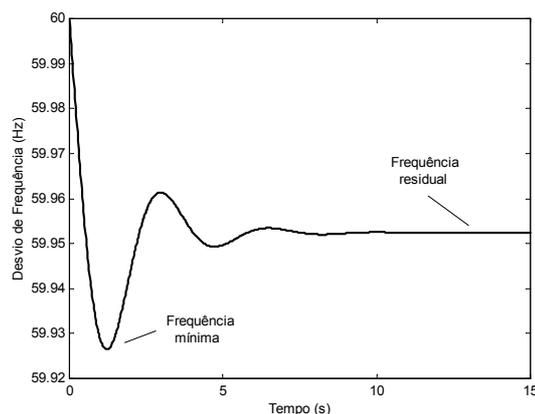


Fig. 1 Frequências mínima e residual.

A frequência mínima não deve ser admitida, porque geralmente conduz ao funcionamento inadequado de equipamentos auxiliares em centrais elétricas, podendo levar à saída forçada de unidades geradoras, e até mesmo ao blecaute do sistema. Por outro lado, a frequência residual sustentada, aumenta o estresse vibracional nas pás das turbinas, e isso causa redução da sua vida útil. Assim, desvios grandes na frequência devem ser evitados. Essas grandezas podem ser consideradas como bons indicadores da qualidade da frequência.

A limitação das excursões destas variáveis é feita (i) com base na reserva girante (SR) primária, através dos RV. Algumas vezes é considerado (ii) o alívio natural de carga, e como

César A. Portolann

Dep^{to} Eng. Elétrica – UFSC - CTC – LABSPOT - Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC
Fone: (48)331 9593 - E-mail: portola@labspot.ufsc.br

um último recurso (iii) o desligamento de alimentadores em subestações. Isto funciona bem em sistemas interligados, porém, a despeito destes recursos, em sistemas isolados os desvios são grandes. Isto ocorre porque nas pequenas e médias áreas de controle (estas últimas podem ter até mais de 10000 MVA), o momento de inércia é baixo e não se dispõe de reservas girantes consideráveis. A flutuação acentuada de frequência inibe a utilização de cargas críticas e sensíveis à frequência, dentre outras implicações. São exemplos de áreas isoladas a Irlanda, Israel, Taiwan, Chipre e sistemas da Amazônia e América Central. O sistema da China tem capacidade grande e é interligado, mas ainda assim, sofre com problemas de frequência.

Assim, é discutida uma estratégia que visa reduzir as frequências mínima e residual, com a vantagem adicional de reduzir a necessidade de SR primária.

2.0 CONTROLE DA FREQUÊNCIA ATRAVÉS DA REDUÇÃO CONTROLADA DE CARGA

2.1 Generalidades

A metodologia proposta envolve a redução de potência em pequenas cargas, de forma muito distribuída, com atuadores situados nos seus terminais e não em alimentadores. Assim, para melhor retratar o envolvimento de cada ponto de carga no esquema, faz-se necessário o uso de um parâmetro que represente com boa fidelidade o comportamento da carga controlada (LC) para variações de frequência. Esse parâmetro é a característica de carga-frequência ajustável, que se diferencia da característica natural, por ser controlada entre amplos limites. O parâmetro pode ser chamado também de fator de amortecimento artificial, que será denominado D_a .

O controle é efetuado com variações apropriadas de tensão sobre cada carga, onde as resistivas sofrem uma redução parcial, e as compostas têm redução total na tensão (desligamento). A carga controlada pode ser definida como a redução intencional, quando a frequência é variada:

$$LC = \sum_{i \in C} \Delta P_i \quad p/ \quad \Delta \omega = \omega_0 - \omega(t) \quad (1)$$

onde ΔP_i = variação na carga i ; $\Delta \omega$ = desvio na frequência; ω_0 = freq. de referência; $\omega(t)$ = freq.; e C = conjunto de cargas controláveis.

Procura-se reduzir discretamente pouca carga de muitos consumidores contratados, para equilibrar variações em torno da frequência nominal, como pode ser visto na Figura 2.

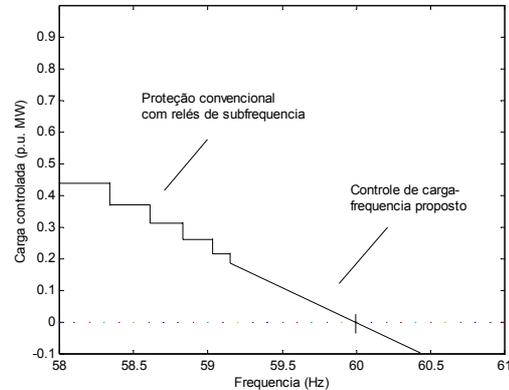


Fig. 2 Aspecto do controle proposto.

É oportuno fazer uma breve revisão sobre a relação entre carga e frequência.

2.2 Relação entre carga e frequência

A relação entre ω e a variação de carga pode ser descrita pelas equações que seguem.

$$\omega = \frac{1}{2H_s} \int P_a dt \quad (2)$$

$$P_a = \sum_{i \in G} P_{mi} - \sum_{i \in L} P_{oi} - \sum_{i \in C} LC_i - \sum_{i \in M} P_{lossi} \quad (3)$$

onde, P_a = potência acelerante do sistema; H_s = constante de inércia total; P_{mi} = potência mecânica da unidade i ; P_{oi} = carga fixa (não faz parte do controle); LC_i = carga controlada i ; P_{loss} = perda ativa nas linhas de transm.; G = conjunto de geradores; L = conjunto de cargas fixas; M = conjunto de L.T. e t = variável tempo (s).

A regulação de frequência é regida pela seguinte expressão de balanço de potência, a qual evidencia a ação de LC. No caso considera-se a perda da unidade geradora j .

$$\sum_{i \in G} SR_i - SR_j - \sum_{i \in C} LC_i + LS \geq P_j, \quad j \in G \quad (4)$$

onde, Sr_i = reserva girante da unidade i ; LS = montante de desligamento de carga (proteção convencional) e P_j = perda da j th unidade.

Fica claro da equação anterior que a redução controlada de carga, o desligamento de cargas e a reserva girante são permutáveis, e um aumento de LC pode, portanto, ser usado para

reduzir a SR, reduzir um possível LS ou ainda ambos. A seção seguinte mostra que o fator de amortecimento artificial D_a resulta de forma natural, quando se considera a sensibilidade da frequência com a tensão.

2.3 Dedução do fator de amortecimento artificial

Como foi dito, a redução controlada de carga, em última instância é efetuada com variações na tensão terminal daquelas destinadas para regulação. O fator de amortecimento artificial é estabelecido nestes termos. Da representação matricial de cargas, deduz-se uma nova expressão para o fator de amortecimento do sistema (fator D), que mostra como a carga se reduz com uma correspondente redução na frequência. Variações ΔP e ΔQ nas cargas ativa e reativa, são causadas por variações ΔF e $\Delta|V|$, na frequência e na tensão. Para a potência ativa tem-se:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial F} \Delta F + \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V \quad (5)$$

P/ obter-se o fator D em pu:

$$\frac{\Delta P}{P_o} = \frac{\frac{\partial P}{\partial F}}{\frac{P_o}{F_o}} \frac{\Delta F}{F_o} + \frac{\frac{\partial P}{\partial V}}{\frac{P_o}{V_o}} \frac{\Delta V}{V_o} \quad (6)$$

Dividindo a expressão por $\frac{\Delta F}{F_o}$:

$$D = D_f + D_v \frac{\Delta V}{\Delta F} \quad (7)$$

Verifica-se que o fator D é dependente tanto da frequência (D_f) como da tensão ($D_v \frac{\Delta V}{\Delta F}$). O termo D_f relacionado com a frequência é o fator de redução de carga convencional, o elemento D_v é o coeficiente de variação natural da tensão com a carga, e ($D_v \frac{\Delta V}{\Delta F}$) é o fator que representa a variação da carga através da tensão. Ele pode se comportar como uma "entrada" para controle, e assim ser manipulado convenientemente, possibilitando que o seu efeito seja tão influente quanto se queira. Esse termo é o fator de amortecimento artificial D_a .

A potência elétrica é influenciada pela frequência, e isto depende das características intrínsecas da carga e, conforme o novo termo

obtido, também da tensão aplicada sobre as cargas. Esta dependência é ilustrada como:

$$\Delta P_e = \Delta P_o + (D_f + D_a) \Delta \omega \quad (8)$$

onde, ΔP_e = variação da potência elétrica e ΔP_o = variação na carga do sistema na frequência de referência.

Assim, a expressão que determina de modo geral, como a carga será controlada, com base no desvio de frequência que segue uma sobrecarga será:

$$\Delta LC = D_a \Delta \omega \quad (9)$$

2.4 Princípio de ação de D_a .

A redução natural de carga com a redução da frequência é um fenômeno conhecido, função das características intrínsecas da carga. Esse alívio é desejável, porque ajuda limitar os desvios de frequência.

O percentual de potência que se reduz naturalmente, para o mesmo percentual de redução da frequência, é denominado fator de amortecimento do sistema (D_f). Com base neste fenômeno, propõe-se gerar um fator de amortecimento de forma artificial (D_a), que tenha propriedades semelhantes às de D_f , mas com um raio de ação bem mais amplo e controlado. A Figura 3 tem o objetivo de mostrar a ação desse fator para reduzir os desvios de frequência.

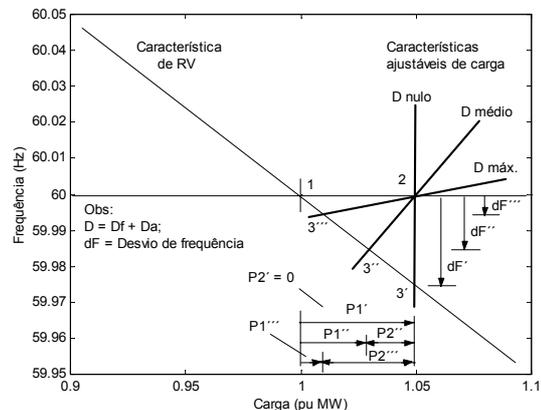


Fig. 3 Fator D ajustável.

Considera-se a operação do sistema representada pelo ponto 1. Se não houver redução de carga com a frequência ($D = D_f = D_a = 0$), ocorrendo uma sobrecarga de, por exemplo, 5% o ponto de operação em regime permanente passará a ser o ponto 3', caracterizado por uma frequência de $(60 - dF')$. Considerando agora o fator controlado, a característica de carga pode variar de modo intencional pré-ajustada, e o

ponto 3 se move sobre a característica do regulador de velocidade (RV) desde 3' até 3''' no caso, passando por valores intermediários, conforme a carga controlada requerida.

Em resumo, para o aumento de 0,05 pu MW, haverá diminuição da freqüência, e o seu desvio poderá ser controlado desde dF' até dF''' . Observando a Figura, verifica-se que quanto maior for $(D = D_f + D_a)$, expressado graficamente através da reta que gira no sentido horário sobre o ponto 2, maior será a carga reduzida com a freqüência (P_2), e conseqüentemente menor será o desvio dF .

A ação sobre a freqüência mínima tem por base o fato de que conforme se aumenta o bloqueio dos RV, as constantes de RV e turbinas perdem o seu efeito, e o modelo do controle tende a ser de primeira ordem, reduzindo a componente senoidal.

4.0 APLICAÇÃO A UM SISTEMA DE ENERGIA

Os sistemas equivalentes podem ser usados com confiança na análise do comportamento da freqüência para grandes redes, e naturalmente para áreas isoladas. Assim, os resultados são extraídos de um sistema teste simples [5], mostrado abaixo, juntamente com dados de geração. Admite-se que as máquinas oscilem de modo coerente. São avaliados os desvios de freqüência e como resultado secundário, a redução da SR.

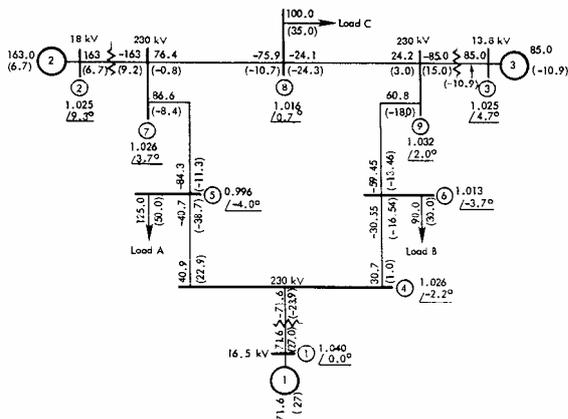


Fig. 4 Sistema elétrico 9 barras.

Tabela 1 Dados da Geração

Máquina	1	2	3
MVA máx.	247,5	192,0	128,0
kV	16,5	18,0	13,8
Fator de Potência	1,0	0,85	0,85
Tipo	Hidro	Vapor	Vapor
Rpm	180	3600	3600
E. cinética (MW.s)	2364	640	301

Dados relevantes:

- Geração ativa disponível: 519,5 MW;
- Carga total máxima - perdas: 512 MW;
- Carga máxima nas barras: barra 5: 203,18 MW; barra 6: 146,29 MW e barra 8: 162,54 MW;
- Base = 315 MW (carregamento); $D_f \cong 1\%$;
- Constante de tempo das turbinas: $T_t \cong 1,25$ s;
- Const. de tempo dos RV: $T_g = 0,2$ s;
- Const. de Inércia do sistema: $H_s = 1,884$ s;
- Sobrecargas: 315 KW p/ distúrbio normal e 3,15 MW p/ contingência.

A geração total supre uma carga suposta constante e invariável. Três casos são tratados; o caso 1 refere-se ao controle convencional com RV, no caso 2 cada tipo de controle é responsável por uma parte da regulação e, finalmente no caso 3, a regulação é feita praticamente só com controle de carga.

4.1 Resposta a um distúrbio normal

Para pequenas perturbações, o desempenho é avaliado com a aplicação de um degrau de carga de 0,1% (base da carga – 315 MW) em uma barra qualquer. Pode-se ver na Figura 5 e Tabela 2, que a freqüência mínima (F_{min}) é melhor para os casos 2 e 3, onde se aplica o método proposto, do que para o caso 1, em que o controle é feito de modo convencional.

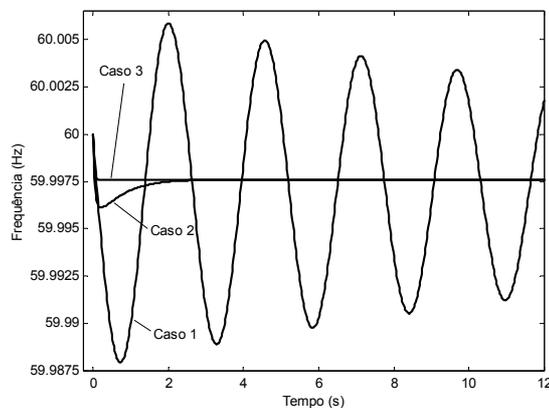


Fig. 5 Controle primário p/ distúrbio normal.

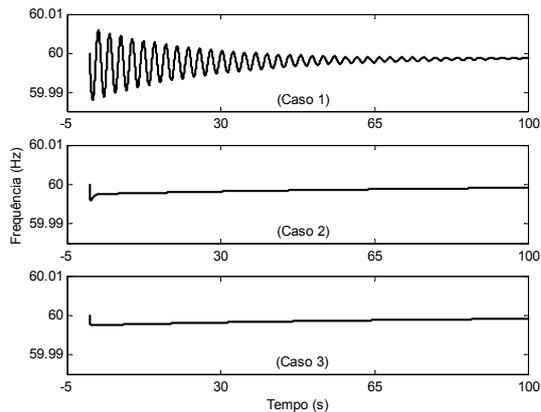


Fig. 6 Controle secundário p/ distúrbio normal.

Tabela 2 Frequências mínima e residual.

Caso	R	D	F_{\min} (Hz)	F_{res} (Hz)	dF (mHz)*
1	0,05	1,00	59,988	59,9971	2,857
2	0,10	15,0	59,996	59,9976	2,400
3	10,0	24,9	59,997	59,9976	2,400

* desvio residual.

Obs: R e D dados em valores %.

Também, a frequência residual (F_{res}) resultou com valores mais desejáveis. O controle primário no caso 1 levou aproximadamente 30 vezes mais tempo para atingir o regime permanente, do que nos casos 2 e 3.

Como complemento, o aspecto do controle suplementar é mostrado na Figura 6. A natureza do controle proposto conduz a respostas superamortecidas, que são desejáveis, e geralmente se associam com a boa estabilidade. Isso permite aumentar o ganho do variador de velocidade. Para o caso 1 ele foi de 0,3 e para os outros se utilizou 1,5.

4.1.1 Divisão de carga entre barras (Caso 3)

Para a barra 5, $\frac{1}{D_5} = 0,02008$. Isto

significa, pela própria definição de D, que este é o valor correspondente à queda de frequência entre a operação com frequência nominal f_0 , e a operação com uma frequência inferior (escolhida para a máxima redução de carga). As retas dos amortecimentos artificiais (ou características ajustáveis) referentes às três barras, ao amortecimento natural, à pequena contribuição dos RV, e característica resultante são colocadas no mesmo gráfico, na Figura 7, para o caso 3 estudado, relacionado com distúrbios normais de carga.

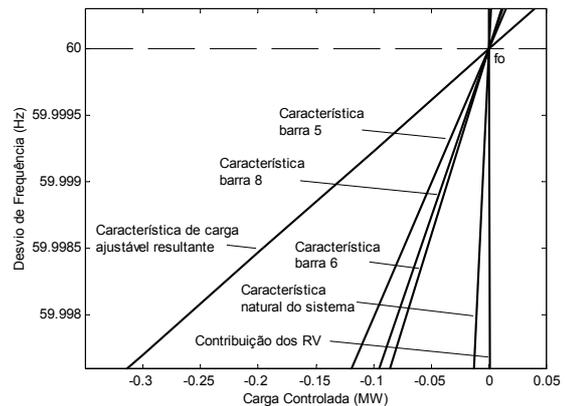


Fig. 7 Características artificiais de carga

Para este caso, os D_a individuais das barras 5, 6 e 8, em percentuais foram respectivamente 9,484; 6,828 e 7,587.

A seguinte expressão fornece os alívios de carga.

$$\Delta P_c = D \Delta \omega_{r.p.} (MVA_{\text{base}} / f_{\text{base}}) \quad (10)$$

Então, cada barra deve reduzir carga da seguinte forma: $\Delta P_5 = 119,52$ KW, $\Delta P_6 = 86,05$ KW e $\Delta P_8 = 95,62$ KW. Estes valores e também aqueles decorrentes da redução natural e ação dos RV, podem ser observados na escala inferior da Figura. A soma de todos eles devem ser igual ao degrau de carga de 315 KW.

Para ilustração, se o conjunto C reúne refrigeradores ($P \approx 90$ W), freezers ($P \approx 130$ W), balcões frigoríficos ($P \approx 250$ W) e câmaras frigoríficas ($P \approx 400$ W), então, para compensar a sobrecarga seria necessário desligar estas cargas, por aproximadamente 1,5 minuto (tempo médio para o controle suplementar), da seguinte forma, para a barra 5: 332 refrigeradores, 230 freezers, 120 balcões frigoríficos e 75 câmaras.

4.2 Resposta a uma contingência

Para um distúrbio de grandes proporções, a redução de carga obviamente deverá ser maior para evitar excursões indesejadas de frequência. Aplica-se um degrau de carga de 1%, e os desvios de frequência para regulação primária e secundária, também são avaliados. As Figuras 8 e 9 e a Tabela 3 mostram os resultados para os casos considerados. Para o caso 3, as reduções de carga nas barras seriam respectivamente $\Delta P_5 = 1192,7$ KW, $\Delta P_6 = 858,7$ KW e $\Delta P_8 = 954,2$ KW. O Degrau de carga é completado com 131,3 KW da redução natural e 13,3 KW dos RV.

Dessa forma, verifica-se que o esquema contribui para fazer frente a contingências, ou

pelo menos algumas delas, substituindo a reserva girante primária, e podendo também, se for o caso, reduzir os desligamentos de alimentadores que são usados como proteção de retaguarda.

As frequências mínima e residual também foram controladas. Para os casos 2 e 3, os desvios são sempre menores do que no caso 1. Quanto maior a contingência, mais tempo é requerido para o controle suplementar, para os casos 2 e 3, visto que a característica de RV é bastante acentuada.

A Tabela 4 mostra os montantes de SR economizada. Para o caso 1, a redução natural de carga é de 150 KW, e o restante do controle primário é feito com SR. Para o caso 2, houve atuação tanto dos RV como dos controladores de carga, onde 1706,2 KW de SR foi dispensada. Finalmente para o caso 3, a reserva necessária foi desprezível, e o controle de carga se responsabilizou pela grande parte da regulação, liberando 3005,6 KW para uso na demanda.

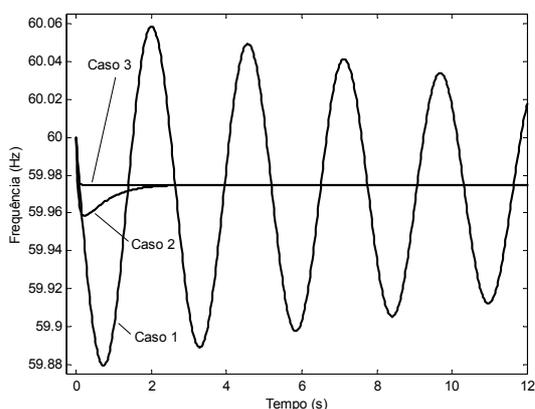


Fig. 8 Controle primário p/ contingência.

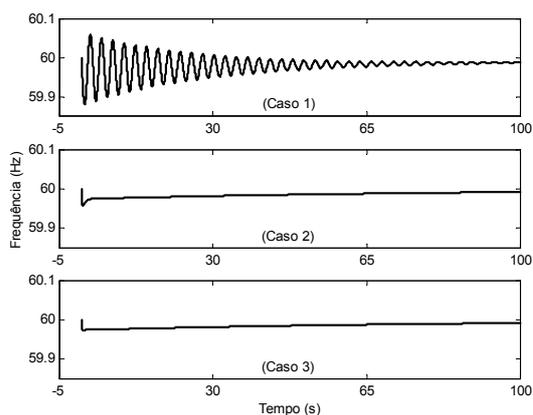


Fig. 9 Controle suplementar p/ contingência.

Tabela 3 Frequências mínima e residual.

Caso	R	D	F _{min} (Hz)	F _{res} (Hz)	dF (mHz)
1	0,05	1	59,880	59,971	28,57
2	0,10	14	59,958	59,975	25,00

3	10,0	23,9	59,975	59,975	25,00
---	------	------	--------	--------	-------

Obs: R e D em valores %.

Tabela 4 Reserva girante.

Caso	SR(%)	SR(MW)	LC(%)	LC(MW)
1	95,24	3	0,000	0,000
2	41,67	1,3125	54,17	1,7062
3	0,00042	0,0131	95,42	3,0056

5.0 ASPECTOS DE IMPLEMENTAÇÃO

Os controladores se situam nos terminais das cargas controladas, não havendo um processamento e comando central. Basicamente são requeridas (i) medições rápidas de frequência, (ii) processamento digital e (iii) atuação sem retardo. A utilização de microcontroladores e dispositivos eletrônicos tais como tiristores, viabilizam tecnicamente a proposta. A medição rápida da frequência tem como princípio utilizar o semiciclo da tensão da rede como uma janela de medição, onde será contado um sinal de clock de alta frequência, resultando em um efeito multiplicador de pequenos desvios de frequência da rede. Assim, o tempo entre medir a frequência e atuar é estimado ficar dentro de um ciclo de rede, ajudando justificar a relação com o fator D natural. Os dispositivos de controle indicam ter um custo compatível com a aplicação.

6.0 CONCLUSÕES

A modulação de potência ativa, sintetizada no fator de amortecimento artificial, permite restringir as frequências mínima e residual. Quanto maior o D_a gerado, menores serão as excursões de frequência. Se necessário, a frequência residual pode ser restringida dentro da faixa de tolerância, o que permitiria, por exemplo, retardar o controle suplementar.

Como resultado secundário, mas também importante, é a vantagem de dispensar a SR primária, que pode ser usada imediatamente para uso no consumo. Na verdade, esse bloco de potência inserido virtualmente no sistema, é que poderá dar margem para viabilizar a proposta.

A nova filosofia tem aplicação imediata em sistemas isolados, e naqueles onde algumas unidades geradoras são grandes em relação ao sistema. Outra característica desejável, com aplicação em unidades hidráulicas, é que aumentando o bloqueio dos RV, transferindo a regulação para os controladores de carga, a indesejável queda de pressão, e conseqüente variação negativa na potência, após a abertura das palhetas, é reduzida.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Wu, C. C., Chen, N., **Frequency-based Method for Fast-response Reserve Dispatch in Isolated Power Systems**, IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, Jan 2004.
- (2) DeMello, F. P., **Dinâmica e Controle da Geração**, Trad. Algarve, A., e Soares, J., Livro, 2^a Edição, Série PTI, UFSM, Sta. Maria, 1983.
- (3) Jovanovic, S. Fox, B., Thompson, J. G., **Online Load Relief Control**, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 9, No. 4, Nov. 1994.
- (4) Tuan, L. A., Bhattacharya, K., **Competitive Framework for Procurement of Interruptible Load Services**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, May 2003.
- (5) Anderson, P. M., Fouad, A. A., **Power System Control and Stability**, Livro, Vol.1, Editora da "Iowa State University", 1977.

