



Grupo de Estudo de Operação de Sistemas Elétricos-GOP

Análise da Operação de Grandes Geradores Síncronos Considerando os Parâmetros do Transformador Elevador e do Sistema de Potência.

ALVARO BATISTA CANCADO(1); MANOEL CÂNDIDO DE LIMA RAMOS(1);
CEMIG G.T(1);

RESUMO

Este artigo tem como objetivo mostrar, por meio da realização de simulações computacionais, que a operação plena dos geradores síncronos hidrelétricos, definida classicamente pelas suas curvas de capacidade, é limitada pelos equipamentos da unidade geradora e pelo próprio sistema elétrico de potência conectado à usina. Avalia-se o contexto do projeto das unidades geradoras dentro dos critérios estabelecidos pelos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (ONS). Os resultados possibilitam uma seleção mais adequada dos parâmetros de projeto dos equipamentos para futuros empreendimentos, bem como a constatação de possíveis limitações para os empreendimentos já consolidados.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador síncrono, Transformador elevador, Curva de capacidade, Limite operativo, Potência reativa

1.0 - INTRODUÇÃO

As limitações operativas dos geradores síncronos, traduzidas pelas suas curvas de capacidade, requerem uma análise dos diversos aspectos inerentes ao projeto da máquina e sua interação com o sistema elétrico e com os demais equipamentos da unidade geradora. Os equipamentos conectados aos geradores, em função de suas características técnicas, limitam, de alguma forma, a sua operação plena. Por exemplo, o transformador elevador da unidade geradora influencia os limites de fornecimento e absorção de potência reativa pelo gerador. Para se realizar um projeto com a maior relação benefício/custo, explorando ao máximo a faixa operativa permissível projetada para o gerador, é necessário uma análise conjunta dos parâmetros do gerador e dos equipamentos a ele conectados. No sistema elétrico brasileiro, o projeto dos grandes geradores hidrelétricos deve seguir alguns critérios estabelecidos pelo ONS por meio dos Procedimentos de Rede (1). Dentre eles, há um relativo à geração e absorção de potência reativa pelo gerador, o qual define que "*A unidade geradora deve ser capaz de operar com fator de potência dentro da faixa de 0.90 capacitivo (sobreexcitado) a 0.95 indutivo (subexcitado).*" Nem sempre é possível, na prática, operar plenamente o gerador dentro dessas condições, mesmo que previsto em projeto, ou pode ser que em função das características sistêmicas, não seja necessário que ele opere dentro daquela faixa.

É possível durante o projeto uma análise da influência do transformador elevador e do sistema de potência no fornecimento e absorção de potência reativa do gerador, dentro de sua faixa permissível de tensão. Neste artigo são apresentados os resultados de simulações computacionais realizadas para a verificação de algumas situações de operação do gerador e suas respectivas limitações. É desejável que o gerador seja capaz de absorver potência reativa até o seu limite quando a tensão do sistema estiver no seu máximo valor possível e seja capaz de fornecer potência reativa até o seu limite quando a tensão do sistema estiver no seu mínimo valor possível (2). Como

resultado, são obtidas as curvas de capacidade da unidade geradora considerando as influências dos transformadores elevadores, do sistema potência e da turbina.

A seleção adequada do conjunto de parâmetros para os equipamentos pode resultar em ganhos consideráveis nos custos de implantação e na eficiência energética da operação do empreendimento. Pode-se, por exemplo, concluir que um gerador projetado para um fator de potência nominal de 0.90 sobreexcitado não poderá, em algumas situações, fornecer potência reativa nominal, operando sob potência ativa nominal, devido a uma limitação imposta pelo transformador elevador. A alteração do fator de potência nominal para 0.95 permite uma redução nos custos de implantação do empreendimento. Além disso, a operação do gerador sob um maior fator de potência proporciona ganho de rendimento à unidade geradora devido às menores perdas associadas, quando comparado à operação sob um menor fator de potência nominal, podendo se refletir em interessantes ganhos energéticos e financeiros.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

As curvas de capacidade típicas dos geradores síncronos de polos salientes são definidas conforme a Figura 1, que mostra as margens de geração de potência ativa e geração e absorção de potência reativa, sujeitas aos limites térmicos do estator e rotor, limite de estabilidade, limite de mínima excitação do rotor e às variações da tensão terminal.

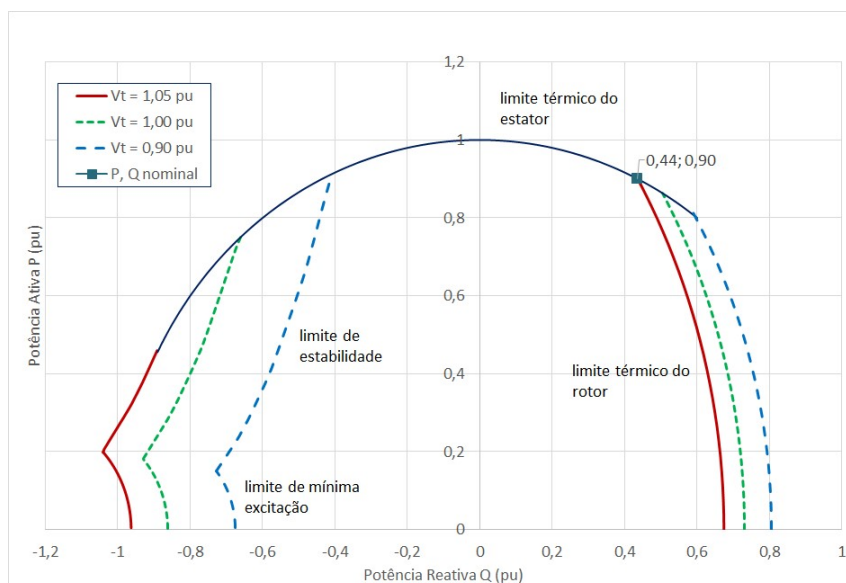


FIGURA 1 – Curvas de capacidade de geradores síncronos de polos salientes

Na prática, a metodologia de traçado das curvas, principalmente no que tange às influências da tensão terminal, variam conforme o entendimento de cada fabricante. O importante é que o critério utilizado para o seu traçado atenda às especificações contratuais e às normas técnicas vigentes, as quais estabelecem que o gerador deve ser capaz de operar com potência e fator de potência nominais em toda a sua faixa de variação de tensão terminal (3).

A operação dos geradores interligados ao sistema elétrico de potência apresenta limitações adicionais, além daquelas representadas pelas suas curvas de capacidade, no que refere à potência entregue no ponto de conexão do sistema. Um diagrama unifilar simplificado do conjunto gerador – transformador elevador – sistema é mostrado na Figura 2 (2).

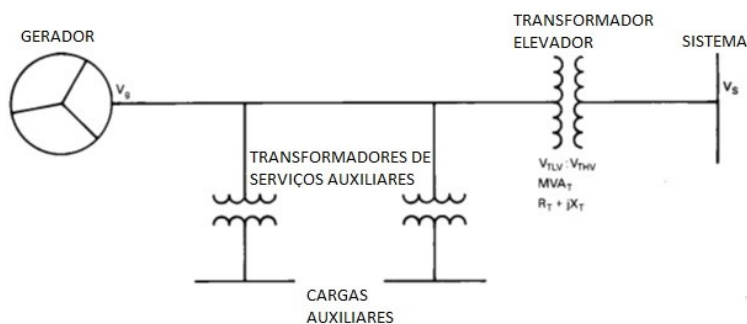


FIGURA 2 – Diagrama unifilar típico da unidade geradora, adaptado de (2)

A equação (1) relaciona as tensões envolvidas no circuito e pode ser escrita da seguinte forma (2):

$$\bar{V}_s = \bar{V}_g - \frac{\left[\frac{(P \pm jQ^*)}{MVA_T} \right]}{V_g} * (R_T + jX_T) \quad (1)$$

Onde:

- V_s = tensão sistêmica, em p.u. (por unidade) da tensão de derivação do comutador do lado de AT (HV) do transformador elevador;
- V_g = tensão nos terminais do gerador (assumindo com um ângulo de 0°), em p.u. da tensão do lado de BT (LV) do transformador elevador;
- $(P \pm jQ)^*$ = potência na saída do gerador (menos a carga dos auxiliares), em MW e MVar, conjugado complexo;
- MVA_T = potência nominal do transformador elevador, em MVA;
- $R_T + jX_T$ = resistência e reatância do transformador elevador, em p.u. na relação de transformação nominal do transformador elevador.

Uma vez determinados a tensão de geração V_g e a tensão nominal do sistema V_s , alguns parâmetros do transformador elevador podem ser avaliados de forma a otimizar a performance global do sistema e do fluxo de potência. Dessa forma, a variação da tensão gerada em função do fluxo de potência reativa pode ser traçada graficamente de várias formas, considerando qualquer dos parâmetros da equação (1), e considerando as limitações de tensão e potência reativa impostas pelas curvas de capacidade dos geradores, além das variações permissíveis das tensões sistêmicas.

Para a realização das simulações, são utilizados os dados dos equipamentos de uma usina hidrelétrica de grande porte conforme a Tabela 1 a seguir:

TABELA 1 – Dados da unidade geradora para simulação (em p.u.)

Turbina tipo Francis (base 600 MW)	$P_{g_{min}} = 0.50$	$P_{g_{max}} = 1.00$
Gerador Síncrono de polos salientes (base 18 kV, 670 MVA, $\cos \phi$ 0,9 cap.)	$V_{g_{min}} = 0.90$	$V_{g_{max}} = 1.05$
	$X_{du} = 1.00$	$X_{qu} = 0.68$
	$X_T = 0.19$	$R_T = 0.001$
Transformador elevador a óleo mineral com CDST (base 18 /525 kV, 670 MVA)	$N_{min} = 0.95$	$N_{max} = 1.05$
Sistema de potência (base 525 kV)	$V_{s_{min}} = 0.90$	$V_{s_{max}} = 1.05$

Na Tabela 1, $P_{g_{min}}$ e $P_{g_{max}}$ são as potências mínima e máxima da turbina, $V_{g_{min}}$ e $V_{g_{max}}$ são as tensões mínima e máxima admissíveis nos terminais do gerador, X_{du} e X_{qu} são as reatâncias síncronas não saturadas de eixo direto e de eixo em quadratura, N_{min} e N_{max} são as relações de transformação mínima e máxima do transformador elevador, $V_{s_{min}}$ e $V_{s_{max}}$ são as tensões sistêmicas mínima e máxima. Os valores base dos equipamentos estão indicados na tabela.

3.0 - RESULTADOS

A influência da impedância e da relação de transformação do transformador elevador no fluxo de potência reativa e na tensão gerada, sob potência ativa nominal, podem ser visualizadas pelos gráficos das Figuras 3, 4 e 5. Os limites da tensão gerada V_g e da potência reativa nominal sub e sobreexcitada ($-Q/+Q$), sob potência ativa nominal (obtidas de suas curvas de capacidade), podem ser observadas pelas linhas tracejadas.

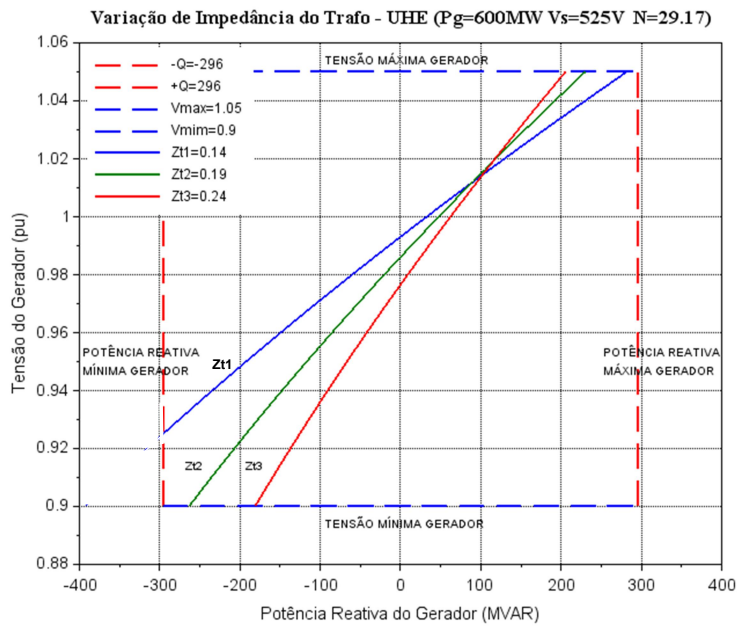


FIGURA 3 – Limites de geração de reativos para várias impedâncias do transformador, potência ativa nominal

Pela Figura 3, pode-se ver que o aumento da impedância do transformador limita o fluxo de potência reativa do gerador, tanto a sua geração quanto a sua absorção. O transformador utilizado com a reatância nominal X_{T2} igual a 0.19 pu limita a geração de potência reativa em no máximo 230 MVAR, já que a tensão máxima do gerador foi alcançada. Da mesma forma, limita a absorção de potência reativa em no máximo 268 MVAR.

Pela Figura 4, constata-se que a relação de transformação tem uma forte influência na limitação do fluxo de reativos do gerador, na qual as opções de máxima geração de reativos usando a máxima relação $N5$ e a máxima absorção usando a mínima relação $N1$ podem ser escolhidas.

A faixa de tensões permissíveis do sistema elétrico impõe limitações operativas na geração e absorção de potência reativa do gerador. A Figura 5 mostra a capacidade de geração e absorção de potência reativa para várias tensões sistêmicas.

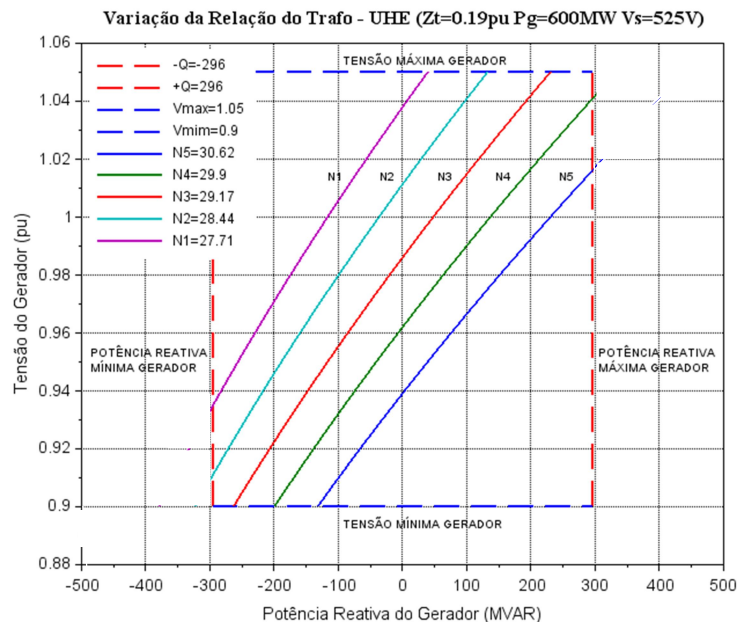


FIGURA 4 – Limites de geração de reativos para várias relações de transformação

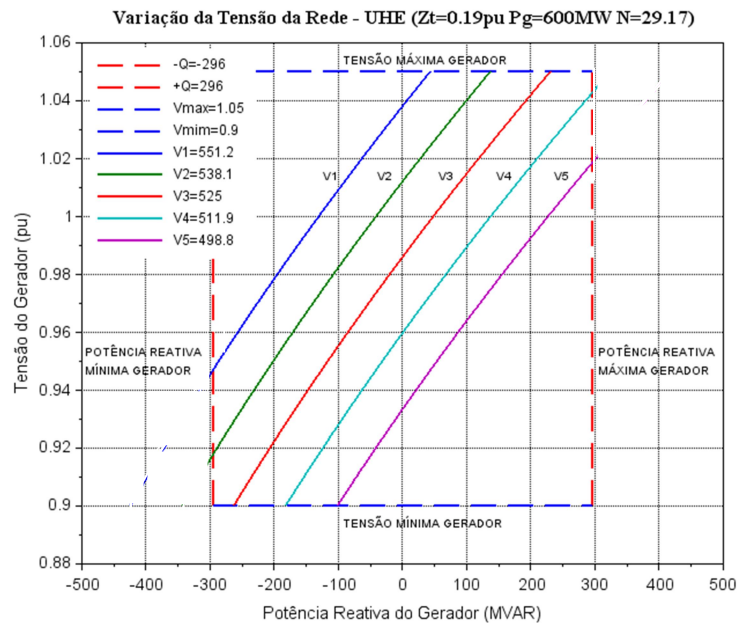


FIGURA 5 – Limites de geração de reativos para várias tensões sistêmicas

Verifica-se que os níveis da tensão sistêmica indicam a necessidade ou não das capacidades plenas de geração e absorção de potência reativa das máquinas. Por exemplo, um sistema local com um perfil de tensão mais elevado raramente irá precisar da geração plena de potência reativa dos geradores. Da mesma forma, um sistema com um perfil de tensão mais baixo raramente irá demandar intensa absorção de potência reativa pelos geradores.

Após a constatação dos limites de potência reativa dos geradores, as curvas de capacidade do conjunto turbina – gerador – transformador elevador – sistema elétrico são traçadas, considerando duas relações de transformação N (0.95 e 1.00 p.u.), com a tensão sistêmica V_s variando entre 0.90, 1.00 e 1.05 p.u., conforme as Figuras 6 e 7. As limitações impostas pelas restrições operativas da turbina na geração de potência ativa são consideradas, tanto em seu limite inferior, em função de instabilidades hidráulicas e vibrações, como em seu limite superior, em função da sua potência nominal. Os dados dos serviços auxiliares foram desconsiderados nas simulações, devido a sua baixa influência nos resultados finais. A tensão do gerador V_g utilizada para o traçado das curvas de capacidade é de 1.00 p.u. O fator de potência nominal é 0.90 sobreexcitado.

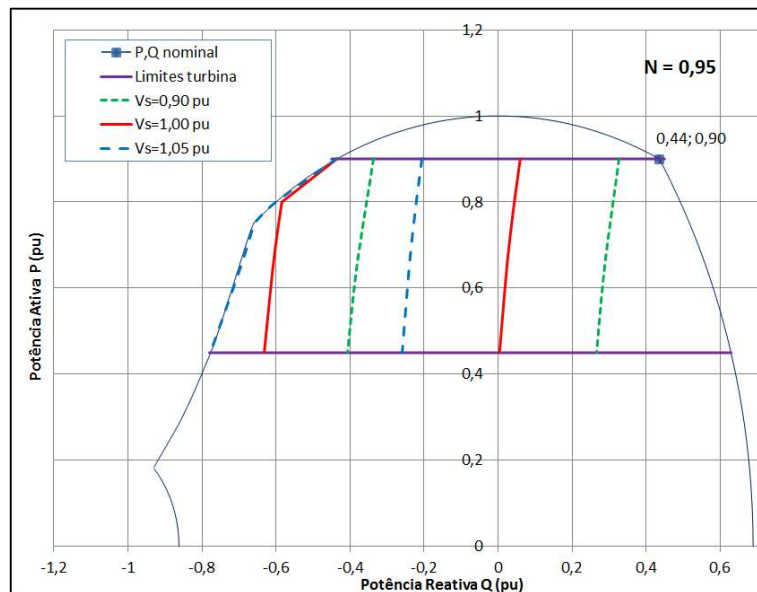


FIGURA 6 – Curva de capacidade da unidade para várias tensões sistêmicas, relação $N=0.95$, $f_p=0.90$

A partir dos gráficos, percebe-se que as margens de potência reativa do gerador são bastante limitadas pelo transformador elevador e “varrem” as curvas conforme varia a tensão sistêmica.

Pela Figura 7, vemos que o gerador operando com tensão nominal e sob relação de transformação nominal não gera o reativo nominal, em função da limitação imposta pelo transformador. O aumento da relação de transformação possibilita a geração de reativo nominal, porém limita a absorção de potência reativa. É mostrado ainda os limites com o gerador operando como compensador síncrono à V_s igual a 0,90 p.u., condição normalmente exigida pelo Operador do Sistema para as usinas de médio e grande porte.

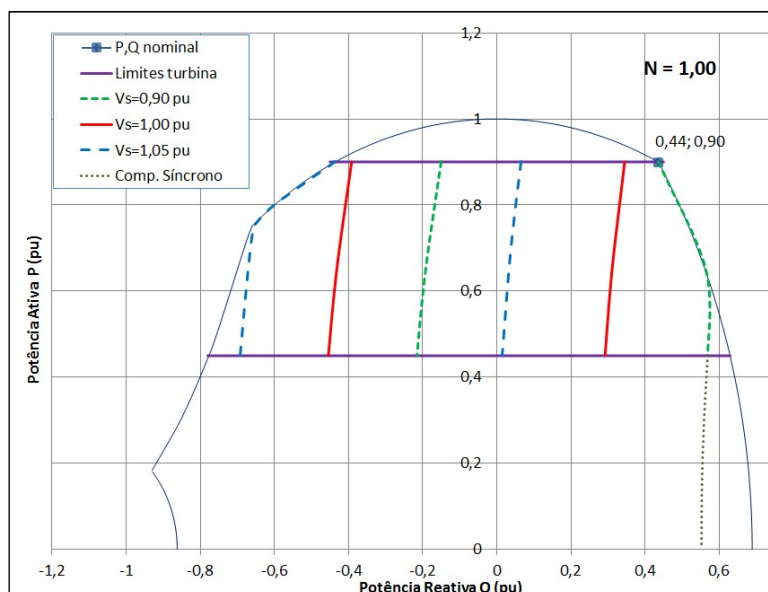


FIGURA 7 – Curva de capacidade da unidade para várias tensões sistêmicas, relação $N=1,00$, $fp=0,90$

Até então, as curvas foram traçadas para um fator de potência (fp) nominal igual a 0,90. A seguir, são apresentadas por meio das Figuras 8 e 9 as curvas de capacidade da unidade geradora considerando um fp nominal igual a 0,95, mantendo a mesma potência ativa nominal, na relação de transformação nominal $N3$, estando as tensões sistêmicas V_s a 0,90 e 1,00 p.u.. Aqui são consideradas as margens de projeto do gerador operando com as tensões V_g de 0,90 e 1,00 p.u., conforme visto no item 2.1 deste artigo. As bases de potência foram ajustadas para o $fp = 0,95$.

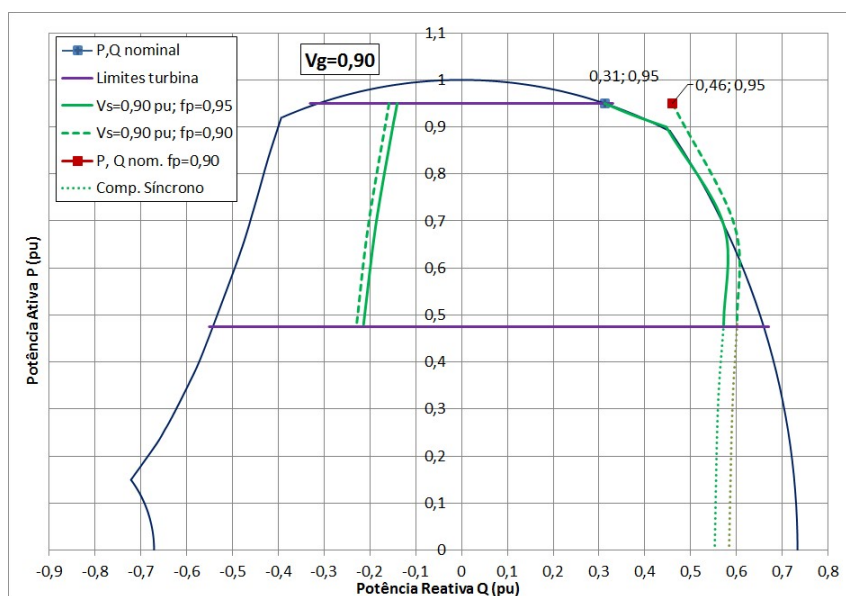


FIGURA 8 – Curva de capacidade da unidade para $V_g=0,90$, $V_s=0,90$, $N=1,00$, $fp=0,95$

Pela Figura 8 verifica-se que com o gerador a um $fp = 0,95$ os limites impostos pelo transformador exploram uma maior área da curva de capacidade. Os limites anteriores com o gerador de $fp = 0,90$ são evidenciados na curva. Para alcançar a mesma geração de reativos a um fp 0,90, uma redução de apenas 5% na geração de potência ativa é necessária. Assim se cumpre a exigência do Procedimento de Rede (1) citada no item 1.0 deste artigo, estando o sistema a uma tensão baixa e precisando da contribuição do gerador para o controle de tensão. Os

limites na absorção de reativos e na operação como compensador síncrono para o novo fp são muito próximos quando comparado à operação com $fp = 0,90$, ambos com limitações impostas pelo transformador elevador.

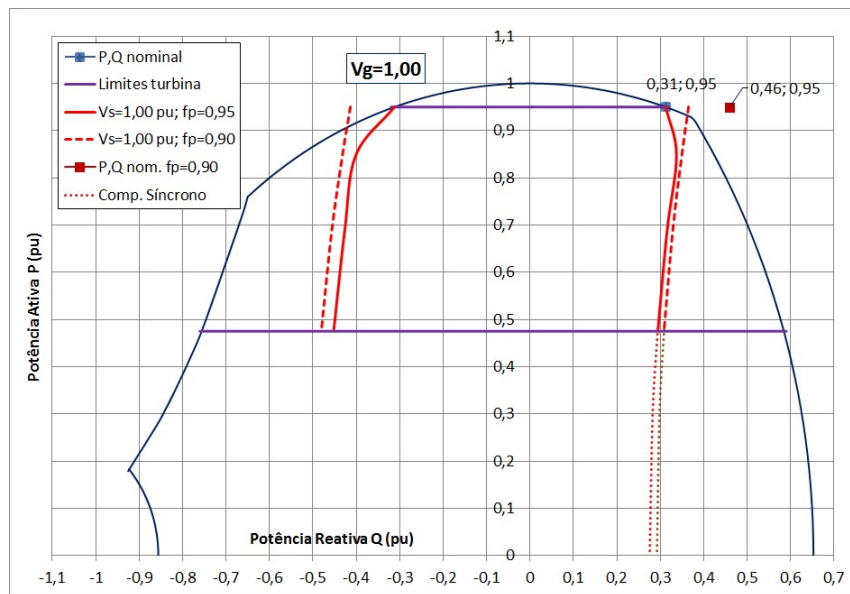


FIGURA 9 – Curva de capacidade da unidade para $V_g=1,00$, $V_s=1,00$, $N=1,00$, $fp=0,95$

O gráfico da Figura 9 mostra que os limites na geração e absorção de reativos são muito próximos para os dois fp's. Para alcançar com o $fp = 0,95$ a mesma geração de reativos daquela a um $fp = 0,90$, uma redução de apenas 2% na geração de potência ativa é necessária. A flexibilidade conseguida com o aumento da relação de transformação permite alcançar a geração de reativos a um $fp = 0,90$. Na operação próxima ao limite inferior da turbina, bem como na operação como compensador síncrono, os limites são praticamente os mesmos, com uma forte limitação de cerca de 54% na plena capacidade de geração de reativos imposta pelo transformador elevador.

4.0 - CONCLUSÃO

Os parâmetros do transformador elevador e do sistema elétrico de potência limitam a plena capacidade de geração e absorção de potência reativa dos geradores representada pelas suas curvas de capacidade. As opções nas derivações dos comutadores sem tensão dos transformadores elevadores permitem uma boa flexibilidade no fluxo de reativos do gerador, permitindo a escolha do melhor ponto de operação. A curva de capacidade do conjunto turbina – gerador – transformador – sistema elétrico mostra-se uma ferramenta eficaz nas atividades de planejamento e projeto, onde diferentes soluções podem ser comparadas. Sua análise permite ao empreendedor uma escolha da melhor solução do ponto de vista técnico e econômico, e proporciona ao operador uma fácil visualização das margens operativas da unidade geradora e suas respectivas limitações. Pode-se inferir que:

- Este artigo demonstra, estando o sistema elétrico com tensão baixa e demandando geração de potência reativa da usina, que é possível operar o gerador projetado para um fator de potência nominal igual a 0,95 sobreexcitado a um fator de potência 0,90 com uma pequena redução em sua potência ativa nominal. Da mesma forma, a operação a um fator de potência 0,95 subexcitado é plenamente possível sem qualquer redução na potência ativa nominal quando a tensão no sistema estiver alta. Desta forma, o gerador projetado com um fator de potência igual a 0,95 sobreexcitado atende plenamente às exigências do Procedimento de Rede do ONS, Submódulo 3.6 (1).

- Em um ambiente extremamente competitivo, apenas onde for plenamente justificável por prévios estudos sistêmicos é que se deveria adotar o fator de potência nominal dos geradores a valores inferiores a 0,95. Uma alteração de 0,95 para 0,90 impacta em um custo adicional para o empreendimento de até 5% do valor do gerador e do transformador elevador, que pode ser determinante na análise dos estudos de viabilidade econômica do negócio (5). O consequente aumento das obras civis da casa de força também causa um considerável impacto no custo global do empreendimento.

- Usinas hidrelétricas normalmente distam dos grandes centros e são interligadas por longas linhas de transmissão, o que faz com que grande parte dos geradores hidrelétricos do sistema interligado trabalhe próximo do fator de potência unitário ou subexcitados.

- Estudos mostram (4) que o controle de tensão do sistema efetuado perto dos grandes centros de carga maximiza o fluxo de potência ativa e minimiza as perdas na transmissão. Dispositivos de controle de tensão locais

(capacitores, reatores, compensadores estáticos e síncronos) podem ser uma melhor opção do ponto de vista técnico e econômico frente aos geradores hidrelétricos (5).

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Procedimentos de Rede, Módulo 3, Submódulo 3.6 – Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão, 2016. Brasil.
- (2) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, IEEE Guide for Transformers Directly Connected to Generators. IEEE Std C57.116™. USA.
- (3) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above. IEEE Std C50.12™. USA.
- (4) SAUER, P. W. Reactive Power and Voltage Control Issues in Electric Power Systems, Applied Mathematics for Restructured Electric Power Systems, Springer, 2005. USA.
- (5) BRAGA, R. E. AHE de Irapé – Justificativa para o Fator de Potência de 0,95 para os Geradores Hidráulicos, Nota técnica – Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, 2002. Brasil.
- (6) LOSI, A., RUSSO, M., VERDE, P., MENNITI, D. "Capability Chart for Generator-Transformer Units", 8th MELECON 96, Volume 3. Itália.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Álvaro Batista Cançado

Mestre (2010) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Especialista (2007) em Qualidade da Energia Elétrica pela UFMG e Graduado (1994) em Engenharia Elétrica pela UFMG.
 Empresa: CEMIG Geração Transmissão SA (CEMIG GT) desde 2002 – Atua como engenheiro de projetos do sistema elétrico, na área de equipamentos e sistemas eletromecânicos. Últimos artigos publicados: "Models of synchronous generators subject to transient voltage surges", Bienal Cigré, Paris, França, 2014. "Coordenação de isolamento na proteção contra surtos de tensão dos geradores – uma abordagem baseada nas impedâncias de surto dos componentes do sistema", XX SNPTTEE, 2009, Recife, Brasil.

Manoel Cândido de Lima Ramos

Mestre (2009) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, e Graduado (2006) em Engenharia Elétrica pela UFMG.
 Empresa: CEMIG Geração Transmissão SA (CEMIG GT) desde 2013 – Atua como engenheiro de projetos do sistema elétrico, na área de equipamentos e sistemas eletromecânicos. Últimos artigos publicados: "A comparative analysis of wind turbine technologies in focus on the grid integration" In: Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on, 2010, São Paulo, Brasil. "Influence of Protection System Settings on Wind Farm Dynamic Behaviour During Power System Disturbances" In: European Wind Energy Conference EWE, 2008, Bruxelas, Bélgica.