

INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DA LINHA NO ESTUDO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

LUIZ FERNANDO GONÇALVES*, ROMEU REGINATTO*, ALEXANDRE SANFELICE BAZANELLA†

**Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Osvaldo Aranha, 103, 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil*

Emails: luizfg@eletro.com.br, romeu@eletro.ufrgs.br, bazanela@eletro.ufrgs.br

Abstract— This work aims at analyzing the influence of the line resistance in the context of independent producers connected to distribution lines. The analysis is carried out on a particular systems considering different line modelings and evaluating the following: system loadability; influence of generated power of the independent producer; the limits of static stability.

Keywords— Power systems, distributed generation, modelling.

Resumo— Este trabalho objetiva analisar a influência da resistência elétrica da linha no contexto de produtores independentes conectados ao sistema de distribuição. Esta análise é desenvolvida sobre um sistema particular onde são avaliados os seguintes indicadores, considerando-se diversas hipóteses sobre os parâmetros da linha: curvas de carregamento; curvas de participação do gerador; limites de estabilidade estática.

Palavras-chave— Sistemas de Potência, Geração Distribuída, Modelagem.

1 Introdução

As recentes mudanças de estrutura no sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição) têm motivado o uso de pequenos produtores independentes conectados ao sistemas de distribuição. Sendo recente, ainda há muitas lacunas quanto ao entendimento do impacto deste novo paradigma na estabilidade e outros índices de desempenho do sistema (Spier et al., 2002) e (Donnelly, 1996).

Esta nova topologia do sistema elétrico impõe uma série de desafios teóricos e práticos a serem resolvidos pela comunidade científica (Gomes, 1999; Jóos, 2000; Donnelly, 1996), por exemplo. O estudo de sistemas de potência foi concentrado até recentemente na topologia clássica, onde predominam geradores de grande porte interconectados por meio de linhas de transmissão sendo, em geral, distantes entre si e distantes das cargas. No contexto de produtores independentes conectados ao sistema de distribuição, tem-se geradores de menor porte e, em geral, mais próximos das cargas sendo alimentadas. Estes e outros diferenciais impõem a necessidade de revisar os modelos classicamente utilizados no estudo de sistemas

de potência, tendo em vista as distintas características dos diversos componentes do sistema em cada caso.

Este trabalho busca focalizar a influência da resistência da linha em sistemas de geração distribuída conectados a linhas de distribuição. No contexto da geração convencional, as linhas de transmissão em geral possuem uma elevada relação X/R , o que permite desprezar a resistência da linha como hipótese simplificada de modelagem, especialmente em estudos qualitativos. Tal cenário não se reproduz no contexto da geração distribuída, o que impõe a necessidade de avaliar o efeito da resistência elétrica da linha nestes estudos. É tomado um sistema particular de geração distribuída e são quantificados os efeitos da resistência da linha sobre diversos indicadores de desempenho do sistema. Através desta análise pode-se chegar a alguns indicadores qualitativos da influência da resistência que podem auxiliar na adequação dos modelos para o estudo de sistemas de geração distribuída.

Este artigo é organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta a modelagem do sistema sob estudo. A colocação do problema e a metodologia empregada para a análise são

desenvolvidos na seção 3. Com base nesta metodologia, a seção 4 apresenta os resultados obtidos por meio de simulação, os quais permitem desenvolver as conclusões apresentadas na seção 5.

2 Modelagem

Neste trabalho considera-se um sistema de geração distribuída específico, conectado a um sistema de distribuição, conforme ilustrado na Fig. 1. Este sistema é inspirado no produtor independente analisado em (Spier et al., 2002).

O sistema é composto por um produtor independente, representado pelo gerador, conectado a um alimentador até a barra 1, onde é representada a carga de forma concentrada. A barra 2 é alimentada por uma fonte de tensão ideal, representando a alimentação principal provida pelo sistema elétrico para este subsistema.

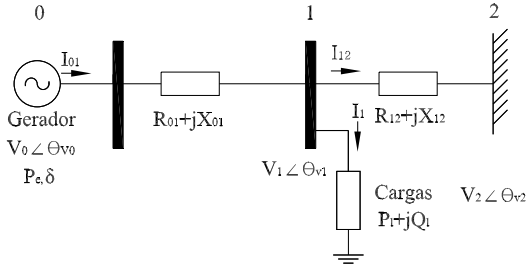


Figura 1: Representação do sistema de geração distribuída e das variáveis envolvidas.

O gerador é representado pelo modelo E'_q (Bazanella, 1993),

$$\dot{\delta} = \omega_r - \omega_m \quad (1a)$$

$$\ddot{\delta} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e - D\dot{\delta}) \quad (1b)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_d} [E_{fd} + (X_d - X'_d)I_d - E'_q] \quad (1c)$$

$$V_q = E'_q - R_a I_q + X'_d I_d \quad (1d)$$

$$V_d = -R_a I_d - X_q I_q \quad (1e)$$

O sistema é provido de um RAT (regulador automático de tensão) para a barra 0, o qual é representado pelo modelo

$$\dot{E}'_{fd} = \frac{1}{T_a} [-E_{fd} + K_a(V_{0ref} - V_0)] \quad (2)$$

onde T_a é a constante de tempo do regulador e V_{0ref} é o valor de referência para a tensão na barra 0.

Para o estudo proposto é considerado um modelo tipicamente utilizado para a modelagem de cargas em sistemas de potência, composto pelo modelo ZIP, na forma (Kundur, 1994)

$$P_{1nom} = a_0 + a_1 V_1 + a_2 V_1^2 \quad (3a)$$

$$Q_{1nom} = b_0 + b_1 V_1 + b_2 V_1^2 \quad (3b)$$

A linha de distribuição que compõe o sistema é modelada apenas por impedâncias em série, contendo resistência e reatância não-nulas. As seguintes equações algébricas completam então a modelagem do sistema apresentado na Figura 1 :

$$I_{01} = I_1 + V_1/Z_{12} - V_2/Z_{12} \quad (4a)$$

$$V_0 = V_1 + I_{01} Z_{01} \quad (4b)$$

3 Procedimentos para análises

Busca-se avaliar a influência da resistência na linha no estudo de produtores independentes conectados aos sistemas de distribuição ou subtransmissão. Para realizar este estudo são consideradas três hipóteses quanto a modelagem da linha, mas especificamente:

Caso 1. Considera o modelo mais completo da linha, representado por uma impedância, sem negligenciar nenhum dos efeitos nem da resistência nem da reatância.

Caso 2. Considera o modelo simplificado da linha e tipicamente empregado nas análises de sistemas de energia, o qual negligencia a resistência da linha. A linha neste caso é representada puramente por uma reatância indutiva.

Caso 3. Neste caso considera-se uma terceira hipótese alternativa para modelagem da linha. Considera-se também a linha modelada apenas por uma reatância indutiva, porém o módulo desta reatância é modificado para igualar o módulo da impedância real da linha. Em outras palavras, a linha é modelada apenas por uma reatância, porém de mesmo módulo da impedância real da linha.

A análise desenvolvida para realizar estes estudos no contexto deste artigo é estática. Para atingir o objetivo principal são quantificados diversos indicadores do sistema de geração distribuída mostrado na Figura 1, mas especificamente os seguintes:

1. São avaliadas as curvas de carregamento na barra 1. Para uma potência gerada constante é avaliada a tensão na barra 1 em função do incremento de carga na barra.
2. São avaliados os pontos de máximo carregamento em função do incremento de carga na barra 1.
3. É avaliada a curva de participação do gerador. Para um valor específico de carga, é estudada a tensão na barra 1 em função do incremento da potência gerada, isto é, da participação do gerador na alimentação da carga.
4. É avaliada a diferença de ângulo entre as barras 0 e 1, como indicador da estabilidade estática do sistema, em função da participação do gerador (potência gerada).

4 Resultados de Simulação

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação obtidos para o sistema de geração distribuída mostrado na Figura 1, para os casos elencados na seção 3.

Em todas as simulações realizadas, a tensão na barra zero é regulada em 1.02pu e o fator de potência da carga é considerado igual a 0.8.

A curvas de carregamento na barra 1 são obtidas com potência gerada constante e igual a 0.8pu. Em todo o intervalo de variação da carga, o fator de potência é mantido constante e igual a 0.8. A análise é realizada para 3 tipos distintos de carga estática: potência constante, corrente constante e impedância constante.

Na análise das curvas de diferença de ângulo entre as barras 0 e 1, bem como na curvas de participação do gerador, a potência elétrica do gerador Pe é variada continuamente mantendo-se o valor da potência da carga constante em 0.8pu. Também aqui são mantidos constantes o fator de potência da carga e a tensão na barra 0.

Os parâmetros do gerador síncrono utilizados nas simulações são: $\omega_s = 376.9911$, $H = 2$, $D = 0$, $X_d = 0.91$, $X'_d = 0.408$, $X_q = 0.58$, $T'_d = 4.2$, $R_a = 0.01$, $K_a = 100$, $T_a = 0.02$. Os parâmetros da linha de distribuição em PU são: $X_{12} = 0.27512$, $R_{12} = 0.09618$, $R_{01} = 0.03206$, $X_{01} = 0.07504$ para os casos 1 e 2 e $X_{01} = 0.081601$ no caso 3.

Carga com Impedância Constante Parâmetros do modelo ZIP utilizam a_0, a_1, b_0, b_1 nulos. Os resultados das simulações para as curvas de carregamento são vistos a seguir na Figura 2.

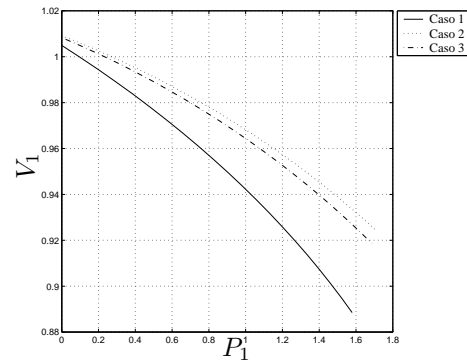


Figura 2: Curvas de carregamento (modelo ZIP, impedância constante).

A Tabela 1 exibe os pontos de máximo carregamento para os 3 casos, mostrando os valores de P_1 , Q_{1nom} e V_1 alcançados nesta condição limite. Os resultados das simulações para as curvas da diferença de ângulo entre as barras, considerando o modelo ZIP, impedância constante, nos três casos, são vistos na Figura 3. Para estas mesmas situações, na Figura 4 tem-se os resultados quanto a participação do gerador.

	Caso 1	Caso 2	Erro %	Caso 3	Erro %
P_1	2.08	2.16	3.94	2.13	2.50
Q_1	1.56	1.62	3.94	1.59	2.50
V_1	0.69	0.46	-33.75	0.42	-38.84

Tabela 1: Pontos de máximo carrregamento (modelo ZIP, impedância constante).

Pode-se observar uma diferença significativa em todos os indicadores em função do

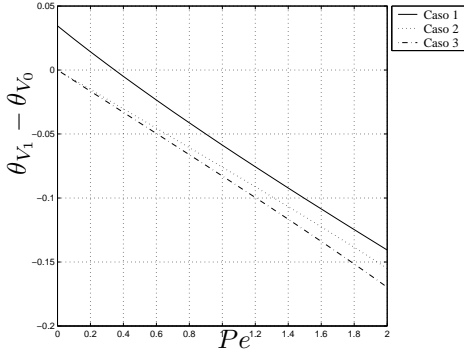


Figura 3: Curva da diferença de ângulo entre as barras (modelo ZIP, impedância constante).

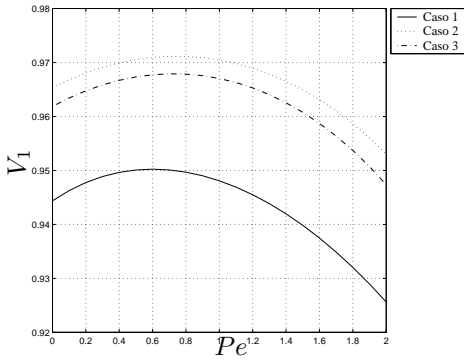


Figura 4: Curva da participação do gerador (modelo ZIP, impedância constante).

efeito da resistência da linha. Um erro de até 38% pode ser observado na curva de carregamento, ainda dentro dos limites de operação estável do sistema, embora os limites de operação estável possam ser previstos com relativa precisão mesmo negligenciando a resistência.

Os resultados para os casos 2 e 3 mostram-se muito mais similares do que os casos 1 e 2, em todos os indicadores. Isto evidencia que o efeito da resistência da linha é inerentemente ligado a sua natureza, isto é, a característica resistiva é mais determinante desta influência do que a sua contribuição na magnitude da impedância. O fato de agregar o módulo da resistência à reatância que modela a linha não contribui significativamente com a melhoria dos resultados.

Carga com Potência Constante. Parâmetros do modelo ZIP utilizam a_1, a_2, b_1, b_2 nulos. Os resultados das simulações para as curvas de carregamento são, neste caso, vistos a seguir na Figura 5. A Tabela 2 exibe os pontos de máximo carregamento para os 3 casos, mostrando os valores de P_1, Q_{1nom} e V_1 adquiridos nesta condição limite.

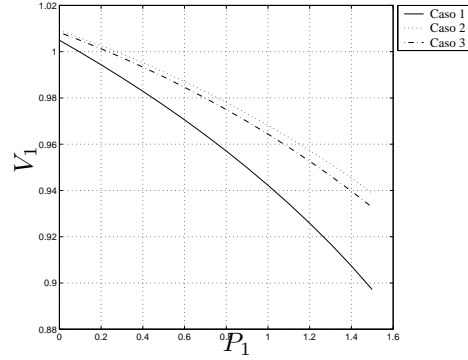


Figura 5: Curva de carregamento (modelo ZIP, potência constante).

	Caso 1	Caso 2	Erro %	Caso 3	Erro %
P_1	2.100	3.000	42.857	3.000	42.857
Q_1	1.575	2.250	42.857	2.250	42.857
V_1	0.801	0.746	-6.866	0.665	-16.978

Tabela 2: Pontos de máximo carregamento (modelo ZIP, potência constante).

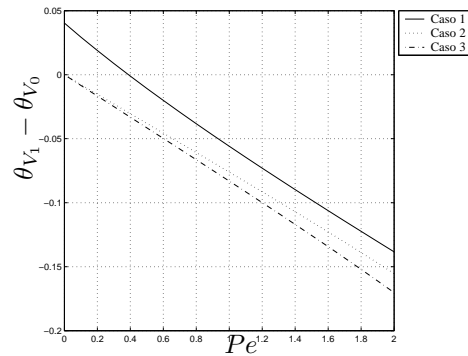


Figura 6: Curva da diferença de ângulo entre as barras (modelo ZIP, potência constante).

Os resultados das simulações para as curvas da diferença de ângulo entre as barras e da

participação do gerador, considerando o modelo ZIP, potência constante, nos três casos, são vistos, respectivamente, nas Figuras 6 e 7.

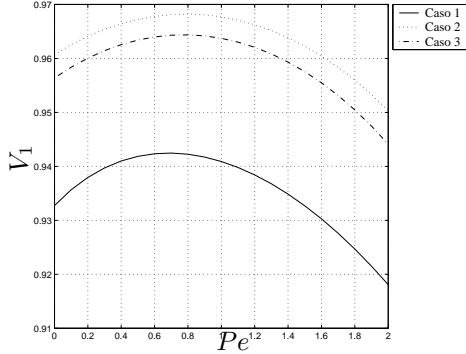


Figura 7: Curva da participação do gerador (modelo ZIP, potência constante).

Os resultados para este caso estão na mesma direção do caso da carga com impedância constante, porém ocorre um incremento muito grande no erro de previsão dos limites de operação estável, o qual chega próximo aos 40%. Por outro lado, há uma redução nas diferenças das curvas de carregamento para os 3 casos, indicando menor influência da resistência da linha para a carga com potência constante.

Carga com Corrente Constante Parâmetros do modelo ZIP utilizam a_0, a_2, b_0, b_2 nulos. Os resultados das simulações para as curvas de carregamento são vistos a seguir na Figura 8. A Tabela 3 exibe os os pontos de máximo carregamento para os 3 casos, mostrando os valores de P_1, Q_1 e V_1 obtidos nesta condição limite. O comportamento do sistema em relação a diferença de ângulo entre as barras para este caso é mostrado na Figura 9, enquanto na Figura 10 tem-se o resultado para a participação do gerador.

Pode-se observar que os resultados em todos os indicadores são bastante similares para as cargas com potência constante e corrente constante. Contudo, as diferenças nas curvas de carregamento são maiores quando a carga é de corrente constante. Por outro lado, o erro

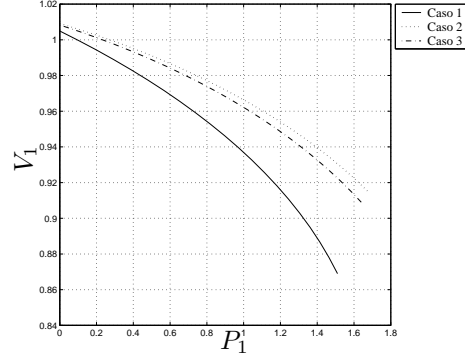


Figura 8: Curva de carregamento (modelo ZIP, corrente constante).

	Caso 1	Caso 2	Erro %	Caso 3	Erro %
P_1	2.182	3.045	39.551	2.782	27.497
Q_1	1.637	2.284	39.551	2.087	27.497
V_1	0.752	0.634	-15.691	0.545	-27.526

Tabela 3: Pontos de máximo carregamento (modelo ZIP, corrente constante).

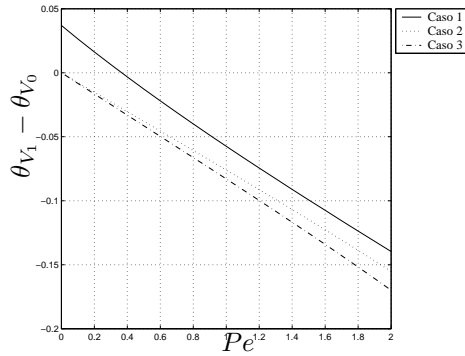


Figura 9: Curva da diferença de ângulo entre as barras (modelo ZIP, corrente constante).

nos pontos de máximo carregamento são maiores para o caso de cargas com potência constante. Novamente observa-se que o grande diferencial está no caso 1 frente aos casos 2 e 3, os quais apresentam resultados menos discrepantes em todos os indicadores. Foram também realizados estudos utilizando-se um modelo de cargas dinâmico (Lerm et al., 2003), explorando expoentes não inteiros da tensão nos modelos de potência da carga, o que levou a resultados que corroboram com os resultados apresentados.

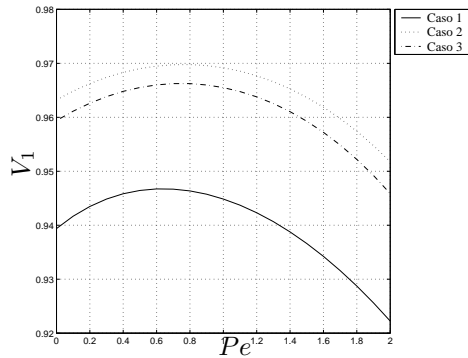


Figura 10: Curva da participação do gerador (modelo ZIP, corrente constante).

5 Conclusão

Neste artigo analisou-se alguns aspectos de modelagem fundamentais para o estudo de sistemas de produtores independentes conectados ao sistema de distribuição de energia elétrica. Foi analisada a hipótese clássica de negligenciar a resistência elétrica da linha quando aplicada no contexto da geração distribuída.

A avaliação de diversos indicadores do sistema sobre um caso específico de geração distribuída demonstrou a influência significativa da resistência da linha em todos os indicadores avaliados. A influência nos diversos indicadores, todos ligados ao comportamento estático do sistema, em alguns casos chegou a 40%. Tal resultado evidencia a necessidade de adequação de modelos classicamente utilizados no estudo de sistemas de energia para o contexto da geração distribuída.

A análise também permite concluir que o efeito da resistência da linha sobre o sistema se deve diretamente a sua natureza, mais do que ao seu módulo, no sentido de que substituí-la por uma reatância não constitui uma alternativa adequada de modelagem. Assim, coloca-se a necessidade de considerar a resistência da linha nos estudos de sistemas de geração distribuída, sob pena de obter resultados não confiáveis das análises.

Referências

- Arrilaga, J., Arnold, C. and Harker, B. (1990). *Computer Modeling of Electrical Power Systems*, John Wiley & Sons, New York.
- Bazanella, A. S. (1993). *Controle autoajustável de sistemas de potência*, Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Bretas, N. G. and Alberto, L. F. C. (2000). *Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos*, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.
- Donnelly, M. K. (1996). Impacts of the distributed utility on transmission system stability, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**: 741–746.
- Gomes, P. (1999). A influência de produtores independentes de energia no desempenho do sistema elétrico brasileiro, *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Planejamento de Sistemas Elétricos (GPL), pp. 1–7.
- Jóos, G. (2000). The potential of distributed generation to provide ancillary services, *IEEE PES Summer Meeting*.
- Karlsson, D. and Hill, D. J. (1994). Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York.
- Lerm, A. A. P., Cañizares, C. A. and e Silva, A. S. (2003). Multiparameter bifurcation analysis of the south brazilian power system, *IEEE Transactions On Power Systems* **18**: 737–746.
- Spier, E. B., Bazanella, A. S., Lemos, F. A. B. and da Rosa, M. A. (2002). Avaliação da conexão de produtores independentes em alimentadores radiais de sistemas de distribuição, *VII Symposium of Specialists In Electric Operational And Expansion Planning, SEPOP*.