

Desenvolvimento de Sistema para Alocação de Perdas Elétricas na Transmissão

A. Padilha-Feltrin, UNESP; D. A. Lima, UNESP; J. R. S. Mantovani, UNESP, R. A. Romero, UNESP, A. M. Cossi, UNESP, F.C. Gaino, E. S. Hoji, UNESP e W. Macedo, CTEEP

Resumo- Um sistema computacional para alocação de perdas elétricas na transmissão foi desenvolvido. Este sistema permite análise do desempenho dos principais métodos de alocação de perdas para geradores e cargas. São discutidos dois métodos baseados na técnica pro-rata, dois procedimentos baseados em técnica incremental, um método baseado em participação proporcional e mais um outro método baseado na teoria de circuitos elétricos. Os algoritmos foram testados, primeiramente, com exemplos didáticos de fácil verificação de potencialidades e desvantagens, para em seguida serem avaliados com o sistema Sul Sudeste Brasileiro 2003. Os resultados apresentados e discutidos verificam: a localização e a magnitude de geradores e cargas; a possibilidade de se ter agentes bem ou mal localizados no sistema para cada configuração da rede; o desempenho de cada método com as alterações na rede elétrica; e o comportamento discriminatório. Conclusões e recomendações são apresentadas.

Palavras-chave— Alocação de Perdas, Mercado de Energia, Perdas na Transmissão

I. INTRODUÇÃO

Atualmente as empresas de transmissão de energia elétrica estão passando por significativas mudanças em seu novo ambiente econômico. Vários novos desafios têm surgido como a determinação das capacidades ótimas de transferência com alocação de custos de congestionamento, e a determinação da alocação das perdas elétricas para geradores e cargas. Este artigo trata da determinação da alocação de perdas para geradores e cargas destaques para os métodos mais adequados às aplicações práticas e com maiores possibilidades de aplicações futuras.

Considerando que as perdas elétricas dependem das injeções de potências nas barras e são funções não lineares, é

Este trabalho foi apoiado pela CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista).

A. Padilha Feltrin trabalha no Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira (e-mail: padilha@dee.feis.unesp.br).

J.R.S. Mantovani trabalha no Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira (e-mail: mant@dee.feis.unesp.br).

R. Romero trabalha no Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira (e-mail: ruben@dee.feis.unesp.br).

D.A. Lima é estudante de mestrado na Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira (e-mail: delberis@dee.feis.unesp.br).

A. M. Cossi é estudante de mestrado na Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira (e-mail: cossi@dee.feis.unesp.br).

F.C. Gaino é estudante de mestrado na Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira (e-mail: gaino@dee.feis.unesp.br).

E.S. Hoji é estudante de mestrado na Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira (e-mail: eduardo@dee.feis.unesp.br).

W. Macedo trabalha na Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (e-mail: wmacedo@ctEEP.com.br).

interessante proceder à análise da alocação das perdas a partir de mais de um procedimento. Deve-se destacar que a alocação dos custos das perdas para barras não afeta diretamente o funcionamento dos sistemas elétricos existentes, uma vez que o cálculo destes custos é realizado depois do despacho de cargas. Obviamente o tamanho e localização de geradores e cargas contribuem, para mais ou para menos, com as perdas elétricas. Este fato pode ser determinante na definição, por exemplo, de locais mais adequados para a conexão de novos geradores no sistema, e neste sentido a alocação das perdas pode ser um fator decisivo na expansão dos sistemas de geração.

Os métodos de alocação de perdas têm como objetivo distribuir entre geradores e cargas a responsabilidade por perdas na transmissão de forma equilibrada. Para atingir este equilíbrio, algumas características são importantes [1], como por exemplo: levar em conta a injeção de potência em cada barra; considerar a localização relativa da barra na rede de transmissão; ser consistente com a solução do fluxo de potência; ser estável diante de alterações pouco significativas de parâmetros da rede; fornecer efetivos incentivos ou punições para geradores e cargas considerando a sua localização relativa e magnitude na rede; e ser de simples compreensão e de fácil implementação.

A importância da análise de perdas elétricas ocorre em função da estimativa de seu custo anual ser da ordem de 1 (um) bilhão de reais (dados de 2001) no Sistema Brasileiro [2].

II. MÉTODOS DE ALOCAÇÃO DE PERDAS

Diferentes propostas de alocação de perdas em redes elétricas surgiram nos últimos anos, tanto para transmissão quanto para distribuição. Obviamente o foco maior tem sido a transmissão devido aos valores atingidos e a grande quantidade de agentes com livre acesso às redes de transmissão. Nesta seção faz-se uma breve descrição dos métodos de alocação de perdas que serão discutidos:

- Z-bus - método baseado na teoria de circuitos, utilizando a matriz Z-bus;
- PS - método de participação proporcional;
- ITL - método incremental de alocação;
- ITLPOS - método incremental de alocação sem alocação negativa (ITLPOS);
- P - método usando a técnica Pro-Rata, com base na potência ativa; e
- I - método usando a técnica Pro-Rata, com base

na corrente.

A. Método Baseado na Teoria de Circuitos

O método empregado aqui é o Z-bus [1] e [7] que apresenta uma característica diferente e interessante que é o fato de explorar as equações de circuitos elétricos sem nenhuma simplificação. A idéia do método é distribuir as perdas do sistema (Ploss) entre as “n” barras do sistema, a partir da solução do fluxo de potência:

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^n L_k \quad (1)$$

A componente de perdas (L_k) é a fração de perdas do sistema atribuídas à barra “k”. A obtenção do termo (L_k) mostrado em (1) é feita a partir da matriz de admitância ($Y=G+jB$) e o vetor complexo de tensão (V) ou a partir da matriz de impedância ($Z=R+jX$) e o vetor complexo de injeção de corrente (I). Partindo da equação de perdas temos:

$$P_{loss} = \Re \left\{ \sum_{k=1}^n V_k I_k^* \right\} \quad (2)$$

O \Re indica que se trata da parte real do vetor obtido do somatório. A referência (Conejo et al.,2001) mostra que a componente de perdas associadas com a barra “k” pode ser expressa por:

$$L_k = \Re \left\{ I_k^* \left(\sum_{j=1}^n R_{kj} I_j \right) \right\} \quad (3)$$

O elemento R_{kj} representa a parte real da matriz Z-bus que reflete a ligação entre a barra k e todas as outras barras do sistema.

A componente de perdas, (L_k), considera os “n” termos que representam o acoplamento entre as injeções de correntes de todas as “n” barras com a injeção de corrente na barra “k”.

B. Métodos de Alocação de Perdas Utilizando Procedimentos Incrementais

Os procedimentos de alocação baseados no princípio de incrementos alocam as perdas para geradores e cargas a partir de fatores [5], [6] e [8], denominados como ITL e ITLPOS. Os fatores ITL’s são obtidos a partir de uma solução do fluxo de potência. O fator ITL de uma dada barra provém da mudança das perdas totais produzidas através da variação incremental de injeção de potência em cada barra. Deve ser destacado que o uso de fatores ITL’s pode alocar perdas negativas para geradores e cargas, e isto pode ser interpretado como subsídio.

A fim de evitar atribuição de valores negativos de perdas para barras modificam-se os fatores ITL’s obtendo-se os ITLPOS com o objetivo de atribuir perdas para geradores e cargas e evitar recompensar barras por perdas elétricas [3].

C. Método de Alocação de Perdas Utilizando Divisão Proporcional

A proposta do método de alocação de perdas baseado no princípio da divisão proporcional (chamado de PS) é desenvolvido através da topologia da rede que é em geral o objetivo do problema do transporte, ou seja como estão distribuídos os fluxos na rede como descrito por [3].

D. Métodos Pro-Rata

Primeiramente as perdas são divididas para geradores e cargas, 50% para cada, e então é feita uma alocação proporcional dentro de cada categoria. Assim uma barra com carga terá uma alocação de perdas correspondente a porcentagem de consumo de energia total (carga total conectada na rede). O mesmo princípio é aplicado às barras de geração. Um exemplo de aplicação é mostrado em [9]. A divisão das perdas pode ser realizada baseada nas injeções de potência ativa nas barras (denominado como P) ou nas injeções de corrente (chamado de I).

III. ANÁLISE DE DESEMPENHO

Uma análise sobre o desempenho de métodos de alocação de perdas considerando-se diferentes situações e obtendo-se os resultados com mais de um método é realizada. Todos os métodos testados alocam perdas iguais a zero para barras que não possuem nem geradores e nem cargas. Os métodos P, I, PS e ITLPOS sempre alocam uma parte das perdas para barras com geradores e cargas, e isto significa que todos os geradores e todas as cargas devem “pagar” por perdas elétricas. O ITL e o Z-bus fazem alocação positiva e negativa das perdas, significando que geradores e cargas podem “pagar” (alocação positiva) ou “receber” (alocação negativa) por perdas elétricas.

Quando acontece alocação negativa para uma determinada barra, significa que esta barra deve receber incentivos monetários, e obviamente outras barras do sistema deverão contribuir a fim de pagar estes incentivos. Esta questão de “receber incentivos por perdas” é um tanto complexa e muitas vezes de difícil aceitação, pois as demais barras deverão pagar pelo total das perdas somado a estes incentivos. Realizar uma análise que separe barras que podem receber incentivos (chamadas de bem posicionadas na rede) de outras que devem pagar (denominadas mal posicionadas) pode ajudar a esclarecer algumas questões relativas ao incentivo. A princípio geradores instalados em centros de carga são bem posicionados e geradores distantes dos centros consumidores são mal posicionados. Cargas próximas de grandes centros geradores são bem posicionadas e distantes são mal posicionadas. Um dos objetivos deste trabalho é verificar e analisar a questão de incentivos monetários para geradores e cargas bem posicionadas, e verificar alocação discriminatória, respondendo algumas perguntas: (a) quais métodos produzem resultados discriminatórios?; (b)quais métodos levam barras bem posicionadas a pagar menos ou mesmo receber?; (c) pode-se utilizar o conceito de barras bem posicionadas para incentivar a instalação de geradores nestas barras em projetos de expansão?; (d) as barras que receberam acréscimo de

geração em uma primeira expansão continuam bem posicionadas pra uma segunda expansão?; (e) a instalação de outros agentes (geradores ou cargas) alteram o bom posicionamento anterior?; e (f) pequenas alterações na rede (tap de transformadores, capacitores, etc.) provocam alterações bruscas na alocação de perdas?

As respostas para estas questões e outras análises já foram apresentadas em [10], usando-se os métodos apresentados anteriormente aplicados em três sistemas de energia elétrica: (1) IEEE14 – com 14 barras, 20 linhas, 2 geradores e 13 cargas [1]; (2) REDE5 – com 5 barras, 2 transformadores, 3 linhas, 2 geradores e 1 cargas [11]; (3) IEEE118 – com 118 barras, 186 linhas, 17 geradores e 110 cargas [12].

Neste artigo apresenta-se desempenho do software desenvolvido com o sistema Sul Sudeste Brasileiro 2003. Os resultados obtidos confirmaram todas as análises realizadas com os sistemas elétricos testados anteriormente. Assim, se mostra a seguir os resultados para casos com carga leve, média e pesada. O software possui possibilidades de saídas em forma de tabelas e também de ilustrações visuais, o que permite que o usuário gere diferentes relatórios de saída. Destaca-se que o software utiliza arquivos de saída do ANAREDE, que é um programa de cálculo de fluxo de potência empregado por uma grande quantidade de empresas do setor elétrico brasileiro.

Relatórios visuais podem ser obtidos a partir da definição de uma barra que deve ser focalizada para análise. A partir desta definição, tem-se uma apresentação visual das ligações desta barra e suas “vizinhas”, e pode-se verificar as alocações das perdas que ocorrem nesta região “clitando-se” em tabela. Uma janela mostra uma tabela com as alocações de perdas nas barras mais próximas da região sob estudo. A figura mostrada no Apêndice A mostra um caso estudado.

As Tabelas I, II e III apresentam os resultados obtidos para o sistema Brasileiro com a barra de Jupia focalizada.

Um problema apresentado por todos os métodos é realizar alocação de forma discriminatória. Os métodos que fazem alocação negativa, muitas vezes, são os que mais apresentam a alocação discriminatória, pois as barras que recebem alocação positiva pagam as perdas globais e mais os incentivos (alocação negativa). A maioria das publicações da área tem mostrado o desempenho das propostas utilizando sistemas elétricos de pequeno porte, onde o comportamento discriminatória aparece pouco ou não aparece. Neste projeto de pesquisa procurou-se analisar os métodos com sistemas elétricos simples, a fim de melhor compreender os resultados, mas as conclusões foram finalizadas com sistemas de grande porte IEEE 118 e Sul Sudeste Brasileiro, configuração 2003.

TABELA I

PERDAS ALOCADAS PARA O SISTEMA SUL-SUDESTE (BARRA 192 - JUPIÁ) - (PERDAS = 1028 (MW)) - (CARGA LEVE-2003)

Barra nº	Barra nome	PRO-RATA		Z-bus (MW)	ITL (MW)	ITL(POS) (MW)
		(P) (MW)	(I) (MW)			
176	A.LAYD-G-GER	0.80	0.73	1.00	0.64	1.84
177	AVERML-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
179	CAPIVA-G-GER	5.28	5.77	12.59	8.13	2.23
180	EMBU -4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
181	I.SOLT-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
182	JUPIA -4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
183	SANGEL-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
184	TIRMAO-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
185	XAVANT-G-GER	3.41	3.07	6.76	3.66	1.98
186	TAQUAR-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
187	P.PRIM-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
189	AVERML-G-GER	11.29	11.63	-8.16	4.07	1.60
190	EMBU -S-SIN	0.00	0.49	0.25	0.00	0.00
191	I.SOLT-G 14	8.99	14.67	2.83	9.2	1.96
192	JUPIA -G 13	10.96	11.49	22.27	15.08	2.15
193	SANGEL-S-SIN	0	0.37	0.23	0	0
194	TIRMAO-G 14	7.8	6.95	16.17	9.12	2.03
196	TAQUAR-G-GER	4.57	3.97	13.52	7.11	2.24
197	P.PRIM-G 13	12.69	10.99	41.87	21.14	2.3

TABELA II

PERDAS ALOCADAS PARA O SISTEMA SUL-SUDESTE (BARRA 192 - JUPIÁ) - (PERDAS = 1772.9 (MW)) - (CARGA MÉDIA-2003)

Barra nº	Barra nome	PRO-RATA		Z-bus (MW)	ITL (MW)	ITL(POS) (MW)
		(P) (MW)	(I) (MW)			
176	A.LAYD-G-GER	1.37	1.28	0.58	0.81	4.18
177	AVERML-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
179	CAPIVA-G-GER	8.99	8.64	24.23	16.35	4.74
180	EMBU -4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
181	I.SOLT-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
182	JUPIA -4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
183	SANGEL-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
184	TIRMAO-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
185	XAVANT-G-GER	5.81	5.49	4.25	4.17	4.24
186	TAQUAR-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
187	P.PRIM-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
189	AVERML-G-GER	21.74	23.20	72.32	45.28	4.87
190	EMBU -S-SIN	0.00	3.25	-1.42	0.00	0.00
191	I.SOLT-G 14	24.69	32.05	69.66	48.45	4.81
192	JUPIA -G 13	18.64	21.63	53.04	37.58	4.83
193	SANGEL-S-SIN	0	3.4	-1.56	0	0
194	TIRMAO-G 14	11.33	10.67	36.34	22.21	4.81
196	TAQUAR-G-GER	7.78	8.64	20.21	15.31	4.81
197	P.PRIM-G 13	20.08	17.87	64.92	40.21	4.83

TABELA III

PERDAS ALOCADAS PARA O SISTEMA SUL-SUDESTE (BARRA 192 - JUPIÁ) - (PERDAS = 1888.2 (MW)) - (CARGA PESADA-2003).

Barra nº	Barra nome	PRO-RATA		Z-bus (MW)	ITL (MW)	ITL(POS) (MW)
		(P) (MW)	(I) (MW)			
176	A.LAYD-G-GER	1.42	1.33	-1.77	-0.09	3.93
177	AVERML-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
179	CAPIVA-G-GER	9.23	11.98	23.87	13.48	4.47
180	EMBU -4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
181	I.SOLT-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
182	JUPIA -4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
183	SANGEL-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
184	TIRMAO-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
185	XAVANT-G-GER	5.97	5.56	-4.47	0.97	4.01
186	TAQUAR-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
187	P.PRIM-4-440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
189	AVERML-G-GER	20.13	20.25	59.33	36.89	4.61
190	EMBU -S-SIN	0.00	2.88	-0.68	0.00	0.00
191	I.SOLT-G 14	22.46	26.68	55.4	33.98	4.49
192	JUPIA -G 13	19.16	20.18	48.04	30.41	4.52
193	SANGEL-S-SIN	0	2.85	-0.77	0	0
194	TIRMAO-G 14	11.63	13.84	30.94	19.06	4.54
196	TAQUAR-G-GER	7.98	8.09	20.25	12.35	4.5
197	P.PRIM-G 13	20.62	20.82	60.32	36.58	4.59

IV. CONCLUSÕES

As análises realizadas mostram que fazer a alocação de perdas utilizando apenas um método pode não ser uma boa solução para todos os geradores e cargas, pois alocação discriminatória aparece. Um bom indicativo de procedimento é trabalhar com mais de um método para alocar os custos. Recomenda-se utilizar pelo menos um método que faça alocação negativa, a fim de obter informações sobre barras bem posicionadas. Na atribuição de custos com mais de um procedimento, um método pode ser utilizado para alocar as perdas e outro para produzir incentivos de forma a corrigir alocações discriminatórias. No software desenvolvido a opção foi fazer alocação pelo método PRO RATA e verificar desempenho na rede com o método Z-bus, pois estes métodos apresentaram um bom desempenho.

O software desenvolvido simula redes elétricas a partir do arquivo de saída do ANAREDE, que é um programa de cálculo de fluxo de potência amplamente utilizada nas empresas brasileiras.

Não ocorreram discrepâncias entre os resultados esperados e alcançados. Obviamente, estes resultados alcançados não são obtidos com o fim do projeto de pesquisa e sim a partir da utilização e divulgação do produto obtido. Em termos de produto obtido a pesquisa permitiu desenvolver um software com mais recursos do que o esperado inicialmente.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.J. Conejo, F.D. Galiana and I. Kockar, "Z-Bus loss allocation", IEEE Trans. On Power Systems, vol.16, no. 1, pp. 105-110, Feb. 2001
- [2] A.M. Leite da Silva, J.C.C. Costa, J.C.O Mello, J.C. Abreu, S.P. Romero, R. Treistman. "Determinação Dos Fatores de Perdas Aplicados na Medição do mercado Atacadista de Energia Elétrica", apresentado no XVI SNPTEE, Campinas, SP 2001. (GAT 018).
- [3] A.J. Conejo, J.M. Arroyo, N. Alguacil and A.L. Guijarro, "Transmission Loss Allocation: A comparison of different Practical Algorithms". IEEE Trans. On Power Systems, vol.17, no. 3, pp. 571 -576, Aug. 2002,.
- [4] [5] J. Bialek, "Tracing the flow of electricity". IEEE Proc-Gener. Transm. Distrib, Vol. 143, no. 4, pp. 313-320, Nov. 1996,.
- [5] F.D. Galiana, A.J. Conejo and I. Kockar, "Incremental Transmission Loss Allocation Under Pool Dispatch". IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 17, no. 1, pp. 26-33, Feb. 2002,.
- [6] O.I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*, New York: McGraw-Hill, 1982.
- [7] A.G. Espósito and J.R. Santos, Discussion of "Z-bus Loss Allocation". IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 17, no. 2, pp. 525, May 2002.
- [8] F. Schweppe, M. Caramanis, R. Tabors and R. Bohn, *Spot Pricing of Electricity*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [9] J.J. Gonzalez, and P. Basagoiti, "Spanish power exchange market and information system. Design concepts, and operating experience", in Proceeding of IEEE Power Industry Computer Applications Conference, Santa Clara, USA, 1999.
- [10] A. Padilha, D. A. Lima e W. Macedo "Alocação de Perdas na Transmissão: Uma Comparação de Propostas", XVII SNPTEE, Uberlândia MG, 2003, a ser publicado.
- [11] J.D. Glover and M. Sarma, *Power System Analysis and Design*. Boston, MA: 1987.
- [12] The Standard IEEE 118 test data. Disponível em: www.ee.washington.edu/research/pstca/sensitivity/sensreadme.txt em janeiro de 2003.

APÊNDICE A – RELATÓRIO DE SAÍDA COM A BARRA 192 FOCALIZADA

