

*II^o Congresso Brasileiro de Energia e Planejamento
Energético - 1990 - 1991*

CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DA GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E COMPOSTA EM SISTEMAS ELÉTRICOS REGIONAIS

Edson da Costa Bortoni

PEA/FEE/EPUSP¹

05508-900 São Paulo-SP tel: (011) 818-5318 fax: (011) 815-4272

Sergio Valdir Bajay

NIPE/UNICAMP

13083-970 Campinas-SP tel: (0192) 39-7596 fax: (0192) 39-4717

Afonso H. M. Santos

DEM/IEM/EFEI

37500-000 Itajubá-MG tel: (035) 629-1152 fax: (035) 629-1477

RESUMO

Os índices de confiabilidade relacionados à geração e transmissão em sistemas elétricos regionais são atualmente determinados utilizando-se dos mesmos critérios e conceitos aplicados a grandes sistemas interligados. Este trabalho propõe algumas medidas simplificadoras e critérios específicos para a avaliação da confiabilidade durante a fase de planejamento de tais sistemas.

INTRODUÇÃO

Uma das principais funções dos sistemas elétricos é prover um fornecimento confiável a seus consumidores. Durante o processo de planejamento de tais sistemas, esforços devem ser voltados no sentido de se obter os mais elevados índices de confiabilidade possíveis, dentro das restrições econômicas e financeiras existentes.

No caso do planejamento da geração e transmissão em sistemas regionais de pequeno e médio porte, com unidades geradoras descentralizadas, não existe ainda uma metodologia específica apropriada a estes casos e, sendo assim, utiliza-se, no país, dos mesmos critérios e conceitos aplicados aos grandes sistemas interligados.

Neste sentido, este trabalho propõe algumas medidas simplificadoras para a avaliação da confiabilidade quando do planejamento de tais sistemas, em termos de representação de seus elementos, topologia

da rede, etc., bem como critérios específicos para o cálculo de índices tais como a probabilidade de perda de carga (LOLP) e o valor esperado da demanda não servida (EDNS), considerando os efeitos de unidades de geração descentralizadas, tais como pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), grupos diesel (PCTs) e plantas de cogeração industrial interligadas ao sistema. Como exemplo, as metodologias são aplicadas a um sistema regional brasileiro, comentando-se as vantagens e desvantagens oriundas da sua aplicação, face aos métodos atualmente utilizados.

CONFIABILIDADE DA GERAÇÃO

Quando se estuda a confiabilidade do sistema de geração isoladamente, supõe-se que toda a carga e toda a geração estão ligadas em uma única barra. Desta forma, o déficit de atendimento é computado simplesmente como a diferença entre os requisitos do mercado e a disponibilidade de geração, incluindo-se, aí, as perdas nos sistemas de transmissão.

Neste contexto, a confiabilidade da geração pode ser avaliada através do índice LOLP - "Loss Of Load Probability". De uma maneira geral, este índice mostra qual a probabilidade da carga ser igual ou superior à capacidade geradora total instalada.

O procedimento básico para o cálculo do LOLP é feito combinando-se as funções distribuição de probabilidade de todas as unidades geradoras envolvidas através de um processo estatístico, comparando-se os resultados obtidos com a carga, e calculando-se,

finalmente, a probabilidade de falha de atendimento total à carga.

A partir do LOLP pode-se calcular o LOLE - "Loss Of Load Expectation" que normalmente é expresso em dias ou horas por ano em que a carga de ponta diária não é atendida. Pode-se ainda obter o índice EDNS, ou seja, o valor esperado da demanda não servida e, dentro do período de tempo estudado, o EENS, que é o valor esperado da energia não supriada (Sullivan, 1977).

O processo de combinação das funções de distribuição de probabilidade geralmente é feito de duas formas, ou seja, através de uma enumeração completa de todos os estados possíveis do sistema, ou através de uma convolução entre as distribuições da geração e da demanda, sendo que esta última pode ser feita de uma forma discreta ou contínua, utilizando-se, por exemplo, o método dos cumulantes. Estes processos são descritos a seguir.

Enumeração dos Estados Possíveis

Um dos métodos mais utilizados para o cálculo do LOLP é a utilização de uma função de distribuição de probabilidade discreta para a representação da capacidade disponível de geração e suas probabilidades associadas para fazer a combinação com a curva de demanda do sistema.

Neste processo, cada unidade geradora pode ser representada por um modelo Markoviano de dois estados de operação. A unidade pode estar no estado 1 - em serviço, capacidade total disponível - e, então, aleatoriamente, ir para o estado 2 - fora de serviço, capacidade total indisponível - e vice-versa, conforme mostrado na figura 1.

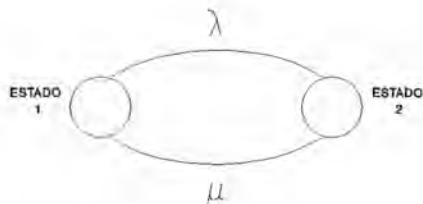


Figura 1 Modelo de dois estados para unidades geradoras

Neste modelo, λ é a taxa de falhas e μ é a taxa de reparos. Define-se p e q como sendo a probabilidade

da unidade geradora se encontrar no estado 1 ou 2, respectivamente.

Sendo assim, pode-se levantar as probabilidades de ocorrência das diversas combinações de parada forçada. As capacidades disponíveis deverão ser combinadas com a característica da carga do sistema para o cálculo do LOLP. Este último é dado pelo produto da probabilidade de não atendimento da demanda pelo tempo em que a carga excede a capacidade disponível associada, representando um corte de carga (Camargo, 1984).

Convolução Discreta

Uma forma alternativa para o cálculo do LOLP pode ser obtida utilizando-se a curva de carga equivalente do sistema. Para se entender o conceito de curva de carga equivalente, basta imaginar que uma unidade geradora com capacidade C_i disponível aleatoriamente pode ser modelada como sendo uma unidade fictícia com capacidade C_i , 100% confiável, conectada a uma carga fictícia L_i de valor igual a C_i , cuja disponibilidade é igual à probabilidade de falha, q_i , da máquina real. Sendo assim, quando a carga fictícia é disponível, a capacidade fornecida ao sistema é nula, representando uma perda de geração, conforme ilustrado na figura 2.

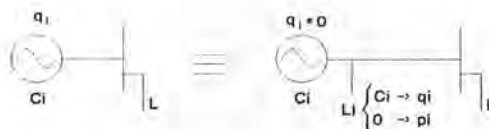


Figura 2 Carga fictícia representando a perda de geração

Desta forma, compondo-se a curva de carga real com as curvas de carga fictícias, através de um processo de convolução, pode-se obter a curva de carga equivalente - CDCE (Santos, 1987) -, denotada por $F(L_e)$, necessária para o cálculo do LOLP.

O princípio básico para o cálculo do LOLP através deste procedimento é apresentado na figura 3, onde C_i é a capacidade geradora total instalada e L_e é a carga equivalente. Neste caso o LOLP será dado por $F(L_e = C_i)$. Observe-se que a área hachurada representa o valor esperado da demanda não servida, EDNS, que pode facilmente ser calculado através de uma simples

integração. O EENS é igual ao produto do EDNS pelo período de tempo considerado na análise,

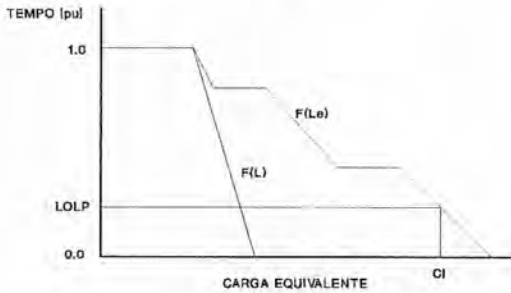


Figura 3 Determinação do LOLP através da CDCE

Esta curva é construída através da convolução entre a curva de permanência de carga real e as curvas de permanência das cargas fictícias, utilizando-se, para tanto, a seguinte equação recursiva:

$$F^i(Le) = F^{i-1}(Le) \cdot p_i + F^{i-1}(Le - Li) \cdot q_i \quad (1)$$

onde $F^i(Le)$ é a nova curva equivalente, resultante da inclusão da i -ésima carga fictícia - unidade geradora -, Li .

Esta equação recursiva deve ser empregada até que todas as unidades geradoras disponíveis no sistema tenham sido consideradas. Observe-se que:

$$F^i(Le) = \begin{cases} F(L) & , p/i = 0 \\ F(Le) & , p/i = N \end{cases} \quad (2)$$

Aproximação Contínua

Os métodos para o cálculo do LOLP apresentados até agora são bastante precisos, porém exigem um grande esforço computacional para que sejam aplicados e, na ocorrência de alguma modificação do sistema, pouco, ou quase nada, dos cálculos já executados podem ser aproveitados, exigindo um novo e completo cálculo para cada estado do sistema em que se deseja avaliar a confiabilidade.

Recentemente, inúmeros trabalhos têm sido divulgados apresentando o uso de distribuições contínuas no cálculo da confiabilidade de sistemas elétricos, cuja principal vantagem é que os cumulantes da distribuição resultante da convolução são iguais à soma dos cumulantes de mesma ordem das distribuições que a compõem. Sendo assim, basta calcular os cumulantes das

distribuições das unidades geradoras apenas uma vez e, à cada configuração do sistema, a distribuição resultante será obtida através de operações de adição, somente, elevando a velocidade e eficiência dos cálculos (Levy e Kahn, 1982; Alavi e Singh, 1990).

A expansão que permite representar uma função em termos de seus cumulantes é a expansão de Edgeworth que, formalmente, é equivalente à de Gram-Charlier; a única diferença é que Edgeworth arranja os termos em ordem crescente das derivadas, de modo que, para os termos acima de uma certa ordem, o cálculo dos cumulantes não é necessário.

De posse dos cumulantes da função resultante, pode-se calcular a probabilidade de perda de carga para cada condição do sistema de uma forma bastante otimizada devido à simplicidade computacional do algoritmo.

CONFIABILIDADE DA TRANSMISSÃO E COMPOSTA

A confiabilidade de sistemas de transmissão de energia elétrica pode ser avaliada através de métodos de simulação e também por métodos analíticos, sendo que os últimos podem ser divididos em métodos de espaço de estados e métodos de redes. Neste trabalho, a confiabilidade da transmissão de energia em um sistema de transmissão também é avaliada pelos índices LOLP e EDNS. Baseado no critério de continuidade entre carga e geração, faz-se a análise da rede através de uma modelagem utilizando a teoria dos grafos.

Para tanto, deve-se determinar os estados aceitáveis e inaceitáveis para o sistema. Note-se que um estado aceitável implica em um atendimento total à demanda sem que qualquer componente do sistema esteja operando em sobrecarga.

Nesta modelagem considera-se que cada elemento v_i da rede pode se encontrar em dois estados de operação, ou seja, o elemento pode estar no estado "1", em funcionamento com capacidade C_i e probabilidade p ; ou no estado "0", fora de operação, com probabilidade q . Isto faz com que o sistema possa se apresentar em 2^m estados distintos de operação, onde m é o número de elementos do sistema, incluindo-se aí as linhas de transmissão e unidades geradoras (confiabilidade composta).

Logo, a probabilidade, $P(x)$, do sistema se encontrar em um estado x qualquer é dada por:

$$P(x) = \prod_{j=1}^m P(v_j) \quad (3)$$

com

$$x = (v_1, v_2, \dots, v_m)$$

$$P(v_i) = p_i \quad \text{se } v_i = 1$$

$$P(v_i) = q_i \quad \text{se } v_i = 0$$

O problema reside em se decompor o espaço de estado completo em estados aceitáveis (A) e estados inaceitáveis (B). Os estados inaceitáveis são aqueles no qual a carga L do sistema não pode ser satisfeita, seja por capacidade insuficiente de geração, seja por capacidade restrita de transmissão.

Nestes termos, o LOLP pode ser definido por:

$$LOLP = \sum_{x \in B} P(x) \quad (4)$$

onde B é o subconjunto de estados inaceitáveis.

Para cada estado inaceitável, a quantidade de carga servida é $G < L$, e o valor esperado da demanda não servida pode ser expresso por:

$$EDNS = \sum_{x \in B} P(x) \cdot (L - G) \quad (5)$$

O subconjunto B, representativo dos estados inaceitáveis, pode ainda ser decomposto em subconjuntos chamados "individuais", $B_{ind}(i)$, para cada barra de carga i. O subconjunto individual contém os estados de capacidade no qual a carga L_i não é satisfeita. Conseqüentemente o LOLP individual, $LOLP_i$, e o valor esperado da demanda não servida na barra i, $EDNS_i$, podem ser calculados através das expressões (6) e (7), respectivamente.

$$LOLP_i = \sum_{x \in B_{ind}(i)} P(x) \quad (6)$$

$$EDNS_i = \sum_{x \in B_{ind}(i)} P(x) \cdot (L_i - G_i) \quad (7)$$

Dada uma rede com m elementos, verifica-se que o processo que acabou de ser descrito é direto, bastando determinar-se quais os estados, dentre os 2^m possíveis, são inaceitáveis e, em seguida, calcular as suas probabilidades de ocorrência e os fluxos máximos associados, para o cálculo dos índices de confiabilidade. Porém, quando o tamanho do sistema vai aumentando, o esforço computacional necessário para esta análise torna

o método proibitivo. Basta observar que, para um sistema com apenas 20 elementos, existem mais de um milhão (2^{20}) de combinações diferentes entre estes elementos e os seus estados possíveis, o que leva a motivar a aplicação de técnicas especiais de programação e procedimentos de decomposição e classificação para a análise de sistemas reais.

ADAPTAÇÕES PARA SISTEMAS REGIONAIS

Confiabilidade da Geração

Embora nos últimos anos tenha havido uma forte tendência para a aplicação de métodos baseados nos cumulantes para a avaliação da confiabilidade de sistemas de geração, algumas características peculiares a estes métodos os tornam inapropriados quando aplicados a pequenos sistemas, como são os abordados por este trabalho. Tais inconvenientes são apresentados a seguir:

- Posto que o método baseia-se, em parte, no teorema central do limite, pode-se crer que ele só apresentará precisão suficiente quando o número de variáveis - unidades geradoras - for suficientemente grande, o que não é típico nos sistemas aqui analisados;
- A expansão em séries é apropriada quando as variáveis aleatórias são caracterizadas por funções de distribuição contínuas. Isto torna-se um problema quando aplicada a unidades geradoras cuja distribuição de probabilidade é composta por valores discretos, como no modelo de dois estados;
- Um sistema com uma grande discrepância entre as capacidades das unidades geradoras traz inconveniências para a aplicação do método, tornando o resultado tendencioso;
- Se as taxas de saída forçada forem muito baixas, as séries podem apresentar propriedades inconvenientes e precisão limitada, inclusive levando a valores de probabilidade acumulada negativos e a uma má definição da mesma.

Todos estes aspectos assumem maior ou menor relevância em função do número de termos utilizados na obtenção da série. Entretanto, não se determinou até hoje uma sistemática que aponte este número para que se obtenha um melhor resultado.

Face ao exposto, procurou-se não utilizar esta técnica para o cálculo da confiabilidade da geração e, dentre as metodologias restantes, optou-se pela fórmula recursiva do método de carga efetiva que, embora apresente uma ordem de processamento duas vezes maior que o método da enumeração completa dos estados, traz a

vantagem de cada iteração ser muito mais rápida além de oferecer uma maior facilidade de implementação computacional. Deve-se lembrar que os sistemas aqui analisados apresentam um número reduzido de grupos geradores.

Confiabilidade da Transmissão

Para o cálculo da confiabilidade da transmissão foi desenvolvido um programa computacional (Bortoni, 1993) cuja concepção visou a maximização da eficiência dos cálculos, posto que o esforço computacional cresce rapidamente com o número de elementos do sistema.

Houve também a preocupação em se determinar os chamados índices individuais em cada barra, já que os índices globais descrevem a qualidade do sistema em termos de um desempenho médio das suas diversas partes e, mesmo que este se apresente satisfatório, o desempenho de algumas partes da rede pode se apresentar abaixo dos limites especificados.

Para tanto, foram empregadas técnicas especiais de programação em conjunto com técnicas de decomposição. A idéia básica do algoritmo parte da construção de uma árvore com as possíveis combinações de falhas, cujas ordens são iguais aos níveis de profundidade que se avança na árvore. Por exemplo, no nível 3 de profundidade da árvore se encontram todas as combinações de falhas de terceira ordem - três elementos falhados.

Esta árvore é construída através da manipulação de bits, como é mostrado na figura 4, tornando mínimos os dispêndios com memória. Neste caso, cada bit está relacionado a um elemento da rede.

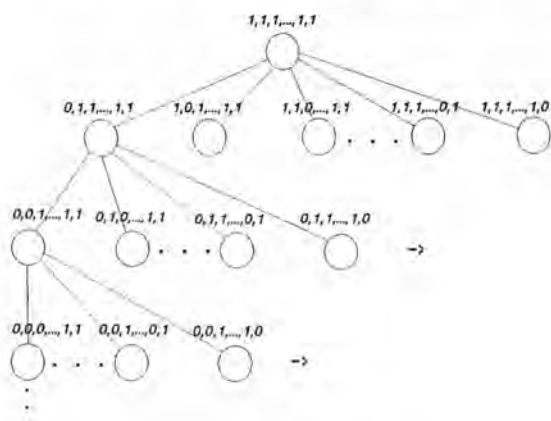


Figura 4 - Árvore de estados da rede

Para cada estado do sistema verifica-se se este é aceitável ($x \in A$) ou se é inaceitável ($x \in B$), acumulando-se

as suas probabilidades de ocorrência a $P(A)$ ou a $P(B)$, respectivamente. Como:

$$P(A) + P(B) + P(U) = 1 \tag{8}$$

onde $P(U)$ é a probabilidade associada aos estados ainda não classificados, tem-se que:

$$P(U) = 1 - P(A) - P(B) \tag{9}$$

A vantagem deste procedimento é que tão logo o valor da probabilidade dos estados não-classificados seja menor que uma certa tolerância, γ , admissível no horizonte de planejamento, o processo pode ser dado por terminado, havendo, então, um truncamento do espaço de estados possíveis quando

$$P(U) \leq \gamma \tag{10}$$

Como as probabilidades associadas a falhas de ordens superiores são muito baixas com relação às falhas de menor ordem, percebe-se que não se torna necessário descer a níveis muito baixos da árvore para que a condição acima seja satisfeita. Em geral, a análise de falhas no terceiro ou quarto nível é suficiente. Isto reduz tremendamente o esforço computacional.

APLICAÇÃO A UM SISTEMA REGIONAL

A título de exemplificação, as metodologias apresentadas serão aplicadas a um sistema regional real pertencente a CEMIG e localizado no sul de Minas Gerais. O sistema escolhido é exatamente do tipo daqueles abordado pelo trabalho, que são pequenos sistemas elétricos compostos por várias fontes de geração descentralizada conectadas entre si através de um sistema de subtransmissão. Este tipo de sistema pode também ter a oportunidade de comprar energia de um grande sistema ou não, porem busca-se maximizar a utilização de recursos energéticos disponíveis na própria região.

O sistema é apresentado na figura 5 e seus dados podem ser encontrados em (Bortoni, 1993). Serão considerados, além da situação atual, mais dois cenários. Um considerando apenas a expansão da transmissão e outro considerando a expansão da geração e da transmissão.

Nesta expansão considera-se as entradas de todas as unidades geradoras e das seguintes linhas candidatas: 12-11, 11-03, 03-04 e 04-05.

Os resultados obtidos com a aplicação dos métodos se encontram na tabela 1

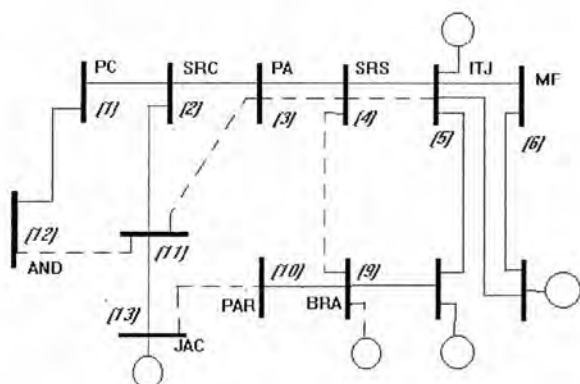


Figura 5 Sistema regional "Sul-Sul" - CEMIG

Nota:

1 - Este trabalho foi desenvolvido enquanto o autor se encontrava junto ao Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, trabalhando na obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos, suportado financeiramente pelo CNPq.

REFERÊNCIAS

- Sullivan, R; **Power System Planning**; McGraw Hill; 1977
- Camargo, C.C.; **Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica**; LTC/ELETRORÁS/FEESC; 1984
- Santos, A.H.M.; **Planejamento de Centrais Hidrelétricas de Pequeno Porte**; Tese de Doutorado; UNICAMP; 1987
- Levy, D.J; Kahn, E.P.; **Accuracy of the Edgeworth Approximation for LOLP Calculations in Small power Systems**; Electrical Power & Energy Systems; Vol 14; Num 2/3; 1982
- Alavi-Sereshki, M.M.; Singh, C.; **A Generalized Continuous Distribution Approach for Generating Capacity Reliability Evaluation and its Application**; IEEE Trans. on PWRs, Vol 6, Num 1, 1990
- Bortoni, E.C; **Planejamento de Sistemas Elétricos Regionais Considerando a Contribuição da Geração Descentralizada**; Dissertação de Mestrado; UNICAMP; 1993

TABELA 1 Resultados das análise de confiabilidade para o sistema teste

BARRA	SISTEMA INICIAL		EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO		EXPANSÃO GER./TRANS.	
	LOLP (p.u.)	EDNS (MW)	LOLP (p.u.)	EDNS (MW)	LOLP (p.u.)	EDNS (MW)
2	0,0037	0,0254	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003
3	0,0851	2,0002	0,0041	0,0954	0,0000	0,0002
4	0,1083	0,2521	0,0046	0,0091	0,0000	0,0000
5	0,1401	2,2509	0,0054	0,0862	0,0001	0,0000
6	0,0014	0,0046	0,0003	0,0011	0,0003	0,0006
9	0,0011	0,0011	0,0001	0,0004	0,0000	0,0000
10	0,0253	0,0738	0,0260	0,0779	0,0270	0,0811
11	0,0306	0,2728	0,0000	0,0004	0,0001	0,0008
12	0,0417	0,1252	0,0020	0,0059	0,0022	0,0065
13	0,0537	0,2677	0,0249	0,1246	0,0261	0,1305
TOTAL	0,2389	9,2035	0,0700	0,8318	0,0117	0,1305
Erro máximo		0,0149		0,0150		0,0063
Número de iterações		98		262		1048
Espaco analisado (%)		0,075		0,012		0,012
Ordem de contingência		2		3		3