

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE SUBTRANSMISSÃO BASEADA EM ÍNDICES DE SEVERIDADE

THIAGO O. SANTOS¹ LEONIDAS C. RESENDE¹ LUIZ A. F. MANSO¹ FELIPE L. MIRANDA¹
ARMANDO M. LEITE DA SILVA²

1 – DEPEL – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ,

2 – DEE – Depto de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC Rio,

E-mails: tos@oi.com.br, leonidas@ufsj.edu.br, lmanso@ufsj.edu.br,
felipe.laure@hotmail.com, armando@ele.puc-rio.br

Abstract— This paper proposes a method for obtaining reliability performance criteria of sub-transmission systems. Based on least-squares curve-fitting and severity indices, estimated by a reliability analysis, a robust classification of the adequacy of sub-transmission systems is established. The analysis resulting from the proposed approach constitutes important support information for the decision-making process in the expansion planning of sub-transmission networks. Three real systems are used to test and validate the proposed method and all results are extensively discussed.

Keywords— Sub-transmission planning, Reliability, Severity index, Least-squares method.

Resumo— Este artigo tem como objetivo propor uma metodologia para a obtenção de critérios de classificação do desempenho de sistemas de subtransmissão. Com base em um ajuste de curvas, obtido pelo método dos mínimos quadrados, e em índices de severidade, estimados via análise de confiabilidade, é estabelecida uma simples e eficiente classificação para a adequação de sistemas de subtransmissão, a qual constitui um importante subsídio para a tomada de decisões no âmbito do planejamento da expansão desses sistemas. Três sistemas reais de subtransmissão são utilizados para teste e validação da metodologia proposta, sendo os resultados detalhadamente discutidos.

Palavras-Chave— Planejamento da subtransmissão, Confiabilidade, Índice de severidade, Método dos mínimos quadrados.

1 Introdução

A energia representa um papel fundamental na existência humana. Trata-se do principal fomentador do desenvolvimento econômico e social, proporcionando inúmeras oportunidades e alternativas para a sociedade ao fornecer potencial elétrico, térmico e mecânico às ações humanas. Dentre as formas de energia disponíveis, atenção especial deve ser dada à energia elétrica, que desde sua descoberta assumiu um papel de destaque na história, representando a principal e mais nobre fonte de energia utilizada, tornando-se essencial para o mundo moderno.

Sua relativa facilidade de geração, transporte, distribuição e utilização, com as consequentes transformações em outras formas de energia, atribuem à eletricidade uma característica de universalização, disseminando o seu uso pela humanidade. Entretanto, ao proporcionar qualidade de vida, desenvolvimento e produtividade, provoca na sociedade moderna um grau elevado de dependência de um fornecimento regular de energia. Isso faz com que falhas e cortes de energia elétrica tragam consequências, muitas vezes desastrosas, para a sociedade, a qual demanda cada vez mais por um fornecimento contínuo através de sistemas pouco susceptíveis a falhas, além de uma atuação eficaz de órgãos reguladores.

Dessa forma, sistemas elétricos de potência devem ser constantemente monitorados e analisados pelos agentes do setor elétrico, geralmente por meio de índices de confiabilidade. Isto permite uma leitura sobre o desempenho do sistema, identificando falhas potenciais que podem levar todo o sistema a uma condição crítica, trazendo transtornos a todos os envolvidos, consumidores ou concessionárias.

Os primeiros trabalhos significativos dedicados à avaliação da confiabilidade de redes de transmissão de energia elétrica surgiram na década de 60. Tais trabalhos introduziram alguns índices de confiabilidade a partir de parâmetros básicos de componentes da rede elétrica, tais como frequência anual, duração prevista e média anual de falhas, proporcionando aos planejadores de sistemas de transmissão e distribuição ferramentas que podem ser usadas em conjunto com a análise econômica e técnica para avaliar alternativas de planejamento (Gaver et al., 1964; Todd, 1964).

As técnicas de avaliação da confiabilidade passaram por um desenvolvimento considerável nas últimas décadas, sobretudo para sistemas de geração e sistemas compostos de geração e transmissão. Dentre os inúmeros trabalhos encontrados na literatura, é pertinente destacar o realizado pelo *IEEE Working Group on Measurement Indices* (Fong et al., 1989), o qual propõe uma escala de classificação de sistemas compostos de geração e transmissão, com base no Índice de Severidade (IS). Esta escala tem como principal vantagem permitir uma avaliação, em certa medida, independente da dimensão do sistema. No entanto, quando aplicada a sistemas de subtransmissão, os quais são menos malhados, ela se mostra muito rigorosa, não permitindo, por exemplo, avaliar adequadamente os impactos no desempenho destes sistemas decorrentes da alocação de reforços.

Nesse contexto, a principal contribuição deste artigo é o desenvolvimento de uma metodologia para a definição de valores de referência para a classificação do desempenho de sistemas de subtransmissão. Procedimento útil para planejadores e operadores ao promover retorno de informações sobre o desempenho e da eficácia de planos executados. Essa classifi-

cação é realizada através da análise do IS de distúrbios, para o qual é fornecida uma tabela de valores para uma rápida classificação de um sistema qualquer, aos moldes das tabelas já existentes para sistemas de transmissão (Fong et al., 1989). Embora a distinção entre sistemas de transmissão e subtransmissão seja dificultada pelas características do sistema elétrico, que apresenta vários níveis de tensão e está sempre em evolução, neste artigo o termo subtransmissão é utilizado para denominar o conjunto de linhas de transmissão e subestações que conectam a transmissão às subestações de distribuição em tensões entre 69 kV e 138kV (ANEEL, 2008).

2 Confiabilidade

2.1 Aspectos Gerais

Em termos gerais, confiabilidade de um sistema ou de um componente pode ser definida como a capacidade deste de realizar e manter seu funcionamento, i. e., executar suas funções pré-determinadas em circunstâncias operativas de rotina, bem como em circunstâncias hostis e inesperadas, dentro de um período de tempo pré-determinado. Em se tratando de sistemas elétricos, um dos principais objetivos do planejamento e operação é atingir um determinado grau de confiabilidade no suprimento de energia elétrica aos consumidores. Para isso, planos de investimento e estratégias de operação precisam prever a possibilidade de ocorrência de falhas dos componentes e outros distúrbios no sistema, de forma a estimar se a qualidade e continuidade do suprimento permanecerão dentro de níveis satisfatórios.

A qualidade e continuidade do fornecimento de energia são mensuradas por vários índices de desempenho, que possibilitam contínua avaliação da confiabilidade de sistemas elétricos. Isso é fundamental para planejadores do sistema, pois fornece um *feedback* sobre o desempenho e eficácia de eventuais planos executados, além de ser útil para setores de operação e manutenção em relação aos efeitos surtidos sobre a confiabilidade em virtude da adoção de práticas de operação (Fong et al., 1989).

A estimação dos índices de confiabilidade geralmente se baseia em técnicas probabilísticas para modelar incertezas associadas a falhas nos equipamentos e flutuações de carga. Apresentam características fundamentais, como raridade, frequência de ocorrência, duração e impacto dos eventos simulados (Billinton e Allan, 1994).

2.2 Índices de Confiabilidade

As estimativas dos índices de confiabilidade, sobretudo dos sistemas compostos de geração e transmissão, são obtidas através de algoritmos de avaliação, os quais são baseados em duas representações distintas: espaço de estados e cronológica. Em geral, tais algoritmos são compostos de três passos principais (Pereira et al., 1992):

- a) Selecione um estado do sistema x^k (i.e. nível de carga, disponibilidade dos equipamentos, etc.);
- b) Analise o desempenho do estado selecionado (i.e. verifique se as unidades geradoras e os circuitos disponíveis são capazes de suprir a carga sem violar qualquer limite operativo; se necessário, realize medidas corretivas, tais como redespacho da geração, corte de carga, etc.);
- c) Estime os índices de confiabilidade (i.e. índices de perda de carga, etc.); se a precisão das estimativas é aceitável, pare; senão volte ao passo (a).

Os índices de perda de carga são, então, obtidos a partir do valor esperado da função teste $F(x^k)$, que avalia os estados do sistema (Pereira et al., 1992; Leite da Silva et al., 2000):

$$\tilde{E}[F] = \sum_{x \in X} F(x^k) \times P(x^k) \quad (1)$$

Todos os índices básicos de confiabilidade podem ser estimados pela Equação (1), dependendo da definição dada à função teste F .

Usualmente, os programas de avaliação da confiabilidade fornecem o seguinte conjunto de índices (Billinton e Allan, 1994; Pereira et al., 1992): LOLP (*Loss of Load Probability* - Probabilidade de perda de carga); LOLE (*Loss of Load Expectation* - Número esperado de horas de perda de carga); LOLF (*Loss of Load Frequency* - Frequência de perda de carga); LODL (*Loss of Load Duration* - Duração média de perda de carga); EPNS (*Expected Power Not Supplied* - Valor esperado de potência não suprida); EENS (*Expected Energy Not Supplied* - Valor esperado de energia não suprida); e IS (Índice de Severidade). Especificamente neste artigo, especial atenção é dedicada ao IS, dado pela Equação (2), o qual será utilizado na metodologia proposta.

$$IS = \frac{60 \times EENS}{L} \quad (2)$$

A severidade é, portanto, obtida pela divisão de um valor estimado da energia interrompida (em MWh/ano) por L , que corresponde ao pico de carga anual do sistema, dado em MW. O valor numérico é multiplicado por 60 para a conversão em minutos por ano (ONS, 2003). Entre dois sistemas quaisquer, o mais confiável é o que apresenta menor IS.

O IS exprime um tempo fictício de uma perturbação imaginária que seria necessária para acumular um corte de energia exatamente equivalente ao montante fornecido pelo índice EENS, se toda a carga do sistema, na condição de pico, fosse afetada (EPE, 2007). Trata-se de um indicador de risco que captura não apenas a habitualidade das falhas do sistema, mas também suas gravidades e consequências. Pelo fato de ser um indicador normalizado, permite a comparação de sistemas de portes e naturezas distintas no que se refere ao impacto de cortes de carga, advindo daí a sua importância (ONS, 2003).

Tabela 1. Classificação da severidade de distúrbios do sistema

Classific.	IS (min/ano)	Status	Observações
Grau 0	$IS < 1$	Favorável	Baixíssimo risco
Grau 1	$1 \leq IS < 10$	Satisfatório	Baixo risco
Grau 2	$10 \leq IS < 100$	Limítrofe	Risco médio
Grau 3	$100 \leq IS < 1.000$	Grave	Impacto severo em alguns consumidores
Grau 4	$1.000 \leq IS$	Muito Grave	Impacto severo em muitos consumidores

Tabela 2. Dados gerais dos sistemas

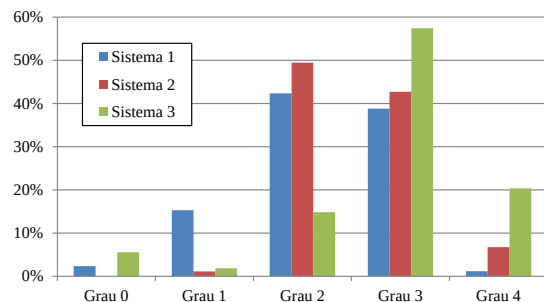
Dados	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Barras	238	236	285
Barras de carga	85	89	54
Circuitos	276	295	320
Pico de carga (MW)	2.555,7	962,6	1.328,0

Tabela 3. Índices globais dos sistemas

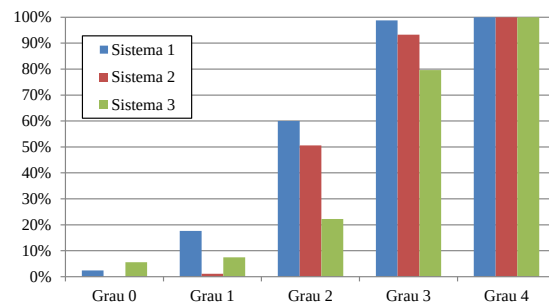
Índice	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
LOLP ($\times 10^2$)	1,64	2,58	2,70
LOLE (horas/ano)	143,66	226,08	236,51
EENS (MWh/ano)	2.773	2.503	4.659
EPNS (MW)	0,3165	0,2858	0,5318
LOLF (oc./ano)	47,75	72,86	64,65
LOLD (horas)	3,01	3,10	3,66
IS (minutos/ano)	65,10	156,04	215,21

As severidades de distúrbios ocasionados por eventos individuais podem ser agrupadas em intervalos de gravidade (chamados graus de severidade). O objetivo é segregar grandes perturbações da rede de outras de menor importância. Entretanto, impactos sociais e econômicos são difíceis de serem determinados com precisão. Portanto, é suficientemente satisfatório classificar as perturbações do sistema apenas em termos de categorias gerais através dos graus de severidade (Fong et al., 1989). A Tabela 1 mostra a hierarquia usada na classificação da confiabilidade do sistema via IS, com base logarítmica.

Apesar de ser concebida para avaliar o grau de severidade de eventos individuais, a classificação definida pela Tabela 1 pode ser adaptada para avaliar o desempenho de um sistema, ou de parte dele, tendo como base o IS. Esta tabela foi concebida para sistemas compostos de geração e transmissão. Entretanto, não existe uma tabela aos seus moldes que promova uma classificação do desempenho dos sistemas de subtransmissão. A construção desta nova classificação representa a principal contribuição deste artigo e será desenvolvida na próxima seção.



a) Individual



b) Acumulada

Figura 1. Distribuição de frequência das barras dos Sistemas Testes 1, 2 e 3 por Grau de Severidade

3 Metodologia Proposta

3.1 Sistemas Utilizados

A classificação quanto ao IS de acordo com os parâmetros fornecidos pela Tabela 1 é aplicada a três sistemas de subtransmissão, que posteriormente também serão utilizados para o desenvolvimento da nova tabela proposta por este artigo.

Os três sistemas utilizados, cujos dados são resumidos na Tabela 2, representam sistemas reais de subtransmissão, os quais apresentam desempenhos distintos em termos de confiabilidade. Utiliza-se o programa NH2 (CEPEL, 2007) para a obtenção dos IS por barra de cada sistema através da avaliação da confiabilidade pelo método de enumeração de estados, considerando contingências simples dos circuitos da área de contingência.

Na Tabela 3 são apresentados os índices globais de perda de carga estimados para os três sistemas. Cabe salientar que estes índices foram obtidos para a condição de carga pico, o que explica os elevados valores para a LOLE, por exemplo. Com base neste índice, e também na LOLF, conclui-se que o Sistema 1 é aquele com o melhor desempenho. Já uma análise rude utilizando a EENS aponta o Sistema 2 como ligeiramente melhor que o Sistema 1.

Especificamente em relação à severidade, é possível notar que o Sistema 1 possui um IS global em torno de 65 minutos/ano, o que, de acordo com a Tabela 1, o enquadraria em um sistema de Grau 2, apresentando-se como um sistema de risco médio e status limítrofe. Já os Sistemas 2 e 3 apresentam IS de 156 e 215 minutos/ano, respectivamente, sendo classificados no Grau 3, de status considerado grave, com impacto severo para alguns consumidores.

Com relação ao IS por barra, a Figura 1-a mostra a distribuição de frequências em valores percentuais das barras dos três sistemas, classificadas por grau de severidade de acordo com a Tabela 1. A Figura 1-b mostra as frequências acumuladas das barras seguindo a mesma classificação. Nota-se que o Sistema 3 possui grande parcela de suas barras no Grau 3 (cerca de 57%), grau considerado insatisfatório de acordo com a Tabela 1. Além disso, possui 22,22% de suas barras classificadas como Graus 0 a 2, o que representa quase a mesma quantidade de barras classificadas como Grau 4, caracterizando sua condição de sistema com o pior desempenho. De fato, o Sistema 3 necessita de ajustes e melhorias para que seu desempenho alcance o patamar em que se encontram os demais sistemas apresentados.

Contudo, cabe destacar que 38,82% das barras do Sistema 1 e 42,70% das barras do Sistema 2 são classificadas como Grau 3, considerado grave. Deste modo, tais barras são identificadas como pertencentes a uma condição operativa que pode provocar impactos severos aos consumidores, levando a avaliações negativas a respeito do IS em sistemas que, ao contrário da classificação proposta, apresentam bons desempenhos. O Sistema 2 possui inclusive IS global de 156,04 minutos/ano, considerado grave segundo a classificação da Tabela 1.

Estas classificações negativas, com base no IS, podem ser decorrentes de dois fatores: da falta de robustez e margem das redes de subtransmissão para absorver as saídas dos equipamentos ou da Tabela 1 apresentar valores de referência muito rigorosos para redes de subtransmissão, as quais possuem pouca redundância. Portanto, torna-se necessário uma adequação da aplicação da classificação definida na Tabela 1 para os sistemas de subtransmissão.

3.2 Nova Tabela de Classificação

De acordo com a Tabela 3 e a Figura 1, nota-se certo equilíbrio quanto às barras dos Sistemas 1 e 2. Entretanto, o Sistema 1 possui mais da metade de suas barras nos graus 0, 1 e 2, cerca de 60%, contra pouco mais que 50% das barras do Sistema 2. Além disso, existem mais barras do Sistema 2 (6,74%) classificadas como Grau 4 (status muito grave) do que barras do Sistema 1 (1,18%). Dessa forma, considerando ainda os valores globais do IS de cada sistema conforme a Tabela 3, sob o ponto de vista da severidade, conclui-se que o Sistema 1 possui o melhor desempenho dentre os três sistemas analisados, sendo, portanto, escolhido neste estudo como referência para a construção da nova tabela de classificação, específica para sistemas de subtransmissão.

Os percentuais de barras em cada grau de classificação fornecem apenas cinco pontos. Faz-se necessária, então, a aplicação de alguma aproximação matemática de forma encontrar uma curva que forneça, com uma boa aproximação, a variação contínua para os percentuais máximos de barras em função do IS. Desta forma, pode-se elaborar a nova escala do grau de severidade mesmo com valores a princípio

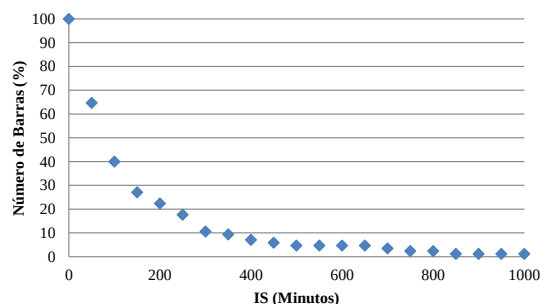


Figura 2. Diagrama de dispersão: Percentual de barras versus IS

Tabela 4. Percentual máximo de barras admitido em cada Grau

Grau	Máximo de barras admitido (%)
0	100
1	75
2	50
3	15
4	5

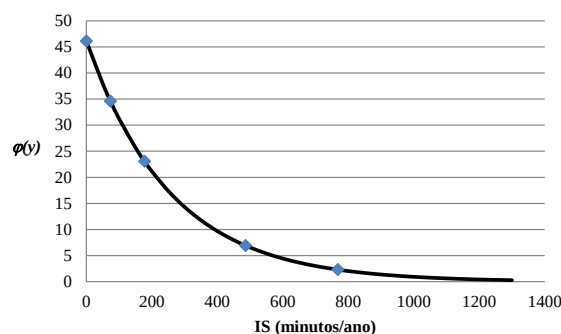


Figura 3. Valores percentuais máximos das barras em $\phi(y)$

não fornecidos pelos resultados obtidos para o Sistema 1.

Para a utilização do método dos mínimos quadrados (Ruggiero e Lopes, 2008), na obtenção de uma função que melhor representa o comportamento do IS versus o percentual de barras, deve-se inicialmente agrupar os valores dentro de faixas ou classes e obter um diagrama de dispersão, como o ilustrado na Figura 2, o qual utiliza intervalo de 50 minutos/ano para IS.

Após a aplicação de algumas transformações convenientes e considerando a característica exponencial da curva, a função encontrada que melhor ajusta as informações fornecidas pelo Sistema 1 é dada na Equação 3.

$$\phi(y) = \alpha_1 e^{-\alpha_2 y} = 46,1086e^{-0,0039y} \quad (3)$$

Para a construção da nova tabela, os graus são escalonados a partir de percentuais admitidos pelo planejador para limitar a quantidade de barras em cada grau de severidade. Na Tabela 4 são apresentados os valores propostos neste artigo. Ressalta-se que estes valores podem ser modificados para atender à realidade e política operativa de cada concessionária.

Tabela 5. Classificação do IS para Sistemas de Subtransmissão

Classific.	IS (min/ano)	Status	Observações
Grau 0	$IS < 73,8$	Favorável	Baixíssimo risco
Grau 1	$73,8 \leq IS < 177,8$	Satisfatório	Baixo risco
Grau 2	$177,8 \leq IS < 486,4$	Limítrofe	Risco médio
Grau 3	$486,4 \leq IS < 768,1$	Grave	Impacto severo em alguns consumidores
Grau 4	$768,1 \leq IS$	Muito Grave	Impacto severo em muitos consumidores

Tabela 6. Comparação da classificação dos sistemas

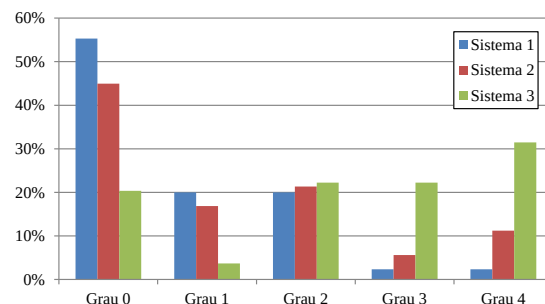
Sistema	IS (min/ano)	Classificação	
		Transmissão	Proposta
1	65,10	Grau 2	Grau 0
2	156,04	Grau 3	Grau 1
3	215,21	Grau 3	Grau 2

Para que se encontrem os valores de IS referentes aos percentuais limites em cada grau, inicialmente deve ser encontrado o valor de $\varphi(y)$ que corresponde a 100% das barras. Para isso, deve-se considerar a variável y igual a 0 (i. e., IS igual a 0 minutos/ano, valor mínimo no qual todas as barras se enquadrariam) e encontrar $\varphi(y)$ através da Equação 3. Obtém-se, então, o valor de 46,1086. Os demais valores percentuais da Tabela 4 são aplicados ao valor máximo da curva (i.e. 46,1086) para se obter os correspondentes valores de $\varphi(y)$. A partir destes valores e da Equação 3 são encontrados todos os demais valores correspondentes às porcentagens propostas, os quais são destacados na Figura 3.

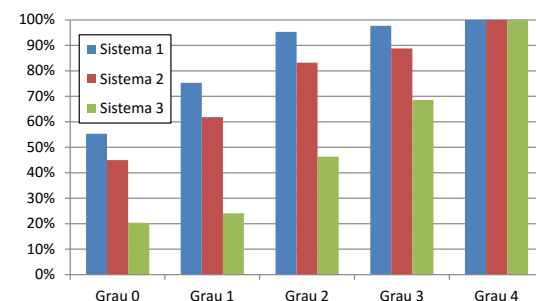
Os valores encontrados pela metodologia proposta fornecem uma nova classificação quanto ao IS, a qual está adaptada às peculiaridades dos sistemas de subtransmissão, permitindo um diagnóstico mais preciso de seus desempenhos. A nova classificação é fornecida pela Tabela 5.

4 Aplicações e Resultados

A classificação proposta na Tabela 5 é aplicada aos Sistemas 1, 2 e 3 para validar a metodologia proposta. A Tabela 6 compara a classificação dos três sistemas quanto ao IS global de acordo com as classificações adequadas à transmissão (Tabela 1) e à subtransmissão (Tabela 5). Nota-se uma melhora significativa em dois graus para os Sistemas 1 e 2. Já o Sistema 3 continua com o pior desempenho dentre os três, embora seu grau tenha melhorado em 1 nível segundo a nova classificação.



a) Individual



b) Acumulada

Figura 4. Distribuição de frequência das barras dos Sistemas 1, 2 e 3 de acordo com a nova classificação proposta

A Figura 4 mostra a distribuição de frequência, individual e acumulada, do IS por barra para os Sistemas 1, 2 e 3 segundo a nova classificação. Comparando com a Figura 1, nota-se um deslocamento dos impulsos de frequência dos três sistemas para a esquerda, principalmente para o Sistema 1, o qual foi utilizado como base para este trabalho. Esse sistema passa a ter a grande maioria de suas barras no Grau 0, melhorando significativamente sua avaliação quanto ao IS em comparação com a classificação adotada para sistemas de transmissão (Tabela 1).

O Sistema 2 também melhorou a quantidade de barras nos Graus 0, 1 e 2, principalmente no Grau 0. Do mesmo modo apresenta melhora em sua avaliação quanto ao IS global, ainda que o número de barras no Grau 4 tenha aumentado, ficando acima do percentual máximo estabelecido pela Tabela 4 (e.g. 5%). Este fato aponta para a necessidade de reforço pontual ou localizado para o Sistema 2.

Conclui-se, portanto, que os Sistemas 1 e 2 apresentaram configurações com IS global aceitável, com a expressiva maioria (acima de 80%) de suas barras nos Graus 0, 1 e 2, o que confere aos dois sistemas um desempenho global satisfatório.

Quanto ao Sistema 3, percebe-se que o mesmo possui avaliação global (Grau 2) que o coloca na condição limítrofe, com uma significativa melhora com relação à quantidade de barras nos Graus 0 a 2. No entanto, a parcela de barras nos Graus 3 e 4 permanece elevada, havendo, inclusive, um aumento da quantidade de barras no Grau 4. Este último fato comprova a maior capacidade de diagnóstico permitida pela nova classificação. Diante deste quadro, pode-se concluir que o Sistema 3 apresenta um desempenho inadequado, demandando maiores investimentos.

5 Conclusão

Neste artigo é proposta uma metodologia para definir critérios de classificação de desempenho para sistemas de subtransmissão com base no índice de severidade (IS). Três sistemas reais de subtransmissão foram utilizados para a obtenção da nova tabela de classificação, assim como para avaliar a sua capacidade de diagnosticar o nível de desempenho de cada sistema. Os limites superiores identificados para cada grau foram, em geral, maiores do que os valores dispostos na classificação existente para a transmissão. O principal fator responsável por esta situação é a menor malha apresentada pelos sistemas de subtransmissão em comparação com a transmissão.

Os resultados obtidos a partir dos três sistemas utilizados validam de maneira consistente a nova classificação baseada no IS, a qual se mostrou capaz de lidar com as peculiaridades dos sistemas de subtransmissão. Um aspecto interessante está na ampliação da quantidade de barras do Sistema 3 que receberam o Grau 4. Isto comprova a maior sensibilidade dos novos limiares para identificar, sobretudo, as barras mais críticas, apontando as regiões com necessidade mais premente de reforços.

A metodologia proposta neste artigo pode ser aplicada por qualquer concessionária tendo por base seus próprios sistemas, assim como seu conhecimento a respeito do desempenho apresentado pelos mesmos. Logicamente, se uma quantidade maior de sistemas estiver disponível, será possível ajustar melhor os limiares utilizados na tabela de classificação. Por outro lado, não se deve utilizar sistemas localizados em regiões muito distantes, ou pertencentes a concessionárias com realidades distintas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos engenheiros da Cemig Hernane Salvador Braga e Michele dos Reis Pereira, pelo fornecimento dos dados relativos aos sistemas de subtransmissão utilizados, bem como ao CNPq, à CAPES, à FAPEMIG e ao INERGE pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2008). Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª Edição.
- Billinton, R. e Allan, R. N. (1994). Reliability Evaluation of Power Systems. Plenum Press, 2nd Edition, New York.
- CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2007). Programa NH2: Sistema Computacional para Análise Probabilística e Avaliação da Confiabilidade de Sistemas Elétricos. Guia do Usuário.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2007). Estudos Associados ao Plano Decenal de Energia 2007/2016.
- Fong, C. C., Billinton, R., Gunderson, R. O., O'Neill, P. M., Raksany, J., Schneider, A. W. and Silverstein, B. (1989). Bulk System Reliability, Measurement and Indices: A Report by IEEE Working Group on Measurement Indices. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 4, No. 3, pp. 829-835.
- Gaver, D. P., Montmeat, F. E. and Patton, A. D. (1964). Power System Reliability: I - Measures and Methods of Calculation. IEE Trans. on Power App. Systems, vol. 83, No. 7, pp. 727-737.
- Leite da Silva, A.M., Manso, L.A.F., Mello, J.C.O. Mello and Billinton, R. (2000). Pseudo-chronological Simulation for Composite Reliability Analysis with Time Varying Loads. IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, No. 1, pp. 73-80.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico (2003). Confiabilidade da Rede Básica no Período 2003 a 2005: Sumário Executivo.
- Pereira, M. V. F. and Balu, N. J. (1992). Composite generation/transmission reliability evaluation. Proc. IEEE, vol. 80, no. 4, pp. 470-491, Apr. 1992.
- Ruggiero, M. A. G. e Lopes, V. L. R. (2008). Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais. Pearson, 2ª edição, São Paulo.
- Todd, Z. G. (1964). A probability Method for Transmission and Distribution Outage Calculations. IEEE Trans. on Power App. Systems, vol. 83, No.7, pp. 696-701.