

A model-free voltage stability security assessment method using artificial intelligence

M. R. Bastos, CTEEP, Brasil

J. S. C. Martini, EPUSP, Brasil

Abstract— The reliable and safe operation of electric power systems is challenged to keep them operating obeying operational safety margins, all this within the context of the inherent power generation and consumption uncertainties.

Maintaining the continuity and quality of electricity supply implies the need for models that can represent the dynamics of the electric power systems in order to provide tools for the study of dynamics, both in situations of contingencies and demand changes, as in normal operation.

This work seeks to determine whether the behavior of sets of coherent bars can provide information on the stability of the electric power system.

The proposed approach seeks independence of the use of established models for power electrical systems, through artificial intelligence algorithms applied in the evaluation of the voltage profiles of the various system buses under study.

Index Terms— Artificial Intelligence, Context Awareness, Pattern Analysis, Power system analysis computing, Power system stability.

I. INTRODUÇÃO

Observa-se, mundialmente, o aumento contínuo da complexidade e porte dos sistemas elétricos de potência, incluindo-se a interconexão de vários sistemas distintos, em decorrência da busca constante de atendimento eficiente da demanda por energia elétrica e à adoção de novas tecnologias.

A operação confiável e segura destes sistemas enfrenta o desafio de mantê-los operando obedecendo-se margens de segurança operacional definidas, isto tudo dentro do contexto de incertezas inerentes da geração e consumo de energia.

Uma operação adequada do SEP – Sistema Elétrico de Potência demanda o conhecimento do seu comportamento, o qual envolve o conhecimento das interações mútuas entre as suas diversas partes constituintes, incluindo aspectos elétricos, mecânicos e térmicos, dentre outros.

A análise da dinâmica do SEP é considerada uma função de grande importância no gerenciamento do fornecimento de energia elétrica [1].

Desta forma, considerando a manutenção da continuidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica, decorre a necessidade de modelos que possam representar a dinâmica do SEP, de forma a propiciar ferramentas para o estudo de sua dinâmica, tanto em situações de contingências e alterações de demanda, quanto em situações normais de operação [3]-[22].

A modelagem do SEP envolve a representação complexa de seus diversos elementos, assim como seus comportamentos individuais e relacionamentos mútuos. Conforme ressaltado por [23], uma acurada modelagem do sistema constitui importante passo da engenharia do mesmo. Mas, apesar de se utilizar modelagem do SEP nos aplicativos de análise, geralmente não é considerada a modelagem detalhada do sistema completo, devido ao porte dos sistemas de potência atuais [24]-[16].

Uma das abordagens para se tratar esta dificuldade do uso da modelagem mais detalhada é a busca por métodos que permitam uma redução da representação equivalente do SEP, ou seja, de sua complexidade, mas mantendo-se sua consistência funcional.

II. MOTIVAÇÃO

A evolução do SEP caracterizada pelo crescimento contínuo de suas interligações, do uso intenso de novas tecnologias e sistemas de controles, conjuntamente com sua atual operação em condições de alto stress [2] potencializou a possibilidade de diversos tipos de instabilidade em seu funcionamento. Dentre estes, um dos tópicos considerados na manutenção da continuidade do fornecimento de energia elétrica, é o fenômeno de instabilidade de tensão, o qual tem tido um interesse crescente nos dias atuais [1].

Considerando a dificuldade, citada por [24], de utilização dos modelos mais detalhados nos estudos dos grandes sistemas de potência, uma abordagem buscando a determinação de

índices de estabilidade de tensão e a previsão de curto prazo do estado futuro do SEP, em tempo real, sem utilizar a complexa modelagem do mesmo tem grande potencial de uso nas tarefas de estudos e planejamento, assim como na sua operação.

Vários trabalhos [1] a [4]-[9] a [21]-[23] a [26], são encontrados na literatura abordando a redução de complexidade dos sistemas em estudo, ou seja, a redução de ordem dimensional dos mesmos.

Os trabalhos tratam da determinação de grupos de barras coerentes [1]-[25] enquanto outros consideram grupos de geradores coerentes [9] a [21]-[23]-[24]-[26], mas observa-se que apesar de se buscar uma redução de dimensão dos sistemas estudados, todos os trabalhos acabam usando modelos dos elementos constituintes do SEP, assim como dependem da topologia da rede elétrica. Estas abordagens ficam dependentes da precisão e exatidão dos modelos/parâmetros, da correta representação de conectividade dos diversos elementos, assim como da representação equivalentes de redes externas conectadas ao SEP em estudo.

III. METODOLOGIA PROPOSTA

Este trabalho continua com a aplicação da metodologia apresentada em [27], agora tratando com a rede IEEE-118 barras e diversas contingências na mesma.

A rede IEEE-118 foi utilizada considerando várias contingências na sua rede elétrica, e para cada uma delas, processada a classificação dos perfis de tensão das barras no sentido da determinação de barras com comportamentos semelhantes (coerentes), independentemente de suas classes de tensão e distâncias físicas.

A classificação é efetuada utilizando-se redes neurais auto-organizáveis (Mapas de Kohonen), tendo como dados de entrada a evolução dos valores de tensão (em pu) das diversas barras desta rede IEEE. O Mapa de Kohonen determina o número de conjuntos (clusters) de barras coerentes e aloca-as no conjunto que melhor descreve o seu comportamento em relação às demais barras.

O processamento Kohonen ocorre a cada amostragem de valores de tensão das barras, dentro do período de processamento de um fluxo de potência continuado, para cada uma das contingências consideradas. Desta forma a cada amostragem, todas as barras são novamente processadas e classificadas.

A dinâmica dos conjuntos resultantes é apresentada, considerando a evolução da classificação de cada barra nos diversos conjuntos obtidos. A criação, desenvolvimento e possível eliminação de conjuntos, assim como o processo de migração de barras entre os conjuntos também são apresentados e avaliados. Buscam-se determinar regras de comportamento [5]-[8] que possam sinalizar “assinaturas dinâmicas” do comportamento do SEP, permitindo o uso para avaliação de estabilidade do SEP.

IV. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Dentro do vasto campo de Inteligência Artificial, foi aqui adotado o uso de redes neurais, as quais, conforme [6], são concepções de hardware e/ou software que exibem a capacidade de aprender com a experiência, através de um processo adaptativo (supervisionado ou não) baseado em estímulos aplicados na sua entrada (etapa de treinamento da rede). A etapa de treinamento adequada torna a rede apta a desempenhar as funções para as quais foi treinada.

O tipo de rede neural adotada foi o mapa de Kohonen [7], o qual apresenta características de auto organização. Este tipo de rede produz de modo não supervisionado uma redução dimensional nos dados aplicados em suas entradas. Ela efetua um mapeamento da distribuição de dados de uma maior dimensionalidade em uma distribuição de menor dimensionalidade, mas preservando o relacionamento topológico inicial dos dados originais.

Sua estrutura apresenta uma camada de neurônios interconectados de tal forma que, cada um deles está conectado com todos os demais neurônios desta camada e com cada um dos demais neurônios da camada de entrada.

O processo de aprendizado utilizado pelo algoritmo de Kohonen, caracterizado como competitivo, devido às conexões com os neurônios da mesma camada, trabalha com a divisão do conjunto de dados de entrada em conjuntos disjuntos, de forma que as similaridades entre os dados classificados em um conjunto específico são maiores que as similaridades existentes entre dados classificados em outro conjunto.

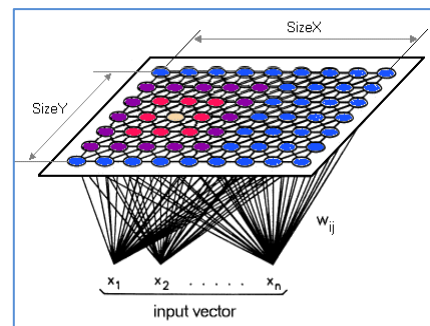


Fig. 1. Mapa de Kohonen

O algoritmo Kohonen aqui adotado é iniciado com a apresentação dos vetores de valores de tensão de entrada x_i . Na sequência faz-se a inicialização dos pesos de todas as conexões w_{ij} , considerados como o valor médio dos vetores de entrada adicionado de uma parcela de ruído aleatório, e a adoção do raio de vizinhança como sendo uma área quadrada de $(2c+1) \times (2c+1)$ neurônios, tendo como centro o neurônio vencedor.

O próximo passo do algoritmo consiste no cálculo do valor de ativação para todos os neurônios e na seleção daquele que apresente o maior valor de saída.

$$a_j = \sum_{i=1}^N w_{ij} x_i \quad (1)$$

Este neurônio, dito o vencedor, assim como os neurônios do seu raio de vizinhança c , tem os seus pesos de conexão atualizados obedecendo a uma dada taxa de aprendizagem.

$$w_{ij} = w_{ij} + \eta(x_i - w_{ij}) \quad (2)$$

Todo o processo é repetido com o raio de vizinhança, a cada iteração, decrementado de uma unidade. No fim de todo o processo tem-se como resultado a classificação dos vetores de entrada, determinada pelos neurônios vencedores obtidos.

O resultado deste processamento é a determinação de conjuntos de barras coerentes, barras cujos perfis de tensão se apresentam de maneira similar durante a evolução do SEP em estudo.

V. RESULTADOS

Foram consideradas informações de tensão das barras da rede IEEE 118, as quais foram processadas por uma rede Kohonen de 23 X 23 neurônios e coeficiente de aprendizagem inicial 0.001, decrescendo conforme o processo de treinamento (1000 iterações) era efetuado.

O algoritmo de Kohonen aqui utilizado foi a implementação disponível no Matlab, sendo treinada com as tensões das barras disponíveis após a execução da aplicação fluxo de potência continuado, presente no aplicativo Análise de Redes – ANAREDE, do CEPEL, para a rede IEEE 118 e considerando as diversas contingências adotadas. Após a fase de treinamento, a rede passou a ser utilizada para a classificação das tensões em conjuntos similares.

Serão apresentados os resultados das simulações e as conclusões do trabalho quanto à possibilidade de o comportamento dinâmico do SEP poder ser avaliado baseando-se no comportamento da evolução dos diversos conjuntos de barras coerentes independentemente da adoção dos modelos atualmente adotados na representação e estudos do SEP. Um subsídio à elaboração de previsões de curto prazo do comportamento futuro do sistema elétrico.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Aumuler, G. A., Saha, T. K., Determination of Power System Coherent Bus Groups by Novel Sensitivity-based Method for Voltage Stability Assessment, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.18, N.3, Aug 2003.
- [2] Kundur P., Paserba J., Ajarapu V., Andersson G., Bose A., Canizares C., Hatzigiorgiou N., Hill D., Stankovic A., Taylor C., Cutsem T. V., Vittal V., Definition and classification of power system stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, N. 2, May 2004
- [3] Djukanovic M., Artificial neural network based identification of dynamic equivalents, *Electric Power Systems Research*, nº 24, 1992
- [4] Chiang, H., Tong, J., Tada, Y., On-line transient stability screening of 14.000 bus models using TEPCO-BCU: Evaluations and Methods, 2010.
- [5] Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, *Information & Control*, 1965,8
- [6] Oliveira, E. N., Padilha A. Composição de índices de estabilidade transitória para a avaliação de segurança dinâmica. In: Fifth Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2003, Águas de São Pedro - SP. Proceedings of the Fifth Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission. 2003. Vol.11. p.1 – 10 (CD).
- [7] Kohonen, T., Self-organized Map, *Proc. IEEE*, 1990, 78, (9), pp. 1464-1480
- [8] Hossein, K. R., FCM-Fuzzy Rule Base: A New Rule Extraction Mechanism, *IEEE, 2011 International Conference on Innovations In Information Technology*, 2011.
- [9] Rudnick, H.; Patino, R.I.; Brameller, A., Power-system dynamic equivalents: coherency recognition via the rate of change of kinetic energy, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*
- [10] Molina D., Harley R. G., Venayagamoorthy G. K., Falcão D., Taranto G. N., Assis T.M.L., Coherency Based Partitioning of a Power System for Intelligent Wide-Area Damping Control, XXI Symposium of Specialists in Electric operational and Expansion Planning, Rio de Janeiro, Brasil, 2012
- [11] Romeres D., Dorfler F., Bullo F., Novel Results on Slow Coherency in Consensus and Power Networks, *Control Conference (ECC), 2013 European*
- [12] Yang S., Zhang B., Su F., Bo Z., A Real-time Identification Scheme of Coherent Generators based on the WAMS information, 2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014) Chengdu, 20-22 Oct. 2014
- [13] Wei, J., Kundur, D., Butler-purry, K. L., A Novel Bio-Inspired Technique for Rapid Real-Time Generator Coherency Identification, *IEEE Transactions on Smart grid*, Vol. 6, N. 1, Jan 2015
- [14] Preda, T. N., Nordgard, D. E., Clustering Distributed Generation Using the Instantaneous Euclidean Distance in Polar Coordinates, 2013 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), October 6-9, Copenhagen
- [15] Kyriadis, T., Cherkaoui, R., Kayal, M., Generator Coherency Identification Algorithm Using Modal and Time-Domain Information, *EuroCon 2013*, 1-4 July 2013, Zagreb, Croatia
- [16] Singh, R., Elizondo, M., Lu, S., A Review of Dynamic Generator Reduction Methods for Transient Stability Studies, *Power and Energy Society General Meeting*, 2011 IEEE
- [17] Xu G., Vittal V., Slow Coherency Based Cutset Determination Algorithm for Large Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, N. 2, May 2010
- [18] Ma, F., Luo, X., Vittal, V., Application of Dynamic Equivalencing in Large-scale Power Systems, *Power and Energy Society General Meeting*, 2011 IEEE
- [19] Singhavilai T., Anaya-Lara O., Lo K. L., Identification of the Dynamic Equivalent of a Power System, *Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2009
- [20] Alsafih H., A., Dunn, R., Determination of Coherent Clusters in a Multi-Machine Power System Based on Wide-Area Signal Measurements, *Power and Energy Society General Meeting*, 2010 IEEE
- [21] Souza E. J. S. P, Identification of Coherent Generators Considering the Electrical Proximity for Drastic Dynamic Equivalents, *Electric Power Systems Research* 78 (2008) 1169–1174
- [22] Liu H., Bose A., Venkatasubramanian, V., A fast voltage security assessment method using adaptive bounding, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, N. 3, Aug 2000
- [23] Ghosh S., Senroy N. A., Comparative Study of Two Model Order Reduction Approaches for Application in Power Systems, *Power and Energy Society General Meeting*, 2012 IEEE
- [24] Rashedur R.S., Yeakub H.M., Sekendar A.M., A new and simple approach to coherency identification for multi-machine power system, *International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE)*, 2012 7th
- [25] Schlueter R. A., A voltage Stability Security Assessment Method, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, N. 4, Nov 1998

- [26] Matar M., Fernandopulle N., Maria A., Dynamic model reduction of large power systems based on coherency aggregation techniques and black-box, International Conference on Power Systems Transients (IPST2013) in Vancouver, Canada July 18-20, 2013.
- [27] Bastos M, Martini, J. S. C., An Approach Free Model for Evaluation of Electric Power Systems with the use of Artificial Intelligence, 2013 IEEE PES Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013

VII. BIOGRAFIA



Mário Roberto Bastos Engenheiro Eletricista, com ênfase em Eletrônica, pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1985), especialista em Tecnologia de Informação (2002), Mestre em Engenharia (2006) e atualmente doutorando em Engenharia, todos pela escola Politécnica da USP. Possui 29 anos de experiência em sistemas de automação e controle e em engenharia de projetos. Trabalha, desde maio de 1994, na especificação técnica, desenvolvimento, implantação e manutenção dos Sistemas de Supervisão e Controle da CTEEP. Membro IEEE e CIGRE B5 e D2.



José Sidnei Colombo Martini Formado em Engenharia Elétrica, Mestre, PhD e Professor Associado da Escola Politécnica da Universidade São Paulo. Presidiu, por uma década, a principal empresa de transmissão de energia elétrica no Estado de São Paulo (CTEEP e EPTE), atuou como Diretor de empresas de engenharia nas áreas de Saneamento, Energia Elétrica e Energia Nuclear e Pesquisador nas áreas de Energia e de Tecnologia da Informação.