

RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS. ESTUDOS NO SISTEMA ELÉTRICO SUL.

ARTURO S. BRETAS, MAURÍCIO V. CECCON

Departamento de Engenharia Elétrica

UFRGS – Avenida Osvaldo Aranha, 103, 90035-190, Porto Alegre – RS

E-mail: abretas@ece.ufrgs.br, mcecon@terra.com.br

Abstract: After the occurrence of a disturbance in an Electric Power System, it is of great importance the complete restoration of all loads in a short period of time. In this paper, it is proposed a new technique to Electric Power System Restoration Plan elaboration. The technique is based on Artificial Neural Networks. A study case based on the Brazilian Southern Electric Power System is conducted presenting promising results. Comparative tests with the commonly used heuristic search restoration techniques are presented. The result shows an efficient Restoration Scheme which can be used as an alternative to the traditional used methods.

Keywords: Artificial Neural Networks (ANN), Cold Load Pick Up (CLPU), Automatic Restoration of Electric Power Systems, Power System Protection.

Resumo: Após a ocorrência de um blecaute em um Sistema Elétrico de Potência é importante o restabelecimento das cargas em um tempo mínimo. Este artigo propõe uma nova técnica para a elaboração de planos de Restauração de Sistemas Elétricos de Potência fazendo uso de Redes Neurais Artificiais. Um caso estudo baseado em dados do Sistema Elétrico da Região Sul Brasileira (54 barras) é conduzido, apresentando resultados promissores. Testes comparativos com técnicas de restauração baseados em busca heurística são apresentados. Os resultados mostram um esquema de restauração eficiente, que pode ser utilizado como alternativa aos métodos de restauração tradicionalmente utilizados.

Palavras-Chave: Redes Neurais Artificiais (RNAs), Carga Fria, Restabelecimento Automático de Sistemas Elétricos de Potência (RSEP), Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.

1. Introdução

O principal objetivo de um plano de restabelecimento de um Sistema Elétrico de Potência é, quando da ocorrência de um blecaute, providenciar o restabelecimento das cargas em um tempo mínimo [1]. Restabelecimento de Sistemas Elétricos de Potência (RSEP) compreende um conjunto seqüencial de procedimentos de energização de equipamentos quando da ocorrência de um blecaute total ou parcial. A restauração de um SEP é implementada a partir de um plano de restabelecimento (seqüência de fechamento/abertura de disjuntores) cuja forma de construção depende da técnica de restauração utilizada.

As técnicas de restauração/ restabelecimento utilizadas atualmente pela maioria das Companhias de Energia Elétrica são compostas de um conjunto de regras/ guias de energização preestabelecidos. Estas regras são baseadas e construídas a partir de possíveis cenários de blecaute total/ parcial e são compostas de procedimentos seqüenciais de energização que sugerem ao operador operações quando de ocorrência de um defeito. No entanto, a condição de grande stress encontrada após a ocorrência de um blecaute unida ao fato dos procedimentos serem baseados em condições pós-blecaute que podem não ser encontradas, fazem com que estas metodologias apresentem um baixo índice de sucesso (definido como a fração de tentativas de planos de restauração que não criam condições de carga e tensão inaceitáveis ou em operações de disjuntores por parte do esquema de proteção) [2]. Deve ser destacado que

o fato destas técnicas convencionais serem baseadas em supostas condições de operação pós-blecaute é a razão principal para estas altas taxas de insucesso, pois como se sabe estas condições podem não ser encontradas [3].

As técnicas de RSEP utilizadas atualmente possuem ainda uma outra grande desvantagem, a demora na elaboração de um plano de restauração eficiente e a pequena tolerância a falhas [4].

Diante deste quadro, em anos recentes várias novas técnicas para RSEP foram propostas [5,6,7]. No entanto, todas estas novas técnicas apresentam resultados limitados sendo testadas em sistemas pequenos e com poucas variações de condições pós-blecaute. Neste artigo propõe-se uma nova técnica de restauração de sistemas elétricos de potência. A técnica é baseada no uso de redes neurais artificiais (RNA). O uso de RNA já em RSEP já foi motivo de estudo anterior dos autores [8]. Nesta, a técnica foi inicialmente implementada e testada em sistemas elétricos norte-americanos. Neste artigo, a técnica é desenvolvida e aplicada em um sistema elétrica sul brasileiro de 54 barras. Testes comparativos com um sistema de restauração baseado em busca heurística são também apresentados.

O artigo se inicia com uma apresentação da técnica de RSEP proposta. Uma breve introdução em RNA é posteriormente apresentada junto a uma descrição detalhada dos módulos do esquema. A técnica é então aplicada ao problema de RSEP. O artigo é finalizado com uma discussão dos resultados e algumas conclusões retiradas do trabalho

2. Restauração de Sistemas Elétricos de Potência utilizando RNA

A nova técnica proposta de RSEP é composta por três módulos básicos:

- Módulo de Carga Fria.
- Módulo de Seleção.
- Módulo de Seqüência de Energização.

Na figura a seguir um diagrama de blocos da técnica proposta é apresentado.

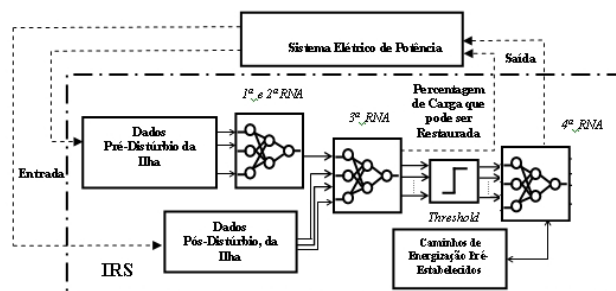


Figura 1: Esquema de Restauração Proposto

O primeiro módulo do esquema de restauração proposto é responsável pela estimativa da carga fria (valor de carga a ser encontrada no momento do restabelecimento). Como entrada, este módulo recebe as informações pré-blecaute do sistema via SCADA-EMS. As informações utilizadas são os valores de carga e geração imediatamente antes do defeito. O primeiro módulo é composto por duas RNA tipo *feed-forward*. As entradas são normalizadas [0-1] de forma facilitar o treinamento. Em todos as RNA o algoritmo de treinamento *Backpropagation* foi utilizado.

O segundo módulo do esquema de restauração proposto é responsável pela seleção dos caminhos de energização (Linhas de Transmissão, Transformadores, etc...) e pela estimativa de percentagem de carga a ser restabelecida. Os caminhos de energização são selecionados a partir de algumas regras:

- Disponibilidade.
- Número mínimo de caminhos.
- Condições aceitáveis de operação.

As entradas do segundo módulo correspondem à estimativa de carga fria, proveniente do primeiro módulo, e as condições de falta, provenientes do SCADA-SEM. O módulo é composto de uma RNA tipo *feed-forward*. A saída do módulo é composta por um vetor que representa os caminhos de energização selecionados. As entradas como as saídas são normalizadas.

O terceiro módulo é responsável pela escolha da seqüência de energização dos caminhos pré-

selecionados no módulo II. Esta seqüência fornecerá um plano de restabelecimento (fechamento/ abertura de disjuntores) que o operador poderá seguir. As entradas deste módulo são compostas dos caminhos selecionados no módulo anterior. A saída deste módulo possui os caminhos de energização arranjados em seqüência. Desta forma, o funcionamento do sistema proposto pode ser resumido como:

1) Os dados do sistema em funcionamento (pré-distúrbio) são coletados via SCADA/EMS.

2) Esses dados, mais especificamente os valores de carga e geração nas barras servem de entrada para a 1ª RNA. A saída desta rede informa o percentual de carga presente no sistema em relação a uma referência (carga-padrão).

3) Na entrada da 2ª RNA informa-se o tempo de restauração estimado, e sua saída informa o percentual de carga fria.

4) Somando a saída das duas primeiras RNA, tem-se como informação o percentual de carga total presente no sistema em relação a sua carga padrão.

5) Esse último dado é à entrada da 3ª rede, juntamente com valores coletados pós-distúrbio, que indicam a localização da falta na ilha. A saída desta rede informa a percentagem de carga que pode ser restaurada e as linhas e transformadores que podem ser utilizados na restauração.

6) A saída da 3ª rede, em adição aos caminhos de restauração, é entrada para uma 4ª RNA. A saída desta rede informa a seqüência de energização dos caminhos (fechamento dos disjuntores).

3. Redes Neurais Artificiais

O SEP utilizado neste estudo é da região sul do país. Este SEP é composto de 54 barras, e foi previamente dividido em 3 ilhas (ilhamento intencional é a divisão de um sistema em grupos isolados de barras/cargas/geradores). O ilhamento de um

sistema é implementado por relés de proteção previamente ajustados com este intuito quando encontradas condições de risco. A divisão em ilhas é um dos primeiros passos a ser tomado para garantir que o sistema não seja afetado como um todo. Dessa forma, cada ilha é restaurada isoladamente e depois ligada às demais de forma paralela. Neste estudo esta etapa de divisão do SEP foi suposta como realizada. Assim, a técnica proposta é composta por três esquemas de restauração de ilhas (IRS), que são responsáveis pela construção do plano de restauração de cada ilha.

Neste estudo foram ainda utilizadas RNA Perceptron Multicamada, do tipo *feed-forward* (com alimentação nas entradas) e treinadas de forma supervisionada com um algoritmo de *back-propagation* (retropropagação). A seguir apresentam-se os detalhes das RNA que compõem o esquema proposto

3.1. Módulo I

Dependendo das condições em que opera um sistema, sua carga pode sofrer variações significativas em relação à carga assumida como padrão. Por exemplo, no inverno há um consumo de energia elétrica em torno de 10% maior do que no outono ou primavera. Em virtude disso, é necessário que se consiga precisar o percentual de carga num sistema em função de uma referência. Assim, pode-se elaborar um plano de restauração sem medo de sobrecarregar um transformador ou uma linha de transmissão.

Nesse estudo, considerou-se que os valores máximos que a carga nas barras pode assumir é de $\pm 10\%$ em relação a carga padrão. Com base nisso, foram gerados padrões de treinamento com 21 pares de entrada e saída, representando intervalos entre -10% a +10% (com variação de 1%).

3.1.1. Arquitetura da 1ª RNA

Várias arquiteturas foram testadas para efetuarem a classificação da situação de carga pré-blecaute. Após extensos testes, foi escolhido uma arquitetura de RNA com quatro camadas que segue à seguinte distribuição:

- Camada_1: Um neurônio para cada linha do vetor de entrada (camada de entrada).
- Camada_2: Duas vezes o número de neurônios do Camada_1.
- Camada_3: Um quarto do número de neurônios do Camada_2
- Camada_4: 1 neurônio (camada de saída).

A função de ativação usada em todos as camadas foi a Tangente Hiperbólica Sigmóide, que é uma função que permite uma saída não-linear entre -1 e 1, além de ser derivável.

3.1.2. Carga Fria

Após um blecaute em um SEP, a carga existente no sistema é geralmente superior a carga no momento pré-blecaute. Esta carga encontrada no momento do restabelecimento do sistema é chamada de “carga fria”. Este fenômeno ocorre em função da perda da diversidade do sistema quando da ocorrência de um blecaute. Ainda, a perda de diversidade do sistema é principalmente causada por equipamentos elétricos controlados por termostatos. Abaixo, ilustra-se uma curva de carga fria genérica de um sistema elétrico.

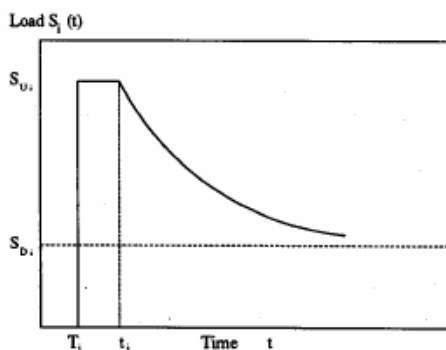


Figura 2: Curva de Carga Fria Genérica

3.1.3 Arquitetura da 2ª RNA

Para modelar este fenômeno usou-se uma RNA que tem como entrada o tempo estimado para a restauração do sistema, e na saída o percentual de carga a mais no sistema em relação à referência. Nesse estudo, utilizou-se uma curva de carga fria que representasse um sistema elétrico misto (50% industrial e 50% residencial).

- Camada_1: Um neurônio (entrada).
- Camada_2: 20 neurônios.
- Camada_3: 10 neurônios.
- Camada_4: Um neurônio (saída).

Aqui, as funções de transferência utilizadas foram: Sigmóide Logarítmica para as camadas 1 e 4 e Tangente Hiperbólica Sigmóide para os camadas 2 e 3.

3.2. Módulo II

A soma das saídas das duas primeiras RNA do Módulo I indica o percentual de carga fria que será encontrada no sistema em relação à carga padrão no momento do restabelecimento. De posse dessa informação, e da informação de onde ocorreu a falta no sistema (dados coletados pós-blecaute), se quer saber quais linhas e transformadores podem ser utilizados na restauração da ilha, assim como o percentual de carga que pode ser restaurado. Para tal, utilizou-se uma RNA.

3.2.1. Estrutura da RNA

A seguir apresenta-se uma ilustração deste módulo.



Figura 3: 3ª RNA com suas respectivas entradas e saídas.

Na entrada temos um vetor com quatro linhas. A primeira corresponde ao valor de carga existente no sistema. As outras três linhas são valores correspondentes à localização da falta (linha em que ocorreu e barras que estão conectadas a esta linha).

Na saída também temos um vetor, com número de linhas igual a “número de linhas da ilha + 1”. O primeiro valor corresponde ao percentual de carga que pode ser restaurado. Além disso, para cada linha da ilha na saída foi associado o valor 0 ou 1, representado a sua indisponibilidade ou disponibilidade para restauração.

O percentual de carga que pode ser restaurado foi conhecido após realizar simulações das ilhas em um programa de fluxo de carga.

3.2.2. Arquitetura da RNA

Após realizadas sucessivos testes com diferentes arquiteturas, uma RNA com cinco camadas, com as seguintes características foi escolhida:

- Camada_1: Quatro neurônios.
- Camada_2: Dezesesseis neurônios.
- Camada_3: Trinta e dois neurônios.
- Camada_4: Quarenta e oito neurônios.
- Camada_5: (nº de linhas + 1) neurônios.

Nesta RNA foi também utilizada a função sigmóide logarítmica como função de ativação para os neurônios da primeira e última camada, de forma a garantir que a saída se mantenha positiva (entre 0 e 1). Nas outras camadas usou-se a Tangente Hiperbólica Sigmóide.

3.3. Módulo III

Sabendo-se das linhas e transformadores que podem ser utilizados na restauração (saída da 3ª. RNA) resta a tarefa de determinar qual a seqüência de linhas a serem

religadas. Para isso deve-se levar em consideração quais cargas são prioritárias, e assim definir caminhos de restauração. A definição de prioridade das cargas pode variar num sistema, então é importante que a rede consiga dar respostas precisas, mesmo que a ordem de prioridades seja mudada.

3.3.1. Estrutura da RNA

Nesta rede tem-se como entrada um vetor com as cargas e linhas existentes na ilha. A saída também é um vetor, onde será mostrada a seqüência de reenergização das linhas. Cada linha do vetor corresponde a uma linha da ilha, e dependendo do valor que assumir, terá uma determinada posição na seqüência de ligamento. Na figura abaixo se ilustra o módulo.

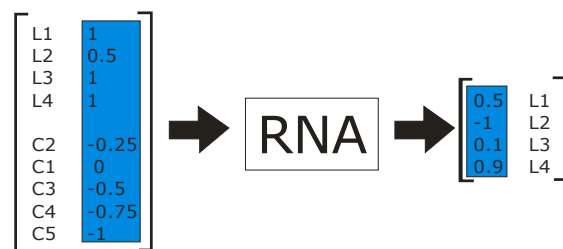


Figura 4: Configuração de entrada/saída para a RNA.

3.3.2. Arquitetura da RNA

Para esta rede foi utilizada uma arquitetura com cinco camadas, com as seguintes características:

- Camada_1: (número de linhas + número de barras) neurônios.
- Camada_2: Duas vezes o número de neurônios da primeira camada.
- Camada_3: Três vezes o número de neurônios da primeira camada.
- Camada_4: Metade do número de neurônios da terceira camada.
- Camada_5: (número de linhas) neurônios.

A função de ativação usada em todas as camadas foi a Tangente Hiperbólica Sigmóide.

4. Resultados

De modo a testar a capacidade do esquema proposto simularam-se diversas condições pós-blecaute e submetem-se os resultados ao esquema proposto bem como a um esquema de restauração baseado em busca heurística. O esquema de restauração baseado em busca heurística efetua uma busca em largura pela menor distância elétrica entre cargas prioritárias e geradores. Este esquema não estima percentagem de carga a ser restabelecida e não testa o plano de re-energização através de simulações em programas de fluxo de potência. Na tabela a seguir apresentam-se os resultados comparativos da aplicação de ambos os métodos em mais de 100 simulações no sistema de 54 barras.

	Método RNA	Busca Heurística
Tempo (média)	2min 30s	15min 30s
Planos Inaceitáveis	0	32

Analisando-se os resultados dos testes chegaram-se as seguintes conclusões:

- Vantagens do RSEP-RNA:

- Agilidade na elaboração de planos de RSEP;
- Robustez;
- Considera as condições de carga fria;
- Considera as condições de operação do SEP;
- Considera as condições de segurança;
- Facilidade para adaptar-se a novas tarefas.

- Desvantagens:

- Só trabalha com falta em uma das linhas;
- Implementação trabalhosa.

5. Conclusão

Após diversos testes realizados utilizando ambas as técnicas conclui-se que a metodologia proposta apresenta resultados encorajadores oferecendo-se como possível alternativa aos métodos tradicionais de restauração. A capacitação do esquema proposto a mais de uma condição de faltosa por ilha vem sendo motivos atual de estudo.

Agradecimentos

- Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa), que financiou este projeto de pesquisa.

Referências

- [1] M. M. Adibi, "Power System Restoration Methodologies and implementation Strategies", IEEE Press Power Eng. Series 2000.
- [2] L. Fink e K. Carlsen, "Operating under stress and strain", IEEE Spectrum, Março 1978.
- [3] K. Matsumoto, T. Sakaguchi, R. Kafka e M.M. Adibi, "Knowledge based systems as operational aids in power system restoration", IEEE Proceedings, vol. 80, no. 5, pp.320-329, Fevereiro 1983.
- [4] M. M. Adibi, L. H. Fink, "New approaches in power system restoration", IEEE Transactions in Power Systems, vol. 7, pp. 1428-1434, Fevereiro 1992.
- [5] T. Sakaguchi e K. Matsumoto, "Development of a Knowledge based system for power system restoration", IEEE Transactions in Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, pp. 320-329, fevereiro 1983.
- [6] K. L. Liou, C. C. Liu e R. Chu, "Tie Line utilization during power system restoration", IEEE Transactions in Power Systems, vol. 10, pp. 192-199, Fevereiro 1995.
- [7] K. Komai, T. Sakaguchi, "Analysis and evaluation of human Knowledge for power system restoration by mathematical programming method", IEEE – Japan, vol. 107-B, no. 6, pp. 269-275, 1987.
- [8] A. S. Bretas, A. Phadke, "Artificial Neural Networks in Power System Restoration", IEEE Transactions in Power Delivery, vol. 18, no. 4, outubro 2003.