

CONIC-SEMESP

14º Congresso Nacional de Iniciação Científica

TÍTULO: SIMULAÇÃO DE METODOLOGIA BASEADA EM REDES DE KOHONEN PARA IDENTIFICAÇÃO DE CORRENTES DE INRUSH NA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

CATEGORIA: CONCLUÍDO

ÁREA: ENGENHARIAS E ARQUITETURA

SUBÁREA: ENGENHARIAS

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PARÁ

AUTOR(ES): HELLESON JORTHAN BRITO DA SILVA

ORIENTADOR(ES): RAIDSON JENNER NEGREIROS DE ALENCAR

Realização:



Apoio:



Simulação de metodologia baseada em Redes de Kohonen para identificação de Correntes de Inrush na proteção de transformadores de potência

Helleson Jorthan Brito da Silva ¹, Raidson Jenner Negreiros de Alencar ²

Grupo de Estudos em Sistemas Elétricos de Potência – GESEP

¹ Estudante, Bolsista PIBITI/CNPq / ² Professor Pesquisador
Instituto Federal do Pará – IFPA, Campus Belém

1. RESUMO

O presente trabalho apresenta os passos de desenvolvimento e a simulação computacional de uma proposta de metodologia para a identificação de correntes de *inrush* e correntes de falta interna na proteção diferencial de transformadores de potência, baseada em Mapas Auto-organizáveis de Kohonen (*Self Auto-organization Maps – SOM*). A metodologia captura o comportamento do vetor gradiente da corrente diferencial e a partir dele gera um índice que reflete as características da corrente de *inrush* ou da corrente de falta interna, capazes de serem lidos e interpretados pela rede neural. A análise do desempenho da metodologia proposta e uma comparação de desempenho com um método tradicionalmente usado em relés diferenciais comerciais também serão objetos de estudo do trabalho. Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta possui alta capacidade de identificar correntes de *inrush* e de falta interna na proteção diferencial de transformadores de potência, conferindo a ela potencial para uso em dispositivos reais.

Palavras-chave: transformador de potência, proteção diferencial, Rede de Kohonen.

2. INTRODUÇÃO

Dentre as estratégias de proteção usadas em transformadores de potência, a proteção diferencial é a principal [1]. Embora seja muito utilizado, tal esquema de proteção ainda enfrenta dificuldades para tomar a correta decisão de retirar de operação o equipamento protegido o mais breve possível, já que elevadas correntes diferenciais podem não estão relacionadas somente às correntes de falta dentro da zona de proteção. A ocorrência de correntes de magnetização inrush é comum na energização do enrolamento primário do transformador e elas são capazes de gerar elevadas correntes diferenciais e sensibilizar o sistema de proteção diferencial, fazendo-o interromper indevidamente o funcionamento do equipamento. A correta

distinção entre as correntes de *inrush* e as correntes de falta interna na corrente diferencial é a principal dificuldade da proteção diferencial [1].

De um modo geral, os relés diferenciais da atualidade realizam a identificação da corrente diferencial através da metodologia conhecida como “Restrição por Harmônicos” [2]. Contudo, a eficácia do procedimento é comprometida em situações de corrente de falta interna com elevada componente harmônica de segunda ordem [3] ou mesmo casos de correntes de *inrush* com baixo conteúdo dessa componente. Diversos pesquisadores apresentaram propostas de ferramentas que solucionassem o problema da identificação de correntes de *inrush* na proteção diferencial, baseada em métodos como Redes Neurais Artificiais (RNA), Lógica Difusa (*Fuzzy*), Transformada Wavelet, entre outras [1]. O uso de RNA como método para identificar a característica da corrente diferencial tem ganhado bastante popularidade em virtude de seus promissores resultados [4].

Este documento trata do desenvolvimento e da simulação computacional de uma proposta de metodologia para melhorar o desempenho da identificação de correntes de *inrush* e correntes de falta interna da proteção diferencial aplicada aos transformadores de potência, baseado no método da Rede Neural de Kohonen. O método computacional aplicável à referida tarefa foi desenvolvido com o uso do Software de Simulação de Transitórios Eletromagnéticos EMTP/ATP, usado para criação de situações operativas, que foram usadas nos processos de treinamento e teste da Rede de Kohonen, e da plataforma Matlab, cujo ambiente de programação foi usado para escrever o script da metodologia.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

De um modo geral, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a simulação de uma metodologia inteligente que identifique, na corrente diferencial de um dispositivo de proteção diferencial para transformadores de potência, correntes de *inrush* e correntes de falta interna, sem que seja necessária, para a realização da tarefa, a análise do conteúdo harmônico da corrente diferencial. Também é almejada uma metodologia que apresente um desempenho de identificação melhor que ferramentas baseadas no método tradicional da “Restrição por Harmônicos”, usadas para bloqueio da operação de relés diferenciais percentuais comerciais.

3.2 Objetivo Específico

É esperado com a consolidação do projeto que, as atividades de estudo, execução de simulações computacionais e avaliação de métodos computacionais promovam o aperfeiçoamento dos conhecimentos técnicos relacionados à proteção de sistemas elétricos de potência e à inteligência computacional aplicada nessa área. Além disso, também se espera o aprimoramento do caráter profissional.

4. METODOLOGIA

A etapa inicial do projeto de pesquisa caracteriza-se pela familiarização com os assuntos a ele ligados. Ela consistiu de uma série de estudos acerca dos fundamentos de sistemas de proteção aplicados aos sistemas elétricos de potência, da proteção diferencial aplicada aos transformadores de potência, das correntes de *inrush* e de falta interna no transformador, de metodologias para restrição da operação do relé diferencial (incluindo o método do Mapa Auto-organizável de Kohonen) e estudo do modo de uso dos softwares EMTP/ATP, no que tange a construção e simulação de contingências e situações de operação em sistemas elétricos teste, e Matlab, no tocante linguagem de programação.

Passada a etapa de familiarização foi realizada a etapa de desenvolvimento do projeto propriamente dito. Esta etapa contemplou a seleção e simulação de um sistema teste adequado ao objetivo do trabalho, para a geração de dados de corrente diferencial, a aplicação de um algoritmo para leitura da forma de onda da corrente diferencial e geração dos padrões de treinamento da Rede de Kohonen, a criação e o treinamento do método computacional, seu ensaio e o do método tradicional de bloqueio da operação do relé diferencial por harmônicos, implementado na plataforma Matlab [5] e, por fim, a análise comparativa do desempenho de identificação de ambos os métodos.

5. DESENVOLVIMENTO

5.1 Estratégia da proteção diferencial

O sistema de proteção diferencial é uma proteção contra sobrecorrentes de falta, que consiste em estabelecer uma zona de proteção restrita a um equipamento elétrico, através da interligação elétrica de sua entrada e saída de forma diferencial. Esta interligação origina a corrente diferencial, cujo monitoramento é de responsabilidade do relé diferencial, dispositivo microprocessado que emite o sinal de comando de abertura para os disjuntores comandados, quando o critério da corrente diferencial e suas restrições percentuais são violados. A restrição percentual é uma característica de relés diferenciais do tipo percentual. Um modelo

matemático deste será usado nas simulações do sistema teste. A Figura 1 mostra o diagrama unifilar da proteção diferencial aplicada a um transformador monofásico de dois enrolamentos.

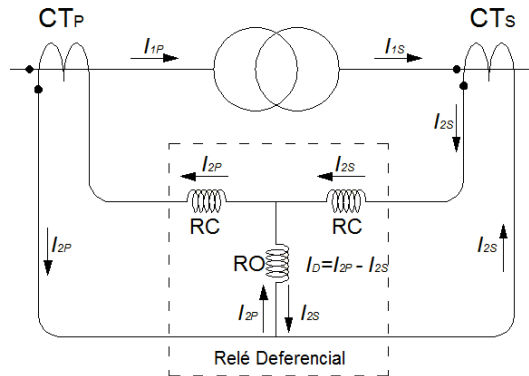


Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema de proteção diferencial. Adaptado de [2]. As equações básicas que modelam o relé diferencial percentual são apresentadas a seguir [1]:

$$I_D = I_{2p} - I_{2s} \text{ [A]} \quad I_D \geq K \cdot I_R \text{ [A]} \quad I_R = (I_{2p} + I_{2s}) / 2 \text{ [A]}$$

Equação (1) Equação (2) Equação (3)

Onde I_D é a corrente diferencial; I_{2p} e I_{2s} são as correntes primária e secundária do transformador de potência, obtidas nos enrolamentos secundários dos transformadores de corrente; I_R é a corrente de restrição da operação do relé diferencial percentual; e K é a característica percentual do relé.

5.2 Redes Neurais de Kohonen

A Rede Neural de Kohonen foi escolhida por apresentar alto desempenho de reconhecimento e classificação de padrões, além de ser capaz em um dado momento de estabelecer relações entre os padrões de entrada a ela apresentados, identificando características próprias desses estímulos e agrupando-os em regiões vizinhas da camada de saída. A Figura 2 mostra graficamente o modelo do Mapa Auto-organizável de Kohonen.

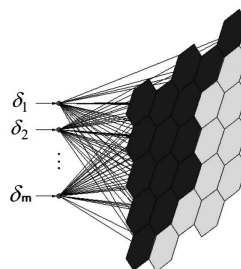


Figura 2 – Modelo de RNA de Kohonen. Adaptado de [1].

A Rede de Kohonen é formada por uma camada de entrada e outra de saída, totalmente interligadas (cada célula da primeira camada é ligada a todas da segunda

camada). Nota-se na Figura 2 uma camada de saída composta por neurônios dispostos bidimensionalmente, formando uma superfície. A princípio, os estímulos com características similares usados na fase de treinamento da rede neural ativam um grupo de neurônios vizinhos da camada de saída, de modo a formar uma região. A cada novo estímulo apresentado à rede, esta decidirá se o agrupará em uma região (*cluster*) já existente ou se formará uma nova [1]. No final do processo, a camada de saída constituirá um mapa, cujas regiões guardam a relação de similaridade entre alguns padrões do total que é mostrado à rede neural.

A técnica do Mapa Auto-organizável de Kohonen é basicamente composta por três processos, denominados Competitivo, Cooperativo e Adaptativo. As Equações 4, 5 e 6 são as funções matemáticas que realizam cada processo, respectivamente [6].

$$d_i = \sum_{i=0}^{m-1} (x_i(t) - w_{ij}(t))^2 \quad h_{j,i} = \exp\left(-\frac{d_{i,j}^2}{2\sigma^2}\right) \quad w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta(t, j, i) \cdot (x_i(t) - w_{ij}(t))$$

Equação (4)

Equação (5)

Equação (6)

Onde m é o número de neurônios na camada de entrada; $X_i(t)$ é o estímulo de entrada da rede no tempo t ; $w_{ij}(t)$ é o vetor de pesos do neurônio j no tempo t ; σ é a largura efetiva da função de vizinhança; e $\eta(t, j, i)$ é o parâmetro que representa a taxa de aprendizagem da rede neural.

5.3 Sistema elétrico teste

A Figura 3 apresenta um diagrama unifilar do sistema teste adotado no estudo de que trata este trabalho. Os transformadores de corrente a montante e a jusante do transformador de potência possuem relação 2000:5 A e 125:5 A, respectivamente.

As contingências simuladas foram as seguintes: energização do transformador T2 (obtenção da corrente de *inrush*); energização do transformador T1 (obtenção da corrente de *sympathetic inrush*); energização do T1 sob falta; aplicação de falta interna no enrolamento primário do T1; e aplicação de falta interna no enrolamento secundário do T1. Ao todo, 268 simulações foram realizadas para compor o banco de casos, sendo que 228 casos foram usados na fase de treinamento e na validação da rede neural e os demais 40 casos usados apenas na sua etapa de validação.

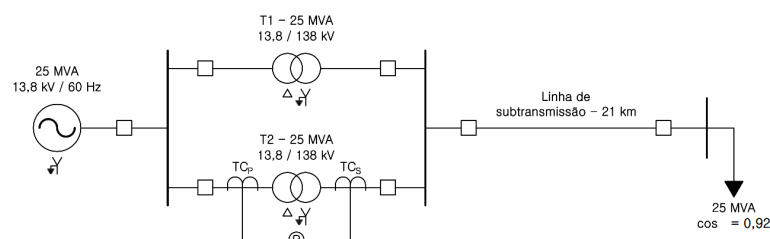


Figura 3 – Sistema teste usado no estudo. Adaptado de [6].

5.4 Metodologia proposta

5.4.1 Etapa de leitura da corrente diferencial e geração dos padrões de entrada

As características da Rede de Kohonen aliada aos aspectos próprios da corrente de *inrush* [6] pode ser uma excelente solução para a restrição da operação da proteção diferencial do transformador de potência, de forma inteligente, segura e confiável. Contudo, não é o bastante monitorar a forma de onda da corrente diferencial e mostrá-la a rede neural, pois além do método desconhecer o tipo de ocorrência codificado na corrente diferencial, é necessário extrair e representar matematicamente suas particularidades relacionadas à energização do transformador ou à falta. A camada de entrada da Rede de Kohonen irá receber essa representação matemática para interpretação da corrente diferencial.

O conceito matemático aderido para gerar os parâmetros representativos da corrente diferencial (padrão de entrada) será o vetor gradiente. O conceito do vetor gradiente aplicado à corrente diferencial é fornecido pelas Equações 7 e 8.

$$\nabla I_D = \frac{\partial I_D}{\partial t} \vec{i} \quad [\text{A/s}] \quad \theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{\partial I_D}{\partial t} \right) \quad [\text{rad}]$$

Equação (7)

Equação (8)

Onde \vec{i} é o vetor unitário na direção do eixo dos tempos e $\frac{\partial I_D}{\partial t}$ é a derivada de primeira ordem da corrente diferencial em relação ao tempo t .

Um método de diferenciação numérica foi usado para o cálculo do vetor gradiente, que tangencia a curva da corrente diferencial. A Equação 8 permite extrair o ângulo formado entre o vetor gradiente e um vetor unitário \vec{i} . Os cálculos serão feitos ponto a ponto da curva da corrente diferencial.

Para analisar o comportamento do gradiente da corrente diferencial, um índice que mede a média dos deslocamentos angulares do gradiente foi definido. Ele considera um ângulo de referência de 90° para aferir os desvios do vetor. Seu cálculo é realizado pela Equação 9.

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^{NS} |\theta_j - 90|}{NS}$$

Equação (9)

Onde NS é o número de amostras da janela de dados e θ_j é o ângulo do gradiente da corrente diferencial para cada ponto j .

O desvio médio angular é analisado dentro de uma janela de dados da corrente diferencial, construída a partir de um ciclo dessa informação. A janela de dados

também foi dividida em quatro quartos de ciclo, para melhor performance do monitoramento do desvio médio angular. Logo, para cada quarto de ciclo será computado um valor de δ . As figuras a seguir ilustram o efeito análise em questão, bem como o distinto comportamento do vetor gradiente para a corrente diferencial ligada à corrente de *inrush* e à corrente de falta interna.

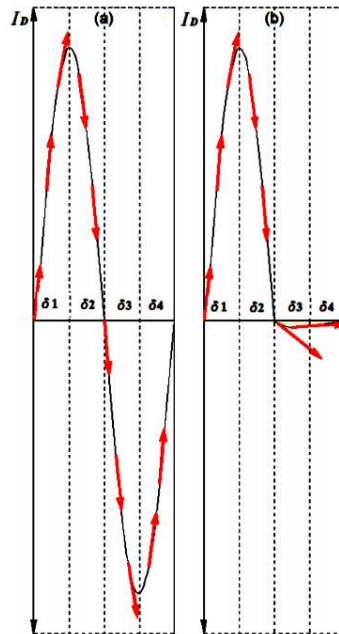


Figura 4 – Resposta do Vetor Gradiente quando ocorre (a) curto-circuito e (b) *inrush*. O índice δ é o parâmetro representativo da corrente diferencial que foi apresentado a Rede Neural de Kohonen, tanto na fase de treinamento quanto na de teste. Considerando a estrutura da janela de dados e que a medição do índice é realizada nas três fases do relé diferencial, logo o padrão de entrada que constitui o vetor de treinamento é composto de 12 valores (uma janela de dados para cada fase), quantidade também definida para o número de neurônios de entrada do método.

5.4.2 Etapa de ajuste, treinamento e mapeamento da rede neural

A camada de saída da rede neural possui no total 25 neurônios, organizados em um arranjo 5x5. A topologia dos neurônios usados foi definida hexagonal, por permitir até 6 conexões sinápticas para cada célula.

Como já foi mencionado anteriormente, através dos softwares EMTP/ATP, Matlab e do sistema elétrico teste foi gerado um conjunto de padrões de treinamento que contemplam diversas situações operativas do transformador. Ao todo, 228 padrões foram gerados e alocados no arquivo de treinamento, a partir de um algoritmo criado na plataforma Matlab. Esse arquivo e mais outro com os dados de inicialização e com os ajustes dos parâmetros de treinamento da rede neural, também construído

no Matlab, foram lidos através de uma rotina voltada para criação de Redes de Kohonen, a fim de criar uma rede específica para aplicação em estudo. O arquivo de saída do processo de treinamento é a rede propriamente dita. Ele é carregado em um algoritmo de mapeamento da rede, para que as regiões ligadas aos casos energização do transformador e aos casos de falta sejam estabelecidas. A Figura 5 ilustra o mapeamento das ocorrências fornecido pela Rede de Kohonen.

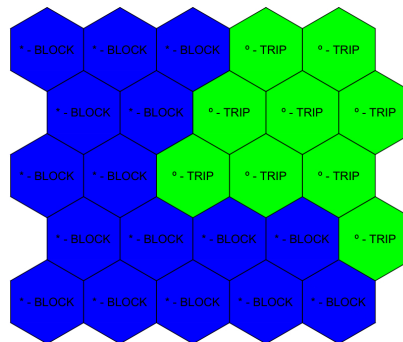


Figura 5 – Mapeamento dos casos de *inrush* e falta provido pela Rede de Kohonen. A Figura 5 mostra dois clusters, um deles corresponde à região de bloqueio (situação de corrente de *inrush*) e o outro à região de disparo (comando de *trip* do disjuntor) do relé diferencial (situação de falta interna no transformador).

6. RESULTADOS

Realizada todas as etapas necessárias à criação da Rede de Kohonen para a implementação na metodologia destinada a identificação de *inrush* e de falta interna em transformadores de potência restava promover alguns testes com o algoritmo desenvolvido como forma de validá-lo. Também se buscou avaliar seu desempenho, por isso, o algoritmo da restrição por harmônicos foi reproduzido [5] em plataforma em Matlab e também testado, usando o banco de casos descrito na seção 5.3. As Figuras 6a e 6b demonstram os resultados exibidos pela metodologia com a Rede de Kohonen.

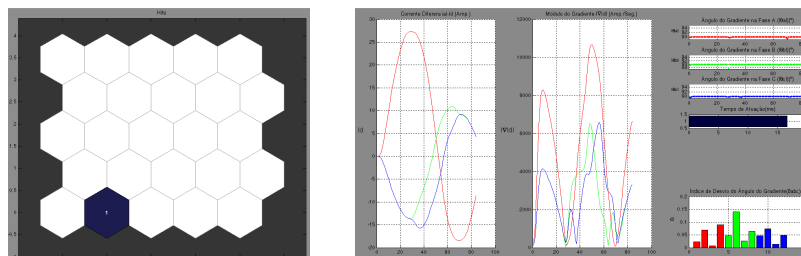


Figura 6 – Resposta da metodologia proposta às correntes de (a) *inrush* e (b) falta. O algoritmo da metodologia proposta exibe uma imagem do Mapa de Kohonen, com uma das células da região de bloqueio ativadas, quando detecta uma situação de corrente de *inrush*, e mostra o comportamento da corrente diferencial em conjunto

com os dados do seu vetor gradiente, quando uma situação de corrente de falta interna é observada. Os resultados do método tradicional são impressos em um arquivo .txt de nome definido pelo usuário, apresentando o estado de operação do relé diferencial (*trip* ou *block*). A seguir, a Tabela 1 apresenta o desempenho dos dois métodos testados.

Tabela 1 Comparação de desempenho na identificação da corrente diferencial.

CASO SIMULADO	QUANTIDADE	ALGORITMO	
		Rede de Kohonen	Tradicional
Energização do T1 (<i>inrush</i>)	Total		64
	Acertos	64	64
Energização do T2 (<i>sympathetic inrush</i>)	Total		32
	Acertos	32	31
Energização do T1 sob falta	Total		40
	Acertos	38	38
Enrolamento primário do T1 sob falta	Total		50
	Acertos	50	38
Enrolamento secundário do T1 sob falta	Total		42
	Acertos	42	32
Casos não treinados	Total		40
	Acertos	38	36
Total de casos			268
Total de acertos		264	239
Percentual de acerto		98,51	89,18

Após a análise dos números observou-se que a metodologia baseada em Rede de Kohonen apresentou resultados promissores e um desempenho bem melhor que a técnica de restrição por harmônicos, atingindo 98,51 % de êxito na identificação da corrente diferencial. O elevado nível de acerto para todos os tipos de ocorrências simuladas demonstra a elevada capacidade de generalização e classificação desse tipo de rede neural. Por outro lado, está muito claro que o segundo método possui limitada capacidade de reconhecimento do efeito da corrente de *inrush* na corrente diferencial, demonstrando que o conteúdo harmônico em boa parte desses casos é similar aos casos de falta interna, o que pode confundir o algoritmo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo mostrou os resultados da aplicação de uma metodologia baseada na Rede Neural de Kohonen para identificação de correntes de *inrush* e corrente de falta interna, na proteção diferencial de transformadores de potência.

A técnica apresentada no trabalho demonstrou, a partir dos resultados obtidos, a elevada capacidade de reconhecimento, generalização e classificação das Redes de Kohonen e que essas características proporcionaram uma operação mais eficaz da proteção diferencial. Embora tenha cometido erros de identificação, mas ela

apresentou desempenho muito melhor que o método da restrição por harmônicos, usado em dispositivos de proteção diferencial reais, mostrando que também tem potencial para aplicação real.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa.

FONTES CONSULTADAS

- [1] ALENCAR, R. J. N. de; BEZERRA, U. H. Inrush Current Identification in Power Transformer Differential Protection through Self-Organizing Maps. **IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies**. ISGT-LA 2013, São Paulo, p. 1-8, 2013.
- [2] DE ALENCAR, R. J. N.; BEZERRA, U. H. **Aplicação de redes auto-organizáveis de Kohonen para identificação de correntes de *inrush* na proteção diferencial de transformadores de potência**. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE. Paraná, p. 1-6, 2014.
- [3] LIU, P. ; MALIK, O. P. ; CHEN, D. ; HOPE, G. S. ; GUO, Y. Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults. **IEEE Transactions on Power Delivery**., v. 07, p. 1912-1919, 1992.
- [4] ALENCAR, R. J. N. de; BEZERRA, U. H. Power Transformer Differential Protection Through Gradient of the Differential Current. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems. Brazilian Society for Automatics - SBA.**, v. 24, p. 162-163, 2013.
- [5] PATTERSON, R. W.; MCCANNON, W. P.; KOBET, G. L. **A Consideration of Inrush Restraint Methods in Transformer Differential Relays**. 54th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, p. 3-5, 2000.
- [6] ALENCAR, R. J. N. de. **Identificação de correntes de *inrush* na proteção diferencial de transformadores de potência através do gradiente da corrente diferencial e de mapas auto-organizáveis**. 2013. 140f. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2013.