

DIAGNÓSTICO E DETECÇÃO DE PADRÕES DE FALHAS EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO FORMAS DE ONDA DA CORRENTE DA BOBINA

Brenda Gobira Valença¹ (IC), Rafael Francisco dos Santos (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá - Campús Itabira

Palavras-chave: Filtro de média móvel. Processamento de Sinais. Sistemas especialistas.

Introdução

Os disjuntores de alta tensão apresentam-se como um componente de suma importância na proteção e controle de sistemas elétricos. Projetados para assegurar a segurança dos equipamentos, a eficiência e integridade do disjuntor é crucial para a estabilidade dos sistemas.

De acordo com o estudo de Razi-Kazemi et.al. (2014), as falhas presentes em disjuntores podem ser causados desde problemas na tensão de alimentação até desgastes mecânicos. Uma detecção rápida e precisa da complicação permite à empresa evitar danos maiores, gerando perda de maquinários e de dinheiro.

Dessa forma, a manutenção preditiva dos disjuntores tornou-se muito relevante para o cenário industrial. Uma das maneiras de verificar o estado do equipamento é por meio da curva da corrente da bobina (CC), como dito por Nenning (2014).

Nenning (2014) define a curva de corrente da bobina, apresentada na Figura 1, como o gráfico que apresenta, ao longo do tempo, a corrente elétrica fluindo através da bobina de disparo ou fechamento em um disjuntor. Conforme visto, a curva possui sete pontos principais, os quais dividem o gráfico em seis seções. Por meio de cada um desses intervalos, é possível analisar diferentes informações sobre o funcionamento da bobina. A análise da curva, bem como a identificação de anomalias presentes nela, permite que a empresa identifique quais os possíveis problemas que o disjuntor possa ter.

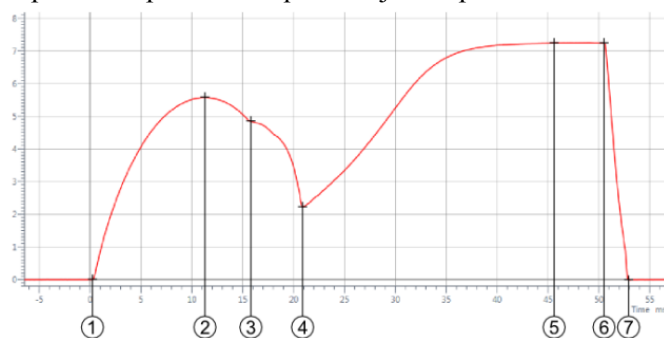


Figura 1 - Curva típica da corrente da bobina.

A seção 1-2 indica o aumento da corrente na bobina, e alterações nesse ponto podem representar problemas

com as propriedades elétricas da bobina ou na tensão de alimentação.

Durante a seção 2-3 o movimento da armadura gera uma força eletromotriz, e uma variação anormal nessa área indica presença de graxa na bobina ou mau alinhamento da armadura.

A seção 3-4 representa a liberação da mola carregada da armadura, e sua alteração ocorre devido a problemas mecânicos na armadura.

Na seção 4-5 ocorre a parada da armadura e o encerramento da força eletromotriz, e, caso possua desvios, indica danos elétricos no enrolamento da bobina.

A seção 5-6 apresenta o comportamento da bobina com a interrupção do fluxo de corrente, e uma mudança nessa área representa a necessidade de ajustes entre os contatos da bobina.

Por fim, na seção 6-7 a bobina começa o processo para retomar à sua posição inicial. Alterações nesse segmento indica atrito mecânico ou danos no diodo de recuperação.

Buscando colaborar com o estudo nessa área, o presente trabalho traz um estudo e modelagem de duas ferramentas: a primeira realiza o processamento e tratamento da CC, removendo os possíveis ruídos para ser possível identificar os pontos principais da curva. O segundo instrumento é um Sistema Especialista (SE) que, através dos valores de cada ponto de uma determinada curva, identifica os possíveis problemas presentes no disjuntor.

Metodologia

O processo para a realização da detecção de falhas nos disjuntores possui quatro etapas principais, conforme visto na Figura 2. A prática possui, além do sistema de identificação dos pontos, uma parte manual, na qual o usuário precisa inserir no SE os dados obtidos e, dessa forma, descobrir qual o possível problema existente no disjuntor.

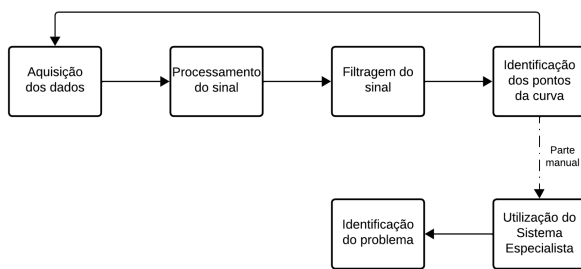


Figura 2 - Diagrama de fluxo do funcionamento do sistema.

Processamento do sinal

Após a aquisição dos dados, é necessária uma rotina de tratamento destes, devido à presença de ruídos no sinal. Essa interferência compromete a qualidade do resultado e, com isso, a precisão das próximas análises.

Buscando mitigar esses problemas, foi criado um algoritmo de filtro de média móvel. A função visa suavizar as flutuações indesejadas, permitindo uma análise mais confiável dos dados. Para isso, utilizou-se a função *medfilt*, presente na biblioteca *Scipy*.

O comando executa um filtro mediano em uma matriz N -dimensional e, para isso, é necessário definir a janela do filtro, ou seja, um escalar ou uma lista de comprimento N que fornece o tamanho da janela do filtro mediano em cada dimensão. A função retorna uma matriz do mesmo tamanho da entrada contendo o resultado filtrado mediano.

Devido ao formato da curva, foi adotado o uso de duas janelas diferentes para a filtragem, possibilitando ao usuário realizar um ajuste mais cuidadoso e preciso. A escolha foi feita baseada nas formas distintas do sinal, sendo necessários tratamentos diferentes para cada parte. O código utilizado foi:

```
def gera_Sinal(sinal, div, janela1, janela2):
    #Divide o sinal
    sinal1 = sinal[:div]
    sinal2 = sinal[div:]
    #Aplica media movel
    sinal_filtrado1 = aplica_Filtro(sinal1, janela1)
    sinal_filtrado2 = aplica_Filtro(sinal2, janela2)
```

Algoritmo de identificação de pontos

Após a filtragem, o algoritmo de identificação de pontos pode ser aplicado. A maioria dos pontos foi identificado utilizando o algoritmo que tem como principal função localizar o próximo pico ou vale em uma série de dados, dependendo do último ponto identificado.

A partir do ponto 1, por exemplo, o algoritmo identifica o ponto 2, que corresponde ao primeiro pico após a referência inicial. Nesse momento, o algoritmo inicia o

registro do aumento no valor do sinal, que caracteriza uma subida. Essa subida é acompanhada até que ocorra uma diminuição nos valores, sinalizando a transição para um novo estado. Para garantir que essa transição não seja afetada por pequenas oscilações nos dados — comuns sinais — a detecção da queda é realizada somente após a confirmação de uma quantidade específica de valores consecutivos em declínio. A função genérica de detecção de dos pontos é:

```
def identifica_ponto(sinal, posAnterior, quant):
    anterior = sinal[posAnterior]
    cont = 0
    pico = 0
    pos = 0
    for i in range(posAnterior + 1, len(sinal)):
        if sinal[i] >= anterior:
            pico = i
            cont = 0
        else:
            cont += 1
            if cont == quant:
                pos = pico
                return pos
    anterior = sinal[i]
```

No exemplo, o código ilustra um caso em que a amplitude do ponto identificado é superior ao do ponto anterior, como acontece com o ponto 2. Nesse caso, a variável *posAnterior* corresponde à posição do ponto 1. Por outro lado, caso o ponto identificado estivesse em queda, como o ponto 3, a condição do *if* seria alterada por *if sinal[i] < anterior*.

Para este estudo específico, o ponto 1 foi adotado como referência principal para determinar os valores do período e amplitude dos demais pontos. O procedimento consistiu em realizar a subtração entre o tempo do ponto 1 e o tempo de cada ponto avaliado, permitindo assim a quantificação das variações em relação ao início da curva. Devido a isso, os valores do ponto 1 foram desconsiderados na análise dos limites.

Sistema Especialista

Para desenvolver o Sistema Especialista, foi necessário a criação de uma região aceitável de variação para a curva, demonstrado na Figura 3. Se o sinal ultrapassar os limites inferiores ou superiores demarcados, isso indicará um possível problema no disjuntor, comprometendo a segurança do sistema elétrico. Os valores tanto de amplitude quanto do período da região aceitável foram obtidos através do código de identificação de pontos, apresentado anteriormente.

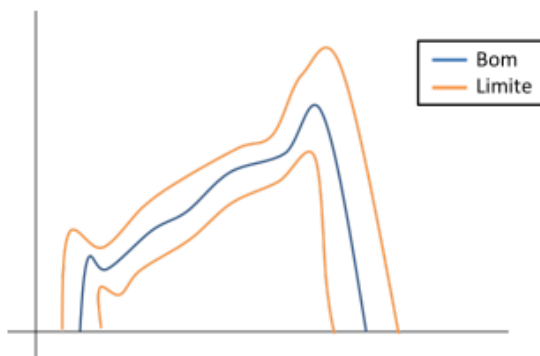


Figura 3 - Exemplo genérico de região aceitável de variação da curva.

A região aceitável foi definida por meio do menor e maior valor de cada ponto. Em seguida, foram elaboradas as regras do Sistema Especialista utilizando o Expert SINTA. Nessa ferramenta, é possível adicionar e alterar as regras de produção sem atrapalhar o restante do sistema, garantindo modularidade ao lidar com a base de conhecimento.

Descrevendo as regras de maneira genérica, elas consideram tanto a amplitude quanto o período de cada ponto identificado. Além disso, elas consideram também as informações dos pontos anteriores ao avaliado, a fim de evitar a propagação de um erro. Para isso, ao invés de considerar se o valor está fora do limite, será considerado se ela estiver no limite definido. A função genérica do código seria, então, dada por:

SE

[inversão das regras dos pontos anteriores]

E

pontoXAmplitude < limiteInferiorAmplitude

OU

pontoXAmplitude > limiteSuperiorAmplitude

E

pontoXPeríodo < limiteInferiorPeríodo

OU

pontoXPeríodo > limiteSuperiorPeríodo

ENTÃO

ERRO: [causa do erro]

Resultados e discussão

Curva de abertura da bobina

Na Figura 4, é possível identificar os seis pontos principais de uma curva de abertura. Após a análise de um conjunto de diferentes curvas, foi possível obter os limites presentes na Tabela 1.

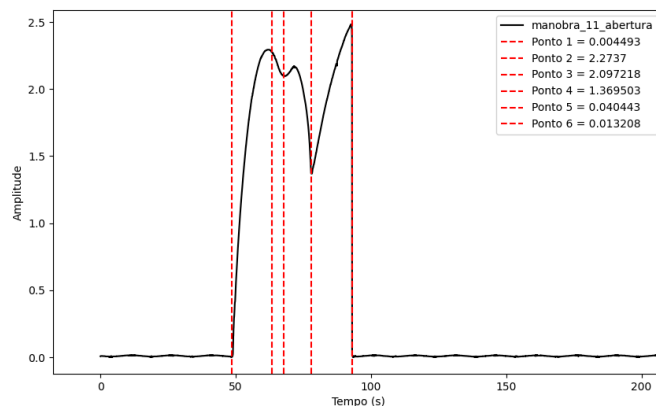


Figura 4 - Exemplo de detecção de pontos na CC de abertura da bobina.

Ponto	Amplitude _{inf}	Amplitude _{sup}	Período _{inf}	Período _{sup}
2	2.25518	2.279147	494	512
3	2.089592	2.099397	646	651
4	1.360788	1.382576	989	1007
5	2.425126	2.481774	1507	1514
6	0.004493	0.014297	1557	1807

Tabela 1 - Limites inferiores e superiores de cada ponto da CC de abertura.

Curva de fechamento da bobina

Na Figura 5, é possível identificar os seis pontos principais de uma curva de abertura. Após a análise de um conjunto de diferentes curvas, foi possível obter os limites presentes na Tabela 2.

Ponto	Amplitude _{inf}	Amplitude _{sup}	Período _{inf}	Período _{sup}
2	6.803604	6.824008	357	376
3	6.62915	6.641393	477	483
4	4.875429	4.942762	591	836
5	8.518558	8.616497	1730	1782
6	0	0.422262	4839	4875
7	0.003981	0.008061	5147	6255

Tabela 2 - Limites inferiores e superiores de cada ponto da CC de fechamento.

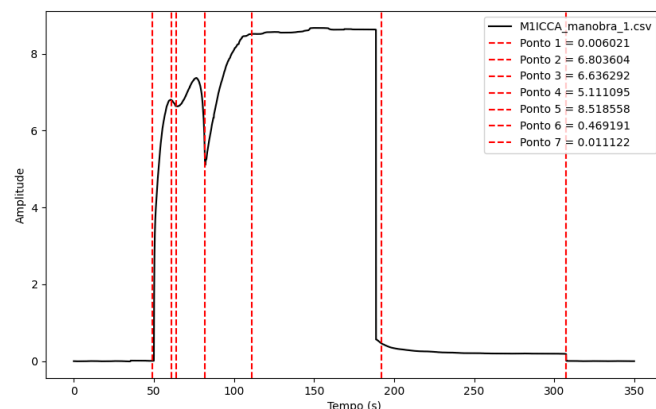


Figura 5 - Exemplo de detecção de pontos na CC de fechamento.

fechamento da bobina.

Sistema de detecção de erros

Assim como no caso da identificação de sinais, a detecção de erro pode variar significativamente conforme a curva que está sendo avaliada. A seguir, serão demonstrados dois exemplos de cada uma das curvas, visando apresentar as respostas do sistema em diferentes situações e contextos.

No primeiro exemplo, cujos valores estão presentes na Tabela 3, o sistema apresenta apenas um erro. O resultado entregue pelo SE pode ser visto na Figura 6.

Ponto	Amplitude	Período
2	2.25	5330

Tabela 3 - Primeiro teste, feito com a CC de abertura.

Como descrito anteriormente, erros nos valores dessa seção indica problemas na tensão de alimentação ou nas propriedades elétricas da bobina.



Figura 6 - Resultado do primeiro teste realizado.

No segundo teste realizado, o valor do período dos pontos 3 e 7 é inferior ao limite estabelecido, apresentado na Tabela 4.

Ponto	Amplitude	Período
2	6.83	360
3	6.63	470

Tabela 4 - Segundo teste, feito com a CC de fechamento.

É possível observar que o SE apresenta o motivo da falha do problema ao inserir o primeiro valor fora da região aceitável de variação. O resultado entregue pelo Expert SINTA está na Figura 7.



Figura 7 - Resultado do segundo teste realizado.

Conclusões

Durante o desenvolvimento do Sistema Especialista, foi notório a importância da análise da curva da corrente da bobina na identificação de possíveis falhas presentes nos disjuntores de alta tensão, bem como suas origens. O desenvolvimento do software não apenas contribui para a detecção dos defeitos, mas também facilita a manutenção preditiva, em ambientes industriais.

Com o advento da Indústria 4.0, a coleta e análise de dados em tempo real se tornaram cruciais para a eficiência operacional. Nesse contexto, a pesquisa destacou a importância dos disjuntores como elementos centrais de proteção e manobra em sistemas elétricos, ressaltando como a análise da curva de corrente pode proporcionar uma camada adicional de segurança. A capacidade de antecipar falhas reduz custos operacionais e minimiza interrupções, beneficiando tanto a eficiência econômica quanto a segurança dos trabalhadores.

Agradecimentos

Agradeço ao órgão CNPq pela oportunidade de participar de um projeto de pesquisa, onde não apenas consigo aprimorar meus conhecimentos adquiridos dentro da UNIFEI, os colocando em prática, mas também amplio minha experiência e contribuo para o avanço da ciência.

Referências

- NENNING, A. Interpreting the results of circuit breaker analysis? Water and Energy International, Central Board of Irrigation and Power, v. 57, n. 9, p. 33–37, 2014.
- RAZI-KAZEMI, A. A. et al. Circuit-breaker automated failure tracking based on coil current signature. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 29, n. 1, p. 283–290, 2014.
- SPIRANDELLI, L. P. et al. Sistemas especialistas: um estudo de caso com o expert sinta. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica, v. 1, n. 1, 2011. 7, 8.