



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7842
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

ANÁLISE DOS EFEITOS DE DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM RELÉS DE PROTEÇÃO MICROPROCESSADOS

ANDRÉ BALZI
AREVA T&D BRASIL

PAULO MÁRCIO DA SILVEIRA
UNIFEI

RESUMO

Qualidade da energia e proteção numérica estão relacionadas de várias maneiras que nem sempre são imediatamente aparentes. O objetivo deste artigo é apresentar resultados de um estudo que visa mostrar a interdependência dos fenômenos de qualidade da energia elétrica com os equipamentos microprocessados de proteção.

PALAVRAS-CHAVE

Relés de proteção microprocessados, qualidade da energia, *hardware*, *software*.

1.0 INTRODUÇÃO

Distúrbios em sistemas de potência podem provocar efeitos indesejáveis na operação dos relés de proteção. As características de operação do relé podem ser deterioradas com a presença destes distúrbios, alterando tempos de operação ou características de ajustes.

Tecnologias modernas têm criado uma nova geração de relés numéricos, com crescente imunidade contra distúrbios. Esta mesma tecnologia habilita também o uso de novos algoritmos de proteção baseados em princípios completamente diferentes daqueles existentes anteriormente. Estes algoritmos são potencialmente mais rápidos e confiáveis, porém sua imunidade em relação à qualidade da energia elétrica ainda não é totalmente conhecida [1].

Durante o estágio de projeto de um relé é difícil prever todos os possíveis distúrbios que o

mesmo irá encontrar quando estiver instalado em um sistema real. O ideal seria conhecer a qualidade da energia elétrica do ambiente onde o relé será instalado, fornecendo informações aos fabricantes para que estes testem tais produtos. Porém, como isto não é simples, torna-se necessário ao menos conhecer e coletar diferentes distúrbios de QEE para então conduzir análises de desempenho dos relés frente a estes distúrbios, melhorando suas características a cada futuro projeto.

Este artigo visa portanto, apresentar um trabalho cujo objetivo foi o de reunir informações sobre as diversas relações entre relés de proteção microprocessados e qualidade da energia. Em uma segunda etapa serão analisadas as respostas dos relés à diversos distúrbios.

2.0 CARACTERÍSTICAS DE UM RELÉ NUMÉRICO.

A grande maioria dos relés possui um filtro passa baixa que corta as altas frequências do sinal com uma frequência de corte que não prejudique ou altere o sinal de frequência fundamental.

O algoritmo de filtragem numérica é o elemento do relé numérico que mais necessita de esforço computacional. A partir das amostras pré-filtradas pelo filtro analógico, convertidas em sinal digital pelo conversor A/D, o algoritmo calcula os valores de interesse do relé. Estes valores são, em sua maioria, magnitude e fase do sinal, seja este de corrente ou tensão. Grandezas secundárias podem ser calculadas, tais como impedância, frequência, etc.

Após todo processo de amostragem e cálculo dos valores de interesse, o relé executa o algoritmo de proteção e outras funções relacionadas indiretamente com a proteção. Os valores calculados são comparados com a característica do relé, e uma decisão é tomada de acordo com o ajuste feito.

3.0 CARACTERÍSTICAS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Um serviço de fornecimento de energia elétrica é de boa qualidade quando garante, a custos viáveis, o funcionamento seguro e confiável de equipamentos e processos, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas. Assim, a QEE possui três níveis de qualidade: qualidade do atendimento, do serviço e do produto.

As duas primeiras se referem diretamente ao trabalho realizado pelas concessionárias de energia. A terceira, foco de nosso trabalho, diz respeito à conformidade do produto que, do ponto de vista ideal, seria a disponibilidade de energia elétrica com tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes.

Os vários fenômenos encontrados no sistema elétrico, que se enquadram dentro dos conceitos de QEE, são classificados quanto à sua magnitude e sua duração. Várias normas hoje definem os fenômenos de QEE, como a IEEE Std 1159-1995 e IEEE Std 519-1992.

4.0 RELAÇÕES ENTRE RELÉS NUMÉRICOS E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Considerando a disponibilidade de relés no sistema elétrico, bem como a capacidade dos microprocessadores, vem surgindo nos últimos anos a seguinte questão: por que não agregar ao relé de proteção funções de Qualidade de Energia? Isto traria diversos recursos para os engenheiros analisarem as condições do sistema elétrico, antes e depois de alguma ocorrência. Destacaremos três pontos a serem relacionados: *hardware*, operação e *software* [2].

4.1 Relações de hardware

4.1.1 Amostragem

As semelhanças entre os relés microprocessados e os medidores de QEE da atualidade são muitas. Os grandes fabricantes de proteção possuem dispositivos capazes de realizar

medições de QEE. Além das características próprias, que envolvem o microprocessador, memória, dentre outros, ambos possuem um grande número de entradas e saídas digitais e portas de comunicação, frontal e traseira.

A grande diferença entre relés de proteção e medidores de QEE está na amostragem. Hoje, um relé que realiza amostragem com 16 ou 20 amostras por ciclo, tem todas as informações necessárias para tomar decisões nas mais diversas situações de defeito do sistema elétrico. A ocorrência de um curto-circuito ou outro defeito qualquer, causa um aumento expressivo nas grandezas elétricas. Assim, o relé, mesmo que perca um pouco de informação relativo ao sinal real, é capaz de realizar suas funções.

Mas, para medições de algumas grandezas elétricas como transitórios de alta frequência, harmônicos de ordem superior, ruídos, a baixa amostragem dos relés não é capaz de reproduzir estes fenômenos. Hoje, os clientes necessitam de equipamentos que medem até a 51ª harmônica.

Os atuais relés de proteção são capazes apenas de reproduzir variações que não possuem frequências tão altas. Um aumento na amostragem ainda não é interessante para os fabricantes, pois o mercado ainda utiliza pouco a análise de QEE. O aumento dos equipamentos eletrônicos e equipamentos não lineares têm alimentado o interesse na Qualidade da Energia e isto justificaria a compra de um único equipamento microprocessado capaz de realizar proteção e medição de QEE.

4.1.2 Transformadores de instrumentos

Os transformadores de potencial (TP) funcionam da mesma maneira que os transformadores de força, diferindo apenas no design e na potência. A escolha da classe de exatidão dos TP's depende da precisão dos aparelhos a serem conectados, que hoje são 0,3%, 0,6% e 1,2%.

A classe de exatidão expressa em % é o erro máximo admissível que o TP pode introduzir na medição de uma potência. O erro é a soma do erro a vazio e do erro sob carga, tanto para o erro de relação como para o erro de fase.

A utilização dos sinais provenientes de TP's de proteção para realização de medições de qualidade de energia possui, inerentemente, um erro maior em 0,9% do que se fossem usados TP's para medição. Este erro, que pode chegar a 1,2%, não é muito significativo para provocar alguma medição equivocada. Assim, os

transformadores de potencial de proteção podem ser usados para realizar medições.

Em um TC as causas dos erros se apresentam de uma forma diferente do TP. As impedâncias primárias não exercem qualquer influência sobre a precisão dos TC's somente introduzindo uma impedância em série com a linha, a qual pode ser desprezada. Assim, o erro será unicamente devido à corrente de magnetização.

Os TC's podem ser classificados em dois grupos: TC de medição e TC de proteção. A diferença entre eles se encontra no máximo erro admissível, tanto no valor como na maneira de interpretação.

Os transformadores de corrente para medição seguem os mesmos padrões dos TP's, ou seja, possuem classe de exatidão de 0,3%, 0,6% e 1,2% e representam o erro máximo admissível que o TC pode introduzir na medição de uma potência.

Percebemos que os TP's e TC's para medição possuem grande exatidão, relacionada com as medições em regime contínuo. Para estes transformadores não interessa as medições transitórias, como por exemplo, as correntes de curto-circuito. A exatidão dos sinais medidos durante um distúrbio fora das condições de regime, para o qual ele foi projetado, não é garantida pelos transformadores de medição.

De forma diferente, os TC's de proteção possuem exatidões menores, possibilitando uma faixa maior na qual o TC garante o erro para o qual foi construído. A exatidão dos TC's de proteção é relacionada com o máximo erro admissível entre correntes primárias e secundárias, desde a corrente nominal até 20 vezes o valor desta. Ela é definida com valores de 5% ou 10%.

Esta faixa se faz necessária para garantir que as correntes de curto-circuito que chegam ao relé de proteção não possuam um erro muito grande, que venha a atrapalhar na decisão do relé. Acima desta faixa o núcleo do transformador começa a saturar, provocando distorções na corrente secundária.

Notemos então que a exatidão maior dos transformadores de corrente para proteção possibilita uma faixa maior de trabalho, garantindo um "espelho" da corrente do primário. O uso desses transformadores em relés de proteção carrega um erro de até 10%, simplesmente em função do TC.

Uma medição THDI, por exemplo, poderá ser mascarada devido aos erros inerentes ao TC de proteção. Assim, as medições realizadas pelo relé não possuem precisão e fidelidade suficiente para os operadores. Vemos que este não é um

problema do relé numérico, mas sim da concepção dos equipamentos periféricos que forma um sistema de proteção.

Os transformadores óticos, por não possuírem um núcleo magnético, não são afetados pela saturação. O emprego destes transformadores possibilitaria o uso tanto para medição quanto para proteção.

4.2 Relações de operação

Os fenômenos de QEE estão diretamente relacionados com a operação dos relés de proteção. Por exemplo, faltas no sistema elétrico causam afundamentos de tensão, enquanto que a operação da proteção define o tempo de duração dos afundamentos. Cada fenômeno de QEE pode afetar várias funções de proteção. É relevante analisar não apenas os fenômenos que causam má operação do relé, mas também aqueles que trazem um alto risco para o sistema, levando os relés a trabalharem bem próximos dos limites ajustados [3].

A coordenação e seletividade da proteção ainda são baseadas no sinal de frequência fundamental. Os diferentes distúrbios podem passar despercebidos pelos engenheiros e, no futuro, causarem desligamentos desnecessários. Vejamos como alguns distúrbios afetam a operação dos relés de proteção [4].

- Transitórios

Os transitórios aparecem subitamente no sistema e são geralmente associados a descargas atmosféricas ou chaveamento de cargas predominantemente reativas. Os relés eletromecânicos e estáticos podem ser diretamente afetados com este fenômeno.

Os filtros analógicos de relés numéricos são ajustados para acomodar apenas os sinais de interesse. Alguns fabricantes estão produzindo relés com capacidade de medição de harmônicos. Os filtros têm que ser então ajustados para deixar passar estes sinais. Quanto mais alto o harmônico desejado, maior será a influência dos transitórios nos relés numéricos.

Assim, a operação de um relé numérico devido à presença desses distúrbios depende de sua concepção.

- Variações de curta duração

Os equipamentos eletrônicos possuem níveis de tolerância de tensão para operação. Altas tensões causam danos ao equipamento, enquanto baixas tensões não são suficientes para sensibilizar os componentes eletrônicos. A

curva CBEMA define os limites para operação de equipamentos eletrônicos.

Os afundamentos e saltos de tensão, e as interrupções transitórias, são definidas dentro do limite de tempo de 1 minuto. Sua duração depende da restauração do sistema às condições antes do início do distúrbio.

Os afundamentos de tensão são os distúrbios de qualidade de energia elétrica que mais afetam as plantas industriais, sendo que os prejuízos associados são quantificados pelas perdas de produção associadas às interrupções de processos, perdas de insumos e custos associados à mão-de-obra e a reparos de equipamentos danificados.

Quando da ocorrência de uma falta em um sistema solidamente aterrado, a tensão no sistema cai ao longo do ponto de falta até a fonte. A proteção deve isolar a falha do sistema para não danificar nenhum equipamento devido às altas correntes de curto-circuito. Após a extinção da falta, a proteção também deve colocar o circuito isolado de volta em operação.

Os relés numéricos de proteção de alimentadores e LT, em geral, possuem a função 79 de religamento automático. O ONS define que todos os circuitos da rede básica devem prever equipamento para religamento monopolar. O religamento monopolar é muito importante para que se mantenha a continuidade do fornecimento de energia, por isso ele é feito de forma extremamente rápida. Este tempo é praticamente o tempo da interrupção da fase faltosa.

Percebemos então que no caso de um curto-circuito em LT's, o índice de duração para o afundamento de tensão está diretamente relacionado com o tempo de atuação da proteção mais o tempo de abertura do disjuntor, e a interrupção transitória tem sua duração limitada ao tempo de operação do religamento.

Em sistemas isolados ou aterrados através de impedância, quando da ocorrência de curtos-circuitos fase-terra, temos o aparecimento dos saltos de tensão no lugar dos afundamentos. A análise utilizada para o afundamento de tensão é a mesma para os saltos de tensão.

- Riscos de má-operação

Os afundamentos e saltos de tensão se propagam pelo sistema e vão perdendo intensidade ao longo da rede. Quando ocorre um curto-circuito em uma LT, por exemplo, outros relés de proteção, irão enxergar o fenômeno. Isto pode fazer com que o relé venha a operar sem que o equipamento que ele está protegendo esteja sob um defeito.

A função 21 com partida por sub-impedância, utiliza-se dos valores de corrente e de tensão para verificar a impedância do equipamento protegido, geralmente linhas de transmissão. Em regime, o relé calcula uma impedância elevada pois considera a corrente que vai para a carga e outros equipamentos do sistema. Quando ocorre um curto-circuito, o relé da LT passa a receber uma corrente de valor elevado enquanto que a tensão sofreu uma diminuição em sua magnitude. Se a impedância calculada ultrapassa um limite mínimo, o relé opera.

Relés 21 que estejam instalados próximos a esta LT, onde a impedância entre o ponto de defeito e o relé não seja elevada, medem esta tensão, quase com o mesmo valor. A impedância calculada por este relé pode ser tal que esta venha a entrar em sua característica de operação. São necessários vários estudos para garantir que o relé não venha a operar nestas condições, mesmo com carga leve ou pesada.

Os relés de função 27, subtensão, também correm risco de atuarem indevidamente. Geralmente estes relés têm uma temporização maior que o tempo de duração do afundamento de tensão. Assim, a temporização garante o bom funcionamento da proteção.

- Desequilíbrios

Os desequilíbrios, em contraste com os afundamentos e saltos de tensão, apresentam um impacto maior na proteção do que o oposto. Tensões e correntes desequilibradas aparecem em circuitos com cargas desbalanceadas e também em linhas de transmissão não transpostas.

Um sistema que tenha um alto nível de desequilíbrio pode mascarar uma situação de falta para o relé. Sistemas com muita carga monofásica possuem um alto nível de desequilíbrio. Os ajustes destas funções devem ser tais que permitam a operação contínua sem que haja desligamento desnecessário. Geralmente, quando o nível de desequilíbrio é muito alto, a função de desequilíbrio é desabilitada.

Alimentadores não transpostos, e linhas paralelas, causam um desequilíbrio natural ao sistema, devido às impedâncias mútuas entre os cabos. Por causa disto, os relés devem ser ajustado com um *pick-up* mínimo equivalente ao desequilíbrio criado pela linha.

Os desligamentos monofásicos das LT são muito rápidos para que venham a afetar algum sistema de proteção com função de desequilíbrios. O desequilíbrio criado é muito rápido e praticamente não contabilizado. Uma função interessante a ser usada pelos relés numéricos é um primeiro nível

de desequilíbrio para alarme e um segundo para operação. Desta forma, o operador do sistema poderá estudar o caso e verificar as condições do sistema para que o relé não venha operar incorretamente.

- Harmônicos

Os sinais harmônicos podem apresentar correntes com valores eficazes pequenos, porém com elevados valores de pico, o que pode fazer com que alguns dispositivos de proteção termomagnéticos e diferenciais disparem. Em relés numéricos, a presença de harmônicas depende da filosofia utilizada pelo relé de proteção.

Controlar a presença das correntes harmônicas é tarefa fundamental e cada vez mais necessária nos dias atuais para estarem asseguradas uma distribuição elétrica limpa e instalações que atendam aos requisitos normativos existentes.

Nos modernos relés numéricos, a maioria das funções de proteção utiliza filtros numéricos para trabalharem apenas com o valor fundamental da corrente ou tensão. Assim, ficam imunes aos sinais harmônicos.

A função de proteção 49, função térmica ou de sobrecarga, é uma das funções que necessita levar em consideração todos os sinais que passam pelo circuito, ao qual o relé é conectado. Os efeitos das harmônicas de seqüência negativa e zero em alguns equipamentos, como motores, banco de capacitores, condutores de neutro, podem causar danos irreversíveis, provocando a troca do equipamento destruído.

Acontece que quando um sistema de filtro de harmônicas sofre algum desligamento, as correntes harmônicas que passavam por este filtro irão procurar um novo caminho e uma falha isolada pode levar a um efeito cascata e acabar desligando uma instalação inteira. Um relé de sobrecarga pode medir estas novas correntes e vir a operar. Não de forma incorreta, mas sim para um problema que não existia no equipamento ao qual ele protege.

Algumas funções de proteção numérica possuem a possibilidade de operarem para valores de amostras, ao invés do valor eficaz do sinal. Estas funções podem ser funções de sobrecorrente ou funções diferenciais de transformador e barra.

As funções diferenciais, geralmente concebidas para operarem de forma instantânea, possuem alto risco de má operação. A diferença de respostas dos transformadores de corrente pode contribuir para agravar o problema. Se os relés, ou a conexão dos TC's, não preverem um filtro para a 3º harmônica, picos elevados desta corrente podem levar o relé a operar. Temporizar

o relé neste caso é muito perigoso, pois quando existir um defeito na área protegida, a temporização pode ser suficiente para inutilizar o equipamento em questão.

Os relés diferenciais de transformador necessitam de algumas harmônicas, geralmente a 3º e 5º, para distinguirem quando o transformador está saturado e sobre excitado, respectivamente. Assim, o uso de filtros harmônicos para este sistema é prejudicial para a proteção.

Mas mesmo que os relés numéricos incorporem funções que utilizam medições de harmônicas, existirá um limite relacionado com o *hardware*. A grande maioria dos relés numéricos da atualidade utiliza amostragem em 960 Hz e 1200 Hz. Estes equipamentos estariam limitados a medir harmônicas até a 9ª ordem. Um aumento na amostragem resultaria em um maior custo, o que pode não ser viável para o mercado.

- Inter-harmônicos

Pouco se sabe sobre os efeitos dos sinais inter-harmônicos nos equipamentos de proteção. As principais fontes geradoras de inter-harmônicos são inversores de frequência, conversores-cíclicos e fornos à arco. Os sinais de *carrier* nas linhas de transmissão também podem ser considerados como inter-harmônicos [5].

A maior relação dos inter-harmônicos com a proteção numérica é o filtro numérico usado. A maioria dos relés utiliza o filtro de Fourier com janela de 1 ciclo para obter o valor e ângulo das grandezas elétricas de frequência fundamental.

Ao contrário dos sinais harmônicos, o filtro de Fourier de 1 ciclo ajustado para a frequência fundamental não é capaz de rejeitar completamente os sinais inter-harmônicos em regime.

4.3 Relações de software

Sabe-se que um relé numérico é constituído de *hardware* e *software*, sendo este último implementado para realizar diferentes tarefas, tais como: autosupervisão, comunicação de dados, supervisão da rede elétrica e, obviamente, a proteção do sistema. Também é comum encontrarmos nos relés numéricos, rotinas para medição de diferentes grandezas elétricas, como: valor eficaz de corrente e de tensão, potência, demanda, etc. Em termos de supervisão, rotinas para oscilografia, localização de defeito e diagnósticos diversos passam a fazer parte do cotidiano destes relés.

Assim como os relés numéricos, os medidores de qualidade de energia funcionam da mesma maneira. São compostos de *hardware*, muito semelhantes aos relés numéricos, e *software*. Nele estão implementadas as funções qualidade de energia, da mesma maneira que nos relés temos as funções de proteção.

Percebemos então que para que um relé numérico faça funções de qualidade, basta que no *software* interno do relé, chamado de *firmware*, estejam previstas tais rotinas. É claro que o *hardware* deve ser capaz de processar toda esta informação adicional, além de possibilitar uma maior armazenagem de dados.

Após a amostragem do sinal, o problema se concentra em como extrair as características dos sinais elétricos de tensão e de corrente e os parâmetros derivados. É neste ponto que entra em cena os algoritmos numéricos.

Alguns métodos têm sido pesquisados para implementação prática tais como os métodos baseados em ondas viajantes com técnicas comparativas e técnicas de correlação cruzada ou técnicas utilizando transformada wavelet. Cabe mencionar que em tais casos a taxa de amostragem deve ser elevada para que seja possível capturar os transitórios de falta e, principalmente, as ondas viajantes [6].

A grande maioria dos algoritmos existentes são baseados nas formas de onda dos sinais de tensão e de corrente. O grande interesse é descobrir as características dos fasores para que, em vista de uma variação destes parâmetros, alguma decisão inteligente possa ser tomada pelo relé.

A grande maioria dos relés existentes utiliza dois tipos de filtros numéricos: cálculo do valor *true rms* e filtros de Fourier, cada qual para sua aplicação específica.

O filtro de Fourier é capaz de filtrar numericamente qualquer sinal senoidal em regime contínuo, múltiplo inteiro da frequência fundamental. O algoritmo leva em consideração que todos os sinais envolvidos são simétricos em relação ao eixo das abscissas, ou seja, possuem integral nula dentro do tempo estabelecido pela janela de amostragem.

Os sinais inter-harmônicos não podem ser 100% filtrados pelo algoritmo de Fourier convencional de 1 ciclo, pois não simétricos em relação a um ciclo de frequência fundamental.

A maioria dos relés numéricos utiliza o Filtro de Fourier de 1 ciclo para extração das características dos sinais de frequência fundamental. A implementação de um *firmware* capaz de extrair sinais em outras frequências é

feita de maneira simples, desde que sejam atendidas as necessidades de *hardware* para amostragem e processamento.

A partir daí, um algoritmo seria responsável em analisar todos os fenômenos de qualidade, baseado em normas específicas de acordo com a necessidade de cada cliente, a partir dos sinais extraídos. A contabilização de afundamentos, THD, flicker, entre outros, seriam armazenadas e informadas para o Centro de Operações através de redes de comunicação.

5.0 CONCLUSÕES

Existem diversas relações entre proteção numérica e qualidade da energia elétrica. O desempenho dos relés numéricos frente aos distúrbios de qualidade não é, ainda, muito bem definido. Simulações e testes deve ser feitos para avaliar melhor as respostas destes equipamentos.

O uso de relés numéricos para monitoramento da qualidade nem sempre é adequada devido a diversos fatores, como por exemplo, a exatidão dos TCs de proteção. Mas as semelhanças entre relés e monitores de qualidade permitem que no futuro, estas funções estejam no mesmo equipamento, realizando num mesmo sistema, proteção elétrica e monitoramento da qualidade da energia.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Wang, F., "On Power Quality and Protection", Licentiate thesis. Göteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Technical Report No. 372L, 2001.
2. Hart, Davi G., "Tappin Protective Relays for Power Quality Information", IEEE Computer Application in Power, January 2000.
3. Henville, C. F., "Power Quality Impacts on Protective Relays - and Vice Versa", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, Page(s): 587-592 vol.1.
4. IEEE Std 1159-1995, "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality".
5. Wang, F., Bollen, M. H. J., "Measurement of 182 Hz interharmonics and their impact on relay operation", Proceedings of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Orlando, 2000, Vol. 1, page(s): 55-60.
6. Silveira, Paulo Márcio, Seara, Rui and Zürn, Hans Helmut, "Seleção de fases em relés numéricos de linhas de transmissão baseada em análise multi-resolução via transformada wavelet", Cba Controle & Automação, Set. 2002, vol.13, no.3, p.327-336.