XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Análise de Eventos do Sistema Elétrico Quanto à Possibilidade de Danos de Equipamentos de Baixa Tensão

Nelson Kagan	Nelson M. Matsuo	Nelson C. de Jesus
Universidade de São Paulo	**Universidade de São Paulo**	**AES Sul**
nelsonk@pea.usp.br	matsuonm@usp.br	nelson.jesus@aes.com

Edson H. Takauti	Marcelo H. I. da Silva	Ivo T. Domingues
Bandeirante Energia	**Grupo Rede**	**AES Eletropaulo**
hideki@enbr.com.br	marcelo.iunes@redeeeb.com.br	ivo.domingues@aes.com

Palavras-chave: Ressarcimento, Sobretensão, Dano em equipamento, Surtos atmosféricos, Perturbações elétricas

Resumo

Este artigo apresenta os aspectos julgados importantes relacionados à análise de pedidos de indenização por danos em aparelhos e descreve a abordagem adotada na metodologia utilizada no desenvolvimento da ferramenta computacional de análise, que incorpora um sistema de consulta dos bancos de dados das companhias para acessar as ocorrências na rede e identificar indícios de situações que podem ter causado perturbações na rede que sejam potencialmente associáveis a danos de equipamentos, efetuando análise das possibilidades de danos em função da instalação que alimenta o consumidor, tipo de equipamento e sua susceptibilidade a perturbações.

1. Introdução

As empresas de distribuição têm sentido demandas crescentes de pedidos de ressarcimento por danos em equipamentos. Possivelmente, parte desse crescimento deve-se ao aumento do uso de equipamentos eletro-eletrônicos mais vulneráveis a perturbações de tensão. Outras possíveis razões poderiam ser citadas, como o aumento dos canais para reclamações e o aumento da consciência das pessoas quanto ao direito de exigir ressarcimentos justos por danos causados por perturbações de origem no sistema de alimentação, muitas vezes incentivadas pela imprensa. Perda na qualidade de fornecimento também pode contribuir para esse aumento, mas aparentemente não tem havido uma correlação forte entre esse aumento de demanda e a piora de índices de qualidade como uma tendência geral dos sistemas de distribuição.

A importância do assunto é atestada pelo considerável número de publicações [1-9] e pela edição da Resolução nº 61 da ANEEL em 2004.

Tem havido uma percepção, da parte de muitos técnicos de companhias de distribuição que tem trabalhado nos processos de atendimentos de casos de pedidos de ressarcimento, de que freqüentemente os casos desses pedidos suscitam dúvidas quanto à justeza das reclamações, por

motivos como o fato de os serviços de consertos apresentados pelos consumidores que reclamam de danos incluírem componentes que dificilmente seriam danificados por perturbações de origem no sistema de alimentação, ou o fato de as ocorrências havidas na rede de alimentação e registradas no banco de dados dificilmente justificarem os danos alegados, etc.

A percepção, também desses técnicos, relativa aos órgãos reguladores é que eles têm atuado no sentido de evitar que os consumidores, normalmente leigos no assunto, não sejam prejudicados, mas tem sido notadas situações em que os consumidores são superprotegidos, na medida em que, havendo dúvidas, algumas hipóteses mais pessimistas são admitidas como possíveis, sobreestimando os efeitos danosos associados aos eventos que ocorrem normalmente na rede elétrica, como no caso de existência de alguma manobra no sistema.

Por outro lado, para realizar uma análise técnica imparcial é necessário que, na busca de ocorrências suspeitas na rede eventualmente associáveis a danos de equipamentos, se examinem também eventos temporários ou transitórios cujas ocorrências muitas vezes deixam de ser examinadas, seja por não se dispor de monitoração ou pelo fato de essas informações não estarem associadas ao sistema de informação de ocorrências na rede.

Faz-se assim necessário que se aprofundem os conhecimentos das situações do sistema elétrico que podem gerar perturbações capazes de produzir efeitos danosos em aparelhos elétricos, bem como o conhecimento da susceptibilidade destes, com a finalidade de buscar informações para que os envolvidos no assunto possam ter uma base mais sólida sobre a questão. Isso permitirá conclusões mais realísticas e mais justas possíveis nas avaliações, evitando que mitos prevaleçam sobre a realidade nesse relacionamento entre consumidor e companhias de distribuição, onde entram, também, os agentes reguladores.

Portanto, trabalhos de avaliações das perturbações, tanto os baseados em estudos de simulações de ocorrências anormais como aqueles baseados em medições e registros de perturbações por meio de monitores de qualidade de energia são importantes, assim como as avaliações da susceptibilidade de equipamentos elétricos às perturbações.

Um projeto P&D reúne a Universidade de São Paulo e várias companhias de distribuição, a saber, Bandeirante, AES Sul, AES Eletropaulo e 8 empresas do Grupo Rede, em busca de uma metodologia aperfeiçoada e ferramenta computacional de análise de PID (pedidos de indenização por danos em equipamentos). Essa ferramenta incorpora um sistema de consulta dos bancos de dados das companhias para acessar as ocorrências na rede e identificar indícios de situações que podem ter causado perturbações na rede que sejam potencialmente associáveis a danos de equipamentos. Efetua-se então análise das possibilidades de danos em função da instalação que alimenta o consumidor, tipo de equipamento e sua susceptibilidade a perturbações.

Este artigo discute alguns aspectos julgados importantes relacionados a essa questão e apresenta a forma de abordagem adotada na metodologia e na ferramenta computacional de análise de PID.

2. Perturbações nas tensões de alimentação de consumidores de baixa tensão

Podem ser citados os seguintes principais tipos de perturbação elétrica no suprimento de consumidores de baixa tensão que podem afetar de alguma forma o funcionamento de aparelhos elétricos, seja do ponto de vista funcional como da integridade do aparelho:

a) sobretensões (sustentadas e temporárias)

b) subtensões sustentadas

c) afundamentos de tensão e interrupções temporárias

d) desequilíbrio de tensão/inversão de fases ou inversão fase-neutro (longa-duração)

e) sobretensões transitórias de manobra e de origem atmosférica

O efeito de um tipo de perturbação sobre um determinado aparelho depende do seu nível de severidade e da vulnerabilidade/susceptibilidade do aparelho em relação a esse tipo de perturbação.

A seguir são apresentadas algumas considerações gerais sobre as perturbações.

Sobretensões

Dentre as perturbações, as sobretensões têm sido o maior foco de atenção quanto à causa de danos de equipamentos, tanto as sobretensões sustentadas, as temporárias como as transitórias. Não se têm dúvidas quanto ao fato de as sobretensões causarem danos a aparelhos. Contudo, há, ainda, carência de conhecimento sobre a suportabilidade de aparelhos de baixa tensão à sobretensão. Além disso, há necessidade de maior conhecimento sobre os níveis de algumas perturbações a que os consumidores de baixa tensão ficam sujeitos.

Conforme será comentado mais adiante em maiores detalhes, alguns tipos de ocorrências ou situações na rede causam sobretensões, como: curto-circuito, abertura do neutro, abertura de fase associada a algumas situações peculiares, manobras na rede, descargas atmosféricas, etc.

Subtensões (sustentadas)

As subtensões podem, em princípio, provocar solicitações adicionais em equipamentos que têm a sua corrente aumentada ao sofrer subtensão, como aqueles de característica de funcionamento a potência constante, e eventualmente causar dano. Algumas referências mencionam essa possibilidade, principalmente referindo-se a equipamentos com motores, como refrigerador, ar condicionado e máquina de lavar, entre outros.

Cabe ressaltar que são muito comuns nos sistemas de distribuição aéreos do país situações que causam subtensões. Basta citar que a abertura de fase, que na grande maioria dos casos produz subtensão, é um tipo de evento corriqueiro, tendo em vista o uso extensivo de dispositivos de proteção monopolares como fusíveis de distribuição. Considerando que há uma grande quantidade de atuações desse tipo de dispositivos ocorridas diariamente e que cada atuação pode causar subtensão a vários consumidores, é de se suspeitar que os aparelhos não sejam tão vulneráveis a esse tipo de perturbação. Caso contrário, a quantidade de pedidos de ressarcimento seria muito maior do que tem ocorrido.

Ensaios realizados no presente projeto com diversos eletrodomésticos aplicando vários níveis de subtensão de longa duração não indicaram, até o momento, nenhum caso de queima de equipamento por este motivo. Esses ensaios contemplaram refrigeradores, máquinas de lavar roupa e máquinas de lavar louças, além de aparelhos eletrônicos. Verificou-se que os equipamentos motorizados ensaiados, ao serem submetidos a subtensões, não têm a sua corrente aumentada de acordo com o modelo de potência constante.

Portanto, esses resultados indicam que, ao menos na grande parte dos casos, as subtensões não devem ser apontadas normalmente como causas de danos de equipamentos.

Recomenda-se que maior número de ensaios com um universo maior de equipamentos seja realizada para verificar a existência ou não de alguns tipos específicos de aparelhos que são realmente vulneráveis a esse tipo de perturbação, para que as análises sejam feitas com maior discernimento.

Interrupções de curta duração e afundamentos de tensão

Normalmente as interrupções ou de afundamentos de tensão de curta duração na alimentação não provocam efeitos térmicos que causem danos de equipamentos. Entretanto, há na literatura menções quanto à possibilidade de danos de aparelhos causados pelo religamento da alimentação logo após uma

interrupção, quando se trata de equipamentos que utilizam compressores, como refrigerador ou condicionador de ar.

Ensaios realizados em laboratório no presente projeto não confirmaram essa vulnerabilidade.

Neste caso, também se recomenda que maior número de ensaios com um universo maior de equipamentos seja realizado para verificar a existência ou não alguns tipos específicos de aparelhos que são realmente vulneráveis a esse tipo de perturbação.

Desequilíbrio de tensão

É largamente conhecido o efeito danoso do fenômeno de desequilíbrio de tensão em motores trifásicos. Assim, motores sem dispositivo de proteção que permita desconectá-los em condições de desequilíbrio podem sofrer danos por desequilíbrios de tensão que ocorrem comumente na rede de distribuição quando há abertura de fase, tanto na rede primária como na rede secundária.

Cabe comentar que a NBR-5410 recomenda o uso de dispositivo de proteção contra quedas e faltas de tensão, que possibilita a proteção de motores trifásicos nos casos de desequilíbrios acentuados resultantes de aberturas de fase no sistema de distribuição.

Sobretensões transitórias originárias de manobras na rede

É de conhecimento geral que manobras na rede podem produzir transitórios na rede de baixa tensão, mas não há um domínio amplo sobre os níveis e durações das sobretensões que realmente ocorrem nos sistemas de distribuição e sobre a suportabilidade de equipamentos de baixa tensão a esse tipo de sobretensão, que se caracteriza pela curta duração. Conforme comentado mais adiante, os equipamentos possuem em geral suportabilidade relativamente alta a sobretensões transitórias.

Surtos de origem atmosférica

É bastante conhecido o potencial destrutivo de surtos de origem atmosférica em todos os níveis de tensão. Mas, neste caso, também, não há um domínio amplo sobre os níveis e durações das sobretensões que realmente ocorrem e sobre a suportabilidade de equipamentos de baixa tensão a esse tipo de sobretensão, que se caracteriza pela curta duração.

Outros tipos de perturbação

Outros tipos de perturbação podem eventualmente causar danos em equipamentos em algumas situações, como por exemplo distorções harmônicas de tensão em níveis excessivos. Embora teoricamente esse tipo de perturbação possa causar danos em alguns tipos de equipamento de baixa tensão, trata-se de situação raramente esperada.

Tipos de perturbação e situações diferentes dos casos contemplados na metodologia de análise realizada automaticamente pela ferramenta de análise de PID devem ser analisados à parte.

3. Investigações sobre a vulnerabilidade de aparelhos a perturbações (características de suportabilidade)

As perturbações podem se propagar para um equipamento por dois modos distintos:

- **modo comum**: distúrbios que ocorrem entre condutores ativos e terra (linha-terra).

- **modo diferencial**: distúrbios que ocorrem entre condutores ativos (linha-linha, que pode ser fase-fase ou fase-neutro).

As sobretensões de modo comum aparecem em função das elevações de potencial dos condutores da rede de alimentação em relação à terra. Esse tipo de sobretensão impõe solicitações às isolações de equipamentos. Mas, caso o equipamento tenha o seu terminal de terra ou a sua massa conectada ao neutro não haverá solicitação de modo comum. Entretanto, se o equipamento possuir entrada de um outro sistema, tal como de sinal, poderão ocorrer solicitações. Portanto, a possibilidade de queima de equipamento pela sobretensão de modo comum depende da situação de instalação do equipamento.

As sobretensões de modo diferencial impõem solicitações nos equipamentos independentemente da forma de aterramento.

Dados de suportabilidade obtidos de ensaios em laboratório

Os seguintes ensaios de aplicação de sobretensões de modo diferencial realizados em laboratório permitiram conhecer melhor as características de suportabilidade de vários aparelhos:

a) ensaios com sobretensão de 60 Hz

b) ensaios de sobretensão com onda de freqüência 420 Hz com duração de ½ ciclo de 60 Hz superposta à onda de 60 Hz de regime permanente (resultando em pico de 4,3 pu do pico nominal de 60 Hz)

c) ensaios de surtos aplicando onda combinada padrão IEC 61000-4-5 (onda de tensão de 1,2 x 50 µs e onda de corrente de 8 x 20 µs após curto-circuito e onda tipo “ring wave”)

Observou-se que grande parte dos aparelhos ensaiados (TV, DVD, refrigerador, máquina de lavar roupa, máquina de lavar louça, secadora de roupa) suporta as sobretensões mostradas na Figura 1. A figura mostra também a curva ITIC (sobretensão), para comparação.

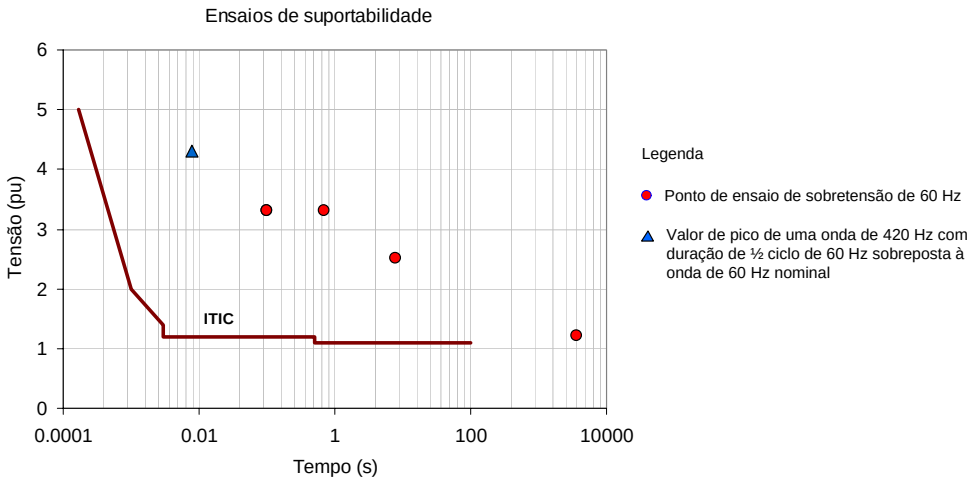


Figura 1 - Sobretensões temporárias de modo diferencial

Nesses ensaios, o microcomputador apresentou nível de suportabilidade inferior.

Alguns poucos ensaios de modo comum de 60 Hz foram também realizados (TV e refrigerador), mas há apenas alguns resultados preliminares, que indicam que as características de suportabilidade de modo comum e diferencial podem ser bastante diferentes, conforme esperado.

Os ensaios de surtos mostraram que os valores suportáveis são em geral de 2 kV ou mais, para modos diferencial e comum, com tendência de valores maiores no modo comum [2]. Os níveis de imunidade são em geral maiores do que os níveis especificados na IEC-61000-6-1 (linha-linha: 1 kV, linha-terra: 2 kV).

Testes adicionais preliminares foram realizados quanto à possibilidade de danos de equipamentos submetidos a interrupções de curta duração, para verificar eventual possibilidade de dano no retorno a alimentação. Nos testes assim realizados não se verificou nenhum caso de dano de equipamento, inclusive refrigerador.

4. Tipos de ocorrência ou situações associáveis a PID

Existem alguns tipos de ocorrência ou situações que podem estar associados às perturbações de tensão e, portanto, à possibilidade de danos em equipamentos.

A seguir são enumerados os principais tipos de ocorrência (situações) que eventualmente podem originar perturbação e afetar de alguma forma o funcionamento de equipamentos elétricos de BT, embora não necessariamente associáveis a danos.

4.1. Sobretensões sustentadas e temporárias

a. curto-circuito na rede secundária: situações antes e após atuação da proteção (fusível)
b. abertura ou mau contato numa fase no primário do transformador de distribuição
c. abertura ou mau contato numa fase de um trecho de alimentador primário
d. abertura ou mau contato no neutro
e. inversão fase-neutro
f. curto-circuito envolvendo diretamente circuitos primário e secundário
g. curto-circuito envolvendo fase primária e neutro contínuo
h. problemas de regulação/condições anormais de alimentação BT, MT ou AT, de longa duração
i. restabelecimento do sistema com carga baixa

4.2. Subtensões sustentadas e temporárias

a. abertura ou mau contato na fase do circuito secundário
b. curto-circuito na rede secundária
c. abertura (fusível aberto ou condutor rompido) ou mau contato numa fase no primário
d. abertura ou mau contato no neutro
e. problemas de regulação/condições anormais de alimentação BT, MT ou AT, de longa duração
f. curto-circuito no alimentador primário
g. curto-circuito em outra parte do sistema
h. inversão fase-neutro
i. problemas temporários de regulação e condições anormais de alimentação
j. entrada de grandes cargas ou transformadores nas redes de BT, MT ou AT
k. defeitos internos em consumidores de BT, MT ou AT

4.3. Desequilíbrio de tensão

a. abertura de fase no primário
b. abertura de neutro primário, no caso de banco de transformadores com neutro aterrado no primário

c. abertura de fase no secundário
d. inversão fase-neutro
e. curto-circuito

4.4. Transitórios de manobra

a. religamento de alimentador primário ou trecho com ou sem atuação da proteção
b. operação de entrada ou saída de banco de capacitores na distribuição, na SE ou na transmissão/subtransmissão
c. operações liga/desliga no sistema de transmissão/subtransmissão
d. outros tipos de manobras na distribuição

4.5. Surtos atmosféricos

a. ocorrência de raios provocando surtos diretos ou induzidos

5. Alguns aspectos importantes considerados na análise de sobretensões

5.1. Curto-circuito no secundário

Ao analisar uma ocorrência de curto-circuito no secundário, devem ser consideradas as situações antes e após a atuação da proteção, normalmente fusível do primário do transformador.

a) Situação antes da atuação da proteção

Nesse período pode ocorrer sobretensão, normalmente temporária mas podendo ser sustentada em situação desfavorável, quando o defeito ocorre em local distante do transformador. A sobretensão a que um consumidor fica sujeito depende do tipo de defeito, do local de defeito e da localização do consumidor no circuito secundário. Pode ocorrer sobretensão fase-neutro numa fase não envolvida no defeito quando este envolve o neutro (defeito fase-neutro ou 2 fases - neutro). Na origem do circuito a sobretensão é nula e aumenta conforme se aproxima do ponto de defeito, na rede. A jusante do ponto de defeito, a sobretensão tende a se manter constante ao longo do circuito até o seu final. No outro lado do circuito secundário, em relação ao transformador, não há sobretensão. Cabe observar que esse comportamento é típico de sistema em que o neutro é solidamente aterrado.

b) Situação após a atuação da proteção

Após a atuação da proteção, pode ocorrer ou não sobretensão, dependendo do tipo de defeito e da fase em que a proteção atua.

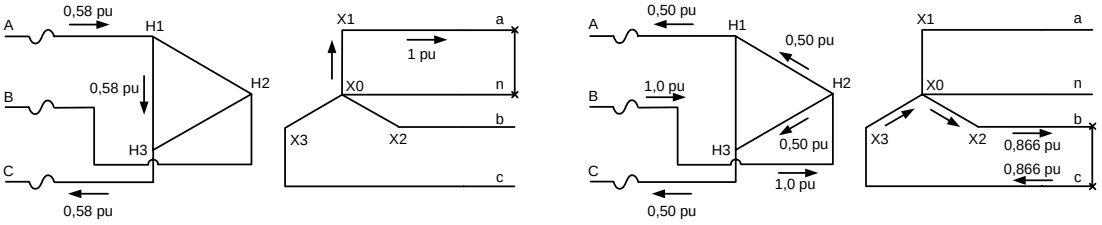
A proteção pode abrir na ordem natural ou não natural. A ordem da abertura é considerada natural quando há a abertura do fusível primário da fase em que a atuação é esperada, considerando a relação entre a corrente de defeito que passa pelo fusível e a corrente nominal do elo fusível e a característica tempo x corrente do elo do transformador ou banco de transformadores. A ordem da abertura é considerada não natural quando isso não acontece, em função de certas condições desfavoráveis, como elo fusível de característica diferente daquela que se espera.

A abertura na ordem não natural e a permanência do defeito podem produzir sobretensões severas sustentadas em todos os consumidores do circuito secundário.

Os seguintes exemplos para o caso de transformador trifásico com ligação DY aterrado podem esclarecer essa questão:

- No caso de defeito fase-neutro, considerando que no primário haverá correntes de linha iguais em duas fases (Figura 2.a), a situação teoricamente esperada seria a abertura de fusíveis dessas

duas fases. Evidentemente, nessa situação não haverá sobretensão, pois haverá interrupção no fornecimento. Entretanto, havendo uma diferença entre as características de atuação dos elos fusíveis das duas fases, pode ocorrer a abertura de uma fase antes da abertura da outra, o que faz cessar a sobrecorrente, causando a não atuação do outro fusível. Essa é uma situação cuja possibilidade de ocorrência pode ser significativa. Nessa situação, permanecendo o defeito, a tensão fase-fase será 1,15 pu.



a) falta fase-neutro b) falta fase-fase

Figura 2 - Curto-circuito na rede secundária

- No caso de defeito fase-fase, haverá, no primário, uma fase em que a corrente de linha é o dobro das correntes das outras fases (Figura 2.b) . Havendo abertura na ordem natural não ocorreria sobretensão. Caso contrário, havendo abertura de uma das fases em que a corrente seja menor, a tensão fase-neutro passará a 2 pu* e a tensão fase-fase a 1,73 pu. Esta não é uma situação normalmente esperada, mas não deve ser descartada a possibilidade.

* Nota: Na prática, a saturação do transformador tende a reduzir esse valor.

Na metodologia de análise utilizada, adotou-se a seguinte denominação, para analisar as situações de abertura monofásica:

- Abertura monofásica na ordem natural: abertura de uma fase em que a corrente seja maior ou aproximadamente igual à corrente nas outras fases.
- Abertura monofásica na ordem não natural: abertura da fase em que a corrente de defeito é significativamente menor (cerca de metade) do que na fase com a maior corrente.

Os valores de sobretensões na pior fase e em situação mais desfavorável considerando os defeitos fase-neutro, fase-fase e 2 fases-neutro e as ordens de abertura monofásica natural e não natural são apresentados na Tabela 1 para o caso de transformador trifásico com ligação DY aterrado.

Tabela 1 - Sobretensões resultantes de curto-circuito no secundário - Valores máximos típicos

Tipo de transformador	Antes da abertura do fusível	Após a abertura do fusível (1 fase)	
		Abertura monofásica na ordem natural	Abertura monofásica na ordem não natural
Trifásico DY aterrado	M: 1,3 pu com neutro de secção igual à de fase; 1,5 pu com neutro de secção menor do que de fase (normalmente temporária)	M: 1,4** pu (sustentada) B,T: 1,15 pu (sustentada) ** situação com defeito 2 fases-neutro	M: 2 pu (sustentada) B,T: 1,73 pu (sustentada)

Nota: M : equipamento monofásico com alimentação fase-neutro; B: equipamento monofásico com alimentação fase-fase; T: equipamento trifásico

Para bancos de transformadores ou outros tipos de transformador são aplicados critérios semelhantes considerando o tipo de ligação e correntes resultantes dos defeitos e os valores nominais de elos fusíveis usados.

5.2. Curto-circuito no primário

Durante a ocorrência de um curto-circuito na rede primária, as tensões nos consumidores secundários podem ser afetadas no período até a interrupção da corrente de defeito pela atuação da proteção da seguinte forma:

- surgimento de condições de tensão desequilibradas com ou sem sobretensão (depende do tipo de defeito e tipo de ligação do transformador MT/BT);
- queda de tensão ao longo do neutro da rede secundária, pela passagem de alta corrente de defeito, nos casos em que o defeito envolver o neutro;
- elevação de potencial do neutro do secundário em relação à terra, caso o defeito envolva esse neutro, podendo afetar equipamentos de BT que tenha aterramento da sua massa não ligada ao neutro.
- elevação de potencial de fase do secundário, caso o defeito envolva diretamente uma fase secundária.

Essas situações são geralmente temporárias, uma vez que nesse tipo de ocorrência normalmente há atuação da proteção da rede de MT.

Curto-circuito no primário pode causar sobretensões de modo comum e modo diferencial significativas no secundário. Os níveis dessas sobretensões dependem de alguns fatores como: existência ou não do neutro contínuo na rede, aterramentos existentes, localização do defeito e do consumidor.

Cabem os seguintes comentários a respeito:

<u>Rede com neutro secundário local, sem interligação com neutro geral</u>

Quando o defeito ocorre no primário do transformador que alimenta o consumidor em questão ou no pára-raios desse transformador, envolvendo o aterramento local, normalmente há uma elevação muito grande do potencial do neutro secundário, quando este estiver ligado ao aterramento, atingindo um nível da ordem do valor da tensão nominal fase-terra da rede primária (sobretensão de modo comum).

Curto-circuito envolvendo o primário e neutro ou terra em outra parte do alimentador pode produzir sobretensão no consumidor de BT se o transformador tiver enrolamento primário aterrado, como é o caso de sistema MRT (monofilar com retorno por terra). Neste caso, a tensão no sistema MRT atinge tensões da ordem de 1,3 a 1,73 pu, se não houver transformador de isolação.

<u>Rede com neutro interligado</u>

Em rede com neutro interligado, a existência de vários aterramentos pode reduzir os níveis das sobretensões de modo comum, mas, mesmo assim, podem atingir níveis elevados.

A continuidade do neutro favorece a diminuição da sobretensão de modo comum, pela multiplicidade de aterramentos, mas, por outro lado, faz propagar a sobretensão para uma área maior, envolvendo maior número de consumidores. Além disso, favorece o aparecimento de sobretensão de modo diferencial causada pela passagem de corrente pelo neutro no sentido longitudinal.

Essas sobretensões têm durações determinadas pelo tempo de atuação da proteção e podem ser comparadas com a característica de suportabilidade de um equipamento para verificar a possibilidade de dano. Entretanto, quando a sobretensão de modo comum atinge níveis próximos à tensão fase-terra

do sistema primário, é de se esperar que qualquer equipamento de baixa tensão que não tenha o terminal de terra ou a massa conectada ao neutro (esquema TN) sofra danos pelo rompimento da isolação.

Nas análises de PID, considerando que a sobretensão de modo comum assim originada geralmente atinge vários consumidores do alimentador primário, a constatação desse tipo de problema poderia ser feita verificando a existência de múltiplos casos de PID no mesmo alimentador.

5.3. Abertura de fase no primário

As situações de abertura de fase por atuação de fusível primário de transformador de distribuição com a existência de curto-circuito no secundário foram tratadas anteriormente no item 5.1.b.

As situações aqui tratadas se referem às condições de abertura de fase no primário (de transformador ou trecho de circuito primário) sem a existência de curto-circuito.

A abertura de uma fase no primário de uma estação transformadora (ET) produz situações desequilibradas de tensão no secundário. As tensões resultantes dependem dos tipos de cargas ligadas (monofásicas com alimentação fase-neutro, monofásicas com alimentação fase-fase ou trifásicas) relação entre as impedâncias desses diferentes tipos de cargas nas diferentes fases. Dependendo dessas condições pode haver sobretensões fase-neutro ou fase-fase. As sobretensões tendem a ocorrer nas fases menos carregadas.

No caso de transformador trifásico com ligação DY aterrado, a abertura de uma fase pode produzir, em situações desfavoráveis de desequilíbrio de cargas, as seguintes situações:

- sobretensão fase-fase de 1,15 pu

  Essa situação pode ocorrer quando há desequilíbrio acentuado de cargas monofásicas ligadas entre fase e neutro.

- sobretensão fase-neutro de 2 pu e sobretensão fase-fase de 1,73 pu

  Esta situação pode ocorrer quando existem cargas monofásicas ligadas entre fases no sistema e há em condições desequilibradas. Portanto, não ocorre em sistema onde não há esse tipo de carga. Na prática, a saturação do transformador e, além disso, a própria existência da carga que fica potencialmente sujeita à sobretensão (diminuindo a impedância) tendem a reduzir os valores dessas sobretensões.

5.4. Abertura de fase no secundário

Esse tipo de ocorrência normalmente não produz sobretensões. A abertura de fase no secundário pode produzir situações em que cargas monofásicas ligadas entre fases ou uma carga ligada entre fases e outra ligada entre fase e neutro fiquem em série. Teoricamente existe possibilidade de sobretensão quando cargas indutiva e capacitiva ficam em série e haja condição de ressonância. Entretanto, essa condição é pouco provável de ocorrer com equipamentos usuais.

5.5. Abertura do neutro primário

Esta situação pode produzir sobretensão no secundário de transformador ou banco de transformadores que tenha enrolamento primário com ligação fase-neutro, em sistema primário a 4 fios multiaterrado.

5.6. Abertura do neutro secundário

Esta situação pode produzir sobretensão em cargas monofásicas com ligação fase-neutro em locais de circuito secundário a jusante do ponto de abertura do neutro secundário onde haja 2 ou mais fases.

5.7. Transitórios de manobra

Embora manobras no sistema supridor como energização de alimentador de distribuição, chaveamento de banco de capacitores, manobras de linhas no sistema de transmissão/subtransmissão possam teoricamente causar tensões de pico acima de 2 ou 3 pu do pico nominal, principalmente em condições sem carga, simulações indicam que as cargas contribuem para redução dos picos e das durações das sobretensões. Estima-se que as sobretensões que ocorrem efetivamente nos sistemas raramente atingem valores que causam danos em equipamentos de baixa tensão.

A análise de 178 registros de tensões e correntes de alimentadores de 13,8 kV durante religamentos (incluindo religamento de alimentador e religamento do sistema a montante), compreendendo 90 alimentadores da AES Eletropaulo, mostrou que:

- as sobretensões durante religamento são pouco freqüentes,
- é comum a ocorrência de pequenas subtensões de curta duração durante os religamentos,
- em apenas 5 casos (2,8% do total) houve sobretensão em que o valor de pico superou 1,1 pu do pico em regime,
- em um desses casos o valor de pico foi de 1,7 pu,
- nos outros casos os valores de pico ficaram inferiores a 1,2 pu,
- os picos de sobretensões em todos os casos não persistiram além do primeiro ½ ciclo.

Não se descartam tensões transitórias maiores do que as verificadas nessas medições, mas, conforme mostrado anteriormente, no item relativo aos ensaios de suportabilidade, os equipamentos normalmente suportam níveis de sobretensões bastante superiores a esses.

5.8. Surtos atmosféricos

A idéia de utilizar dados dos registros de descargas atmosféricas para a análise de pedidos de indenização visa verificar a possibilidade de ocorrer danos de equipamentos em conseqüência de descargas ocorridas no período pertinente ao PID, em função da localização da instalação do consumidor em relação ao local da descarga e aos parâmetros da descarga, considerando a rede de suprimento de energia onde o consumidor se encontra e a característica de suportabilidade do equipamento a surtos atmosféricos.

Os estudos realizados para essa avaliação, valendo-se de simulações computacionais, foram descritos na referência [2].

Considerando diversas incertezas existentes quanto ao ponto exato de descarga e no processo de propagação dos surtos atmosféricos na rede de distribuição, foi adotada uma abordagem conservativa, que fornecesse resultados no geral pessimistas, a favor de consumidores. Assim, nas simulações, foi considerada a descarga direta, que engloba casos em que o raio atinge a linha de distribuição (primária ou secundária), bem como os casos em que atinge instalações, edificações e estruturas alimentadas pela rede de distribuição.

As simulações consideram a linha primária, a linha secundária, o transformador, os aterramentos da rede e dos consumidores, pára-raios primários, disrupções nos isoladores primários. Deliberadamente não são consideradas disrupções na rede secundária analisada, visando obter resultados conservativos. As tensões assim obtidas representam valores que o sistema alimentador pode potencialmente transmitir às instalações de consumidores se não houver disrupções ou dispositivos de proteção de BT.

O procedimento consiste em determinar, em função da corrente de descarga, a distância crítica entre o transformador que supre o consumidor em questão e o local da descarga (raio de vulnerabilidade),

abaixo da qual a sobretensão supera o nível de suportabilidade do equipamento; ou seja, poderia haver dano no equipamento.

O seguinte procedimento é utilizado para a análise:

- obtenção dos casos de ocorrências de descargas atmosféricas no período pertinente, do banco de dados do sistema de detecção de raios, com os parâmetros de corrente (intensidade) e localização (coordenadas geográficas do centróide da elipse de probabilidade de 50% e valores e direções dos eixos maior e menor);

- determinação das distâncias críticas relativas aos raios em função das intensidades das correntes de descarga e dos níveis de suportabilidade do equipamento analisado (modo diferencial e modo comum);

- verificação da existência de trecho de rede de distribuição, de onde possa haver a propagação de surto para o consumidor em questão, na área determinada pela intersecção entre a elipse de probabilidade de 50% e o círculo traçado com centro no transformador e raio igual à distância crítica; caso afirmativo considera-se que o raio pode ter causado dano no equipamento; a aplicação deste critério é ilustrada na Figura 3. Como uma forma mais simples e mais conservativa de realizar essa verificação pode ser considerada a mesma figura sem fazer a sobreposição da topologia da rede, considerando apenas o ponto de instalação do transformador e verificando a existência ou não da intersecção entre o círculo e a elipse.

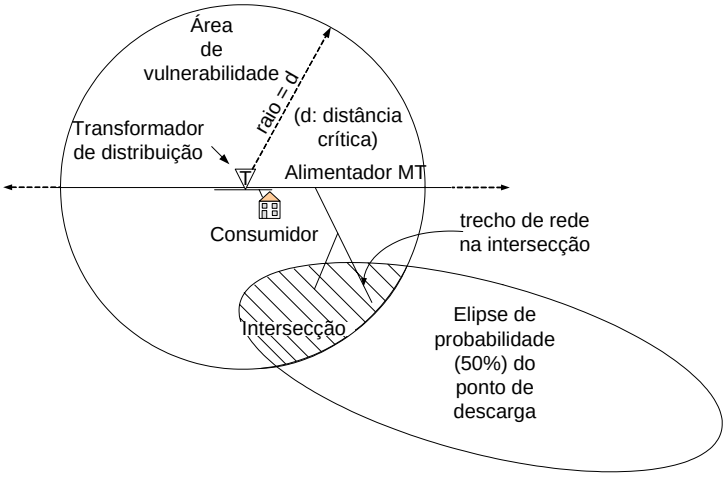


Figura 3 - Critério para avaliação da possibilidade de dano por descarga atmosférica

- considerando que as sobretensões causadas pelas descargas diretas ao sistema de distribuição normalmente produzem disrupções nas isolações da rede primária e, conseqüentemente, condições de falta, esses eventos causam, em geral, atuações da proteção de sobrecorrente do alimentador, com ou sem religamento. Assim, a atuação da proteção ou a ocorrência de sobrecorrente no alimentador podem servir como um fato de confirmação de que a descarga atmosférica teria causado uma situação severa na rede que possa ter provocado danos de equipamentos de consumidores.

Nota sobre a distância crítica

A distância crítica é um valor obtido admitindo algumas hipóteses pessimistas. Portanto, não representa necessariamente um valor típico de distância ao raio que ainda produz dano em equipamento.

As distâncias críticas obtidas por meio de simulações para níveis comuns de suportabilidade de equipamentos, incluindo os valores especificados na norma IEC 61000-6-1, variam aproximadamente na faixa de 700 a 2500 m dependendo da corrente de descarga e dos aterramentos existentes na rede. Essa faixa obtida parece bastante coerente com algumas menções encontradas na literatura, como a referência [10], que cita 2 km como o raio da área em torno do ponto de descarga em que há risco de dano de aparelhos eletrônicos. Essa mesma referência narra um evento real de descarga em que se verificou uma concentração de danos principalmente num raio de 1 km. Poderia, então, ser adotado um critério que admita uma distância de cerca de 1 km como aquela que a descarga pode normalmente causar danos em equipamentos. Caso haja alguma reclamação de local mais distante mas que esteja dentro do raio de vulnerabilidade (distância crítica), seria admitida a possibilidade de dano se existir(em) outra(s) reclamação(ões) na área próxima.

Outros resultados

Os resultados das simulações realizadas forneceram outras indicações importantes relativamente à propagação de surtos no sistema de distribuição, como:

- a existência de dispositivo de proteção num ponto da rede de baixa tensão (como por exemplo, na saída do transformador) não garante a proteção de outros pontos dessa rede;

- a instalação de dispositivo de proteção na entrada de uma instalação consumidora é capaz de reduzir drasticamente os níveis de sobretensões nas extremidades de circuitos internos do consumidor, embora as sobretensões ali resultantes possam ser maiores do que no local de instalação do dispositivo (na entrada).

6. Análise das ocorrências no sistema supridor e indícios da possibilidade de perturbações

Na metodologia utilizada para o desenvolvimento da ferramenta computacional de análise de PID, os bancos de dados com as informações das ocorrências no sistema elétrico são acessados para buscar indícios de situações que podem ter gerado perturbações nos consumidores de baixa tensão. Essa busca tem a finalidade de auxiliar a obtenção de dados ocorrências e a identificação de possíveis eventos relacionados com a reclamação de forma rápida, a partir dos dados do consumidor reclamante e sua localização na rede elétrica.

O programa PID busca os dados das ocorrências na rede e verifica a existência de determinadas combinações de dados específicos que apontem indícios de ocorrências de situações na rede que possam estar associadas a perturbações. É utilizada uma lista de indícios associáveis a cada uma das situações que podem gerar perturbações. Cada um desses indícios deve ter uma correspondência na base de dados da companhia de distribuição, através de uma tabela que estabelece essa correspondência com uma combinação de dados da empresa. Assim, a partir dos dados das ocorrências são identificados os indícios de situações associáveis a perturbações e então a verificação da possibilidade de dano de equipamento é direcionada aos algoritmos de análise de acordo com a situação apontada.

7. Considerações finais

Este artigo apresentou os principais aspectos considerados na metodologia de análise de pedidos de indenização por danos em equipamentos de baixa tensão adotada no projeto P&D. Esse projeto compreende o desenvolvimento da metodologia de análise, baseada em estudos de situações em rede elétrica que podem produzir danos em equipamentos de baixa tensão, pesquisa de suportabilidade de

equipamentos de baixa tensão a perturbações na alimentação e desenvolvimento de ferramenta computacional para auxílio à análise de pedidos de indenização.

Os trabalhos realizados nesse projeto têm possibilitado avanços nas análises de pedidos de indenização.

Entretanto, cabe mencionar que ainda há muitas pesquisas a serem realizadas nesta área no sentido de se obterem dados de medições de campo principalmente de sobretensões transitórias e temporárias, para melhor conhecimento dos níveis das perturbações que ocorrem nos sistemas de distribuição, e efetuar investigações adicionais sobre a vulnerabilidade/susceptibilidade de equipamentos a diferentes tipos de perturbações.

Como uma forma de melhorar os recursos analíticos das companhias de distribuição nas avaliações das perturbações, recomenda-se o incremento do uso de monitores de Qualidade de Energia nas suas redes de distribuição, ajustando-os de forma a detectar as diversas condições anormais em vários locais da rede elétrica de maneira a haver monitorações permanentes do sistema. Isso seria útil não só para pesquisa dos valores típicos das perturbações, mas para que os registros possam servir sistematicamente como dados para análise rotineira de pedidos de indenização.

8. Referências

1 Jesus, N.C.; Oliveira, H.R.P.M.; Batista, E.L.; Silveira, M. - Simulação de Distúrbio no Sistema Elétrico de Distribuição como Suporte Técnico às Solicitações de Ressarcimentos de Danos - CBQEE - 2007 - Santos - SP

2 Kagan, N.; Matsuo, N.M.; Domingues, I.T.; Jesus, N.C.; Silva, M.H.I; Takauti, E.H. - Methodology for the Assessment of Possible Damages in Low Voltage Equipment Due to Lightning Surges - IX SIPDA-2007 - Foz do Iguaçu

3 Tavares, C.E.; Mendonça, M.V.B.; Oliveira, J.C; Delaiba, A.C.; Silva, R.M.T - Aplicativo Computacional para Subsidiar a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento - CBQEE - 2007 - Santos - SP

4 Jucá, A.S.; Pelegrini, M.A.; Ribeiro, F.S. - Proposta para Adequação de Conflitos de Indenização por Danos Elétricos - CBQEE - 2007 - Santos - SP

5 Gomez, J.C.; Morcos, M.M. - Latin-American Experience about Appliance Damage Caused by System Perturbations - T&D Conference and Exposition: Latin America, 2006

6 Oliveira, H.R.P.M; Jesus, N.C.; Martinez, M.L.B. - Análise do Impacto de Sobretensões em Equipamentos Eletro-Eletrônicos: Uma Contribuição Técnica a Avaliações de Pedidos de Indenizações - VI SBQEE - 2005 - Belém - Pará

7 Oliveira, H.R.P.M.; Jesus, N.C.; Martinez, M.L.B. - Análise comparativa do Desempenho e Suportabilidade de Equipamentos Eletro-Eletrônicos Frente a Solicitações de Sobretensões Impulsivas - VI SBQEE - Belém/Pará - 2005

8 Kagan, N.; Matsuo, N.M.; Ferrari E.L.; Duarte, S.X.; Domingues, I.T.; Monteiro, A.J. - Metodologia para Suporte à Análise de Pedidos de Indenização em Queimas de Aparelhos na Área de Concessão da Eletropaulo - IV SBQEE - Porto Alegre/RS - 2001

9 Andrade, M.T.O; Prado Jr, F.A.A.; Landini, L.A.R. - Ressarcimento de Consumidores Relativos a Danos Decorrentes da Prestação dos Serviços Concedidos - Uniformização de Procedimentos - II Reunion Internacional de Distribuicion Y Comercializacion de Energia Electrica - Lima - Peru - 2001

10 Hasse, P. - Overvoltage Protection of Low Voltage Systems - 2nd Edition - The Institution of Electrical Engineers - 2000

Outros participantes do projeto

Silvio X. Duarte , J. C. Guaraldo, Juan C. Cebrian, Tiago P. de Souza , Eduardo L. Ferrari - *USP*
Flavio Cerdan - *AES Eletropaulo*
Vagner M. Pedroso, Reinaldo Vinagre, Maria de Fatima R. Cavalieri, Lucca Zamboni - *Bandeirante Energia*
Gilson Loser - *AES Sul*
Rodrigo F. Silva - *Grupo Rede*