XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

CARLOS ALVES DA SILVA	Fernando Rodrigues Sassaki	Marcos Paulo de Oliveira Castro
AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.
carlos.alves@aes.com	fernando.sassaki@aes.com	marcospaulo.castro@aes.com

Sistema de Proteção para Transformadores com vista à Elevação de Temperatura

Palavras-chave

Enrolamento
Monitoramento
Proteção
Rele
Temperatura
Transformador

Resumo

O transformador de potência é um importante equipamento utilizado no sistema de potência. No aspecto da distribuição de energia elétrica, a integridade deste equipamento se apresenta como fator fundamental para o fornecimento.

Desta forma, várias ferramentas são adotadas para o transformador de potência em operação, sendo que dentre estas ferramentas podemos citar os equipamentos e dispositivos de proteção, programas de gestão da manutenção, sistemas de monitoramento local e remoto, pesquisas para determinação da vida remanescente.

No entanto, fatores como obsolescência, estratégias de gestão das concessionárias de distribuição de energia elétrica, falha de projeto, falha de manutenção, podem levar o transformador de potência a avaria. Neste contexto, este trabalho analisa a exposição do transformador quando da falha de componentes do seu sistema de ventilação (ventiladores, bomba de circulação de óleo, serpentina, trocadores de calor), a conseqüente elevação da temperatura interna do mesmo, os mecanismos de proteção existentes quando desta elevação e apresenta um sistema de proteção ao transformador com vistas à elevação de temperatura.

1. Introdução

Confiabilidade do sistema de proteção atual instalado no transformador de potência

Os dispositivos instalados para monitoramento da temperatura do transformador de potência, também conhecidos como termômetros e monitores de temperatura, são providos para possibilitar a proteção térmica do transformador através de funções de alarme e proteção. Tais equipamentos detectam a elevação de temperatura oriunda de carregamentos acima das condições nominais de operação do transformador, as quais elevam a temperatura do óleo ou enrolamento do mesmo.

Outro fator relevante diz respeito ao estado de conservação dos termômetros de óleo e enrolamento instalados no transformador em operação, particularmente, no âmbito da manutenção, pois durante a fase de pesquisa de campo deste trabalho, foi verificado que alguns termômetros instalados apresentavam mal estado de conservação, sendo que em outros casos, a leitura apresentada através dos mostradores não condizia com o status operativo do transformador, demonstrando falta de aferição.

É de fundamental importância para a preservação do transformador, que os dispositivos de controle de temperatura de óleo e enrolamento estejam aferidos e ajustados para fornecer uma indicação precisa, possibilitando ao sistema de proteção efetuar o comando correto dos dispositivos de resfriamento. Como conseqüência do panorama ruim verificado em alguns dispositivos de controle da temperatura dos transformadores, a temperatura interna dos mesmos pode estar em nível acima do especificado pelas normas vigentes, levando à redução da vida útil do mesmo.

Ao longo do tempo, os efeitos da temperatura de operação na isolação sólida do transformador podem ser medidos de várias maneiras. A norma brasileira ABNT (NBR 5416, 1997, p.14) segue um adaptação da teoria de Arrhenius, a qual estabelece que o logaritmo da vida da isolação seja uma função do inverso da temperatura absoluta.

Deste modo, a elevação da temperatura do transformador e, consequentemente, a sua suportabilidade de resistir às solicitações elétricas depende também da política de manutenção adotada pelos gestores.

Ainda de acordo com a Norma brasileira ABNT (NBR 5416, 1997), a expectativa de 65.000 horas (7,42 anos) para a vida útil do transformador de potência é considerada normal quando sua operação é contínua, cujo ponto mais quente do enrolamento seja igual ou menor que 95 ºC para o papel Kraft neutro e 110 ºC para o papel termoestabilizado, respectivamente, para transformadores de classe de elevação de temperatura de 55 ºC e 65 ºC. Deste modo, se desejarmos que o transformador tenha uma maior vida útil, é primordial o controle do carregamento e da temperatura do óleo e enrolamentos.

2. Desenvolvimento

A cláusula 6.7, da Norma ABNT NBR 5410, apresenta orientações quanto ao cálculo da temperatura máxima de operação do transformador, sendo que na fase de projeto é definida a potência nominal do transformador e, entre outros parâmetros, é considerada uma temperatura ambiente constante de 30^0C.

Neste contexto, o transformador apresentará uma melhor capacidade se considerarmos que seu carregamento seja limitado pela sua capacidade térmica e não pela sua potência nominal. No entanto, para que o carregamento do transformador seja mantido no limite de sua capacidade térmica é necessário monitorar as

temperaturas de operação, a temperatura ambiente e controlar em tempo real o carregamento elétrico de forma a assegurar a confiabilidade de sua operação e evitar o seu envelhecimento precoce.

O carregamento elétrico do transformador, nestas condições, é denominado de carregamento dinâmico do transformador e, nesta condição a temperatura do ponto quente do enrolamento e a temperatura do topo do óleo devem ser monitoradas, pois existe a possibilidade de formação de gases que podem deteriorar a qualidade do óleo isolante, comprometer a confiabilidade da operação e o envelhecimento precoce do transformador.

A modelagem dinâmica do comportamento térmico do transformador pode ser considerada como um dos aspectos mais importantes no monitoramento das condições de operação dos transformadores de potência, sendo que a comparação entre os valores medidos e os previstos das temperaturas de operação, pode fornecer um panorama das condições do equipamento e indicar possíveis anormalidades. O conhecimento adequado das características térmicas dos transformadores pode permitir uma melhor avaliação de suas condições de operação, reduzindo o risco de falha.

O Carregamento do transformador

O Carregamento do transformador está associado à elevação de temperatura, em relação à temperatura ambiente, que os enrolamentos alcançam quando através destes circula a corrente que alimenta a carga, sendo que a corrente nominal associada à potência nominal se refere à temperatura especificada de projeto, compatível com o tipo de material isolante utilizado na construção do transformador.

Desta forma, quando se considera a temperatura ambiente constante de 30°C e carga constante e igual à carga nominal, os enrolamentos do transformador estarão submetidos à elevação de temperatura especificada. Também, se considerarmos que as condições de manutenção do transformador são adequadas, o consumo da vida útil do equipamento se resume ao envelhecimento do material isolante.

Os níveis de consumo de vida esperados ou admitidos em cada condição de operação, bem como os riscos operativos associados juntos, estabelecem os carregamentos liberados, os quais são classificados, em ordem crescente de temperatura de operação e risco de acordo com a Norma ABNT NBR 5416/97:

- Ciclo de carregamento em condição normal de operação;
- Ciclo de carregamento em condição de emergência de longa duração;
- Ciclo de carregamento em condição de emergência de curta duração.

Um ciclo de carregamento em condições normais de operação é aquele em que as temperaturas máximas do topo do óleo e a do ponto mais quente do enrolamento não são ultrapassadas. Diferentemente, no ciclo de carregamento em condições de emergência são admitidas ultrapassagens das temperaturas limite.

Neste ponto reside a importância das ferramentas para determinação das condições de operação nestas condições visando estabelecer as temperaturas máximas atingidas nos pontos mais quentes, bem como, a perda de vida relativa da isolação em função destas temperaturas.

Quanto à duração do carregamento de emergência, a capacidade de um transformador suportar temperaturas acima das condições nominais de placa depende do seu porte, sendo que quanto maior a potência do transformador, maiores serão as massas de isolação sujeitas a estresse dielétrico e finalmente, maiores serão as dificuldades para a determinação do ponto mais quente do enrolamento.

Em função disto, a IEC 60076-7-2004 propõe alguns valores limites de carregamento e temperatura para cada categoria de transformadores e para cada tipo ciclo de carregamento.

Uma vez exposto ao carregamento, o transformador apresenta várias internas de temperatura e para determinar os limites para estas temperaturas, a norma IEEE C57.91-1995, formula o cálculo da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, assumindo que a temperatura que se encontra no interior dos enrolamentos e se refere à temperatura do óleo que se encontra em contato com a isolação dos condutores. Esta temperatura é dada pela seguinte equação:

$$\theta_H = \theta_A + \Delta_{\theta TO} + \Delta_{\theta H}$$

Nos transformadores em operação, a temperatura ambiente e a temperatura do topo de óleo no tanque em uma dada condição de carregamento, podem ser determinadas através da utilização de dispositivos de medição de temperatura, os quais são instalados no transformador. No entanto, a determinação do parâmetro $?_{?H}$ é mais complexa e sugere um tratamento adequado de acordo com o porte do transformador.

Como alternativa para determinação de $?_{?H,}$utiliza-se do ensaio de aquecimento do transformador, realizado em fábrica, cálculos ou a medição direta da temperatura através da instalação de dispositivos de medição direta (sensores de fibra ótica) ou indireta (sensor de imagem térmica).

Para o cálculo da temperatura do ponto mais quente do transformador os vários métodos existentes consideram as condições de operação somadas aos parâmetros característicos do transformador. Os métodos são classificados em dois grupos, sendo que um é baseado na solução de equações exponenciais e a outro na solução de equações iterativas ou diferenciais. O método solução de equações exponenciais é recomendado para aplicação nas condições de carregamento que podem ser transformados em uma função degrau, sendo indicado para determinação dos parâmetros de calor nos testes realizados em fábrica. Enquanto que o método de equações iterativas ou diferenciais é recomendado para condições de carregamento e temperatura variáveis, sendo indicado para aplicação no monitoramento on-line de transformador.

Método de solução de equações iterativas e diferenciais

Descrito na norma IEEE Std C-57.91-1995, Anexo G, este método calcula as temperaturas através da aplicação de equações de conservação de energia para um pequeno intervalo de tempo ?t. De acordo com este método, as equações são formuladas de forma a possibilitar que as temperaturas obtidas para um tempo t1, sejam aplicadas para o cálculo das temperaturas para o próximo instante t_1 + ?t. Assim, em cada etapa, as perdas são calculadas para a respectiva carga com as correções nas resistências em função da temperatura, sendo que fatores de correção que consideram a alteração da viscosidade devido à temperatura também são incorporados nas equações.

Método de solução de equações exponenciais

Este método foi desenvolvido através do princípio de transferência de calor com a comparação entre

parâmetros térmicos e elétricos.

Quando os princípios de transferência de calor são aplicados em transformadores de potência, a solução das equações diferenciais somente será linear quando aplicada em sistemas de resfriamento de óleo com circulação forçada e dirigida (OD), sendo que para outras formas de resfriamento (ON e OF), a temperatura influencia o fluxo de óleo no interior dos enrolamentos e nos radiadores e, consequentemente, a possibilidade de formatação de equações diferenciais não lineares resultando em temperaturas como funções não exponenciais.

Ainda no contexto da solução de equações exponenciais, as referências IEEE Std C-57.91-1995 e ABNT NBR 5416/97 também apresenta a expressão de forma simplificada para aplicação em ciclos de carga em forma de degrau, como segue.

> Elevação da temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura do topo do óleo em carga nominal:

$$\Delta\theta_{TO} = [\Delta\theta_{TOf} - \Delta\theta_{TOi}] \times \left(1 - e^{\frac{-t}{T_O}}\right) + \Delta\theta_{TOi}$$

Limitações técnicas e operativas da norma ABNT NBR 5416/97

O método considerado para o cálculo das temperaturas internas dos transformadores, de acordo com a norma NBR ABNT 5416/97 é muito utilizado e apresenta o comportamento térmico dos transformadores como um modelo de 1.ª ordem.

Como o modelo em questão assume que o perfil da temperatura do óleo dentro do enrolamento aumenta linearmente do fundo ao topo, a diferença entre a temperatura do enrolamento e a temperatura do óleo é constante ao longo do enrolamento, a elevação da temperatura do ponto quente é maior que a elevação de temperatura do condutor no topo do enrolamento, aumento e redução da temperatura do óleo e a temperatura do enrolamento com a mesma constante de tempo e não considerada a incidência de radiação solar, torna-se um modelo simplificado. Os valores mensurados no cálculo das temperaturas do referido método são padronizados nas normas. No entanto, de acordo com (KAJIKAWA, 2007, p. 64-69) não é correto utilizar-se de valores constates para todas as condições de carregamento quando do cálculo das temperaturas do transformador.

Destaca-se que o modelo proposto pela norma ABNT NBR 5416/97 para cálculo de temperatura apresenta várias limitações quando aplicado em um fenômeno complexo como o fluxo de calor em um transformador e que os erros encontrados entre a comparação dos valores calculados e medidos para a temperatura do ponto quente do enrolamento e da temperatura do topo do óleo são maiores do que os esperados. Tais erros podem ser causados pela obtenção inadequada de dados ou porque muitas variáveis necessárias para o cálculo das temperaturas são desconsideradas, dentre as tais, direção e velocidade do vento, a radiação solar, a chuva, a evaporação, umidade e o estado do sistema de ventilação.

Várias metodologias para o modelamento térmico do transformador de potência citadas por (ASSUNÇÃO, 2007, p.72-75) se propõem a corrigir as limitações da norma ABNT NBR 5416/97, mas estas propostas normalmente resultam em um modelo mais complexo, que demanda um esforço computacional maior, ou a instalação de sensores de temperatura e monitoramento on-line, que podem aumentar consideravelmente o custo de operação do transformador.

Apesar da metodologia de cálculo da norma ABNT NBR 5416/97 ser sujeita a limitações, como comentado previamente, é um método muito usado e fornece resultados confiáveis para uso em transformadores.

Outrossim, as prescrições das Normas em questão considera no cálculo da temperatura do transformador que os equipamentos do sistema de ventilação do mesmo estejam em perfeitas condições de operação. No entanto, caso haja falha de tal sistema (interrupção no sistema de ventilação forçada ou parada de bombas de circulação de óleo) e o transformador não esteja sob a condição de carregamento elevado, a temperatura a ser indicada através dos sensores instalados na tampa do transformador não será a mesma da parte inferor do mesmo. Desta forma, o sistema de proteção quanto à elevação de temperatura não emitirá sinal de alarme ou desligamento e, como conseqüência, o transformador estará exposto ao desgaste da isolação sólida e sobreaquecimento interno.

Sistema de proteção do transformador quanto à elevação da temperatura

No aspecto do monitoramento, a curva de carga dos transformadores em operação pode ser disponibilizada através de sistemas de supervisão, sendo que de posse de informações associados aos dados de placa do transformador, é possível avaliar as condições de carregamento e caso seja necessário, efetuar manobras.

Os sistemas digitais de proteção disponíveis no mercado permitem implantar uma lógica, na qual, caso o transformador venha a atingir a temperatura máxima admissível, este sistema de proteção atua e efetua o desligamento do transformador, iniciando assim o mecanismo de alivio de carga do transformador em questão, de forma a preservar as condições de operação dentro dos parâmetros normalizados.

Quanto aos riscos que o transformador está exposto, um carregamento elevado implica em temperatura elevada e, portanto a aceleração da perda de vida, formação de bolhas e o aquecimento e desgaste de componentes internos devem ser considerados.

O modelo proposto consiste, primeiramente, do estudo para desenvolvimento de lógica de alarme e trip nas unidades de controle para transformadores de potência em operação, o qual utiliza somente como parâmetro a elevação de temperatura em um nível crítico, sem considerar o valor da corrente do mesmo. Cabe ressaltar que a apresentação de resultados satisfatórios por parte desta metodologia, a mesma pode ser aplicada para desligamento de um determinado transformador, liberando a transferência automática - T.A, interferindo em números aceitáveis nos indicadores de qualidade de distribuição de energia elétrica. Como segunda opção, caso haja algum tipo de problema quanto à sobrecarga, o sistema de alívio de carga da subestação pode ser acionado.

A mesma metodologia em questão também pode ser aplicada quanto à elevação de temperatura no enrolamento secundário do transformador, de forma que o mesmo possa ser desligado pelo disjuntor secundário e, em seguida, ser executada a interligação de barras e desta forma não interromper o fornecimento de energia. Desta forma, caso a elevação da temperatura do transformador seja ocasionada por sobrecarga, a metodologia de proteção proposta habilita automaticamente o sistema de alívio de carga do transformador, através do controle digital de interligação, este que armazena em memória um estudo da carga do transformador do status anterior ao trip do disjuntor secundário, associado à somatória das cargas das duas barras pelo outro transformador instalado na subestação, o qual socorrerá o transformador objeto de sobre temperatura.

Isto posto, anteriormente ao disjuntor de interligação de barras ser acionado para socorrer a barra desligada, a unidade de controle digital do transformador acionará o sistema de alivio de carga, possibilitando a este interrompem o circuito selecionado.

Cabe ressaltar que o sistema de alivio de carga está programado para operar quando o transformador de

potência atingir entre 20% a 30% de sobrecarga após o acionamento da transferência automática.

Com a aplicação desta metodologia permite ao sistema de proteção do transformador identificar valores de temperatura, independentemente, dos valores de corrente que circula nos enrolamentos secundários, podendo atuar como proteção no caso de avaria do sistema de refrigeração (ventilador, bomba de circulação, trocador de calor, serpentina), falha ou falta de manutenção, falha no projeto ou falha na montagem do transformador.

No âmbito da lógica consiste em dois níveis de temperatura, para os quais serão adotados as funções dos relés de proteção números 49 e 26, sendo a função 49 atua em dois níveis, sendo o primeiro nível para alarme e o segundo nível para desligamento. Já a função número 26 atuará em 02 (dois) níveis de ajuste (tolerável e crítico), sendo a mesma utilizada somente para sinalização de alarme, restando às equipes de manutenção e operação do sistema elétrico de potência à decisão entre desligar um determinado circuito secundário e ligar a interligação de barras através de telecomando.

A figura 1 apresenta o diagrama unifilar de uma subestação de distribuição de energia e a disposição dos dispositivos de proteção na alta e baixa tensão.

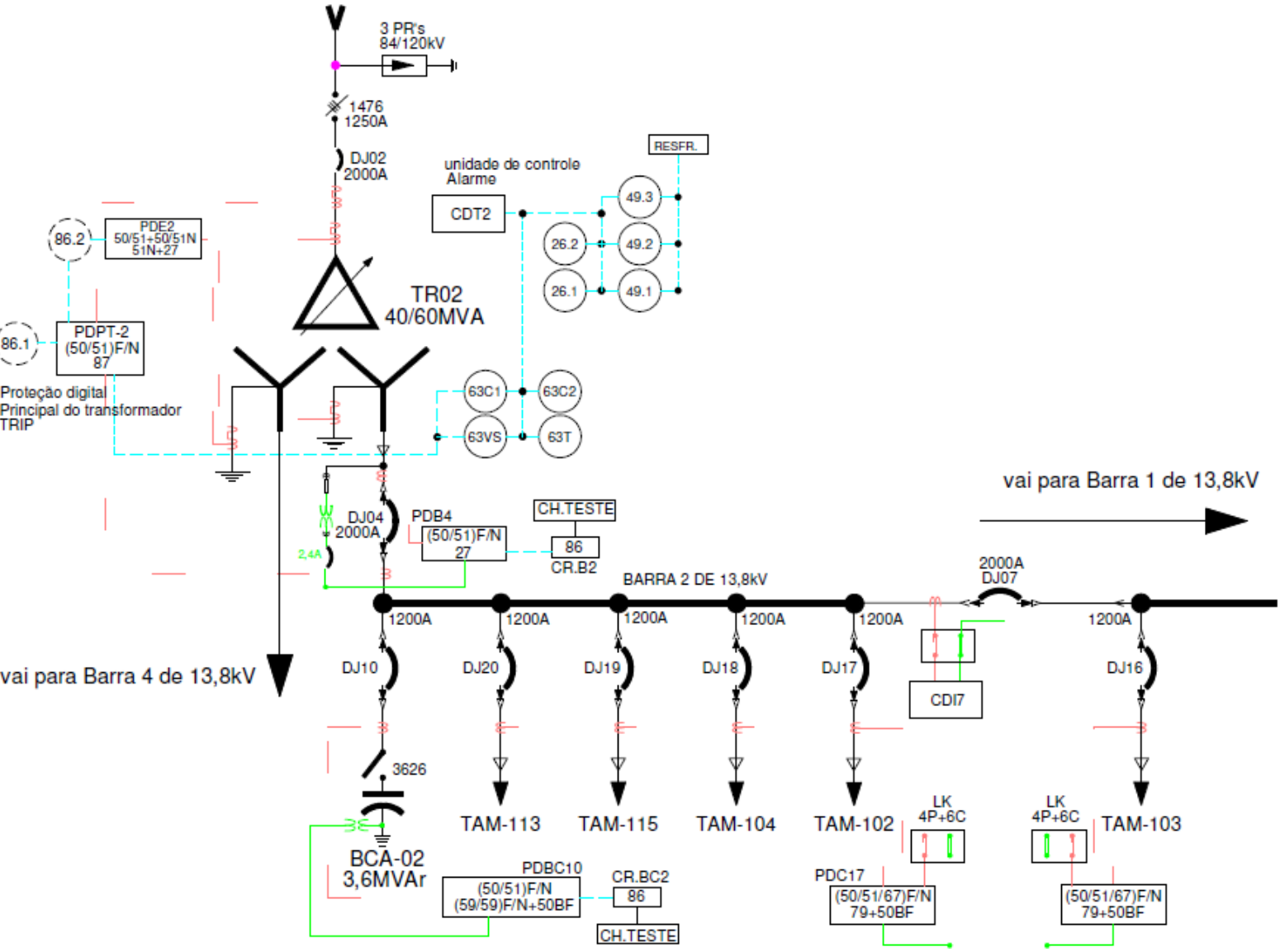

Figura 1. Diagrama unifilar de proteções de subestação de transformadora de energia elétrica

A função de proteção 49 (nível 1) será utilizada somente para sinalização de alarme de elevação de temperatura, indicando os valores temperatura no enrolamento da alta tensão, enrolamento secundário 1 e enrolamento secundário 2 (os transformadores de potência considerados no estudo possuem 02 enrolamentos secundários – baixa tensão).

Para a aplicação da função de proteção 49 (nível 2), os pesquisadores analisarão a possibilidade da mesma atuar como uma proteção de sobre temperatura em um nível crítico, cuja temporização será entre 5 a 10 minutos, associada ao valor de corrente de carga nominal ou em sobrecarga. Neste caso, obtêm-se também os valores de temperatura nos três enrolamentos do transformador, mas com a proteção atuando em apenas um dos circuitos secundários desligando-o, no caso da sobre temperatura ser proveniente de sobrecarga.

Outro aspecto a ser considerado está vinculado aos medidores utilizados no monitoramento da temperatura, pois como a metodologia prevê a utilização da função de trip do relé de proteção, também será necessário o desenvolvimento de medidores que apresentem melhor confiabilidade.

O Sistema de proteção do transformador que medirá os valores de temperatura utiliza do termopar do tipo do PT100 (termorresistência de platina que a 0°C apresenta uma resistência de 100 ?), o qual envia valores de corrente ao relé RET-670, fabricação ABB. Esse relé possui uma placa exclusiva para a função 49 e 26, a qual permite ao relé ser configurado nas funções de alarme e desligamento. A figura 2 abaixo apresenta o diagrama lógico de desligamento e alarme do relé com as funções 49 e 26 e, mostra tambémas entradas e saídas do relé.

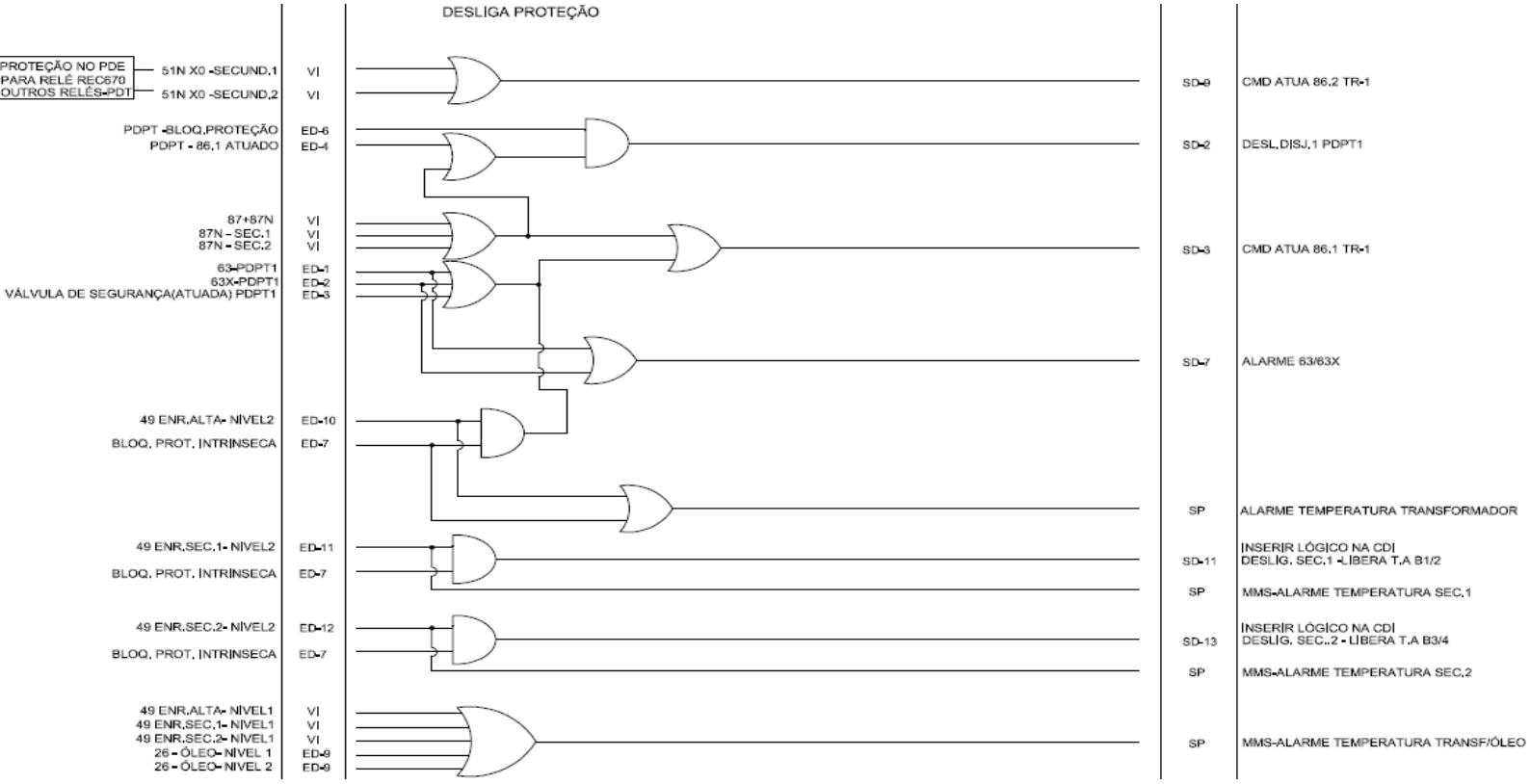

Figura 2. Diagrama lógico de Proteção do relé Diferencial de Transformador

3. Conclusões

Este trabalho apresentou o funcionamento do sistema de proteção dos transformadores de potência de subestações quanto ao aspecto da elevação de temperatura. Também foi apresentada uma metodologia de proteção para o transformador com vista à elevação da temperatura interna deste mesmo quando não há elevação de corrente nos enrolamentos do mesmo.

Como justificativa para a implantação desta metodologia no aspecto da proteção de transformadores de potência em operação, destaca-se o fato dos gestores (técnicos e operadores) desabilitarem a função de desligamento instalada nos atuais dispositivos de proteção, frente à possibilidade de ocorrência de sobreaquecimento do transformador, por ocasião de carregamento de emergência de longa duração. Sendo que esta decisão está embasada na prerrogativa da preservação da qualidade dos índices de fornecimento de energia elétrica.

Cabe ressaltar que a exposição do transformador a temperaturas elevadas pode comprometer a vida útil do mesmo. Outrossim, pesquisas e ocorrências demonstram que a avaria de transformadores de potência podem ter vinculo somente com a elevação de temperatura, independentemente, das condições de carregamento do mesmo.

Como resultado, o sistema proposto se apresenta como alternativa à preservação do transformador de potência em operação no aspecto da proteção deste e também serve de suporte aos gestores (áreas de engenharia, manutenção e operação do sistema elétrico) quanto ao monitoramento da temperatura dos mesmos, podendo ser aplicado nos transformadores que apresentam condições de operação mais crítica, tais como posição estratégica no sistema elétrico, carregamento elevado e elevação continua de temperatura interna.

4. Referências bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimentos. NBR 5416/97. São Paulo, 1997.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Transformador de potência – Especificação. NBR 5356/93. São Paulo, 2007.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Transformador de potência – Métodos de Ensaio. NBR 5356/93. São Paulo, 1993.

Assunção,T.C.B.N. V. Contribuição à modelagem e análise do envelhecimento de transformadores de potência.

Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2007.

IEC 60076-7-2004, Loading Guide for Oil Immersed Power Transformers – Revision of IEC 60354-1991

IEEE C57.91-1995, Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, june 1995/Corl-2002.

Kajikawa, C.O. Avaliação da vida útil do transformador de potência imerso em óleo isolante com base no carregamento.

Monografia – Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais. 2007.

---

carlos.alves@aes.com : e-mail para contato