

SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCO VOLTAICO EM PAINÉIS DE MÉDIA E BAIXA TENSÃO

Geraldo Rocha
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
Rodovia Campinas Mogi-
Mirim, km 118,5, Prédio 11
Campinas, São Paulo
13086-902, Brasil

Eduardo Zanirato
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
Rodovia Campinas Mogi-
Mirim, km 118,5, Prédio 11
Campinas, São Paulo
13086-902, Brasil

Fernando Ayello
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
Rodovia Campinas Mogi-
Mirim, km 118,5, Prédio 11
Campinas, São Paulo
13086-902, Brasil

Roberto Taninaga
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
Rodovia Campinas Mogi-
Mirim, km 118,5, Prédio 11
Campinas, São Paulo
13086-902, Brasil

Resumo—Este artigo apresenta uma solução nova e confiável baseada na detecção da luz do arco voltaico supervisionada pela proteção de sobrecorrente, visando reduzir o risco de arcos voltaicos em painéis de média e baixa tensão e equipamentos de cubículos, além de eliminar falsos trips causados pela presença de luz e propiciar detecção e abertura tão rápidas quanto possível. O trabalho também apresenta as vantagens da detecção rápida de sobrecorrente combinada com a medição do arco-voltaico, tendo como objetivo produzir um esquema de abertura sensível, rápido e seguro.

Palavras Chave—Relé de proteção, painel de média tensão, painel de baixa tensão, arco voltaico, arco elétrico, segurança pessoal.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das maiores preocupações de uma empresa consiste na segurança de suas equipes de trabalho, especialmente operadores de subestações e eletricitas de manutenção. A simples execução de tarefas cotidianas em uma subestação, tais como a inserção de um disjuntor, pode dar origem ao arco voltaico. Este evento pode resultar em efeitos negativos irreversíveis na saúde do operador, incluindo queimaduras graves, inalação de gases tóxicos e quentes, altíssimos níveis de ruídos, lançamento de peças e materiais derretidos, e ondas de pressão que podem arremessar o operador através do ar por vários metros de distância, batendo nos equipamentos existentes na subestação.

Estudos conduzidos nos Estados Unidos mostram que 50% das pessoas enviadas às unidades de tratamento de queimaduras possuem lesões devidas a ocorrências de arco voltaico e que uma ou duas entre cinco pessoas não sobrevivem às consequências dessas lesões [1].

O arco voltaico consiste numa condição perigosa com liberação de energia causada por um arco elétrico que se movimenta em alta velocidade (cerca de 100 metros por segundo) e atinge elevadas temperaturas. Ele pode provocar a destruição total dos equipamentos e painéis metálicos, bem como causar graves lesões físicas, algumas vezes letais, nas pessoas presentes na área afetada. Algumas definições importantes do arco-voltaico e aspectos associados podem ser encontradas na norma "IEEE 1584-2002 IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations". Definições similares são encontradas na norma NFPA 70E: "Standard for Electrical Safety in the Workplace" [2] [3].

Considerando que são liberadas grandes quantidades de energia e calor num espaço de tempo muito curto, os eventos com arco voltaico tornaram-se o foco de estudos para

melhoria da segurança das equipes de operação e manutenção e minimização dos danos aos equipamentos e painéis de cubículos.

A norma IEEE 1584-2002 fornece informações sobre como calcular a energia do arco e estabelecer distâncias limite para as equipes técnicas quando estiverem trabalhando perto de equipamentos elétricos energizados. A energia produzida por um evento com arco voltaico é proporcional à tensão, corrente e duração do evento ($V \cdot I \cdot t$). A norma IEEE 1584-2002 conclui que o tempo do arco tem um efeito linear na energia incidente. Portanto, a redução dos tempos de eliminação da falta reduz proporcionalmente o arco voltaico [4] [5].

Existem diversos procedimentos para proteção das equipes de trabalho, incluindo o uso de roupas especiais, cubículos resistentes ao arco e controle remoto via painéis de IHM (Interface Homem-Máquina). Recentemente, contudo, observa-se um movimento crescente para uma maior utilização de relés de proteção que possam detectar a formação de um arco voltaico e reduzir os tempos de eliminação da falta, uma vez que os três métodos citados acima não evitam a destruição causada por um arco, mas somente minimizam os efeitos de uma explosão.

A lista seguinte destaca os métodos mais comuns para redução do risco de arcos voltaicos:

- Evitar a área de risco.
- Instalar um cubículo resistente a arcos voltaicos.
- Adicionar dispositivos limitadores de corrente.
- Reduzir os ajustes da coordenação de tempo dos relés.
- Melhorar os esquemas de proteção: usar proteção diferencial de barras de baixa e alta impedância e esquemas de trip de barras rápido usando relés de sobrecorrente e sistemas de comunicação.
- Habilitar os elementos instantâneos durante a manutenção.

Todos esses métodos são analisados detalhadamente em [4] [5].

A adoção de medidas de proteção, tais como um cubículo resistente a arcos, não resolve o problema da liberação de gases tóxicos e não elimina a necessidade de utilização de roupas especiais se a manutenção for efetuada através de termovisão.

O uso de relés de proteção para detecção de arco voltaico tem mostrado ser muito eficiente, pois além da proteção das equipes de trabalho, isso também evita explosões e destruição do painel. A redução dos tempos de eliminação da falta reduz proporcionalmente o arco voltaico. Como é impossível evitar 100% dos casos de formação de arcos voltaicos, o relé de

detecção de arco consiste numa maneira eficiente e confiável de redução dos valores de energia liberada durante o evento, reduzindo, conseqüentemente, os danos causados aos equipamentos e indivíduos.

Os avanços tecnológicos recentes tornaram os relés de detecção de arco voltaico economicamente viáveis para instalação em diversos tipos de painéis industriais usados nos centros de distribuição de média e baixa tensão.

A Tabela I detalha os tipos disponíveis de proteção contra arco voltaico e suas conseqüências para o operador e equipamentos do cubículo.

TABELA I
TIPOS DE PROTEÇÃO CONTRA ARCO VOLTAICO E
CONSEQÜÊNCIAS

Tipo de Proteção Contra Arco Voltaico	Conseqüências	
	Operador	Equipamentos
Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e/ou roupas especiais	Proteção individual	Destruição total
Cubículo resistente a arcos voltaicos	Melhoria na proteção (durante operação normal)	Destruição parcial
Operação remota	Seguro, proteção adequada	Destruição total
Relé de detecção de arco voltaico	Proteção avançada	Proteção avançada

Além disso, considerando o tempo necessário para substituição de um painel de média tensão após sua destruição, ou a perda irreparável de uma vida humana, a instalação de detectores de arco tornou-se obrigatória nas subestações elétricas, da mesma forma que os cintos de segurança são indispensáveis nos automóveis.

II. EXEMPLO DO RISCO DE ARCO VOLTAICO

Este artigo usa o modelo da norma IEEE 1584 para cálculo dos riscos de arco voltaico [3]. O sistema usado para exemplo mostrado na Fig. 1 tem como objetivo ajudar na análise dos riscos de arco voltaico. Os detalhes podem ser encontrados em [4] [5].

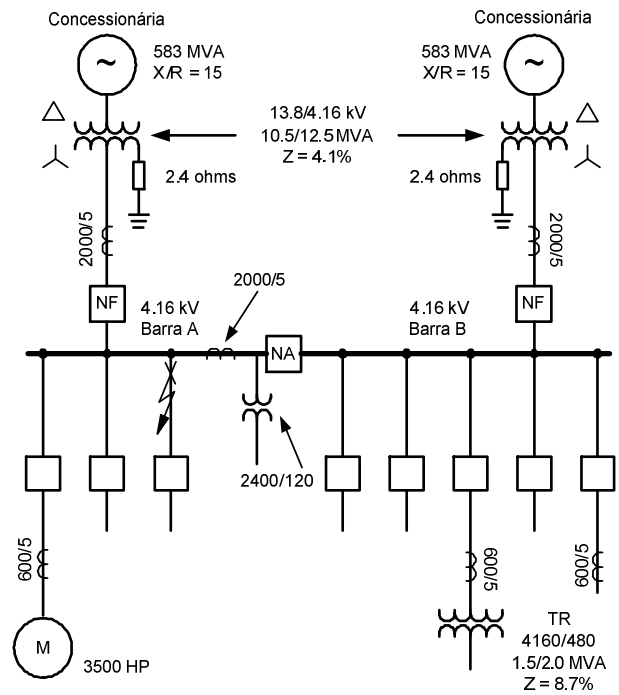


Fig. 1 Sistema Usado com Exemplo

A. Determinar as Correntes de uma Falta Sólida

O primeiro passo consiste em calcular a máxima corrente de falta trifásica disponível. A concessionária de energia elétrica forneceu o valor da falta igual a 583 MVA da fonte disponível com uma relação X/R igual a 15.

Use (1) para fazer a conversão em uma impedância porcentual, baseando-se nos valores MVA e kV do transformador.

$$\%Z = 100 \cdot \left(\frac{kV_u^2 \cdot MVA_t}{kV_t^2 \cdot MVA_u} \right) \angle \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \quad (1)$$

onde:

- %Z = impedância da concessionária como um valor porcentual, baseando-se na base do transformador
- kV_u = base da tensão da concessionária
- kV_t = base da tensão do transformador
- MVA_u = MVA da falta na concessionária
- MVA_t = base MVA do transformador

$$\frac{X}{R} = \text{relação } \frac{X}{R} \text{ da concessionária}$$

A impedância está mostrada em (2).

$$\begin{aligned} \%Z &= 100 \cdot \left(\frac{13.8^2 \cdot 10.5}{13.8^2 \cdot 583} \right) \angle \tan^{-1}(15) \\ &= 1.8\% \angle 86^\circ \\ &= 0.13 + j1.8\% \end{aligned} \quad (2)$$

Considerando que o cubículo do exemplo não tem a impedância do cabo, somente a impedância do transformador de 4.1% precisa ser adicionada. Assumindo que a impedância do transformador é totalmente indutiva, a impedância total para a barra está mostrada em (3).

$$\begin{aligned} \%Z_{\text{total}} &= 0.13 + j1.8 + j4.1 \\ &= 0.13 + j5.9 \\ &= 5.9\% \angle 89^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

Calcular a corrente de falta através de (4) e (5).

$$I_f = \frac{MVA_t \cdot 57735}{kV_t \cdot \%Z_{\text{total}}} \quad (4)$$

$$I_f = \frac{10.5 \cdot 57735}{4.16 \cdot 5.9} = 24.7 \text{ kA} \quad (5)$$

onde:

I_f = corrente máxima de falta na barra

kV_t = base de tensão do transformador

MVA_t = base MVA do transformador

$\%Z_{\text{total}}$ = impedância total na base do transformador para a barra como um valor porcentual

B. Determinar as Correntes de uma Falta com Arco

A adição da impedância do arco reduz a corrente da falta com arco para um valor abaixo do nível de uma falta sólida.

As equações (6) e (7) são usadas para calcular a corrente de arco.

$$\text{Log}I_a = 0.00402 + 0.983 \cdot \text{Log}I_{bf} \quad (6)$$

$$I_a = 10^{\text{Log}I_a}$$

$$\text{Log}I_a = 0.00402 + 0.983 \cdot \text{Log}(24.7) = 1.373 \quad (7)$$

$$I_a = 10^{1.373} = 23.6 \text{ kA}$$

onde:

I_{bf} = corrente máxima de falta na barra em kA

I_a = corrente máxima do arco em kA

85% desse valor é também necessário para verificar de que forma a corrente de falta menor têm impacto nos tempos de abertura, o que pode, na verdade, aumentar a energia. O valor de 85% é 20 kA.

C. Determinar os Tempos de Operação do Relé de Proteção

A coordenação do relé para este sistema foi extraída das curvas de coordenação de tempo. O tempo do disjuntor de 5 ciclos foi adicionado para obter o tempo total de abertura. O tempo de trip do relé da barra para a corrente de 23.6 kA está mostrado em (8).

$$0.69 + \frac{5}{60} = 0.77 \text{ s} \quad (8)$$

O tempo de trip do relé da barra para a corrente de 20.0 kA está mostrado em (9).

$$0.88 + \frac{5}{60} = 0.96 \text{ s} \quad (9)$$

D. Documentar as Tensões do Sistema, Classes de Equipamentos e Distâncias de Trabalho

A norma IEEE 1584-2002 inclui tabelas que fornecem os espaçamentos de barramentos típicos e as distâncias de trabalho para cubículos de baixa tensão, de 15 kV e 5 kV, além de centros de controle de motores de baixa tensão, painéis elétricos e cablagem.

Para um cubículo de 5 kV, o espaçamento entre os condutores é assumido igual a 102 milímetros, e a distância de trabalho é assumida igual a 910 milímetros. Outros fatores, como a configuração do cubículo, cablagem, ou aterramento do sistema ou invólucro são levados em consideração.

E. Determinar a Energia Incidente

O modelo derivado empiricamente apresentado na norma IEEE 1584-2002 fornece duas equações para cálculo da energia incidente do arco voltaico. A primeira é a energia incidente normalizada e a segunda é a energia incidente com parâmetros específicos.

A energia incidente normalizada assume uma distância de trabalho típica de 610 milímetros e uma duração do arco de 0.2 segundo. A equação deste exemplo está mostrada em (10) e (11).

$$\text{Log}E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \cdot \text{Log}I_a + 0.0011 \cdot G \quad (10)$$

$$E_n = 10^{\text{Log}E_n} \quad (11)$$

onde:

E_n = energia incidente normalizada em J/cm²

K_1 = -0.555 para uma configuração em caixa

K_2 = 0.0 para um sistema aterrado por resistência

I_a = máxima corrente do arco em kA

G = espaçamento entre condutores = 102 mm

O cálculo da energia incidente normalizada para a corrente de arco de 23.6 kA deste exemplo está mostrado em (12).

$$\text{Log}E_n = -0.555 + 1.081 \cdot \text{Log}(23.6) + 0.0011 \cdot 102$$

$$\text{Log}E_n = 1.0413 \quad (12)$$

$$E_n = 10^{1.0413} = 11 \text{ J/cm}^2$$

A energia incidente para a corrente de arco de 20.0 kA deste exemplo está mostrada em (13).

$$E = 4.184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (13)$$

onde:

E = energia incidente em J/cm²

E_n = energia incidente normalizada em J/cm²

C_f = 1.0 para tensões acima de 1.0 kV

t = tempo do arco em segundos

D = distância do provável ponto do arco = 910 mm

x = expoente da distância = 0.973 para o cubículo de 5.0 kV

A energia incidente deste sistema, para 23.6 kA, está mostrada em (14).

$$E = 4.184 \cdot 1.0 \cdot 11 \cdot \left(\frac{0.77}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}} \right) = 120 \text{ J/cm}^2 \quad (14)$$

A energia incidente para 20.0 kA está mostrada em (15).

$$E = 4.184 \cdot 1.0 \cdot 9.2 \cdot \left(\frac{0.96}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}} \right) = 125 \text{ J/cm}^2 \quad (15)$$

Observe que 85% da corrente tem, na verdade, maior energia incidente devido ao tempo maior de trip do relé da barra.

Converter a energia do arco em cal/cm² usando a conversão mostrada em (16).

$$5.0 \text{ J/cm}^2 = 1.2 \text{ cal/cm}^2 \quad (16)$$

A energia do arco voltaico na barra para a corrente de 23.6 kA está mostrada em (17).

$$E = 120 \cdot \frac{1.2}{5} = 29 \text{ cal/cm}^2 \quad (17)$$

F. Determinar a Fronteira da Proteção contra Arco Voltaico

A fronteira do arco voltaico é calculada a partir de (18).

$$D_b = \left[4.184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (18)$$

onde:

E_b = energia incidente na fronteira em J/cm² = 5.0 para pele desprotegida

C_f = 1.0 para tensões acima de 1.0 kV

t = tempo do arco em segundos

D_b = distância da fronteira a partir do ponto do arco em milímetros

x = expoente da distância = 0.973 para cubículos de 5.0 kV

E_n = energia incidente normalizada em J/cm²

A fronteira do arco para este sistema está mostrada em (19).

$$D_b = \left[4.184 \cdot 1.0 \cdot 11 \cdot \left(\frac{0.77}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{610^{0.973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0.973}} \quad (19)$$

$$D_b = 23867 \text{ mm} = 24 \text{ m}$$

Isso indica que dentro do limite de 24 metros do arco voltaico, qualquer pessoa desprotegida pode sofrer queimaduras de segundo grau através da energia incidente da falta.

III. FILOSOFIA DA NOVA E CONFIÁVEL PROTEÇÃO CONTRA ARCO VOLTAICO

Um sistema de proteção contra arco voltaico deve ser extremamente rápido, seguro e confiável. Isso significa que o sistema deve atuar instantaneamente, propiciando a detecção em alta velocidade do arco no interior do cubículo e a abertura do disjuntor em poucos milissegundos para extinção do arco. Contudo, o sistema de proteção não deve atuar caso não haja arco voltaico dentro do painel.

A adoção de uma filosofia que combine a detecção de luz no interior do cubículo (indicando a formação de um arco voltaico) com a detecção de aumentos significativos nos valores nominais da corrente de carga (confirmando a presença de um curto-circuito entre as partes vivas internas ao cubículo) elimina falsos trips causados pela presença de luz e proporciona detecção e abertura tão rápidas quanto possível.

Para garantir e melhorar a confiabilidade dessa filosofia, o relé de proteção principal do circuito é usado com unidades adicionais de sensores de luz, os quais são instalados em pontos estratégicos dos cubículos ou painéis de média e baixa tensão e interconectados através de cabos de fibra óptica com este relé, eliminando a necessidade de outros componentes no interior desses cubículos.

A utilização de apenas um equipamento para operar como relé de proteção e detecção de arco voltaico permite que esta filosofia forneça as seguintes vantagens adicionais:

- Não há necessidade de transformadores de corrente (TCs) adicionais ou conexões em série de circuitos de corrente para alimentar as entradas do dispositivo de detecção de arco voltaico.
- Os relatórios de evento propiciam a análise do evento com arco voltaico, permitindo verificar a operação apropriada do detector de arco através dos registros

oscilográficos da medição da intensidade da luz, sinais de atuação do elemento detector de arco e valores de corrente presentes durante o evento.

- Relatórios da Sequência de Eventos ("Sequence of Events" – SOE), incluindo a atuação do elemento de detecção de arco.
- Uma interface Ethernet habilita a comunicação com o sistema de supervisão e controle e permite a visualização de informações do detector de arco voltaico (ex., alarme, trip), assim como a atuação de qualquer outra função de proteção relacionada ao relé.
- Mensagens de trip/alarme podem ser enviadas via IEC 61850 GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) para os demais equipamentos conectados à rede Ethernet.
- Utilização de um programa de software único para configuração do detector de arco voltaico e relé de proteção.
- Um único programa de software para efetuar os ajustes, aquisição de eventos, *data logs* e modificação de ajustes e parâmetros de forma local e remota.
- O equipamento oferece uma função de autodiagnose através de um contato de alarme para comunicar uma falha interna, propiciando alta confiabilidade do sistema (watchdog).
- Há uma redução nas peças sobressalentes e tempo de treinamento dos equipamentos, uma vez que o relé principal executará todas as funções.

O sistema usa três ou quatro sensores em cada cubículo, cada qual conectado via cabo de fibra óptica ao relé de proteção principal que opera como unidade "mestre". O relé é fácil de ser integrado ao sistema de supervisão e controle, permite ajustes e configurações remotas e possui tempo de atuação de alta velocidade (cerca de 2 milissegundos), excelente segurança contra falsos trips (a presença de luz não é suficiente; tanto a luz quanto a corrente têm que estar presentes), além de um menor custo.

A lista seguinte resume as principais características do sistema de proteção contra arco voltaico:

- Eliminação de TCs adicionais no painel.
- Informações sobre intensidade da luz, medição de corrente, atuação do elemento de trip e valores de corrente fornecidos pelos relatórios de evento (oscilografia) e SOE.
- Integração com outros IEDs ("Intelligent Electronic Devices" – "Dispositivos Eletrônicos Inteligentes").
- Troca de mensagens GOOSE.
- Software único.
- Acesso remoto.
- Uma única unidade para funções de proteção e detecção de arco voltaico.
- Tempo de operação de aproximadamente 2 milissegundos.
- Segurança: uso de luz mais corrente para ativar a operação do sistema.
- Autodiagnose do circuito óptico com capacidade para gerar alarmes.

IV. COMPONENTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCO VOLTAICO

O sistema de proteção contra arco voltaico é ilustrado na Fig. 2. Ele é formado por uma unidade mestre (relé de

proteção principal), sensores de luz pontuais (ver Fig. 3) e sensores de luz regionais.

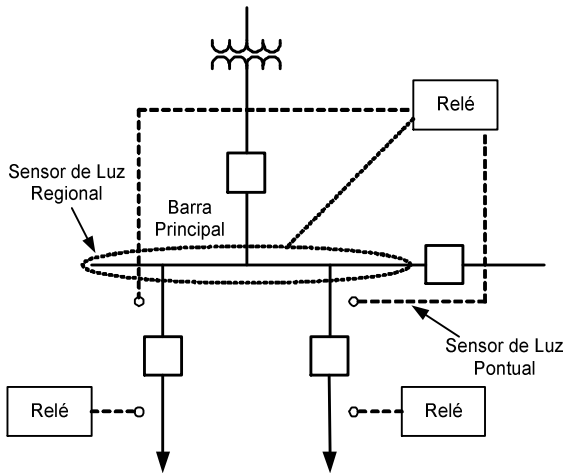


Fig. 2 Relé de Proteção com Sensores de Luz Pontual e Regional



Fig. 3 Sensor de Luz Pontual

Os sensores de luz pontuais são instalados em pontos específicos que tenham risco elevado de formação de arco voltaico, tais como as partes móveis do painel (ex., inserção/remoção de um disjuntor). Os sensores regionais são recomendados para cobrir uma área maior e são normalmente instalados no compartimento do barramento principal do painel.

Um relé de proteção típico para entradas de painéis ou alimentadores pode usar até quatro sensores.

A. Sensores de Luz Pontuais

Uma formação de arco voltaico gera luz que é capturada pelas lentes ópticas dos sensores de luz pontuais (localizados apropriadamente no painel) e transmitida através de um cabo de fibra óptica plástica de 1.000 micrômetros até o detector óptico instalado no relé de proteção. Esses sensores são normalmente instalados nos pontos de conexão internos a cada cubículo (ex., nos compartimentos de inserção do disjuntor e nas conexões de cabos e conexões de transformadores de potencial [TP]). Os sensores de luz pontuais não possuem componentes eletrônicos e são facilmente fixados no painel e substituídos quando da ocorrência de um arco voltaico.

B. Sensores de Luz Regionais

Outra opção para detecção de um arco voltaico utiliza um cabo de fibra óptica plástica descoberta de 1.000 micrômetros de diâmetro que captura a luz emitida durante um evento com

arco voltaico. Esses sensores de luz regionais cobrem uma área maior do painel e podem ser instalados ao longo de todo o comprimento do barramento principal do painel.

C. Relé de Proteção

O relé de proteção principal utilizado nesse sistema de proteção contra arco voltaico consiste num dispositivo multifuncional para aplicações em alimentadores de média e baixa tensão.

Além da função de detecção de arco voltaico, o relé tem diversos outros recursos, incluindo as seguintes funções de proteção:

- Sobrecorrente de fase instantâneo de alta velocidade para detecção de arco voltaico (50PAF)
- Sobrecorrente de neutro instantâneo de alta velocidade para detecção de arco voltaico (50NAF)
- Elementos de sobrecorrente de fase instantâneos e temporizados (50/51)
- Elementos de sobrecorrente residual instantâneos e temporizados (50/51G)
- Elementos de sobrecorrente de terra ou neutro instantâneos e temporizados (50/51N [ou GS])
- Elementos de sobrecorrente de sequência-negativa instantâneos e temporizados (50/51Q [46])
- Elemento térmico (49)
- Sub/Sobrefrequência e taxa de variação dos elementos de frequência (81)
- Elementos de subtensão e sobretensão fase-neutro ou fase-fase (27/59)
- Fator de potência (55)
- Perda de potencial (60)
- Elemento de sobretensão de sequência-negativa (fase reversa) (59Q [47])
- Elemento de sobretensão de sequência-zero, quando utilizados 3 TPs com conexão a quatro fios (59N)
- Bloqueio (86)
- Falha de disjuntor (50/62BF)
- Religamento automático (quatro tentativas) (79)
- Check de sincronismo (25)

As grandezas medidas no relé incluem correntes; tensões; potência ativa, reativa e aparente trifásica; fator de potência trifásico; energia ativa e reativa trifásica; demanda; frequência; e temperaturas via detectores de temperatura da resistência.

Os recursos de monitoramento do relé incluem o seguinte:

- Sequência de eventos com armazenamento dos mais recentes 1.024 eventos e relatórios do perfil de carga.
- Mensagens nos displays frontais e LEDs de sinalização com informações dos eventos, incluindo a interrupção dos circuitos ópticos.
- Relatórios de evento (oscilografia) com informações sobre a intensidade da luz, medição de corrente e atuação do elemento de detecção de arco voltaico.

O relé de proteção principal pode ter até 21 entradas/saídas quando equipado com detecção de arco voltaico ou um máximo de 37 entradas/saídas quando equipado com um módulo adicional. O uso de equações lógicas e botões de pressão do relé torna fácil a execução de testes do sistema. Por exemplo, podem ser criadas lógicas de testes para bloquear intencionalmente o detector de arco por solicitação do operador.

O relé possui lógicas para envio do sinal de trip para o disjuntor mais próximo do arco voltaico detectado. Isso é necessário, pois um relé possui quatro entradas distintas de

sensores que podem estar instalados em diferentes pontos de um cubículo ou mesmo em cubículos adjacentes. Como exemplo, quatro compartimentos de saídas de cabos monitorados por apenas um relé. O relé vai abrir o disjuntor no qual o sensor de arco voltaico foi ativado.

A ordem de trip emitida pelo detector de arco voltaico pode ser inserida no esquema de falha do disjuntor. O relé bloqueia o fechamento do disjuntor até que os sensores de luz detectem condições normais de operação (ou seja, intensidade de luz insuficiente para ativar o circuito de trip baseado na detecção de arco voltaico).

Múltiplas portas seriais, uma porta Ethernet, e vários protocolos de comunicação são incluídos no relé. O relé facilita a transmissão de informações provenientes do detector de arco voltaico (alarme, trip, etc.) através de uma rede de comunicação, uma vez que o relé já faz parte de um sistema supervisor. Ele tem a capacidade de enviar mensagens de trip e alarme via mensagens IEC 61850 GOOSE para os demais equipamentos da rede Ethernet.

O relé monitora continuamente os circuitos dos sensores de luz e pode enviar um alarme para o sistema supervisor no caso de qualquer interrupção nesses circuitos, facilitando o trabalho das equipes de manutenção. Ele usa um programa de software único para parametrização local e remota e permite o acesso local e remoto da engenharia para aquisição de eventos, *data logs* e alterações nos ajustes e parâmetros.

V. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCO VOLTAICO

A. Introdução

O objetivo da detecção de um arco voltaico é minimizar o tempo necessário para desligar o disjuntor e interromper a falta. A detecção do arco no relé de proteção minimiza o tempo de trip, custo e complexidade. A possibilidade de detecção de arco pelo relé permite utilizar o monitoramento da corrente e a proteção já existente no circuito.

O princípio de operação do sistema de proteção contra arco voltaico associa uma variação da intensidade da luz (capturada por até quatro sensores ópticos independentes) com uma elevação das correntes de fase e neutro medidas pelo relé de proteção (ultrapassando as correntes de fase e neutro previamente ajustadas).

A vantagem adicional do processamento da detecção de arco voltaico no relé de proteção é a capacidade de usar uma medição de sobrecorrente real como elemento de supervisão para melhorar a segurança.

Elementos de sobrecorrente de alta velocidade (50PAF e 50NAF) são usados para obter tempos de trip mais rápidos. Esses elementos são separados daqueles baseados em correntes de curto-circuito. A corrente utilizada para acionar um trip é derivada por meio de amostragem da corrente do alimentador e usando um algoritmo de detecção rápida para indicar que houve uma falta. Esta falta é então comparada com os níveis de trip dos sensores de detecção de arco para determinar se um trip por arco voltaico é válido. Diversos elementos de sobrecorrente padronizados têm tempos de resposta entre 6 e 20 milissegundos. Este retardo é inaceitável para supervisão da detecção de arco voltaico. Para evitar a introdução de um retardo adicional, a proteção de sobrecorrente de alta velocidade tem que atuar tão rápido quanto a detecção de arco. A combinação da detecção de arco e sobrecorrente rápida tem que ocorrer simultaneamente;

a segurança combinada é muito maior do que em qualquer sistema individual.

A partir deste ponto, o operador usa os ajustes do relé de proteção para definir quais as ações que deverão ser tomadas após a detecção de um arco voltaico, tais como a emissão de um comando de trip para o disjuntor ou o envio de alarmes remotos visando a extinção do arco voltaico tão rápido quanto possível.

Um obstáculo no uso dos sensores de luz é a necessidade de medir e ajustar de acordo com as variações nos níveis de luz do ambiente. A medição da luz e corrente no relé de proteção pode utilizar medições analógicas e recursos dos relatórios de evento do relé.

Ao monitorar a luz recebida como um sinal analógico, o usuário pode visualizar e ajustar os níveis normais de luz para a aplicação. Os relatórios de evento também fornecem uma ferramenta para solução de problemas através de eventos com estampas de tempo, incluindo os níveis de luz dos sensores de arco.

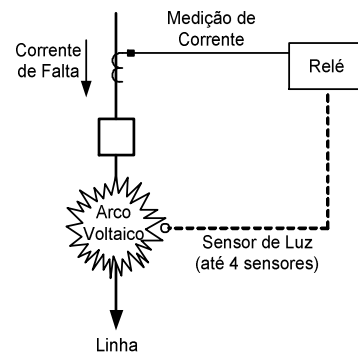


Fig. 4 Princípio de Operação do Sistema de Proteção Contra Arco Voltaico

Na Fig. 5, a linha identificada com IB representa a sobrecorrente no canal da Fase B do relé. A linha identificada com LS (1) representa a variação da intensidade de corrente no Sensor Óptico 1 do Relé LS (1). A linha tracejada vertical representa o instante exato em que o elemento de sobrecorrente de alta velocidade, 50AF, foi ativado. A variação da linha TOL1 mostra o instante em que o nível de luz atingiu o nível previamente ajustado. O tempo necessário para eliminar a falta depende do tempo de abertura do disjuntor.

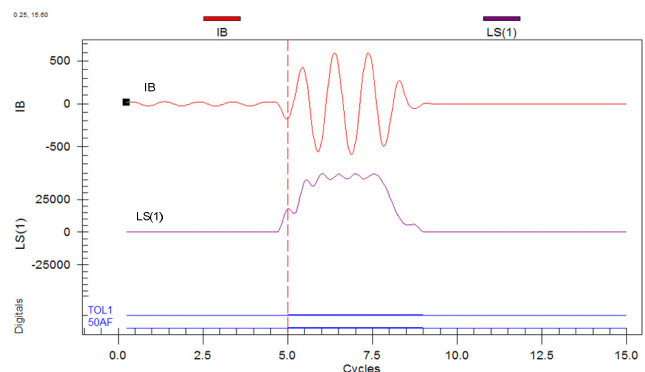


Fig. 5 Registro Oscilográfico de um Relé de Proteção com Função de Detecção de Arco Voltaico

Adicionalmente, uma mensagem IEC 61850 GOOSE pode ser enviada ou um sistema de comunicação digital relé-relé pode ser usado para coordenar com o relé de entrada do

panel se o sinal permanecer ativo por um período de tempo previamente ajustado.

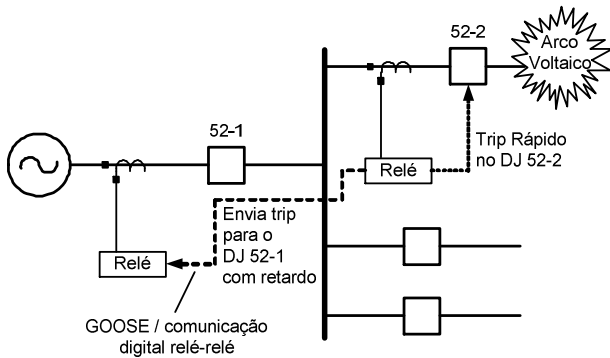


Fig. 6 Use a Comunicação Digital Relé-Relé para Coordenação da Proteção

B. Autodiagnose

Uma técnica de *loop* óptico executa a autodiagnose do sistema de detecção de arco voltaico. Um LED transmissor no relé de proteção emite pulsos luminosos em intervalos regulares. Os pulsos são monitorados no circuito óptico (testes de *loopback*) por um detector óptico e refletidos nas lentes dos sensores de luz. O monitoramento contínuo deste *loop* óptico permite que o relé envie alarmes via contato, display, ou comunicação Ethernet ou serial, caso o circuito seja interrompido. A Fig. 7 ilustra este *loop* óptico.

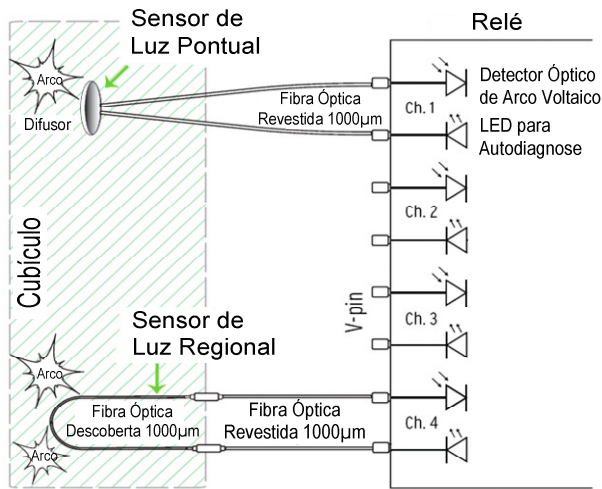


Fig. 7 Esquema de Autodiagnose do Sistema de Detecção de Arco Voltaico com Sensores de Luz Pontuais e Regionais

VI. RECALCULANDO A ENERGIA DO ARCO VOLTAICO

A adição dos sensores de arco voltaico reduz o tempo total de eliminação da falta. A redução do tempo tem um efeito dramático na energia do arco voltaico, causando uma redução significativa da mesma.

O tempo de trip do relé da barra para a corrente de 23.6 kA está mostrado em (20).

$$2.5 \text{ ms} + \frac{5}{60} \text{ s} = 0.0858 \text{ s} \quad (20)$$

O tempo do disjuntor de 5 ciclos foi adicionado para obter o tempo total de abertura.

A nova energia incidente deste sistema para 23.6 kA está mostrada em (21) e (22).

$$E = 4.184 \cdot 1.0 \cdot 11 \cdot \left(\frac{0.0858}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}} \right) = 13.4 \text{ J/cm}^2 \quad (21)$$

$$5.0 \text{ J/cm}^2 = 1.2 \text{ cal/cm}^2 \quad (22)$$

A nova energia de arco voltaico na barra para a corrente de 23.6 kA está mostrada em (23).

$$E = 26.5 \cdot \frac{1.2}{5} = 3.2 \text{ cal/cm}^2 \quad (23)$$

A nova fronteira do arco voltaico deste sistema está mostrado em (24).

$$D_b = \left[4.184 \cdot 1.0 \cdot 11 \cdot \left(\frac{0.0858}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{610^{0.973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0.973}} \quad (24)$$

$$D_b = 2502 \text{ mm} = 2.5 \text{ m}$$

VII. BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DA PROTEÇÃO CONTRA ARCO VOLTAICO INTEGRADA AOS RELÉS PRINCIPAIS

O principal benefício do sistema proposto neste artigo consiste no fato de que a redução dos tempos de eliminação da falta reduz proporcionalmente o arco voltaico. Além disso, as vantagens do sistema incluem:

- Flexibilidade
 - Ao instalar em painéis existentes, recomenda-se um retrofit da proteção principal existente de forma a obter outras vantagens dos relés de proteção de tecnologia avançada (ex., oscilografia, SOEs, integração em rede).
 - Para um retrofit de um painel ou modernização de subestações industriais, todo o sistema de proteção convencional pode ser substituído e o sistema de detecção de arco voltaico deve ser incluído neste conceito como um todo.
 - Ao instalar novos painéis, o relé de proteção principal pode ser definido como uma unidade mestre para a detecção de um arco voltaico.
- Confiabilidade
 - O uso de apenas um dispositivo para as funções de proteção e detecção de arco voltaico reduz o número de componentes do cubículo.
 - Os componentes individuais do sistema de proteção contra arco voltaico apresentam baixas taxas de falhas. Além disso, o sistema como um todo garante a operação somente se houver uma combinação da intensidade de luz e corrente. Portanto, se apenas for detectada a presença de luz no interior do cubículo ou apenas a corrente de falta for detectada no circuito, o sistema de proteção contra arco voltaico não será ativado.
 - Os recursos de autodiagnose do relé de proteção e *loop* óptico do sistema de detecção de arco voltaico geram alarmes no caso de ocorrência de problemas nas fibras ópticas/sensores.

- Otimização dos equipamentos. Não há necessidade de instalação de TCs adicionais ou conexões em série de circuitos de corrente para alimentar as entradas de equipamentos adicionais se o detector de arco for instalado fora do relé de proteção.
- Otimização do software. O uso de um tipo de software para configuração das funções do relé de proteção e detector de arco facilita o trabalho da equipe de manutenção que rotineiramente efetua a parametrização dos relés de proteção microprocessados.
- Otimização das peças sobressalentes. Esta solução reduz o número de itens sobressalentes, que, neste caso, será apenas o relé principal.

VIII. CONCLUSÕES

Algumas indústrias de grande porte já consideram o sistema de proteção contra arco voltaico apresentado neste artigo como sendo o sistema de proteção mais eficiente para a segurança das equipes de trabalho, instrumentos e equipamentos. A filosofia do sistema de proteção contra arco voltaico de alta velocidade (detecção em aproximadamente 2 milissegundos) permite a integração em redes de alta confiabilidade e a otimização dos equipamentos e montagem de painéis.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] L. K. Fischer, "The Dangers of Arc-Flash Incidents," Maintenance Technology, fevereiro de 2004. Disponível em: <http://www.mt-online.com/article/0204arcflash>.
- [2] NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace, 2004 Edition.
- [3] IEEE Standard 1584-2002, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.
- [4] M. Zeller and G. Scheer, "Add Trip Security to Arc-Flash Detection for Safety and Reliability," proceedings of the 35th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 2008.
- [5] J. Buff and K. Zimmerman, "Application of Existing Technologies to Reduce Arc-Flash Hazards," proceedings of the 33rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 2006.

X. BIOGRAFIAS

Geraldo Rocha recebeu seu diploma de engenharia elétrica da UNESP (Universidade Estadual Paulista de Bauru) em 2001 e se especializou em proteção de sistemas de potência na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Ele trabalhou como engenheiro de proteção e automação na CPFL Geração de Energia SA, onde suas responsabilidades incluíam manutenção, comissionamento, especificação e estudos de proteção e automação de usinas hidroelétricas. Em 2007, ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro de aplicação, cobrindo todo o Brasil. Suas responsabilidades incluem treinamentos e suporte aos clientes nos serviços de automação e proteção de subestações, envolvendo as áreas de geração, transmissão e distribuição.

Eduardo Zanirato é um engenheiro de aplicação e vendas, tendo obtido seu diploma da Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Desde 2005, ele trabalha na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Sua experiência inclui controle e proteção de sistemas de energia elétrica, bem como suporte técnico e comercial para projetos de indústrias de petróleo, gás e petroquímica.

Fernando Ayello recebeu seu diploma de engenharia elétrica da Universidade Municipal de Taubaté em 1981. Em 1985, concluiu o mestrado em engenharia elétrica na Escola Federal de Engenharia de Itajubá e, em 2000, recebeu o certificado de pós-graduação em Marketing da Fundação Getúlio Vargas. Entre 1985 e 1991, ele trabalhou como engenheiro de proteção na CPFL Energia, onde foi responsável pelos estudos e análises de sistemas de proteção. Entre 1991 e 1995, trabalhou como engenheiro de vendas na divisão de relés de proteção da ABB e, entre 1995 e 2000, como engenheiro de marketing na área de relés de proteção e medidores de qualidade de energia da Schneider Electric Brasil. Desde 2000, trabalha na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., onde ocupa o cargo de gerente regional de vendas e marketing do Brasil. Ele é autor de inúmeros artigos técnicos publicados em seminários e conferências nacionais.

Roberto Taninaga recebeu o diploma de engenharia elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1998, com especialização em engenharia de sistemas de potência. Ele começou a trabalhar como estagiário e engenheiro consultor na FIGENER S/A, sendo responsável pela análise de sistemas de potência industriais. Trabalhou também como engenheiro de vendas na SEG, fabricante alemã de relés de proteção. Desde 2006, trabalha como engenheiro de aplicação e vendas na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., onde é responsável pelo mercado industrial do Brasil.