

Avaliando as Sequências de Religamento de Linhas Aéreas com Base na Exposição do Transformador às Faltas Passantes

Ed Atienza e Chris Kelley
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
73rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference
Atlanta, Georgia
1–3 de maio de 2019

Edição original lançada em outubro de 2018

Traduzido para o português em maio de 2019

Avaliando as Sequências de Religamento de Linhas Aéreas com Base na Exposição do Transformador às Faltas Passantes

Ed Atienza e Chris Kelley, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Sumário—Esquemas de religamento de linhas aéreas são normalmente usados para minimizar as durações da interrupção de energia e maximizar a confiabilidade dos alimentadores de distribuição. Embora o religamento tenha demonstrado melhorias na confiabilidade (especialmente durante faltas temporárias), religar sobre faltas para testar segmentos da linha submete os enrolamentos do transformador de potência a montante à danos mecânicos devido a exposição à faltas passantes. Este artigo demonstra o uso das curvas de capacidade de faltas passantes do transformador fornecidas pela norma IEEE C57.109 para avaliar o dano por faltas passantes causado por várias sequências de religamento em um transformador da distribuição usado como exemplo.

As sequências de religamento avaliadas incluem esquemas de preservação de fusível, esquemas de preservação de trip, aprimoramentos da curva de sobrecorrente para esquemas tradicionais e esquemas híbridos usando sensores de falta sem fio de alta velocidade. Estas sequências são avaliadas para ambas as condições de faltas temporárias e permanentes. A coordenação de múltiplos religadores e seccionalizadores em série em um alimentador da distribuição também é considerada nas sequências avaliadas.

O método descrito neste artigo fornece aos proprietários e operadores da distribuição uma ferramenta para considerar os benefícios da confiabilidade do religamento versus a perda de vida útil dos transformadores de potência. Os leitores podem aplicar suas próprias distribuições das correntes de falta, localizações, durações e frequências à este método e quantificar os benefícios das melhorias nos esquemas de religamento tradicionais.

I. INTRODUÇÃO

Ao coordenar vários alimentadores radiais da distribuição, os engenheiros da distribuição frequentemente desenvolvem e aplicam um esquema de coordenação de sobrecorrente e um esquema de religamento padrão para todos os alimentadores com base nas bitolas típicas dos condutores de alimentadores, comprimentos dos alimentadores, impedâncias, cargas, correntes de falta disponíveis e capacidades dos fusíveis. Neste artigo, dois diferentes bancos de transformadores da distribuição alimentados pelo mesmo sistema de transmissão são analisados. Os esquemas de sobrecorrente e religamento aplicados aos alimentadores que utilizam disjuntores e múltiplos religadores são considerados em termos de danos causados por faltas passantes nos bancos de transformadores da distribuição. Os mesmos esquemas de coordenação de sobrecorrente e religamento são aplicados aos alimentadores de 13 kV em ambos os transformadores. A Fig. 1 mostra um diagrama unifilar simplificado com o transformador de distribuição à esquerda e o alimentador à direita.

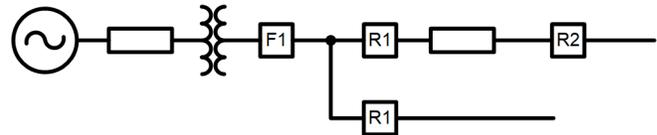


Fig. 1. Diagrama Unifilar Simplificado do Sistema

A. Exemplo de Alimentador

O alimentador do exemplo inclui múltiplos religadores para obter sensibilidade e seletividade para a maioria das condições de falta no alimentador. Um religador localizado no final da linha é necessário para trechos do alimentador onde os níveis mínimos da corrente de falta são menores do que a sensibilidade mínima do disjuntor do alimentador. Religadores localizados em pontos intermediários são aplicados para minimizar o número de consumidores impactados por faltas permanentes. O religamento é aplicado no disjuntor do alimentador e nos religadores para restabelecer automaticamente a energia para os consumidores após faltas temporárias. Os ajustes de sobrecorrente e religamento do Disjuntor do Alimentador F1, do Religador R1 e do Religador R2 estão descritos na Tabela I.

TABELA I
DADOS DO RELIGAMENTO E COORDENAÇÃO DO ALIMENTADOR

	F1	R1	R2
Trip Mínimo (A)	600	600	400
Falta Máxima (A)	A mesma da barra da subestação de distribuição	A mesma da barra da subestação de distribuição	800
Curva Rápida	Nenhuma	R	A
Curva Lenta	U3 (TD = 5)	C	C
Trips Até o Bloqueio	3	3	3
Intervalo Aberto 1 (s)	1	1	1
Intervalo Aberto 2 (s)	15	15	15
Tempo de Eliminação (s)	0.05	0.05	0.05

1) Disjuntor do Alimentador F1

F1 representa um disjuntor de alimentador da subestação que está ajustado para proteger os condutores do alimentador principal que saem da subestação. Os ajustes do disjuntor do alimentador podem ser calculados pelo engenheiro de distribuição que coordena os elementos de proteção do alimentador a jusante ou podem ser calculados pelo engenheiro

da subestação que efetua a coordenação com a proteção do transformador a montante e a curva de danos do transformador; tanto os elementos de proteção do alimentador a jusante quanto a curva de danos do transformador a montante precisam ser considerados ao ajustar F1. A velocidade e a sensibilidade da proteção de sobrecorrente de fase do F1 são limitadas pela carga máxima que pode ser transportada pelo alimentador e pela impedância até o primeiro religador a jusante. Para uma coordenação adequada, todos os elementos de sobrecorrente sensíveis à faltas após os religadores a jusante precisam ser mais lentos do que estes religadores. Se o primeiro religador a jusante estiver relativamente próximo da subestação, um elemento instantâneo não pode ser ajustado para F1. Como praticamente não há impedância entre o transformador de distribuição e F1, a máxima corrente de falta vista por F1 é igual à máxima corrente de falta passante para o transformador.

2) Religador Intermediário R1

R1 representa os religadores de ponto intermediário dos alimentadores relativamente próximos da subestação. Isso pode ser resultado da divisão do alimentador principal para atendimento aos consumidores em duas direções diferentes ou de uma densidade muito alta de consumidores próximos à subestação. Uma impedância muito pequena é assumida entre a subestação e R1; portanto, a corrente de falta máxima vista pelo R1 é a mesma corrente de falta passante máxima para o banco de transformador da distribuição. Para obter uma coordenação adequada, os elementos de sobrecorrente de R1 sensíveis à faltas após os fusíveis e religadores a jusante devem ser mais lentos que estas proteções.

3) Religador do Final da Linha R2

R2 representa um religador próximo do final do alimentador. Faltas mais distantes da subestação terão correntes de falta mais baixas à medida que a impedância entre a localização da falta e a subestação aumenta. Para alimentadores mais longos, as correntes de falta no final do alimentador podem ser menores do que os níveis mínimos da corrente de pickup de fase associados com F1 e R1. Para este exemplo, admita que a corrente de falta máxima disponível em R2 é 800 A e a corrente de falta de fase mínima no final da linha é maior do que 400 A. A carga máxima vista por R2 é significativamente menor do que F1 e R1, permitindo que o valor de pickup de fase mínimo seja menor do que F1 e R1. Os elementos de sobrecorrente de R2 têm que ser mais lentos do que os fusíveis mais lentos a jusante. Os fusíveis mais lentos do alimentador são assumidos

como sendo 100T. As curvas de sobrecorrente para F1, R1 e R2 são mostradas na Fig. 2.

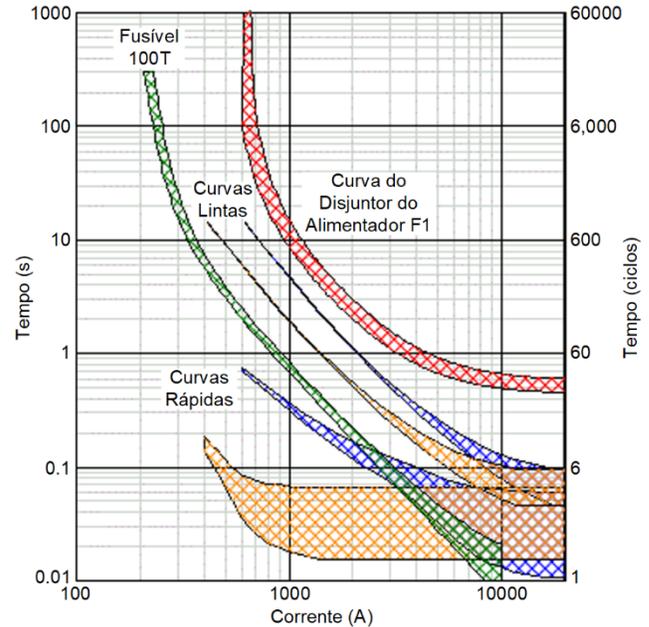


Fig. 2. Curvas de Sobrecorrente de F1 (vermelho), R1 (azul), R2 (laranja) e Fusível 100T (verde)

B. Exemplo de Bancos de Transformadores da Distribuição

Para a configuração do exemplo de alimentador e uma fonte de transmissão comum, dois diferentes bancos de transformadores da distribuição com diferentes capacidades e impedâncias são referenciados e analisados neste artigo. Os dois bancos de transformadores da distribuição representam bancos de transformadores de várias capacidades utilizados por concessionárias de energia para locais urbanos e industriais com maior densidade de carga em comparação com áreas rurais com menor densidade de carga. Em áreas de alta densidade de carga, quatro ou mais alimentadores podem ser conectados a cada banco de transformador, mas apenas um ou dois alimentadores são normalmente conectados a cada banco de transformador em áreas com menor densidade de carga. As curvas de danos para transformadores são normalmente expressas em por unidade (pu) da capacidade nominal a plena carga de cada transformador. As capacidades, o número de alimentadores, a máxima corrente de falta passante e os parâmetros de resfriamento associados da IEEE C57.91 para cada transformador estão listados na Tabela II.

TABELA II
DADOS DO TRANSFORMADOR

	Transformador A	Transformador B
Potência Nominal Máxima (MVA)	30	10
Alimentadores	4	2
Impedância (%)	5	6
I Nominal (A)	1400	450
Máxima Corrente de Falta Passante (A)	14000 (10.0 pu)	5850 (13.0 pu)
Método de Refrigeração	ONAF (<i>Oil Natural Air Forced</i> —Óleo Natural Ar Forçado)	
Elevação Média Temperatura Enrolamento Sobre Ambiente p/ Carga Nominal (°C)	65	
$\Delta\Theta_{TO,R}$ (elevação temp. topo óleo sobre ambiente p/ carga nominal em °C)	50	
$\Delta\Theta_{H,R}$ (elevação temp. <i>hot spot</i> sobre topo do óleo p/ carga nominal em °C)	30	
$\tau_{TO,R}$ (constante de tempo do óleo em horas)	2.0	
R (relação da perda de carga com carga nominal pela perda com carga baixa)	4.5	
n (expoente do topo do óleo)	0.9	
m (expoente de <i>hot spot</i>)	0.8	
τ_H (constante de tempo do enrolamento em horas)	0.08	
B (constante)	15000	
Duração do Isolamento (horas)	180000	

C. Curvas de Dano do Transformador

Estes dois transformadores diferem apenas em capacidade e impedância. Como os parâmetros de resfriamento são os mesmos e as curvas de danos são comumente expressas em pu da corrente de carga nominal máxima do transformador, as curvas de danos associadas a ambos os transformadores são plotadas em um único gráfico mostrado na Fig. 3.

As curvas de dano do transformador consistem de duas partes: uma curva de danos térmicos associada ao isolamento do enrolamento e uma curva de danos mecânicos associada à deformação dos condutores do enrolamento [1]. As duas curvas de danos mecânicos mostradas na Fig. 3 são associadas às impedâncias do transformador de 5% e 6%. Essas duas curvas de danos térmicos são derivadas usando equações da IEEE C57.91 e assumem temperaturas ambientes de 30°C e 40°C.

As curvas de danos térmicos podem ser derivadas usando a capacidade de curta duração do transformador, assumindo que o transformador esteja totalmente carregado e tenha uma temperatura *hot spot* máxima de 180°C [2]. A curva de danos térmicos é geralmente plotada como uma curva única, mas é impactada pelo carregamento do transformador e pela

temperatura ambiente. A carga máxima esperada do transformador e a temperatura ambiente máxima esperada são usadas para determinar o pior caso do impacto no isolamento do transformador.

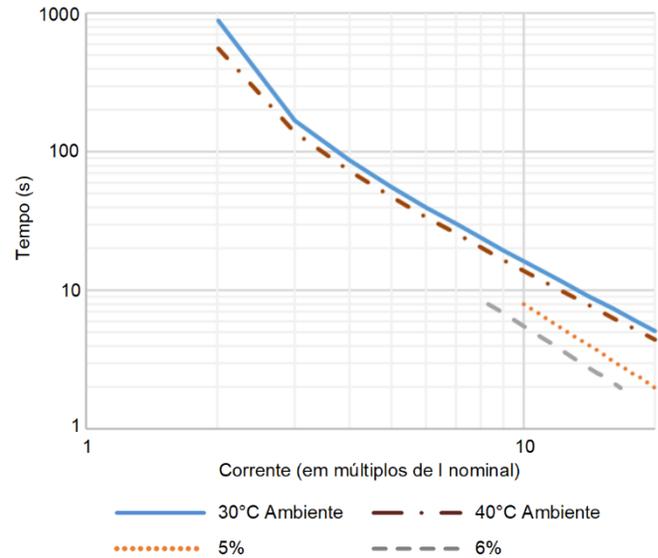


Fig. 3. Curvas de Danos do Transformador

Danos térmicos no isolamento resultam em envelhecimento acelerado do isolamento e redução da expectativa de vida. Embora as durações de faltas reais sejam curtas, as constantes do tempo de resfriamento podem resultar em muitas horas de perda da vida útil do transformador devido à temperatura *hot spot* elevada e ao envelhecimento acelerado. A Fig. 4 mostra a temperatura *hot spot* esperada do transformador à medida que este esfria, passando de 180°C para as condições normais. Nas 6 horas seguintes à falta, as temperaturas elevadas causaram mais de 18 horas de perda de vida e resultaram em uma perda de mais de 12 horas em relação à expectativa de vida do isolamento do transformador.

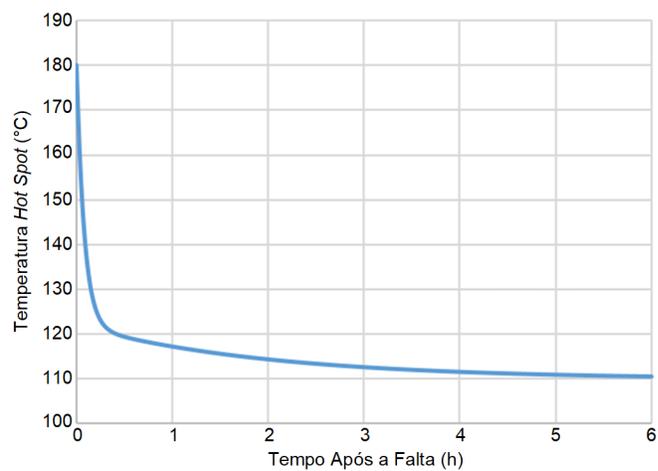


Fig. 4. Temperatura *Hot Spot* a Partir de 180°C

As constantes de tempo associadas ao modelo térmico do transformador são geralmente expressas em horas. Quando as constantes de tempo térmicas são comparadas aos ciclos de religamento que estão em segundos ou minutos, o resfriamento

durante os intervalos abertos do religamento tem efeitos insignificantes na temperatura global do transformador. A Fig. 5 representa a temperatura *hot spot* do transformador durante um ciclo de religamento com uma temperatura ambiente de 40°C, correntes de falta de 10 pu, três trips com tempos de operação de aproximadamente 5 segundos, dois religamentos e intervalos abertos de 1 segundo e 15 segundos. O impacto combinado dos 16 segundos de resfriamento durante os intervalos abertos resulta em uma variação menor do que 2°C na temperatura *hot spot*. O resfriamento de 2°C é significativamente menor do que a elevação de 60°C na temperatura durante o ciclo de religamento. Portanto, quando o impacto térmico de uma falta em um transformador é determinado, a duração da falta acumulada de todos os trips para todo o ciclo de religamento tem que ser considerada. Os efeitos do resfriamento durante intervalos abertos podem ser ignorados.

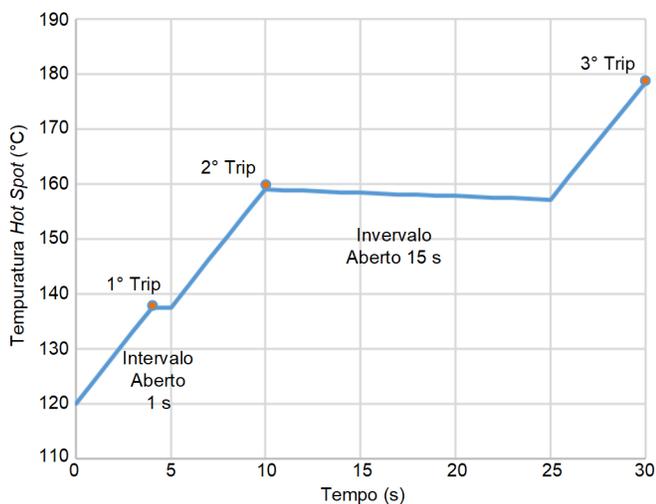


Fig. 5. Temperatura *Hot Spot* do Transformador para Três Trips de 5 Segundos

Após a eliminação da falta e o bloqueio dos elementos do religamento, as temperaturas do óleo e enrolamento do transformador devem conseqüentemente retornar às faixas normais sem quaisquer efeitos prejudiciais, exceto pela perda de vida útil do isolamento.

Ao contrário dos danos térmicos, os tempos associados às curvas de danos mecânicos são baseados na exposição à corrente de falta acumulada ao longo da vida do transformador e ao deslocamento dos enrolamentos devido às forças geradas entre as espiras do enrolamento durante condições de falta [1]. As curvas de danos mecânicos são dependentes da impedância do transformador e são derivadas assumindo um máximo de 2 segundos de exposição à máxima corrente de falta passante possível através do transformador quando o transformador estiver conectado a uma fonte forte ou barramento infinito. Os danos mecânicos somente são considerados para faltas maiores do que 50% da máxima corrente de falta passante possível através do transformador que resultam em curvas de danos mecânicos para impedâncias do transformador de 5% e 6%,

começando com uma corrente de 10.0 pu e corrente de 8.3 pu, respectivamente. Como os danos mecânicos são acumulados durante a vida do transformador e os tempos de danos associados aos danos mecânicos são menores do que os tempos de danos térmicos, a curva de danos térmicos é geralmente ignorada para correntes associadas à curva de danos mecânicos. Para magnitudes de correntes de falta elevadas, um dano mecânico significativo é esperado muito antes que seja atingida a temperatura *hot spot* de 180°C de um transformador.

II. RELIGADOR DO FINAL DA LINHA R2

Quando as curvas de danos do transformador são consideradas em relação à máxima corrente de falta disponível associada ao R2, as máximas correntes de falta disponíveis em R2 são de apenas 0.57 pu e 1.78 pu para o Transformador A e Transformador B, respectivamente. As curvas de danos do transformador começam em 2.0 pu; portanto, as faltas além do Religador R2 e os ajustes do religamento de R2 não precisam ser considerados para danos no transformador. Os tempos de operação dos religadores do final da linha, fusíveis e as correntes de inrush das cargas conectadas impactam a coordenação de sobrecorrente e os tempos de operação dos religadores intermediários e disjuntores de alimentadores. Como resultado, os religadores do final da linha, tal como o R2, têm um impacto indireto nos danos causados por faltas passantes nos bancos de transformadores da distribuição.

III. RELIGADOR INTERMEDIÁRIO R1

Um esquema de preservação de trip (*trip-saving*) ou esquema de preservação de fusível (*fuse-saving*) tradicional pode ser aplicado ao Religador R1. Os esquemas de preservação de trip usam curvas lentas para todos os trips, mas os esquemas de preservação de fusível usam um ou mais trips de curva rápida antes de dar trip usando a curva lenta. Os esquemas de preservação de fusível deste artigo usam um único trip de curva rápida antes de chavear para os trips de curva lenta. Os esquemas de preservação de fusível têm como objetivo minimizar a substituição de fusíveis para faltas temporárias após os fusíveis dos ramais.

A. Falta Permanente no Alimentador Principal

O primeiro caso a ser considerado é uma falta permanente no alimentador principal logo após R1. A corrente de falta máxima disponível vista por R1 corresponde à corrente de 10.0 pu no Transformador A e corrente de 13.0 pu no Transformador B. O tempo de eliminação através da curva rápida e curva lenta para faltas um pouco além de R1 depende da corrente de falta real em amperes primários. Baseando-se na corrente de falta por unidade e na duração total da falta vista pelos transformadores, a Tabela III mostra os tempos da falta, a temperatura de pontos quentes (*hot spot*) mais alta, a perda de vida útil térmica, o limite de danos mecânicos e o número de faltas antes que o dano mecânico seja plotado para ambos os esquemas de preservação de trip e preservação de fusível.

TABELA III
FALTA PERMANENTE NO ALIMENTADOR PRINCIPAL EM R1

	Transformador A		Transformador B	
Corrente de Falta (A)	14000 A		5850 A	
Esquema de Trip	Preservação de Trip	Preservação de Fusível	Preservação de Trip	Preservação de Fusível
Tempo de Eliminação por Curva Rápida (s)	N/D	0.06	N/D	0.07
Tempo de Eliminação por Curva Lenta (s)	0.1		0.2	
Número de Trips	3	3	3	3
Tempo Total de Falta (s)	0.3	0.26	0.6	0.47
Corrente de Falta (pu)	10.0		13.0	
Temperatura Hot Spot Máxima (°C)	111.32	111.14	114.07	113.19
Perda de Vida Útil Térmica (min)	2	1.6	6	4.6
Limite de Danos Mecânicos (s)	8		3.29	
Faltas Até o Dano Mecânico	27	31	6	7

Dependendo do transformador e da corrente de falta disponível, o esquema de preservação de fusível economiza entre 13% e 22% do tempo de falta total para uma falta permanente no alimentador principal. Isso corresponde a uma preservação de 20% a 23% na perda de vida útil térmica e de uma a quatro mais faltas antes que o limite de danos mecânicos do transformador seja atingido.

B. Falta Temporária no Alimentador Principal

Se os esquemas de preservação de fusível reduzem os danos ao banco de transformadores da distribuição para faltas permanentes, o impacto dos esquemas de preservação de fusível para faltas temporárias deve ser considerado. Usando as mesmas correntes de falta disponíveis consideradas na falta permanente anterior no alimentador principal, os tempos totais da corrente de falta são calculados assumindo que a falta foi eliminada após o primeiro trip. O impacto dos tempos totais da corrente de falta e dano no transformador é mostrado na Tabela IV.

Comparado com as faltas permanentes, o esquema de preservação de fusível resulta em uma redução maior no dano ao transformador para faltas temporárias, incluindo uma redução de 39% a 65% na perda de vida útil térmica por falta e

30 a 54 mais faltas temporárias antes que o limite de danos mecânicos seja atingido.

TABELA IV
FALTA TEMPORÁRIA NO ALIMENTADOR PRINCIPAL EM R1

	Transformador A		Transformador B	
Corrente de Falta (A)	14000		5850	
Esquema de Trip	Preservação de Trip	Preservação de Fusível	Preservação de Trip	Preservação de Fusível
Tempo de Eliminação por Curva Rápida (s)	N/D	0.06	N/D	0.07
Tempo de Eliminação por Curva Lenta (s)	0.1		0.2	
Número de Trips	1	1	1	1
Tempo Total de Falta (s)	0.1	0.06	0.2	0.07
Corrente de Falta (pu)	10.0		13.0	
Temperatura Hot Spot Máxima (°C)	110.44	110.26	111.36	110.47
Perda de Vida Útil Térmica (s)	36	22	115	40
Limite de Danos Mecânicos (s)	8		3.29	
Faltas Até o Dano Mecânico	80	134	17	47

C. Faltas nos Ramais Protegidos por Fusível

Todos os ramais protegidos por fusível após o Religador R1 são assumidos como tendo fusíveis 100T ou mais rápidos. A curva rápida de R1 coordena com o fusível 100T para faltas até 2000 A. Com um tempo de intervalo aberto de 1 segundo ou menos para o esquema de preservação de fusível, o resfriamento do fusível não afeta significativamente o tempo de operação do fusível 100T [3]. Portanto, uma falta permanente em um ramal com fusível resulta em um dano similar ao provocado por uma falta passante no transformador quando um esquema de preservação de fusível ou preservação de trip é usado, conforme mostrado na Tabela V. Se o tempo de intervalo aberto aumentar mais de 1 segundo, o fator de resfriamento do fusível resulta em um tempo maior de eliminação pelo fusível após o primeiro religamento para o esquema de preservação de fusível [3]. Isso resulta em uma duração total da falta ligeiramente maior e pode aumentar o dano causado por falta passante ao transformador associado ao esquema de preservação de fusível [3].

Para uma falta temporária, usar a curva rápida de R1 com um esquema de preservação de fusível para eliminar a falta resulta em um tempo menor de eliminação da falta e menos

substituições de fusíveis do que usando um esquema de preservação de trip. A Tabela V mostra o menor tempo total de eliminação da falta e uma redução de 34% na perda de vida útil térmica do transformador em comparação com a eliminação da falta temporária com o fusível.

TABELA V
FALTA NO RAMAL COM FUSÍVEL

Esquema de Trip	Transformador B		
	Preservação de Trip	Falta Permanente, Preservação de Fusível	Falta Temporária, Preservação de Fusível
Corrente de Falta (A)	2000		
Tempo de Eliminação por Curva Rápida (s)	N/D	0.15	0.15
Tempo de Eliminação por Curva Lenta (s)	0.6		
Tempo de Eliminação pelo Fusível (s)	0.23		N/D
Número de Trips	0	1	1
Tempo de Falta Total (s)	0.23	0.23	0.15
Corrente de Falta (pu)	4.44		
Temperatura <i>Hot Spot</i> Máxima (°C)	110.25	110.25	110.17
Perda de Vida Útil Térmica (s)	19.0	18.9	12.3

D. Coordenação de Sequência

Outro cenário possível a ser considerado consiste em mover R2 para mais perto de R1 de forma que a corrente de falta máxima disponível em R2 seja de aproximadamente 3000 A, logo abaixo do limite de coordenação entre as curvas de sobrecorrente rápidas de R1 e R2. Quando esquemas de preservação de trip são usados, R1 é sempre mais lento do que R2 e R2 elimina uma falta permanente logo depois de R2, após três trips de curva lenta. Com esquemas de preservação de fusível, uma falta permanente de 3000 A logo após R2 pode resultar no trip desnecessário de R1 através da curva rápida com base na seguinte sequência:

1. R2 dá trip com base na curva rápida.
2. R2 religa, e R1 dá trip com base na curva rápida.
3. R1 religa, e R2 dá trip com base na curva lenta.
4. R2 religa.
5. R2 dá trip e bloqueia com base na curva lenta.

Habilitar a coordenação de sequência no R1 permite que o contador de tentativas do religador avance quando a curva rápida de R1 começar a cronometrar. Isso mantém os contadores de tentativas de R1 sincronizados com R2 e resulta em R1 e R2 comutando para a curva lenta ao mesmo tempo. Isso evita que R1 dê trip para faltas após R2. O impacto global destes três esquemas de religamento para a temperatura *hot spot* mais alta e perda de vida útil térmica é mostrado na Tabela VI e Fig. 6.

TABELA VI
FALTA DE 3000 A EM R2

Esquema de Trip	Transformador B		
	Preservação de Trip	Preservação de Fusível	Preservação de Fusível com Coordenação de Sequência
Corrente de Falta (A)	3000		
Tempo de Eliminação por Curva Rápida de R2 (s)	N/D	0.07	0.07
Tempo de Eliminação por Curva Lenta de R2 (s)	0.24		
Tempo de Eliminação por Curva Rápida de R1 (s)	N/D	0.13	N/D
Número de Trips	3	4	3
Tempo de Falta Total (s)	0.72	0.68	0.55
Corrente de Falta (pu)	6.67		
Temperatura <i>Hot Spot</i> Máxima (°C) (Ver Fig. 6)	111.56	111.47	111.20
Perda de Vida Útil Térmica (s)	127	120	97

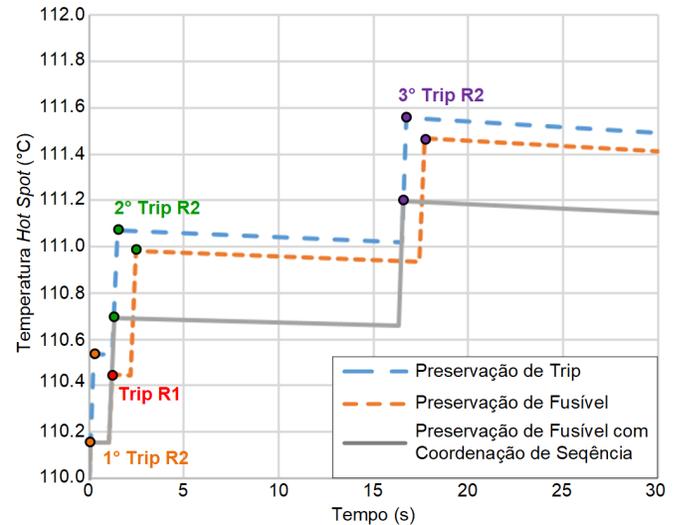


Fig. 6. Temperaturas *Hot Spot* do Transformador para Faltas de 3000 A em R2

Embora uma análise da perda de vida útil térmica e da maior temperatura *hot spot* mostre que esquemas de preservação de fusível sem coordenação de sequência resultam em menor impacto na perda de vida útil térmica do transformador quando comparados aos esquemas de preservação de trip, esta redução nos danos do transformador tem que ser ponderada contra o maior número de consumidores que são submetidos a uma interrupção de energia temporária devido à operação de R1. A adição da coordenação de sequência a um esquema de preservação de fusível reduz ainda mais os danos ao transformador, e elimina a operação desnecessária de R1.

E. Reabilitando o Trip de Curva Rápida

Os trips de curva lenta são necessários em qualquer esquema de religamento para estabelecer a seletividade com os fusíveis e religadores a jusante. Uma vez que a curva lenta de um religador atue em um sistema adequadamente coordenado, sabe-se que a falta está dentro de sua zona de proteção e não em um ramal com fusível ou após um religador a jusante. Portanto, ao religar após um trip de curva lenta, não é necessário que o religador coordene com dispositivos de sobrecorrente temporizados a jusante [4].

A Tabela VII mostra o impacto de reabilitar a curva rápida no terceiro trip para uma falta permanente de 3000 A no alimentador principal além de R1. A restrição por inrush ou um valor de pickup mínimo modificado deve ser usado durante uma inserção de carga com uma curva rápida; isso pode resultar em um tempo de operação ligeiramente maior do que usando a curva rápida tradicional. Por simplicidade, assume-se que a curva rápida com restrição por inrush tem um tempo de operação similar à curva rápida usada em um esquema de preservação de fusível. Com a duração reduzida da corrente de falta total, a reabilitação da curva rápida reduz a perda de vida útil térmica do transformador em 15% a 18% quando comparada a esquemas similares com múltiplas operações baseadas na curva lenta desta aplicação.

TABELA VII
FALTA PERMANENTE DE 3000 A NO ALIMENTADOR PRINCIPAL

	Preservação de Trip		Preservação de Fusível	
	Curva Lenta	Curva Rápida	Curva Lenta	Curva Rápida
Corrente de Falta (A)	3000			
Terceiro Trip	Curva Lenta	Curva Rápida	Curva Lenta	Curva Rápida
Tempo de Eliminação por Curva Rápida (s)	N/D	0.13	0.13	0.13
Tempo de Eliminação por Curva Lenta (s)	0.24			
Número de Trips	3			
Tempo de Falta Total (s)	0.72	0.61	0.61	0.50
Corrente de Falta (pu)	6.67			
Temperatura <i>Hot Spot</i> Máxima (°C)	111.56	111.31	111.32	111.08
Perda de Vida Útil Térmica (s)	127	107	107	88

F. Seccionalizadores

Trips adicionais por curva lenta são normalmente adicionados além dos três trips definidos para F1, R1 e R2 para permitir a coordenação com os seccionalizadores da linha. Os seccionalizadores de linha contam o número de vezes que um dispositivo a montante interrompeu uma falta a jusante do seccionalizador de linha. Após um número pré-definido de operações de religadores a montante, os seccionalizadores de linha abrem para isolar faltas a jusante e permitir que o religador a montante religue com sucesso. O trip de curva lenta adicional para o religador a montante pode aumentar o tempo total de falta aplicado ao transformador para todas as faltas a jusante do religador. Uma vez que a seletividade com os

fusíveis dos ramos seja estabelecida com uma única operação baseada em curva lenta, trips adicionais para coordenação com seccionalizadores podem ser trips rápidos com restrição por inrush. Isso reduz o dano por falta passante associado às tentativas de religamento adicionais.

IV. DISJUNTOR DO ALIMENTADOR F1

Os trips de curva rápida são normalmente implementados usando elementos de sobrecorrente instantâneos nos disjuntores de alimentadores. Nesta aplicação, R1 está próximo da subestação, resultando na mesma corrente de falta disponível em R1 e F1. Como as correntes de falta disponíveis são quase as mesmas, um elemento de sobrecorrente instantâneo que é seguro para faltas após R1 não pode ser ajustado para F1. A ausência de uma curva rápida ou elemento instantâneo em F1 impede o uso de um esquema de preservação de fusível, que já demonstrou reduções no impacto da falta passante no transformador quando aplicado para R1. Os métodos que não dependem da magnitude da corrente de falta para estabelecer seletividade com elementos de sobrecorrente a jusante são necessários para reduzir o dano da falta passante no transformador. Estes podem incluir sistemas de sensores de linha sem fio ou comunicação peer-to-peer de alta velocidade com controles de religador a jusante.

A. Faltas Permanentes no Alimentador Principal Entre F1 e R1

Os sistemas de sensores de proteção sem fio (WPS: *Wireless Protection Sensor*) podem enviar informações de faltas com velocidades de proteção a partir de locais remotos (tais como fusíveis e religadores a jusante) para disjuntores de alimentadores em menos de um ciclo do sistema de potência [5]. Quando aplicados com disjuntores de alimentadores especificados para eliminar faltas em menos de 50 milissegundos, os sistemas WPS permitem a comutação inteligente entre os esquemas de preservação de trip e preservação de fusível, com tempos de eliminação da falta tão baixos quanto 0.07 segundo.

O primeiro exemplo de aplicação do sistema WPS requer a instalação de sensores no religador R1 a jusante. Isso permite que a proteção de F1 efetue a distinção entre faltas dentro de sua zona de proteção antes de R1 e faltas além de R1. F1 pode então usar um elemento de sobrecorrente de tempo-definido com tempo curto ou curva rápida para um esquema de preservação de fusível e permitir que um primeiro trip elimine faltas no alimentador principal ou ramos protegidos por fusível em apenas 0.07 segundo. F1 tem ainda que chavear para o trip de curva lenta para coordenar com fusíveis para faltas nos ramos protegidos por fusível, mas pode comutar de volta para uma curva rápida com restrição por inrush para o terceiro trip, tal como no esquema aplicado anteriormente para R1.

Sensores adicionais podem ser instalados para detectar a presença de faltas nos ramos com fusível. Como a seletividade é estabelecida sem a coordenação dos elementos de sobrecorrente temporizados, os danos causados por falta passante no transformador podem ser reduzidos ainda mais por meio do retardo de todos os trips dos disjuntores de

alimentadores que são apenas longos o suficiente para receber sinais de bloqueio dos sensores. Ao religar, um valor de pickup modificado ou restrição por inrush pode ser aplicado a um elemento de sobrecorrente rápido para restringir o inrush do transformador, mas ainda permitir o trip acelerado ao invés de depender apenas do trip de curva lenta. A Fig. 7 mostra sensores aplicados a ambos os ramais e um religador a jusante.

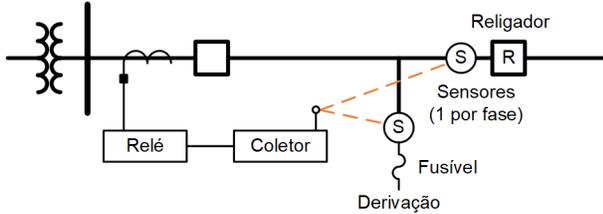


Fig. 7. Sensores de Proteção Sem Fio Aplicados ao Religador e Ramal com Fusível

A Tabela VIII demonstra a redução da perda de vida útil térmica e dano mecânico ao transformador ao integrar um sistema WPS com F1. O uso de sensores apenas no religador a jusante reduz a perda de vida útil térmica em cerca de 65% e duplica o número de faltas antes do dano mecânico ao transformador. A adição de sensores a ambos os religadores a jusante e ramais protegidos por fusível reduz a perda de vida útil térmica em 93% e aumenta o número de faltas antes do dano mecânico por um fator de oito.

TABELA VIII
FALTA PERMANENTE NO ALIMENTADOR PRINCIPAL EM F1

	Transformador B		
	Corrente de Falta (A)	5850	
Locais dos Sensores do WPS	Nenhum	Religadores a Jusante	Religadores a Jusante e Ramais com Fusível
Tempo de Eliminação por Curva Rápida (s)	N/D	0.07	0.07
Tempo de Eliminação por Curva Lenta (s)	0.8		N/D
Trips por Curva Rápida	0	2	3
Trips por Curva Lenta	3	1	0
Tempo de Falta Total (s)	2.4	0.94	0.21
Corrente de Falta (pu)	13.0		
Temperatura Hot Spot Máxima (°C)	126	116	111
Perda de Vida Útil Térmica (min)	27	9.5	2
Limite de Danos Mecânicos (s)	3.29		
Faltas Até o Dano Mecânico	2	4	16

B. Faltas nas Seções Subterrâneas

Os sensores de linha para sistemas WPS podem ser usados para reduzir ainda mais os danos causados por faltas passantes no transformador, permitindo que o relé do disjuntor do alimentador identifique faltas nas seções subterrâneas do alimentador principal. Faltas em seções subterrâneas são quase sempre faltas permanentes. Uma vez que a proteção de F1 tenha localizado a falta em uma seção subterrânea usando o sistema WPS, todas as tentativas de religamento podem ser canceladas.

A aplicação mais comum para cabos subterrâneos é associada aos pontos de saída subterrâneos (*underground takeoffs*) a partir do disjuntor do alimentador, dentro da subestação, até pouco depois da subestação. Para faltas no ponto de saída subterrâneo da subestação, não existe nenhum fusível entre F1 e a falta. Um sistema WPS pode ser instalado onde o alimentador principal faz a transição de subterrâneo para aéreo, conforme mostrado na Fig. 8, com o religamento habilitado apenas para faltas além do ponto de saída subterrâneo. Isso permite que as faltas nos pontos de saída subterrâneos sejam eliminadas através de um único trip de curva rápida. O uso do sistema WPS para habilitar o trip rápido e cancelar religamentos reduz a perda de vida útil térmica em mais de 97% e permite que o Transformador B sustente 285 vezes mais faltas antes dos danos (para faltas no ponto de saída subterrâneo), conforme mostrado na Tabela IX.

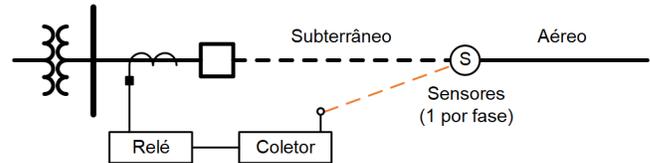


Fig. 8. Sensores de Proteção Sem Fio Aplicados nas Transições de Subterrâneo para Aéreo

TABELA IX
FALTA PERMANENTE NO PONTO DE SAÍDA SUBTERRÂNEO

	Transformador B	
	Corrente de Falta (A)	5850
Locais dos Sensores do WPS	Nenhum	Transição de Subterrâneo para Aéreo
Tempo de Eliminação por Curva Rápida (s)	N/D	0.07
Tempo de Eliminação por Curva Lenta (s)	0.8	N/D
Trips por Curva Rápida	0	1
Trips por Curva Rápida Temporizada	3	0
Tempo de Falta Total (s)	2.4	0.07
Corrente de Falta (pu)	13.0	
Temperatura Hot Spot Máxima (°C)	126	110.5
Perda de Vida Útil Térmica (min)	27	0.67
Limite de Danos Mecânicos (s)	3.29	
Faltas Até o Dano Mecânico	2	571

V. CONCLUSÃO

A aplicação de tecnologias como WPS e modificações nos esquemas do religamento podem resultar em reduções significativas no dano ao transformador causado por faltas passantes. Devido às diferenças nas magnitudes das correntes de falta, as melhorias nos esquemas de religamento mais próximos da subestação provocam um impacto mais significativo na redução dos danos causados por faltas passantes no transformador do que as melhorias associadas aos finais dos alimentadores. Os esquemas de preservação de fusível oferecem uma redução nos danos ao transformador devidos às faltas passantes em comparação com os esquemas de preservação de trip, mas podem afetar a seletividade e a qualidade de energia para mais consumidores quando múltiplos religadores são usados em série. A coordenação de sequência elimina os problemas associados à operação desnecessária do religador a montante, enquanto reduz ainda mais os danos do transformador. Em situações de difícil coordenação, especialmente quando a magnitude da corrente de falta sozinha não pode ser usada para estabelecer seletividade, os sistemas WPS podem reduzir enormemente o impacto dos danos ao transformador causados por faltas passantes.

Ao determinar o dano por faltas passantes para qualquer uma das melhorias nos esquemas de religamento discutidas, toda a sequência de religamento tem que ser considerada. Quando comparada a um esquema de preservação de trip com três trips, uma redução no tempo de operação para um dos três trips pode reduzir o dano ao transformador devido às faltas passantes em 30% a 40%, porém uma redução maior nos danos do transformador pode ser obtida usando mais trips de curva rápida, limitando os trips de curva lenta para um, e cancelando as tentativas de religamento através da localização de faltas com sistemas WPS.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] IEEE C57.109-1993, IEEE Guide for Liquid-Immersed Transformer Through-Fault-Current Duration.
- [2] IEEE C57.91-2011, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators.
- [3] C. J. Cook and D. A. Myers, "The Use of Cooling-Factor Curves for Coordinating Fuses and Reclosers," *2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 1, June 2004, pp 32–39.
- [4] J. Blair, G. Hataway, and T. Mattson, "Solutions to Common Distribution Protection Challenges," proceedings of the 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2016.
- [5] K. Hao, S. V. Achanta, J. Fowler, and D. Keckalo, "Apply a Wireless Line Sensor System to Enhance Distribution Protection Schemes," proceedings of the 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2017.

VII. BIOGRAFIAS

Ed Atienza recebeu seu B.S.E.E. da University of Idaho em 2001. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2002 como um engenheiro de aplicação de campo internacional. Em 2006, ingressou na Tampa Electric como engenheiro de operações de subestações responsável pelos testes e manutenção de relés. Em 2008, ele voltou para a SEL como engenheiro de aplicação de campo e atualmente é um engenheiro líder de desenvolvimento na área de pesquisa e desenvolvimento.

Chris Kelley é um estagiário de engenharia na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. e um estudante de engenharia elétrica na Boise State University. Chris vai se formar com seu B.S.E.E. em maio de 2020.