

Esquema de Baixo Custo Para Disparo Rápido de Barras Usando Sensores de Proteção Sem Fio de Alta Velocidade

Eric McCollum

Blue Ridge Electric Cooperative

Kei Hao, Shankar V. Achanta, Jeremy Blair, e David Keckalo
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na

6th Annual PAC World Americas Conference

Raleigh, Carolina do Norte, EUA

20–22 de agosto de 2019

Anteriormente apresentado na

72nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, março de 2019

e XIV Simposio Iberoamericano Sobre Proteccion de Sistemas

Electricos de Potencia, fevereiro de 2019

Originalmente apresentado na

45th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 2018

Traduzido para o português em dezembro de 2019

Esquema de Baixo Custo Para Disparo Rápido de Barras Usando Sensores de Proteção Sem Fio de Alta Velocidade

Eric McCollum, *Blue Ridge Electric Cooperative*

Kei Hao, Shankar V. Achanta, Jeremy Blair e David Keckalo, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Resumo—A Cooperativa Elétrica Blue Ridge (BREC) implementou um esquema de disparo rápido de barramentos usando sensores de proteção sem fio de alta velocidade como uma alternativa a um esquema de proteção cabeada.

O esquema de disparo rápido de barramento, também conhecido como esquema de intertravamento por zona, é amplamente utilizado em subestações de distribuição radial. Essas subestações usam um relé de sobrecorrente no lado de alta ou baixa tensão do transformador como proteção primária para faltas no barramento. Eles usam relés de sobrecorrente nos alimentadores de distribuição para fornecer proteção contra faltas no alimentador (fora da zona do barramento). No esquema de disparo rápido de barras, o relé de sobrecorrente de barras dispara para uma condição de sobrecorrente, a menos que bloqueado por um relé de alimentador a jusante. Um pequeno atraso de tempo é usado para garantir um bloqueio confiável para faltas no alimentador a jusante.

Para que esse esquema funcione, cada relé de alimentador deve poder comunicar rapidamente um sinal de bloqueio ao relé do barramento usando tanto circuitos de controle com fio como comunicações de alta velocidade via cabos de cobre ou fibra óptica. Esse mecanismo permite que um relé de sobrecorrente em um alimentador em falta emita um sinal de bloqueio para o relé do barramento enquanto protege o alimentador usando elementos de sobrecorrente temporizados. No entanto, adicionar cabos para modernizar as subestações existentes através um esquema de disparo rápido de barramento pode ter custo elevado.

Este artigo descreve as características, confiabilidade e a segurança de um sistema de sensores de proteção sem fio de alta velocidade e sua capacidade de enviar sinais de bloqueio. O documento fornece detalhes sobre como a BREC usou essa tecnologia em um esquema de disparo rápido de barramentos em uma subestação com dispositivos de proteção de vários fabricantes a custos reduzidos, evitando a substituição de equipamentos e mudanças na fiação em campo, enquanto melhorou a segurança de trabalhadores. Finalmente, o artigo apresenta um resumo da redução do nível de energia incidente alcançada com a adoção do esquema de disparo rápido de barras de baixo custo.

I. INTRODUÇÃO

Embora um esquema de proteção diferencial seja um dos melhores esquemas de proteção contra faltas em barramentos, ele nem sempre é usado em subestações de distribuição devido aos requisitos adicionais de equipamentos e manutenção. Como alternativa, um esquema de disparo rápido de barras torna-se uma solução econômica para fornecer proteção aos barramentos de subestações em sistemas de distribuição radiais [1]. Essa solução requer coordenação entre os relés dos alimentadores e a proteção do barramento para determinar se

uma falta é interna (falta no barramento) ou externa (falta no alimentador). Se ocorrer uma falta no barramento, a proteção do barramento desarma o disjuntor da barra, eliminando a falta e deixando todos alimentadores desenergizados. Se ocorrer uma falta em um dos alimentadores, o relé de barramento espera que o relé deste alimentador elimine a falta. Se a falta não for eliminada por causa de falha no relé ou disjuntor do alimentador, o relé do barramento pode atuar como um backup de sobrecorrente temporizado [2].

Para fazer esse esquema funcionar, os relés dos alimentadores devem enviar indicações de faltas ao relé do barramento. Tradicionalmente, os relés de alimentadores usam contatos de entrada e saída com fio ou comunicações dedicadas para enviar indicação de faltas. Infelizmente, há situações em que nem a fiação nem as comunicações dedicadas são viáveis. Embora a maioria dos relés ou controladores de religadores digitais possuam recursos de comunicação e contatos de entrada e saída, adicionar cabos dos relés dos alimentadores ao relé de barramento pode ter alto custo.

Este artigo propõe um esquema econômico para disparo rápido de barramentos usando sensores de proteção sem fio de alta velocidade que não requerem a instalação de cabos entre os relés dos alimentadores e o relé do barramento. O esquema usa os mesmos princípios tradicionais de disparo rápido de barramento, mas a indicação de falta vem de sensores de proteção sem fio instalados nas redes de distribuição do alimentador aéreo ou nos condutores de saída da subestação. Quando o receptor do sistema de sensores de proteção sem fio (que pode ser instalado ao lado do relé do barramento) recebe a indicação de falta, ele envia imediatamente a indicação ao relé do barramento usando comunicações seriais de alta velocidade.

Este documento também descreve em detalhes os benefícios de um esquema de disparo rápido de barras sem fio e como esse esquema ajudou a Blue Ridge Electric Cooperative (BREC) a implementar uma solução de baixo custo e não invasiva.

II. ESQUEMA DE DISPARO RÁPIDO DE BARRAMENTOS

A. Visão Global

Um esquema de disparo rápido de barras, também conhecido como esquema de intertravamento por zona, é usado para proteger os barramentos da subestação quando ocorre uma falta interna. Em um sistema de distribuição radial, esse esquema é mais econômico do que a proteção diferencial de barramento e

pode atingir um tempo mínimo de eliminação de faltas próximas ao tempo do esquema diferencial de barras [1].

O esquema de disparo rápido de barras consiste em um relé instalado em cada alimentador para sua devida proteção e um relé (relé de barramento) instalado no lado secundário do transformador como proteção primária para faltas no barramento (ver Fig. 1). O relé de barramento e os relés de alimentadores geralmente são equipados com o elemento de tempo instantâneo / tempo definido (disparo rápido) (50T) e o elemento de sobrecorrente temporizado (51).

Se ocorrer uma falta em um alimentador, seu respectivo relé detecta a falta e emite imediatamente um sinal para bloquear o elemento de disparo rápido do relé do barramento. Se a falta ocorrer no barramento, nenhum dos relés dos alimentadores detectará a falta para bloquear o elemento de disparo rápido do relé do barramento. Nesse caso, o relé do barramento aciona o disjuntor usando seu elemento de disparo rápido. Para evitar condições de corrida de contatos, um pequeno atraso é definido no elemento de disparo rápido no relé do barramento para fornecer a coordenação necessária entre os relés dos alimentadores e o relé do barramento.

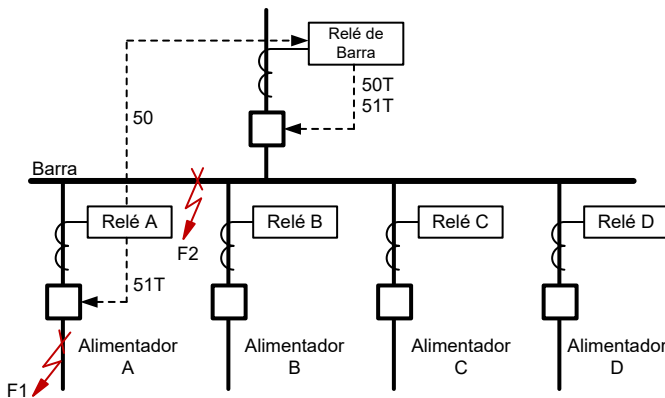


Fig. 1. Esquema de Disparo Rápido de Barramentos

1) Faltas nos Alimentadores

Quando ocorre uma falta no Alimentador A (F1 na Fig. 1), os elementos do relé do barramento (50 e 51) podem atuar se a corrente de falta for alta o suficiente. O elemento do relé do Alimentador A (51) também atua e o Relé A envia imediatamente um sinal de bloqueio ao relé do barramento. Uma vez que o relé do barramento recebe o sinal de bloqueio, ele bloqueia o disparo do seu elemento (50T). Este elemento permanece bloqueado até que o relé do alimentador elimine a falta no alimentador.

O relé de barramento é o backup da proteção do alimentador. Se o relé do alimentador falhar na eliminação da falta do alimentador, o relé do barramento dispara através seu elemento 51, que coordena com os relés do alimentador para que eles tenham tempo para operar primeiro.

2) Faltas no Barramento

Quando ocorre uma falta no barramento (F2 na Fig. 1), os elementos do relé do barramento atuam, mas sem atuação de nenhum dos relés de alimentadores. Como o relé do barramento não recebe nenhum sinal de bloqueio, ele fornece disparo

através seu elemento de tempo definido (50T) após o tempo limite.

B. Implementações

1) Esquema Tradicional com Fio

O esquema tradicional de disparo rápido de barramentos com fio usa um contato de saída do elemento 50 do relé do alimentador para enviar um sinal de bloqueio ao relé do barramento, como mostrado na Fig. 2. O elemento 51 do relé do alimentador é usado para fornecer o disparo do disjuntor.

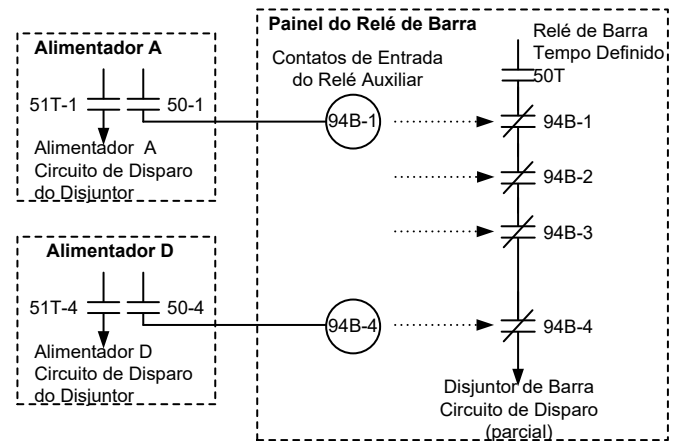


Fig. 2. Exemplo de Implementação com Fio

No painel do relé de barramento, os relés auxiliares podem ser usados para receber os sinais de bloqueio e fornecer um contato normalmente fechado para ser conectado em série com o circuito de disparo do elemento 50T, conforme mostrado na Fig. 2. Se nenhum dos alimentadores fornecer um sinal de bloqueio, o circuito de disparo 50T estará liberado para disparar o disjuntor do barramento quando o contato 50T é fechado. Se algum alimentador fornecer um sinal de bloqueio, o circuito 50T será interrompido e não será capaz de disparar o disjuntor do barramento. O relé de barramento usa um pequeno atraso de tempo definido para evitar as condições de corrida de contatos e para fornecer compensação de tempo para que os elementos dos alimentadores atuem e os relés auxiliares abram. Implementações similares existem, como as descritas em [3].

Para relés digitais, a fiação do painel (ver Fig. 2) pode ser evitada usando as funções lógicas internas dos relés. Nesse projeto, um contato de saída de um relé de alimentador, designado para seguir o elemento 50, envia um sinal de bloqueio por fio ao relé do barramento. O elemento 50T do relé de barramento pode então ser inibido ativando a entrada do sinal de bloqueio no relé de barramento usando lógica interna.

2) Esquemas de Comunicações

a) Comunicação Serial de Alta Velocidade

Em vez de usar circuitos de controle conectados por fio, esquemas de disparo rápido de barramentos podem usar comunicações seriais de alta velocidade. O princípio por trás desse esquema é o mesmo daquele da aplicação com fio. Os eletricitas instalam cabos seriais entre os relés do alimentador e o painel do relé de barramento (um cabo serial de cada relé). Os cabos seriais podem ser de cobre ou fibra óptica. Essa implementação usa um processador lógico de comunicação

serial ou outro dispositivo eletrônico inteligente (IED) no painel do relé de barramento para agregar os sinais de bloqueio provenientes dos vários relés de alimentadores. A saída do processador é um sinal de bloqueio único através de uma conexão serial com a porta serial do relé do barramento, conforme mostrado na Fig. 3.

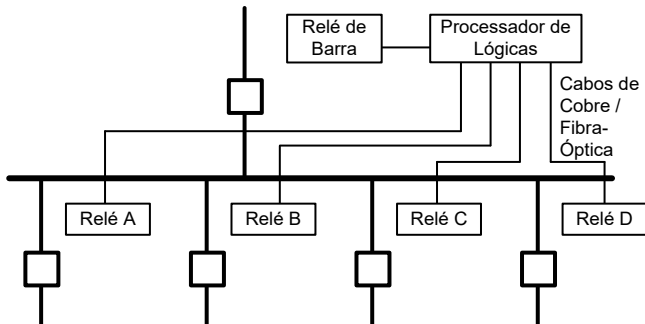


Fig. 3. Implementação de Comunicação Serial de Alta Velocidade

b) Protocolo de Comunicação IEC 61850

A IEC 61850 é uma norma para automação de subestações e projetos de sistemas de comunicação e controle. O princípio de um esquema de disparo rápido usando a IEC 61850 é o mesmo de uma aplicação com fio. No entanto, as mensagens virtuais ponto a ponto de alta velocidade (*Generic Object-Oriented Substation Event – GOOSE*) fornecem o sinal de bloqueio para o relé do barramento em vez dos contatos físicos de E/S dos relés.

Essa implementação requer um sistema de rede IEC 61850 no qual as informações são trocadas pelos IEDs por meio de uma rede Ethernet, conforme mostrado na Fig. 4. A transmissão de mensagens GOOSE é orientada a eventos e qualquer relé pode publicar mensagens quando ocorrer um evento, como uma detecção de falta. Qualquer dispositivo na mesma rede pode ser configurado para assinar transmissões de mensagens GOOSE específicas. No esquema de disparo rápido de barramentos, os relés dos alimentadores publicam mensagens GOOSE que contêm o sinal de bloqueio e o relé do barramento é configurado para receber tais mensagens. Detalhes adicionais dos sistemas e protocolos de comunicação IEC 61850 estão além do escopo deste artigo.

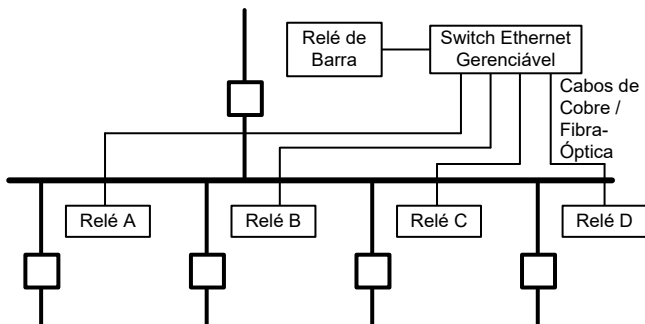


Fig. 4. Implementação IEC 61850

C. Princípios do Esquema Sem Fio de Disparo Rápido de Barras

Como mencionado anteriormente, os esquemas de disparo rápido de barras funcionam bem quando todos os relés de

proteção no esquema podem enviar sinais de bloqueio por meio de conexões cabeadas entre contatos de saída ou canais digitais de alta velocidade. No entanto, existem situações em que o cabeamento não é viável e a comunicação digital de alta velocidade não está disponível. Por exemplo, alguns ou todos os relés de alimentadores podem ser relés eletromecânicos sem comunicação. Outro exemplo é uma subestação com relés digitais com recursos de comunicação, mas sem cabeamento de comunicação dedicado entre o relé do barramento e os relés do alimentador. Adicionar cabos de comunicação ou fiação entre relés pode ser difícil e ter custo elevado.

Por exemplo, na Fig. 1, se um ou todos os relés de alimentadores não tiverem cabos de comunicação ou fiação para o relé do barramento, não é possível implementar um esquema de disparo rápido de barramento sem atualizar os equipamentos. Nesse cenário, as curvas de sobrecorrente temporizadas do relé do barramento são definidas para coordenar com os relés dos alimentadores, de modo que o relé do barramento não dispare para faltas no alimentador. Isso ocasiona disparo mais lento para faltas no barramento, o que pode afetar a segurança, a vida útil do equipamento, a qualidade da energia e a confiabilidade.

Um sistema de sensor de proteção sem fio de alta velocidade pode ajudar nessa situação. Este sistema consiste em um sensor de corrente autoalimentado pela rede elétrica onde está instalado, que detecta correntes de falta com base em um ajuste e que comunica essas informações a um dispositivo receptor. A detecção de faltas e a latência das comunicações do sistema são curtas o suficiente para tornar o sistema viável para aplicações de proteção, como num esquema de disparo rápido de barramentos. A Fig. 5 mostra como o sistema de sensor de proteção sem fio de alta velocidade pode ser aplicado para permitir um esquema de disparo rápido de barras.

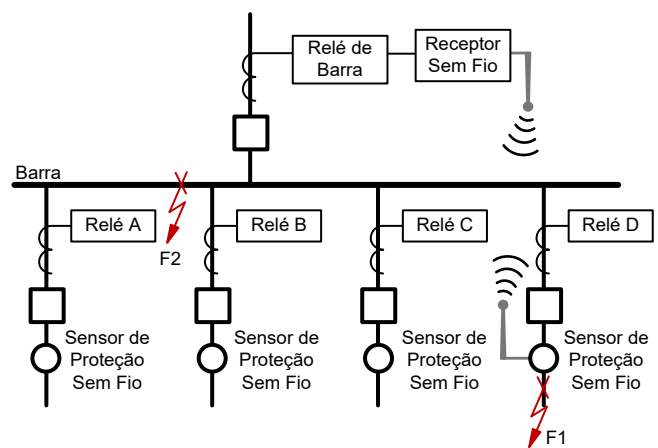


Fig. 5. Esquema Sem Fio de Disparo Rápido de Barras

Na Fig. 5, os sensores sem fio são instalados em cada alimentador e comunicam com o receptor sem fio conectado ao relé do barramento. Os sensores sem fio são alimentados pela própria rede elétrica e podem ser configurados para captar as correntes de falta com base em cada alimentador individual. Na Fig. 5, F1 é detectada pelo Relé D e pelo sensor sem fio neste alimentador. O Relé D dispara para esta falta e o sensor envia um sinal de indicação de falta ao receptor sem fio, confirmando

a falta no alimentador. Este sinal é usado para bloquear o elemento de sobrecorrente de disparo rápido do barramento no disjuntor principal.

Quando ocorre uma falta no barramento (F2 na Fig. 5) no esquema de disparo rápido, o sensor de proteção sem fio não detecta corrente de falta e restringe seu sinal de bloqueio. Consequentemente, os elementos instantâneos do barramento não são bloqueados. A coordenação dos elementos instantâneos dos alimentadores e o disjuntor principal é obtida definindo-se um atraso de alguns ciclos nos elementos instantâneos do relé do disjuntor principal. O atraso de tempo real é selecionado para fornecer margem adequada para que o sinal de bloqueio seja recebido a tempo de bloquear o disparo rápido nas piores condições.

Para fornecer proteção de retaguarda para os disjuntores dos alimentadores, um elemento de sobrecorrente temporizado é sempre ativado no relé de barramento. Este elemento assegura os casos em que um sinal de bloqueio é recebido de um dos alimentadores, mas nenhum disjuntor de alimentador dispara.

D. Diretrizes Para Aplicação do Sistema de Sensores Sem Fio de Proteção de Alta Velocidade

Os seguintes princípios devem ser considerados ao aplicar um sistema de sensores de proteção sem fio de alta velocidade em esquemas de proteção rápidos de barramentos [4]:

- Os dispositivos de proteção não devem tomar decisões de proteção com base apenas nos dados de faltas do sistema de sensores sem fio. O relé de proteção nunca deve desarmar um disjuntor (nem um controle de religador desarmar um religador) com base apenas nas informações dos sensores. Em vez disso, o dispositivo de proteção deve detectar uma falta usando elementos de sobrecorrente antes de considerar as informações adicionais dos sensores.
- Os dispositivos de proteção devem reverter para um esquema de backup na ausência de dados do sensor. Esse princípio à prova de falhas abrange casos em que os sensores sem fio não conseguem fornecer informações de faltas aos dispositivos de proteção. Como a perda de dados pode ocorrer em qualquer sistema de rádio, o esquema de proteção discutido neste documento deve incluir lógica para monitorar os dados do sistema de sensores e identificar problemas antecipadamente.
- O dispositivo de proteção deve usar apenas as informações de faltas dos sensores para expandir os esquemas existentes quando o sistema tiver sido totalmente projetado, comissionado e ativado. Como o sistema de sensores sem fio fornece maior visibilidade do sistema de distribuição de energia, os dispositivos de proteção podem usar os dados de faltas dos sensores para melhorar as decisões de proteção.

III. BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES DOS ESQUEMAS RÁPIDOS DE BARRAMENTOS SEM FIO

Nesta seção, discutiremos os benefícios de um esquema rápido de barras sem fio em comparação com um esquema

tradicional de disparo rápido. Os esquemas sem fio também têm certas limitações em comparação com os esquemas tradicionais de disparo rápido, portanto esta seção também apresenta técnicas para superar essas limitações.

A. Benefícios

1) Facilidade de Instalação

Uma das principais vantagens de um esquema sem fio é a sua fácil instalação. O sistema sem fio de disparo rápido de barramentos não requer a instalação de fios ou de cabos de comunicação, nem a construção de uma rede de comunicação Ethernet. Ele não requer cavar buracos no solo, fazer canaletas, instalar conduítes, puxar cabos, cobrir canaletas, levar fiação a bornes ou direcionar fios e cabos da borneira para o destino via contatos de entrada e saída ou uma interface de comunicação física. A instalação de um sensor sem fio oferece uma economia substancial de custos para os relés instalados no pátio da subestação.

A instalação dos sensores sem fio pode ser realizada com uma vara de manobra e pode levar apenas 15 minutos. As instalações tradicionais podem levar dias para serem implementadas, dependendo do número e comprimento dos trechos de cabos e da disponibilidade da equipe.

Outra vantagem é que a instalação de sensores sem fio não é invasiva. A instalação de um esquema rápido de barramento sem fio requer menos modificações nos equipamentos existentes do que os esquemas tradicionais, seja uma instalação de modernização ou uma nova instalação. Requer apenas alterações no relé do barramento. A única interface física entre o receptor sem fio e o relé do barramento é uma conexão de cabo serial. O comprimento do cabo pode ser curto porque o receptor sem fio é normalmente instalado muito próximo ao relé do barramento. Isso pode reduzir significativamente o tempo e os custos de instalação.

2) Capacidade de Superar Limitações do Relé de Alimentadores

Atualmente, um sistema elétrico de potência é protegido por relés de diferentes épocas e capacidades. Alguns relés fornecem recursos limitados para suportarem um esquema rápido de barras. Uma vez que o esquema foi projetado pela primeira vez, um esquema com sensor de proteção sem fio pode ser implementado como uma solução “replicável”, economizando recursos valiosos de engenharia em instalações futuras.

Alguns relés de eletromecânicos não incluem um elemento 50 e, portanto, não têm capacidade de iniciar um sinal de bloqueio. Mesmo para os relés eletromecânicos de alimentador que incluem um elemento 50, o engenheiro de proteção pode desejar configurá-lo para um disparo instantâneo perante faltas com correntes elevadas, em vez de iniciar um sinal de bloqueio.

Embora a maioria dos relés digitais modernos ofereçam contatos programáveis e comunicação de alta velocidade, existem alguns relés digitais e outros analógicos de estado sólido ainda em serviço e disponíveis para compra que não oferecem contatos de saída programáveis e que podem não oferecer elementos instantâneos (50) suficientes para permitir um esquema de rápido de barras tradicional. Alguns desses

relés também não possuem comunicação digital de alta velocidade.

Algumas subestações de distribuição são construídas usando religadores no lugar de disjuntores. Os religadores hidráulicos nunca foram idealizados para uma integração com outros sistemas e, como resultado, não fornecem sinalização de saída.

Finalmente, pode haver dispositivos conectados ao barramento que estejam protegidos com fusíveis, como bancos de capacitores, transformadores de serviços auxiliares ou transformadores de injeção de sinal de leitura automática de medidor (AMR). Os fusíveis, é claro, não têm a capacidade de reportar um sinal de bloqueio ao relé do barramento para faltas em sua zona.

Para qualquer um desses casos, o sensor de proteção sem fio fornece uma solução simples. O sistema do sensor sem fio possui seus próprios ajustes de *pickup* e pode ser usado como um conjunto de elementos 50 destinados especificamente para detectar a presença de uma falta e fornecer sinal de bloqueio ao relé do barramento. Essa solução supera a falta de elementos de proteção disponíveis e sinalização de saída em um conjunto de fácil instalação e permite que os usuários incluam equipamentos protegidos por fusível no esquema de barramento rápido.

B. Limitações

1) Perda de Comunicação

A perda de comunicação pode ocorrer em um esquema sem fio por vários motivos. A disponibilidade de comunicação sem fio nem sempre é 100 por cento. Uma disponibilidade de 99,99 por cento se traduz em 52,56 minutos de interrupção de comunicação por ano. Se essa interrupção ocorrer durante uma falta, o relé do barramento não receberá o sinal de bloqueio e, portanto, irá atuar seu elemento de disparo rápido. No entanto, a probabilidade de ocorrência de interrupção e falta ao mesmo tempo é muito baixa.

Outra causa para perda de comunicação são as interferências. O sistema pode sofrer interferências a qualquer momento, embora uma instalação bem projetada pode minimizá-las. Uma interferência pode prejudicar a capacidade do receptor em decodificar uma indicação de falta proveniente dos sensores. Uma possível solução é escolher um canal de frequência que sofra a menor quantidade de interferências na área.

2) Problemas com Corrente de Inrush e Transitórios

A principal diferença entre os sensores sem fio de alta velocidade e um relé de alimentador é que os sensores sem fio são suscetíveis a correntes de *inrush*, transientes e outros distúrbios na rede de distribuição. É possível que os sensores sem fio venham a atuar perante tais condições e enviem um sinal de bloqueio ao relé do barramento. No entanto, se o relé do barramento supervisionar o sinal de bloqueio proveniente dos sensores com elementos de proteção como os elementos 50 ou 51, é possível superar esse problema (consulte a Seção IV, Subseção B).

3) Saída Momentânea

Devido à natureza da autoalimentação dos sensores, o sistema de sensores de proteção sem fio pode não transmitir sinais durante uma falta, fazendo com que o receptor sem fio desative o bit de falta. A lógica de proteção deve levar em consideração um sinal de bloqueio momentâneo. Se a duração do sinal de bloqueio for menor que a duração de uma falta, o relé de barramento irá disparar após o sinal de bloqueio ser descontinuado. Isso leva a um disparo da barra que deixa todos os alimentadores desenergizados. Uma maneira de resolver esse problema é selar ou travar o sinal de bloqueio recebido até que a falta seja eliminada. A Seção IV, Subseção B fornece mais detalhes sobre esta implementação.

4) Problemas de Múltipla Alimentação

Quando uma geração distribuída é conectada a um alimentador ou quando um alimentador atende a uma grande carga industrial, essas conexões podem contribuir com correntes de curto-circuito para a faltas no barramento ou a montante do barramento. Além disso, se houver um banco de aterramento em um alimentador de distribuição, o banco poderá fornecer correntes de curto-circuito para faltas à terra no barramento ou a montante do barramento. Para aplicar esquemas de disparo rápido de barras nesses sistemas de alimentação múltipla, os relés dos alimentadores e os relés principais devem usar elementos de sobrecorrente direcionais. O elemento de sobrecorrente direcional do relé de barramento determina se a falta está a montante ou potencialmente no barramento e este elemento disparará para faltas na direção do barramento, a menos que seja bloqueado. Os elementos direcionais dos relés de alimentadores determinam se a falta está no alimentador e, portanto, se o sinal de bloqueio deve ser enviado ao relé de barramento.

Como os sensores sem fio normalmente são dispositivos de sobrecorrente não direcional, o esquema sem fio de disparo rápido de barras não é aplicável a sistemas de múltipla alimentação.

IV. PROJETO DE ESQUEMA SEM FIO RÁPIDO DE BARRAS

A. Instalação

Os requisitos de instalação para um esquema sem fio rápido de barras geralmente são muito fáceis de atender devido aos alcances serem próximos em um ambiente de subestação. No entanto, vale a pena considerar esses requisitos metodicamente para garantir a operação adequada. A implantação de qualquer sistema de sensor sem fio de alta velocidade envolve as fases discutidas nas subseções a seguir.

1) Pesquisa

A pesquisa inclui a seleção do local da instalação, do tipo de antena para o receptor e uma estimativa do link sem fio. Para aplicações de curto alcance, como um esquema de disparo rápido, os sensores geralmente estão próximos aos receptores. Uma implantação é considerada de curto alcance se os sensores estiverem fisicamente visíveis a partir da antena do receptor e não houver obstruções entre eles. Os sistemas de curto alcance não requerem um extenso planejamento, mas uma análise estimativa simples do link deve ser realizada. Uma análise de

link sem fio deve considerar todas as perdas e ganhos em um link de rádio do transmissor e do receptor. Os cálculos de estimativa do link são usados para determinar a quantidade de margem de link disponível para um determinado link de rádio. Para um link confiável, a potência de recebimento deve ser maior que a sensibilidade de recebimento efetiva. A margem do link é a diferença entre a potência recebida e a sensibilidade de recebimento efetiva.

A Fig. 6 exemplifica uma estimativa de link para um sistema sem fio.

2) Pesquisa em Campo

Se os sensores estiverem na linha de visão da antena do receptor, nenhum estudo de visada será necessário. Um teste de pré-comissionamento no local pode simplificar a implantação do esquema sem fio. Para o teste, coloque uma antena temporária no local proposto para a instalação da antena, conecte um receptor e, em seguida, posicione um sensor de proteção sem fio em um local seguro (próximo ao proposto alimentador). Dispare faltas manualmente no sensor usando uma fonte de corrente portátil.

Se o receptor detectar as indicações manuais de faltas provenientes do sensor, isso garante que o sistema de sensores irá funcionar no esquema sem fio para disparo rápido de barras. Se o receptor não puder detectar as indicações de faltas do sensor, reposicione a antena, sensor ou ambos até que o receptor receba consistentemente indicações de faltas do sensor. O receptor sem fio também pode incluir uma função que meça a intensidade do sinal recebido, que pode ser usada para um ajuste fino do sistema.

3) Instalação Física

Os sensores sem fio podem ser instalados usando uma vara de manobra. A orientação do dispositivo após a instalação é importante para um link sem fio confiável. Um bastão para instalação pode ser usado para orientar o dispositivo para que a antena interna no sensor sem fio seja posicionada para a melhor propagação do sinal.

O receptor sem fio normalmente se comunica com vários sensores e requer uma antena externa omnidirecional para o

melhor link de comunicação. O uso de um cabo de radiofrequência (RF) de baixa perda reduz a perda de sinal, melhorando ainda mais o desempenho do link. Normalmente, o receptor sem fio é instalado em uma cabine ou gabinete no pátio da subestação. Para proteger o dispositivo receptor contra raios e outros transientes que possam vir a danificar os componentes eletrônicos, é importante instalar um protetor contra surtos entre o cabo da antena e o receptor. O protetor deve ser montado em um anteparo em uma superfície metálica adequadamente aterrada.

B. Ajustes do Receptor e dos Sensores Sem Fio

Os sensores sem fio requerem alguma configuração antes da instalação. O comportamento da proteção é definido pela detecção de falta por um ajuste de *pickup* de sobrecorrente, que precisa ser definido de acordo com as características específicas do alimentador e da subestação. Quando a corrente detectada excede esses valores de ajuste, o sensor comunica o sinal de falta ao receptor via link de alta velocidade sem fio [4]. O valor de ajuste de sobrecorrente deve ser calculado com base no esquema de proteção e em outros relés de proteção do sistema. Em geral, o valor de ajuste deve ser o mais baixo possível (para maximizar a sensibilidade), permitindo uma ampla margem de segurança acima da corrente de carga em regime permanente. Se o sensor de proteção sem fio atuar transitóriamente perante correntes de inrush ou chaveamentos, isso é uma preocupação mínima porque o relé do barramento não realizará nenhuma ação ao receber este sinal de bloqueio transitório.

O sistema requer ajustes e identificadores de sensor exclusivos para garantir que o receptor reconheça as mensagens dos sensores e para permitir que mais de um sistema seja usado na mesma subestação sem que haja conflito. A Fig. 7 mostra um exemplo para um sistema que compreende dois sistemas de sensores sem fio de alta velocidade instalados na mesma subestação. Esses sistemas devem operar de forma independente. Como as comunicações de RF entre esses sistemas não podem ser isoladas umas das outras, o equipamento de cada rede requer um identificador para permitir a operação compartilhada.

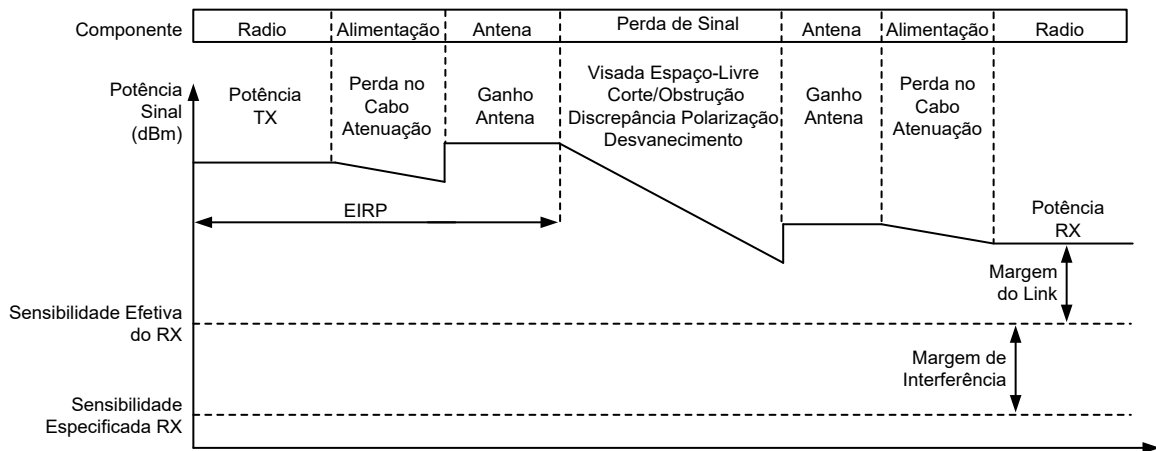


Fig. 6. Análise de Estimativa de um Link

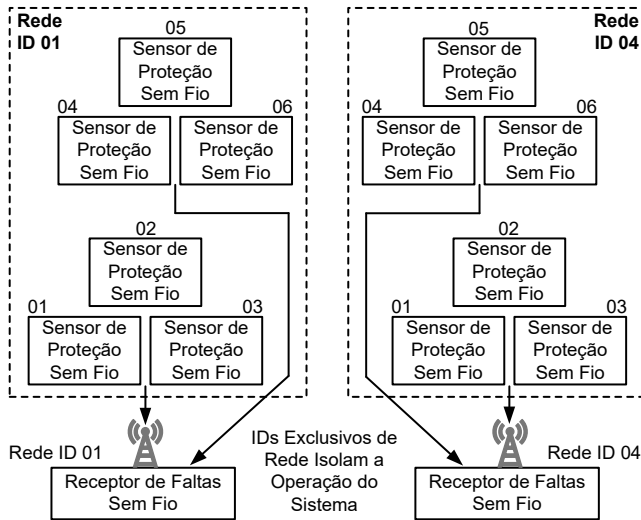


Fig. 7. Sistema de Sensores de Proteção Sem Fio de Alta Velocidade

No exemplo da Fig. 7, um sistema possui um ID de rede 01, enquanto o segundo sistema possui um ID de rede 04. Observe que o sensor sem fio e o receptor na mesma rede devem estar configurados para ter o mesmo ID de rede.

Finalmente, as portas da interface de comunicação serial do receptor sem fio requerem velocidade de comunicação e configurações de endereçamento compatíveis com o dispositivo de mesmo nível, seja um processador lógico ou outro IED.

C. Integrando Sensores de Proteção de Alta Velocidade Sem Fio Em Esquemas Existentes de Barramento Rápidos

Considere um exemplo de subestação com três alimentadores usando um esquema de disparo rápido de barras baseado em comunicação serial semelhante ao esquema descrito na Seção II, Subseção B. Nesta subestação, adicionamos um quarto alimentador equipado com um controle de religador que não é capaz de fornecer conexão de comunicação serial de alta velocidade.

Como o sinal de detecção de falta do Alimentador 4 não pode ser enviado diretamente do controle do religador para o relé do barramento, o esquema de disparo rápido da barra está sem as informações necessárias para funcionar corretamente. Se o esquema fosse ativado de qualquer maneira, funcionaria corretamente para falhas no barramento e falhas nos Alimentadores 1, 2 ou 3. No entanto, uma falta no Alimentador 4 parece ser uma falta de barramento e a proteção do barramento atuaria.

Para superar esse problema, sensores sem fio de alta velocidade podem ser instalados no lado da carga do religador do Alimentador 4 (como mostrado no sistema expandido na Fig. 8). Esses sensores transmitem informações de falhas para um receptor na casa de controle da subestação. O custo de instalação do sensor é mínimo porque os sensores não precisam de fonte de alimentação e nem fiação.

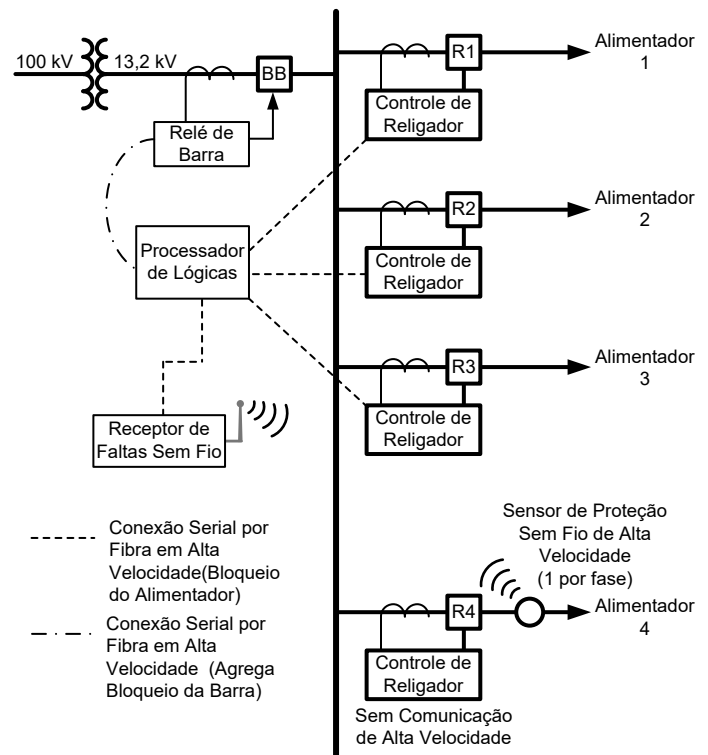


Fig. 8. Esquema Combinando Proteção Cabeada e Sem Fio para Disparo Rápido de Barras

O receptor sem fio qualifica os sinais de entrada provenientes do sensor de proteção e codifica o resultado em um bit lógico, indicando o estado da falta no Alimentador 4. Esse bit é transportado por um link de comunicação serial de alta velocidade, compatível com o processador lógico. O processador lógico combina o sinal de falta no Alimentador 4 com os sinais de *pickup* dos Alimentadores 1, 2 e 3 e um sinal de bloqueio é então enviado ao relé do barramento.

1) Lógica de Selo

Para uma falta no Alimentador 4, o sensor sem fio detecta a condição instantânea de sobrecorrente e comunica o estado de falta ao receptor. A lógica do receptor sem fio fornece um sinal de falta de duração finita, que pode cessar enquanto a falta ainda estiver presente. Por esse motivo, o sinal de falta do alimentador deve ser selado pelo relé do barramento. Essa função de selo também abrange os sinais de *pickup* provenientes dos Alimentadores 1, 2 e 3, que são codificados na mesma entrada “Qualquer Alimentador Sob Falta” pelo processador lógico.

O diagrama lógico da Fig. 9 mostra a função selo. Observe que o sinal de bloqueio derivado internamente é somente liberado quando o elemento 51 fica completamente *resetado*. Isso evita uma prematura ação de *dropout* do sinal de bloqueio devido a falhas intermitentes e que provocam *pickup* dos elementos de sobrecorrente.

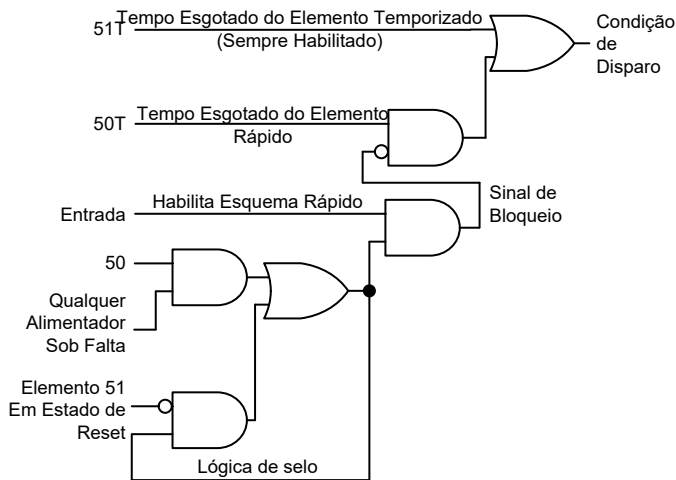


Fig. 9. Selo no Relé de Barra e Lógica de Habilitação

2) Controle de Habilitar/Desabilitar Esquema Rápido de Barras

A entrada “Ativar Esquema Rápido” na Fig. 9 controla a lógica de bloqueio. Quando esta entrada é desativada, o sinal de bloqueio é desabilitado e apenas o elemento 51T permanece em serviço. Este elemento temporizado deve ser coordenado com todos os religadores dos alimentadores. Por ser incondicional, o elemento 51T sempre pode iniciar um disparo na barra como retaguarda em caso de problemas na proteção de alimentadores.

3) Detecção de Perda de Comunicação Sem Fio

Os sensores sem fio normalmente transmitem um sinal periódico de integridade do link, alimentado pela corrente da rede elétrica. Em condições de carga leve, um ou mais sensores podem parar de transmitir os sinais de teste do link. O receptor sem fio monitora os sinais de integridade do link e fornece um ponto de estado. Uma perda temporária de link causada pelo baixo carregamento do alimentador não é problemática para o esquema rápido de barras, porque os sensores ainda detectam faltas e transmitem a mensagem de bloqueio. A operação do esquema não é adaptada nessa situação devido à característica de segurança do esquema de bloqueio.

Uma falha de sinal mais longa pode indicar um problema no próprio sistema sem fio. O processador lógico pode monitorar o estado do link e provocar um alarme se um link for perdido por um período considerável (por exemplo, 12 horas). Esse alarme pode ser monitorado em um centro de controle e o operador do sistema pode enviar um técnico para investigar.

4) Monitoramento e Segmentação Local

O receptor sem fio pode indicar a fase sob falta e o estado do link em uma interface de usuário local e através de um bit de estado. Esse mostrador facilita as atividades de testes, solução de problemas e comissionamento. Os usuários também podem desenvolver lógicas personalizadas ou exibir lógicas no relé de barramento para fornecer indicação de um disparo rápido de barras.

O processador lógico também pode monitorar os sinais de bloqueio do sensor sem fio e o estado do link e disparar um registrador sequencial de eventos. Esta informação é valiosa para análise pós-falta.

V. ESQUEMA DE DISPARO RÁPIDO DE BARRAS DA BLUE RIDGE ELECTRIC COOPERATIVE

A. Instalação

A BREC recentemente comissionou uma subestação rural de 100 kV/13,2 kV. Esta subestação de distribuição alimenta seus consumidores através de quatro alimentadores.

Para maximizar a segurança de trabalhadores no pátio da subestação, a duração de faltas no barramento deve ser minimizada para limitar a exposição à energia incidente do arco elétrico, de acordo com as diretrizes do Código Nacional de Segurança Elétrica (NESC). A BREC frequentemente emprega esquemas rápidos de disparo de barras como um método comprovado para obter tempos rápidos de eliminação de faltas em barramentos. A curta duração de faltas de um típico esquema rápido de barras reduz a energia incidente do arco elétrico para menos de 2 cal/cm², o que está bem abaixo da classificação padrão de 8 cal/cm² da BREC para equipamentos de proteção individual (EPI). Isso garante que os trabalhadores permaneçam confortáveis em seu ambiente de trabalho e reduz a probabilidade de erros humanos em condições de calor excessivo.

1) Instalação Padrão – Conexão Serial

Cada alimentador é protegido por um controlador digital de religador que comunica com um processador lógico usando um link dedicado de comunicação serial de alta velocidade. Cada controle do religador do alimentador é programado para enviar um sinal de bloqueio ao processador lógico quando há atuação de um elemento de sobrecorrente para faltas no alimentador. Em cada controle de religador, um sistema de monitoramento de canal de comunicação testa continuamente o link serial e ativa um bit de estado OK quando o link está ativo.

O processador lógico qualifica cada sinal de bloqueio dos alimentadores com seu bit de estado de comunicação, agrega-os em um único elemento de bloqueio e transmite o resultado ao relé de proteção do barramento através de um link serial dedicado de alta velocidade. A lógica do barramento usa essa entrada como um sinal de bloqueio para o elemento de disparo rápido do barramento.

2) Instalações de Sensores Sem Fio de Proteção de Alta Velocidade

Em um alimentador, a BREC especificou um controle de religador que não suporta comunicações em velocidade de proteção e também não possui adequados contatos de saída para enviar sinais de bloqueio. Para atender ao rigoroso requisito de velocidade de eliminação de faltas em barramentos, a concessionária enfrentou a perspectiva de instalar um esquema diferencial de barras. Isso teria sido muito caro, pois exigiria uma área de ocupação maior da subestação para acomodar os transformadores de corrente adicionais (TCs) nos alimentadores, além de esforços adicionais de projeto, fiação, testes e manutenção.

A disponibilidade comercial de sensores sem fio para proteção em alta velocidade melhorou bastante este quadro. Ao instalar os sensores sem fio no lado da carga do IED incompatível, tornou-se possível usar o esquema de disparo rápido de barras. Os sensores de proteção de alta velocidade

transmitem o estado da falta diretamente para um módulo receptor instalado na casa de controle, independente do IED de proteção.

Quando ocorre uma falta no alimentador, o(s) sensor(es) de alta velocidade nas fases afetadas detectam a elevada corrente passante e transmitem mensagens sem fio para o módulo receptor. O receptor, por sua vez, envia um sinal de bloqueio ao processador lógico de proteção usando o mesmo protocolo de comunicação serial de alta velocidade que os IEDs dos demais alimentadores padrão.

Como os sensores sem fio não precisam de fonte de alimentação, os técnicos podiam selecionar um local conveniente para instalá-los. Conforme mostrado na Fig. 10, os sensores são instalados nos jumpers de saída de um religador na subestação.

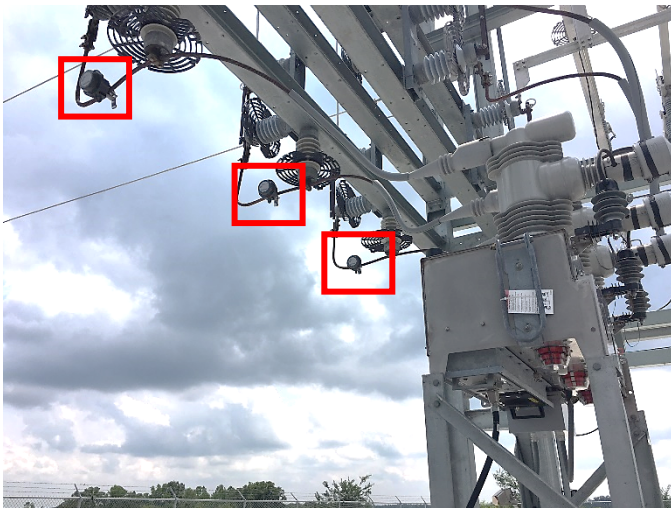


Fig. 10. Instalação de Sensor Sem Fio para Proteção de Alta Velocidade

B. Testes

Durante a fase de projeto, a BREC organizou testes de velocidade para ajudar a determinar a adequação dos sensores para a aplicação.

Seu consultor realizou testes ponto a ponto em um ambiente de laboratório com um sensor sem fio montado em um circuito condutor com uma fonte de corrente controlável. O módulo receptor sem fio foi conectado a um processador lógico e o processador lógico, por sua vez, conectado a um relé de barramento do mesmo tipo usado no esquema padrão da BREC para disparo rápido de barras. Os ajustes do processador lógico representavam o esquema padrão.

O técnico mediu a média do pior caso e o atraso de pico entre a aplicação da corrente de falta e o reconhecimento do sinal de bloqueio no relé de barramento. Após dez testes, o tempo medido mais longo foi de 21 ms e a média foi de 17 ms. Esse desempenho caiu dentro da janela de 50 ms prevista para o esquema de disparo rápido de barras da BREC.

C. Cálculos

A proteção de barras de alta velocidade melhora a segurança do trabalhador, reduzindo o nível de energia incidente para

faltas no barramento. A energia incidente é diretamente proporcional à duração da falta. Para a proteção padrão de barramento sem um esquema rápido, uma falta sólida fase-terra de 7,4 kA no barramento da subestação possui uma energia incidente ao ar livre modelada em 11,7 cal/cm², com um tempo de eliminação de 1.011 ms. Para esse mesmo tipo de falta, o esquema de disparo rápido de barras reduz o tempo de eliminação para 133 ms e a energia incidente é reduzida por um fator de 133/1011, ou seja cai para 1,54 cal/cm².

Utilizando o mesmo fator de redução para uma falta trifásica, a energia incidente ao ar livre cai de 13,7 para 1,8 cal/cm². A BREC implementou o esquema de disparo rápido de baixo custo em sua subestação, o que reduziu a energia incidente ao ar livre em 86,6 por cento.

VI. CONCLUSÃO

Os esquemas de disparo rápido de barras são uma solução econômica para fornecer proteção aos barramentos de subestações em sistemas de distribuição radiais quando uma proteção diferencial de barramento não está disponível. O esquema tradicional de disparo rápido de barramentos requer instalações físicas de cabos (de cobre ou de fibra óptica) para os relés dos alimentadores enviarem sinal de bloqueio ao relé do barramento. Como o esquema de disparo rápido proposto, usando sensores sem fio de alta velocidade, não requer essas instalações físicas, o esquema oferece uma economia substancial de custos para os relés de alimentadores, especialmente aqueles instalados no pátio da subestação.

Os esquemas sem fio de disparo rápido de barras também oferecem vários benefícios. Os sensores sem fio são muito fáceis e rápidos de instalar. A instalação usa bastão de manobras padrão e pode levar apenas alguns minutos. A instalação não é invasiva porque não são necessárias alterações de ajustes nos relés dos alimentadores para casos de modernizações e não é necessária nenhuma programação especial do relé de alimentadores para projetos incipientes. Isso pode reduzir significativamente o tempo e os custos de instalação. O esquema de disparo rápido de barras pode ser uma solução ideal para relés de proteção que não possuem contatos de entrada e saída ou recursos de comunicação. Também pode ser usado para integrar dispositivos obsoletos ou fora do padrão em um esquema de barramento rápido.

A aplicação real da BREC de um esquema sem fio de disparo rápido de barras discutido no documento prova que o esquema é eficaz no fornecimento de proteção de barramentos. Além disso, é uma solução que pode obter desempenho semelhante a um esquema tradicional de disparo rápido de barras. Um dos principais motivos para usar a proteção de barramento é reduzir as categorias de EPI de arco elétrico. A BREC teve inicialmente a opção de instalar um novo conjunto de TCs e um novo relé ou então, instalar os sensores e o sistema de proteção sem fio. A escolha da opção sem fio economizou significativamente custos de instalação e tempo. O esquema sem fio de disparo rápido de barramento também reduziu a categoria de arco elétrico de 3 para 1.

VII. REFERENCIAS

- [1] H. J. Altuve Ferrer and E. O. Schweitzer, III (eds.), *Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, WA, 2010.
- [2] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications, Fourth Edition*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2014.
- [3] C. Martin, S. Chase, T. Nguyen, D. J. Hawaz, J. Pope, and C. Labuschagne, "Bus Protection Considerations for Various Bus Types," proceedings of the 40th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2013.
- [4] K. Hao, S. V. Achanta, J. Fowler, and D. Keckalo, "Apply a Wireless Sensor System to Enhance Distribution Protection Schemes," proceedings of the 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2017.

VIII. BIOGRAFIAS

Eric McCollum é supervisor de controle de energia e confiabilidade do sistema da Blue Ridge Electric Cooperative e é diretamente responsável pela coleta e mitigação de interrupções no sistema. Ele tem mais de 30 anos de experiência em sistemas de distribuição de energia elétrica. Eric trabalhou na coleta de dados de interrupções e na restauração real do sistema Blue Ridge e teve responsabilidades semelhantes nos sistemas irmãos na região Sudeste.

Kei Hao, P.E., recebeu o título de doutor em filosofia de engenharia elétrica da Universidade de Wisconsin-Madison, mestre em ciências de engenharia elétrica da Universidade de Wisconsin-Milwaukee e bacharelado em engenharia elétrica da Universidade da República, Uruguai. Ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2010 como engenheiro de automação e proteção. Atualmente, é engenheiro líder de pesquisa e desenvolvimento. Ele tem experiência em sistemas de controle e automação, sistemas de comunicação sem fio e proteção e automação de sistemas de potência. Ele é membro do IEEE e um engenheiro profissional registrado no estado da Califórnia.

Shankar V. Achanta recebeu seu título de mestre em ciências de engenharia elétrica pela Universidade Estadual do Arizona em 2002. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2002 como engenheiro de hardware, desenvolvendo produtos para concessionárias de energia. Atualmente possui 14 patentes pela SEL e é um inventor com várias outras patentes pendentes na área de sensores de distribuição, precisão temporal e comunicações sem fio. Atualmente ocupa o cargo de diretor de engenharia do grupo de controles e sensores de distribuição na SEL.

Jeremy Blair, P.E., ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro de aplicação em 2013. Anteriormente, trabalhou na Entergy Corporation como engenheiro de planejamento de distribuição com responsabilidades no planejamento da proteção, qualidade de energia e automação de sistemas de distribuição em Baton Rouge, LA. Ele também administrou o programa de transferência automática de carga e seccionalização da Entergy em sua área de concessão envolvendo quatro estados. Jeremy recebeu o grau de bacharel em engenharia elétrica pela Louisiana Tech University e grau de mestre em ciências de engenharia elétrica e da computação pelo Georgia Institute of Technology. É engenheiro licenciado no Estado de Louisiana.

David Keckalo recebeu o grau de bacharel em engenharia elétrica pela University of British Columbia em 1987. Ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 1998 e é um engenheiro líder em controles e sensores de distribuição. Em posições anteriores, trabalhou no projeto e desenvolvimento de muitos dos relés de proteção da SEL, incluindo literatura de produtos. Antes da SEL, David ocupou vários cargos na BC Hydro, concluindo 10 anos de serviço como engenheiro de distribuição senior. Possui uma patente nos EUA, é engenheiro registrado na Colúmbia Britânica e membro do IEEE.