

Aplicações de Relés Microprocessados na Distribuição

Karl Zimmerman
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
American Public Power Association's Engineering & Operations Workshop
Salt Lake City, Utah
25–28 de março de 1996

Traduzido para o português em julho de 2017

Aplicações de Relés Microprocessados na Distribuição

Karl Zimmerman
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
Belleville, IL USA

RESUMO

Avanços na tecnologia usando microprocessadores têm resultado em muitas melhorias na proteção da distribuição: custos menores de instalação e manutenção, melhor confiabilidade, proteção e controle aprimorados, e restabelecimento mais rápido das interrupções.

Os relés microprocessados na distribuição proporcionam melhorias técnicas e economias no custo sob vários aspectos. Uma das melhorias é o uso de lógica programável para reduzir e simplificar a fiação. Os relés também fornecem proteção para faltas na barra, falha de disjuntor, e detecção do rompimento de fusível no lado de alta do transformador, sem nenhum ou com um custo mínimo adicional. Os relés têm funções de medição que reduzem ou eliminam a necessidade de medidores e transdutores no painel e fornecem informações de eventos remotos e da localização da falta para ajudar os operadores no restabelecimento do serviço de eletricidade. Finalmente, os relés microprocessados reduzem os custos de manutenção fornecendo a função de auto-teste e uma alta confiabilidade.

INTRODUÇÃO

Os relés microprocessados na distribuição contribuem para a confiabilidade melhorada e custos reduzidos nos sistemas elétricos de potência. Os relés microprocessados, também chamados relés digitais, têm um registro histórico comprovado de confiabilidade, com mais de 100.000 relés/ano de experiência no campo. Os relés microprocessados proporcionam melhorias técnicas e economias no custo sob vários aspectos:

- Os relés usam lógica programável para reduzir e simplificar a fiação.
- Os relés fornecem proteção para faltas na barra, falha de disjuntor, e detecção de rompimento de fusível no lado de alta do transformador, sem nenhum ou com um custo mínimo adicional.
- Os relés têm funções de medição para reduzir ou eliminar a necessidade de medidores e transdutores no painel.
- Os relés reduzem o custo de manutenção fornecendo as funções de auto-teste e alta confiabilidade.
- Os relés fornecem informações de eventos remotos e da localização da falta para ajudar os operadores no restabelecimento do serviço de eletricidade.

Nesse *paper*, nós mostramos muitos exemplos de como essas melhorias técnicas e economias no custo são evidentes.

USAR RELÉS MICROPROCESSADOS REDUZ E SIMPLIFICA A FIAÇÃO

Muitos relés microprocessados têm características que, quando implementadas, reduzem e simplificam a fiação e as conexões de uma instalação. Nós vamos mostrar três exemplos disso:

- Como utilizar uma lógica programável para implementar um esquema “fuse-saving” (evitar a queima de fusível) num alimentador da distribuição.

- Como utilizar uma lógica programável e entradas de controle para possibilitar que uma proteção de barras rápida substitua um esquema de proteção diferencial de corrente.
- Como simplificar as conexões dos TC's para a proteção diferencial de transformador.

Usando Lógica Programável para Implementar um Esquema “Fuse-Saving”

Num esquema “fuse-saving” característico, nós aplicamos relés de sobrecorrente temporizado (51) e de sobrecorrente instantâneo (50) com religamento automático no disjuntor (F), para coordenar com o fusível à sua frente (F1). Para uma falta além do fusível F1, o conceito é que o relé de sobrecorrente instantâneo abra o disjuntor de maneira que a falta seja eliminada antes que o fusível comece a fusão. Então, nós religamos automaticamente o disjuntor F. Se a falta for transitória, nós evitamos uma interrupção prolongada aos consumidores atendidos pelo ramal F1. Entretanto, todos os consumidores atendidos pelo alimentador terão uma interrupção momentânea. Se a falta for permanente, nós bloqueamos o sobrecorrente instantâneo de F, e permitimos que o fusível elimine a falta. As Figuras 1.a e 1.b mostram um diagrama unifilar e as curvas de coordenação do sobrecorrente temporizado para um esquema “fuse-saving”.

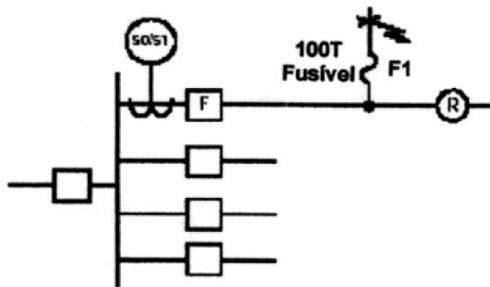


Figura 1a: Unifilar do Alimentador da Distribuição

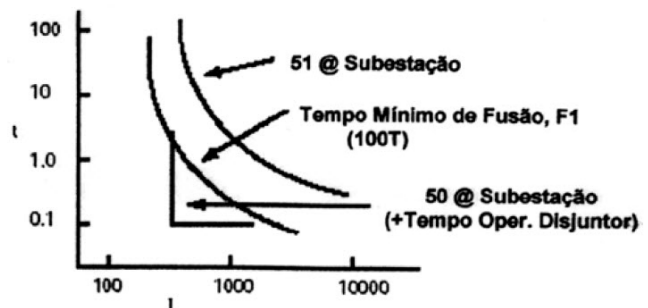


Figura 1b: Curvas do Sobrecorrente Temporizado para o Esquema “Fuse-Saving”

Vamos supor que nós estamos utilizando quatro relés de sobrecorrente monofásicos com elementos temporizados (51) e instantâneos (50). Nas conexões do circuito de controle DC, nós temos que colocar em paralelo todos os elementos 51, e todos os elementos 50. Então, nós usamos um contato de um relé de religamento separado (INST BLOCK) para bloquear os elementos instantâneos após o primeiro trip.

Usando um relé microprocessado, nós podemos programar essas funções internamente. Suponhamos que nós queremos que os elementos de sobrecorrente temporizados de fase e de terra (**51, 51N**) abram diretamente e os elementos instantâneos de fase e de terra (**50, 50N**) abram somente na primeira tentativa. Se nós usarmos os símbolos “Boolean” E (*) e OU (+), nós podemos programar as condições de TRIP como segue:

$$\text{TRIP} = 51 + 51N + (50 + 50N) * (\text{somente } 1^{\circ} \text{ tentativa})$$

Logo, a programação do relé permite o trip para o sobrecorrente temporizado de fase ou de terra. Também, a programação do relé permite o trip para (instantâneo de terra ou de fase) E (somente 1ª tentativa). Se a falta ocorre no alimentador, o relé abre o disjuntor instantaneamente na primeira tentativa para “salvar” o fusível de operar. O relé então bloqueia os sobrecorrentes instantâneos (50, 50N) nos trips subsequentes para permitir que o fusível atue. As Figuras 2.a e 2.b mostram as conexões do circuito de controle usando proteções tradicionais e proteções microprocessadas com lógica programável.

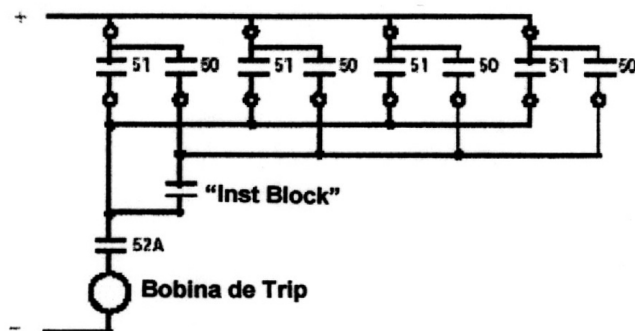


Figura 2a: Circuito de Trip Usando Proteções Convencionais

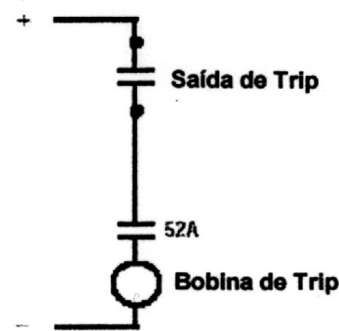


Figura 2b: Usando Relé Microprocessado

Usando lógica programável, nós precisamos somente de um contato de saída, reduzindo significativamente a fiação e simplificando o circuito de controle.

Usando Lógica Programável e Entradas de Controle para Prover uma Proteção de Barras Rápida

Muitas empresas estão utilizando relés de sobrecorrente microprocessados no lugar de relés diferenciais de corrente para prover uma proteção de barras rápida. Em muitos casos, as empresas não utilizam proteção diferencial de barras devido ao custo elevado da instalação dos TC's nos disjuntores e da profusão da fiação dos TC's.

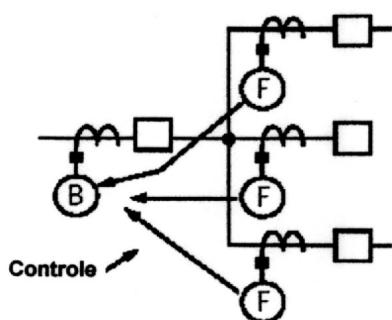


Figura 3a: Esquema de Trip Rápido na Barra

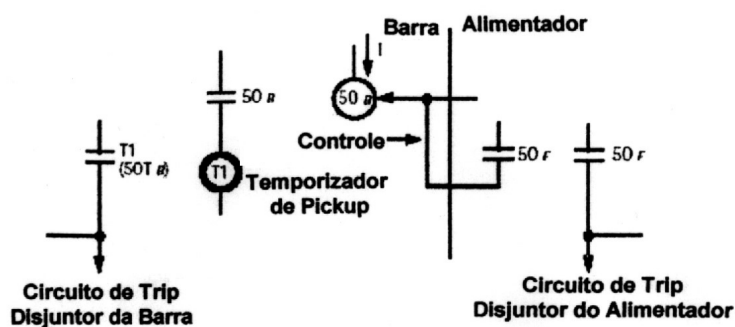


Figura 3b: Implementação do Controle DC

As Figuras 3.a e 3.b mostram a proteção de barras rápida. Os relés de sobrecorrente instantâneos instalados nos disjuntores dos alimentadores (50F) fornecem as entradas de controle para um relé de sobrecorrente instantâneo acrescido de uma pequena temporização, instalado no lado de baixa do disjuntor do transformador ou da chave (50B, T1). Se qualquer um dos relés dos alimentadores (F) atua, ele dá trip no seu respectivo disjuntor e bloqueia o relé de retaguarda (B). Entretanto, se a falta

estiver na barra, nenhum dos relés dos alimentadores opera, e o relé de retaguarda dá trip na barra quase instantaneamente. Uma empresa aplicou com sucesso esse esquema com uma temporização de 2 ciclos (pickup do temporizador T1) para faltas na barra [1].

Simplificando as Conexões dos TC's do Diferencial do Transformador

Em transformadores de potência maiores do que 10 MVA, a maioria das empresas utiliza relés diferenciais no transformador. Com relés convencionais, quando qualquer enrolamento do transformador está conectado em delta, você tem que conectar os TC's em estrela, e vice-versa. Por exemplo, se um transformador está conectado em delta-estrela, você tem que conectar os TC's em estrela no lado delta do banco, e delta no lado estrela do banco. A Figura 4 mostra uma conexão típica.

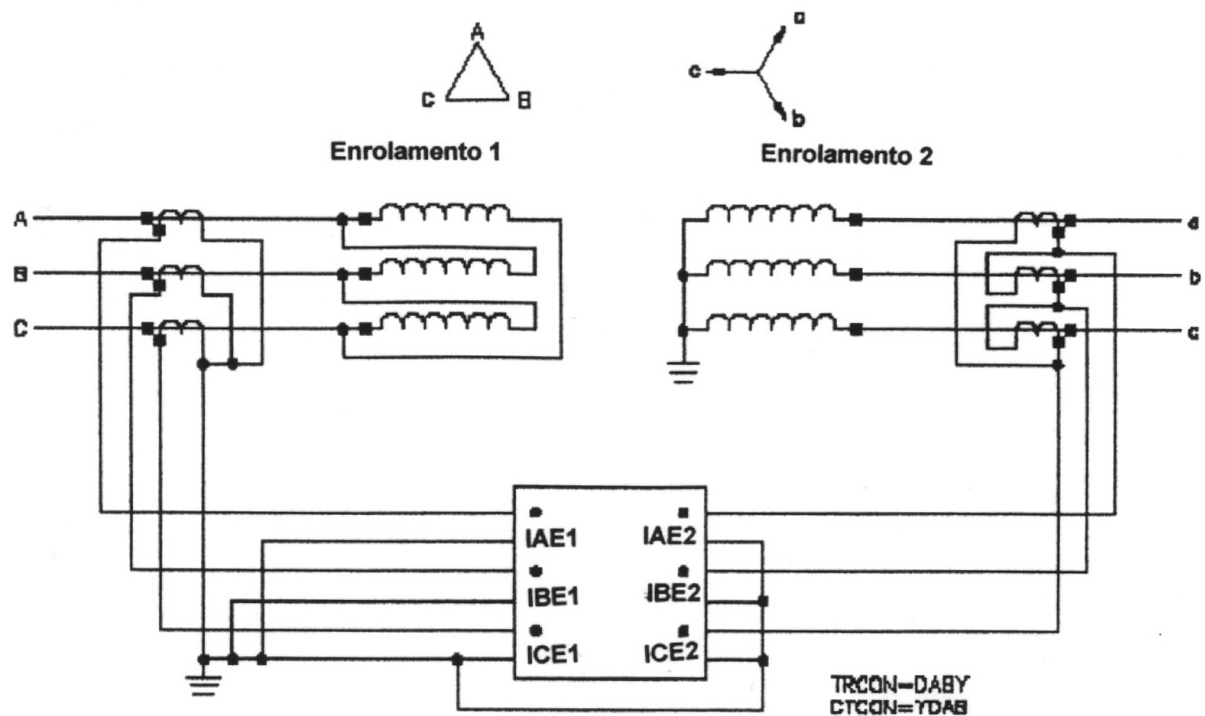


Figura 4: Transformador Delta-Estrela com TC's Conectados em Estrela-Delta

Os relés diferenciais de transformador microprocessados podem “fazer” o delta internamente. Dessa forma, você pode conectar os TC's em estrela em ambos os lados do banco, independente da conexão do banco de transformador. Além disso, os relés microprocessados podem proporcionar facilidade nas verificações da magnitude de corrente e do ângulo, para assegurar que as conexões estejam corretas.

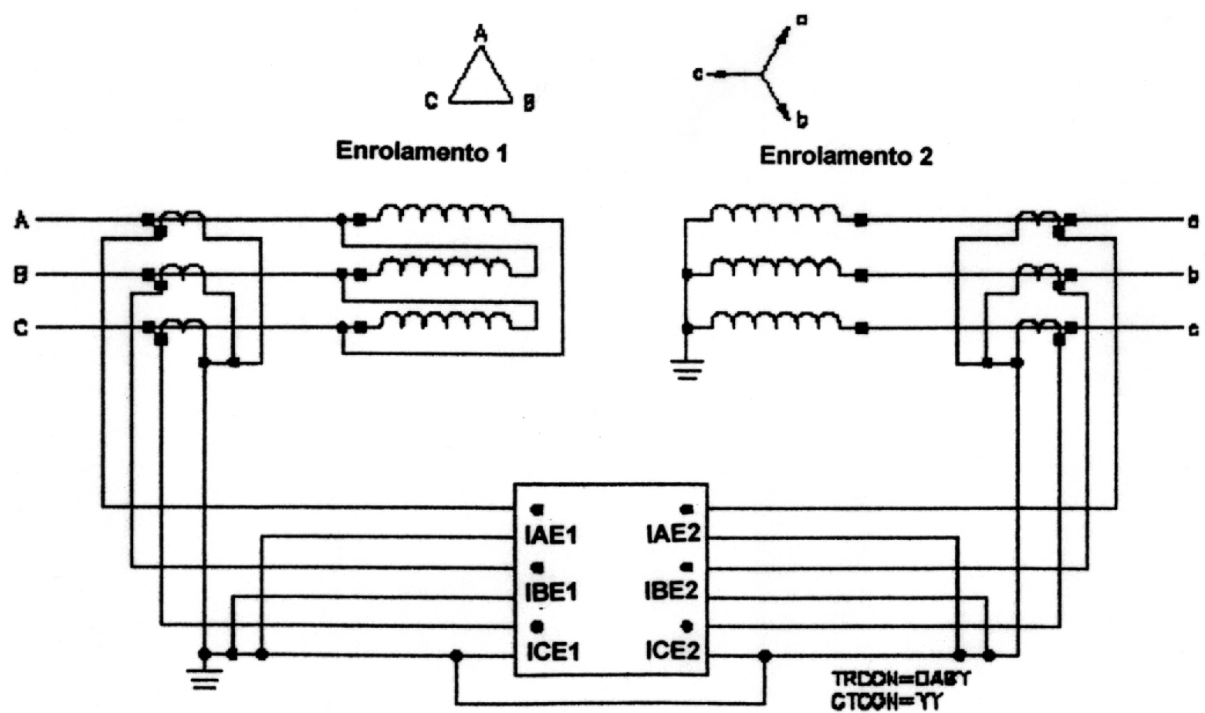


Figura 5: Transformador Delta-Estrela com TC's Conectados em Estrela-Estrela

Isso fornece duas vantagens:

- As aplicações de transformadores estrela-delta não mais exigem TC's dedicados. Nós podemos utilizar os TC's do diferencial do transformador para outras funções de proteção de sobrecorrente ou de medição.
- Utilizar TC's conectados em estrela elimina os erros comuns de ligação que frequentemente ocorrem quando da conexão em delta.

CONTROLE E PROTEÇÃO APRIMORADOS PARA PROBLEMAS COMUNS DA DISTRIBUIÇÃO

Proteção de Retaguarda (Backup)

Uma preocupação comum quando da utilização de relés microprocessados é a proteção de retaguarda. E se um relé falhar? Você tem “todos os ovos na mesma cesta”?

Aqui está um exemplo de como numerosas empresas tratam esse assunto. Um contato de alarme de cada um dos relés dos alimentadores é conectado para permitir que o relé de retaguarda dê trip diretamente no disjuntor do alimentador alarmado. Ao mesmo tempo, os ajustes aplicados no relé de retaguarda podem ser trocados para prover uma sensibilidade adicional de forma a permitir que o mesmo proteja adequadamente o alimentador alarmado, sem sacrificar a coordenação com os outros relés dos alimentadores.

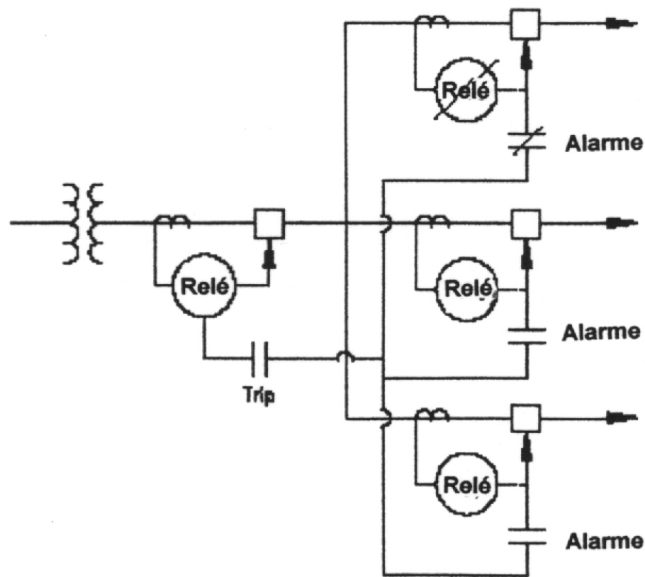


Figura 6: Melhorando a Proteção de Retaguarda

Se um relé de alimentador falhar, o seu contato de alarme fecha. Nós conectamos o contato de alarme em série com a saída de trip do relé de retaguarda, o qual, quando atuado, dá trip no disjuntor do alimentador. Se a empresa utilizar um relé de sobrecorrente no lado de baixa do transformador, não existe qualquer custo adicional, exceto pela fiação do controle do circuito de trip.

Proteção de Falha de Disjuntor

Muitos relés microprocessados para a distribuição são equipados com temporizadores internos que, em conjunto com a condição de trip do relé, podem ser usados para prover uma proteção de falha de disjuntor.

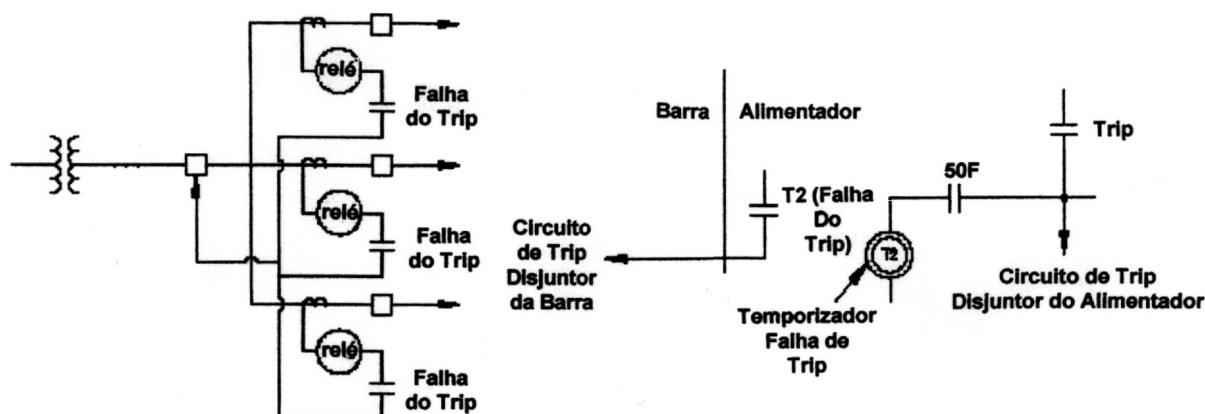


Figura 7: Proteção de Falha de Disjuntor

Alterando a Proteção em Função de Dia/Data/Hora

Empresas utilitárias podem querer instalar “fuse-saving” ou outras proteções sensíveis, porém elas têm também que evitar ou reduzir as operações não desejadas durante o período em que consumidores críticos estiverem em operação. Os relés microprocessados permitem que a empresa troque os ajustes e a lógica da proteção em função da hora do dia e do dia da semana.

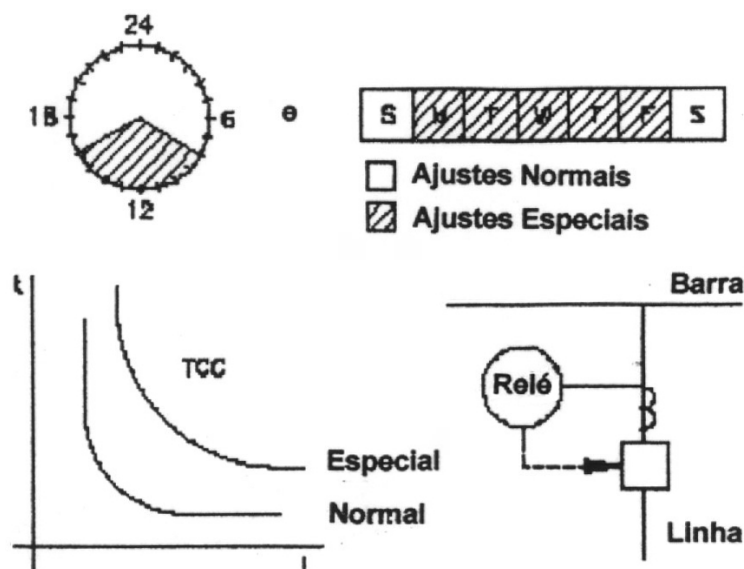


Figura 8: Alterando a Proteção em Função da Hora do Dia e do Dia da Semana

Alterando a Proteção em Função das Condições do Sistema

Os requisitos de proteção podem mudar com a carga e com a configuração do sistema. Os esquemas de proteção convencionais devem acomodar a pior condição de operação do sistema, mantendo a sensibilidade e/ou a coordenação sob condições normais. Uma melhoria para a proteção da distribuição pode ser a troca dos ajustes dos relés da distribuição em cada relé digital do alimentador quando a demanda da corrente de fase ou da corrente de neutro exceder os níveis especificados. Os ajustes originais são altamente sensíveis. O novo ajuste tem os valores de sobrecorrente de fase e residual menos sensíveis, os quais toleram um carregamento maior porém têm a sensibilidade reduzida, embora adequada. Os ajustes dos relés em todos os circuitos são alterados para um terceiro nível quando qualquer um dos relés da distribuição atua. O terceiro nível de ajustes tem uma temporização maior para tolerar o valor de “inrush” devido à partida a frio (“cold load inrush”) que se segue a uma interrupção em qualquer um dos circuitos da distribuição. Quando todas as condições

retornam ao normal dentro de um tempo estabelecido, os relés digitais têm os seus ajustes alterados, retornando aos originais.

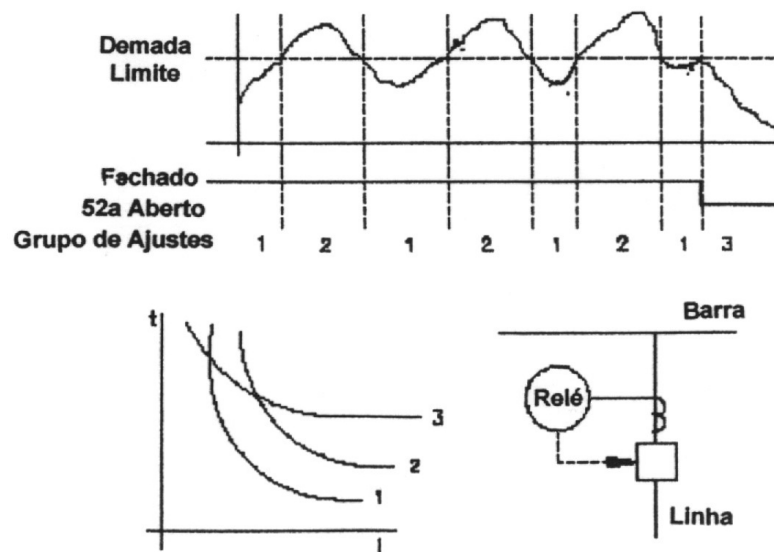


Figura 9: Alterando a Proteção em Função da Carga e do Estado do Disjuntor

Detectando as Operações dos Fusíveis no Lado de Alta

Os bancos de transformadores da distribuição conectados em delta-estrela são frequentemente protegidos por fusíveis no lado de alta, como mostrado na Figura 10. Quando um fusível rompe, as tensões aplicadas ao banco de transformador e às cargas a ele conectadas são desequilibradas. A tensão desequilibrada provoca um valor elevado de corrente de sequência negativa que flui através da carga. Quando a carga consiste de motores de indução, estes podem sofrer danos se a corrente de sequência negativa estiver presente por muito tempo. É também importante evitar o trip se um fusível do TP do lado de baixa rompe.

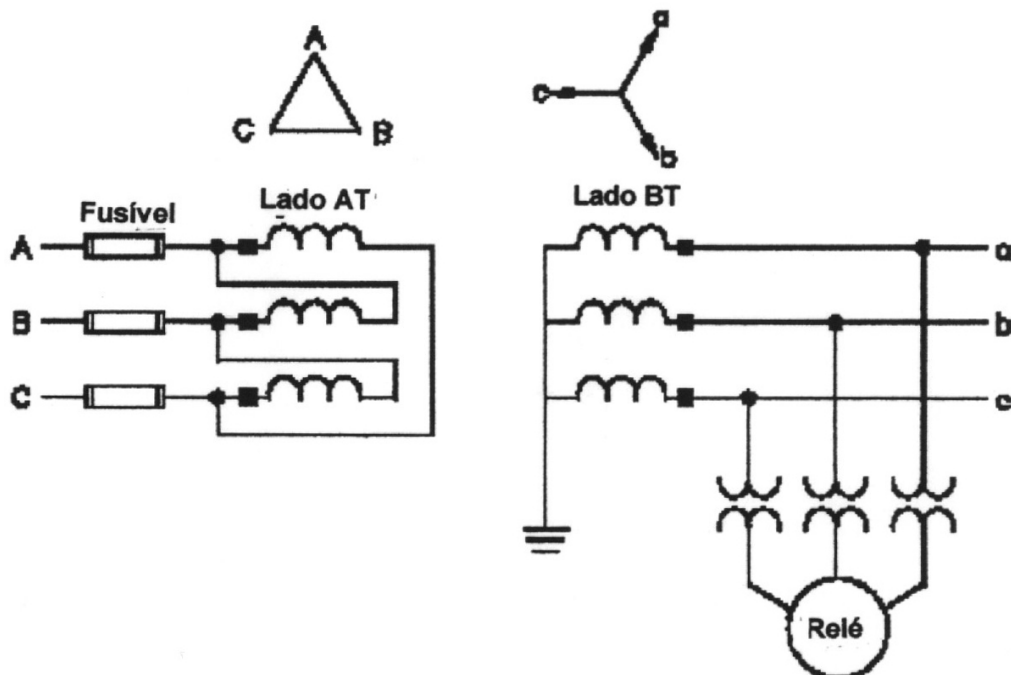


Figura 10: Detecção do Rompimento de Fusível no Lado de Alta

Quando um fusível do lado de alta do transformador opera, as magnitudes de tensão fase-fase do lado de baixa diminuem. Uma das magnitudes de tensão fase-fase vai a zero (admitindo-se condições de carga equilibradas), e as duas remanescentes reduzem para 0,87 por unidade da tensão nominal. Se dois fusíveis do lado de alta operam, todas as tensões fase-fase do lado de baixa vão a zero.

Se um fusível do secundário do TP rompe enquanto o banco de transformador está operando normalmente, duas das tensões fase-fase fornecidas ao relé diminuem para 0,58 por unidade da tensão nominal. Se dois fusíveis do secundário do TP operam, uma das tensões fase-fase medida pelo relé vai a zero, enquanto as outras duas diminuem para 0,58 por unidade.

Para usar a lógica de subtensão nessa aplicação, faça os seguintes cálculos dos ajustes para o relé:

$$27L = 0,40 \cdot V_{nom}$$

$$27H = 0,72 \cdot V_{nom}$$

$$V_{nom} = \text{Fase Nominal} - \text{Tensão Fase, } V \text{ secundária}$$

Uma lógica interna ao relé estabelece a condição para subtensão, elemento **27**, onde:

$$27 = (\text{Qualquer tensão fase-fase menor do que } 0,4 \text{ pu}) * (\text{Qualquer tensão fase-fase maior do que } 0,72 \text{ pu})$$

$$(*) = E$$

Se um fusível do transformador opera, uma tensão fase-fase se aproxima de zero (satisfazendo a porção da esquerda da equação acima), e as tensões fase-fase remanescentes permanecem acima de 0,72 por unidade (satisfazendo a porção da direita da equação). Se um ou mais fusíveis do TP operam, as tensões fase-fase caem abaixo do limite de 0,72 por unidade, e a equação **27** não é satisfeita.

Coordenação Com Outros Dispositivos

Os relés microprocessados na distribuição podem ser coordenados facilmente com outros dispositivos de sobrecorrente. As características dos relés são usualmente definidas por equações matemáticas. Essas equações modelam as características elétricas e físicas. Nós podemos ajustar os relés microprocessados para emular as características de reset do disco de indução (temporizado) ou de relés de estado sólido com reset instantâneo. Uma nova norma do IEEE define as equações para as curvas inversa, muito inversa, moderadamente inversa, e extremamente inversa [4].

Uma vez que as funções dos elementos de sobrecorrente e de religamento estão usualmente incluídas no mesmo pacote de hardware, nós podemos também usar essas funções para melhorar a coordenação. Além do esquema “fuse-saving” descrito anteriormente, nós podemos também coordenar com os religadores das linhas localizadas à frente.

Se a temporização de reset (tempo de guarda) de um relé de religamento tradicional é menor do que o tempo de atuação (trip) de um relé de sobrecorrente, para uma falta com baixa corrente de contribuição, pode ocorrer o seguinte. Uma falta com baixa corrente de contribuição ocorre, fazendo com que o relé de sobrecorrente seja sensibilizado com a falta, porém abra o disjuntor após uma certa temporização. Então, o relé de religamento fecha o disjuntor e inicia a contagem do tempo de reset. Tendo em vista a persistência da falta, o relé de sobrecorrente é novamente sensibilizado e atua após uma certa temporização, abrindo novamente o disjuntor. Como o relé de religamento já resetou, ele nunca prossegue para a sua segunda tentativa de religamento, ou seja, o relé de religamento inicia todo o processo novamente. Alguns operadores de empresas reportaram que bloquearam disjuntores que religaram mais de dez vezes! Os relés microprocessados resolvem tal fato bloqueando automaticamente o religamento de um disjuntor sempre que o elemento de sobrecorrente se mantiver atuado (partido) por um certo tempo.

RELÉS MICROPROCESSADOS REDUZEM A MANUTENÇÃO

Os relés microprocessados, também chamados relés digitais, consistem tipicamente de um sistema de aquisição de dados em AC, um microprocessador, componentes de memória contendo os algoritmos de relés, contatos de entradas lógicas para controlar o relé e contatos de saída para controle de outros equipamentos. A Figura 11 mostra um diagrama de blocos simples de hardware.



Figura 11: Diagrama de Blocos Funcional de um Relé Digital

As entradas de tensão e corrente são isoladas, filtradas, e amostradas. Então elas são colocadas em escala e convertidas em quantidades digitais para o microprocessador. O programa do microprocessador filtra os dados, cria as características do relé e controla as saídas do relé.

A maioria dos relés digitais tem funções automáticas de auto-teste que verificam a correta operação do relé. Virtualmente tudo no relé é submetido ao auto-teste exceto as entradas analógicas e os circuitos dos contatos de entrada e saída. Se o auto-teste detecta uma condição anormal, ele pode fechar um contato de saída, enviar uma mensagem, ou fornecer alguma outra indicação de falha. Nós podemos conectar a saída do alarme do auto-teste ao sistema SCADA RTU (Supervisory Control And Data Acquisition Remote Terminal Unit) ou outro ponto de monitoração para que rapidamente seja enviado um técnico para reparar ou substituir o dispositivo. Logo, quando nós testamos um relé digital, nós precisamos somente testar o que é necessário. Isto usualmente consiste em fazer uma verificação das medições através de uma porta de comunicação, verificando se as saídas estão operando.

Se nós comparamos isto a um esquema tradicional, aqui está o que nós podemos encontrar:

- Para um alimentador típico com quatro relés de sobrecorrente eletromecânicos, se levar aproximadamente uma hora para testar cada relé, serão necessárias quatro horas para testar os relés do alimentador.
- Para uma subestação com quatro alimentadores, levaria aproximadamente dois dias para testar os relés.
- Um típico relé microprocessado, com simples verificações das medições das tensões e correntes de entrada e verificações das saídas de trip, leva menos do que uma hora para testar.
- Para uma subestação com quatro alimentadores, um técnico pode testar todos os relés da barra em quatro horas, sobrando tempo para outros testes importantes.

Um importante estudo [5] apresenta essa filosofia de testes de relés. O estudo mostra que os relés digitais equipados com auto-testes eficazes possibilitam uma melhor disponibilidade do que os relés (eletromecânicos) tradicionais. Além disso, os relés digitais estão mais disponíveis para proteger alimentadores considerando-se que eles não são retirados de serviço para os testes de manutenção de rotina, a menos que uma falha seja detectada no auto-teste. Colocando de outra maneira, nós reduzimos a confiabilidade quando nós retiramos um relé de serviço para testes de rotina.

RELÉS MICROPROCESSADOS FORNECEM DADOS PARA TODA A EMPRESA

Os relés microprocessados fornecem dados de medição, eventos, informação de estados e localização de faltas, além das funções de proteção. Estas informações são acessadas através de portas de comunicação no relé, telas locais, ou outro interface homem-máquina (IHM). Muitos indivíduos dentro da organização de uma empresa utilizam as informações. Por exemplo, os operadores podem precisar conhecer os eventos e a localização da falta para uma determinada perturbação elétrica. Os

engenheiros de planejamento podem querer analisar os dados de demanda de carga coletados do relé do alimentador. Os engenheiros de proteção podem precisar analisar o registro de eventos para explicar uma falta em uma linha que atende uma carga crítica de um consumidor. A Figura 12 mostra uma perspectiva de um “centro de relés de proteção” (“relaycentric”) de uma empresa.



Figura 12: Interface do Relé com a Empresa

Interface da Medição com o Sistema SCADA/RTU

As informações em tempo real dos relés digitais são particularmente importantes para a equipe de operação do sistema. Os dados em tempo real das tensões, correntes, watt, e VAR são necessários para operar o sistema. O tipo da falta e a localização da falta, indisponíveis até o advento dos relés digitais para localização de faltas, são agora requeridos pela maioria dos centros de operação e despacho para conduzir o restabelecimento do sistema.

Os sistemas convencionais SCADA RTUs aceitam somente entradas analógicas (corrente ou tensão em escala) e entradas dos estados (contatos secos ou contatos com tensão). Frequentemente é menos dispendioso utilizar um conversor digital para analógico, de forma que os operadores tenham acesso aos dados do relé, do que instalar transdutores separados e fiação adicional.

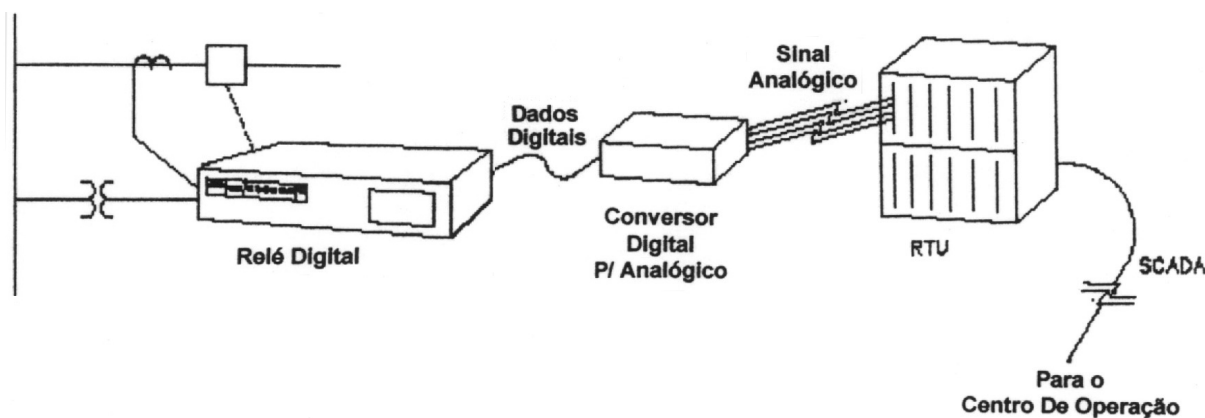


Figura 13: Interface entre Relé Digital e RTU (Unidade Terminal Remota) Analógica

Muitas RTUs modernas operam com princípios digitais que possibilitam a aquisição direta dos dados digitais, permitindo uma interface direta entre a RTU e os relés digitais. Embora a questão dos protocolos de comunicação possa complicar o uso dessa interface, muitos vendedores de RTUs desenvolveram métodos simples e eficazes para estabelecer essa interface de comunicação. Manter os dados dos relés digitais no formato digital tem as vantagens óbvias de segurança, precisão garantida, e capacidade de manipulação dos dados, o que produz melhores resultados sob um menor custo. Existem ainda outras vantagens uma vez que mais dados estão disponíveis em um relé digital além dos dados básicos das medições e das faltas, incluindo eventos do relé, elementos do relé, dados de interrupção do disjuntor, histórico de eventos, *status* do auto-teste do relé, e ajustes.

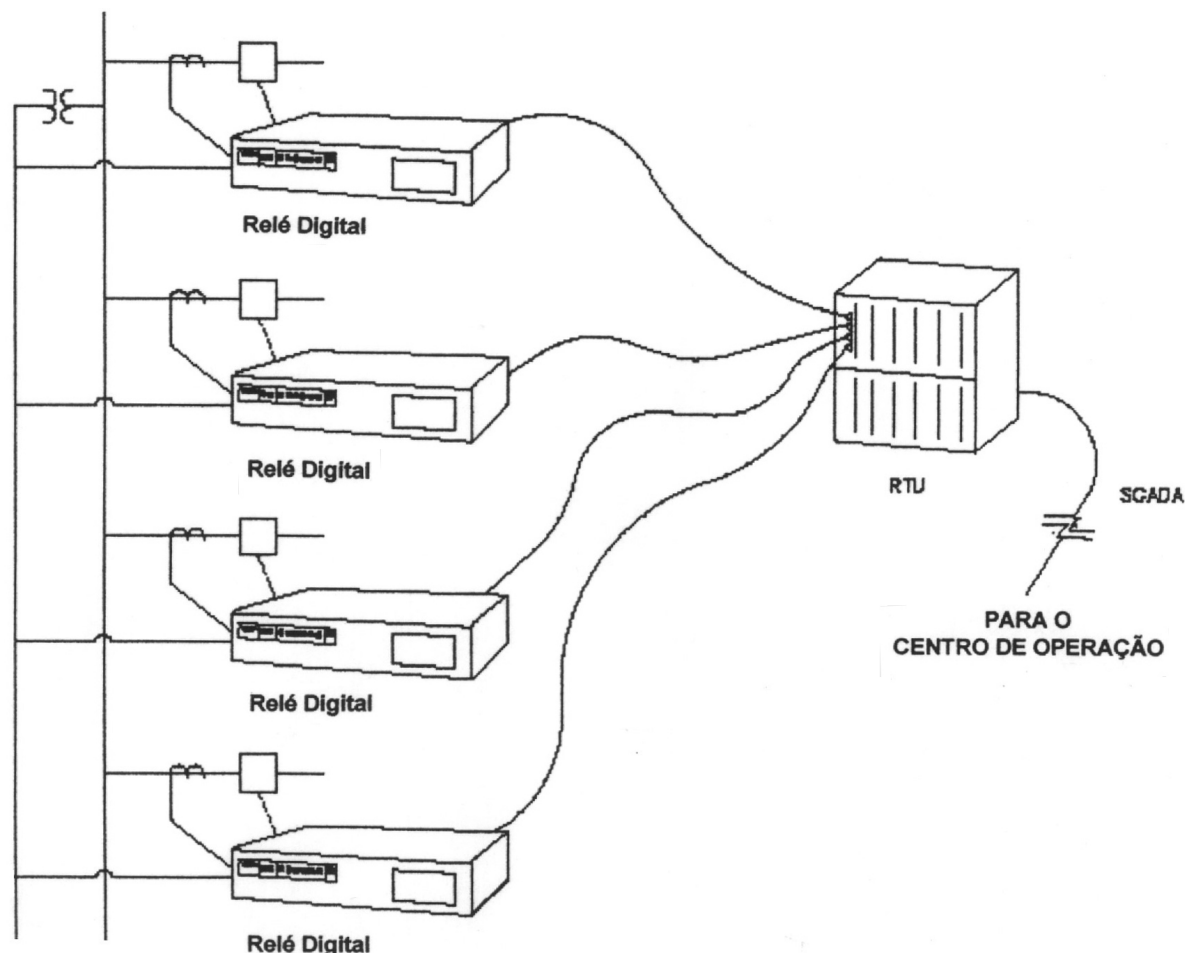


Figura 14: Interface da Comunicação entre Relés Digitais e RTU Digital com Várias Portas

Localizar Faltas

Embora a localização de faltas em alimentadores da distribuição seja precisa porém com limitações, a informação ainda assim é útil para seccionar ou até enviar a equipe de linha para reparos. Teoricamente, a linha tem a mesma bitola do condutor em todo o seu comprimento, é uma linha aérea, e não tem infeed de bancos de transformadores aterrados, capacitores, geradores, ou outras fontes. A Figura 15 mostra que os engenheiros, operadores, e a equipe de trabalho do consumidor podem acessar o relé remotamente através das comunicações via modem.

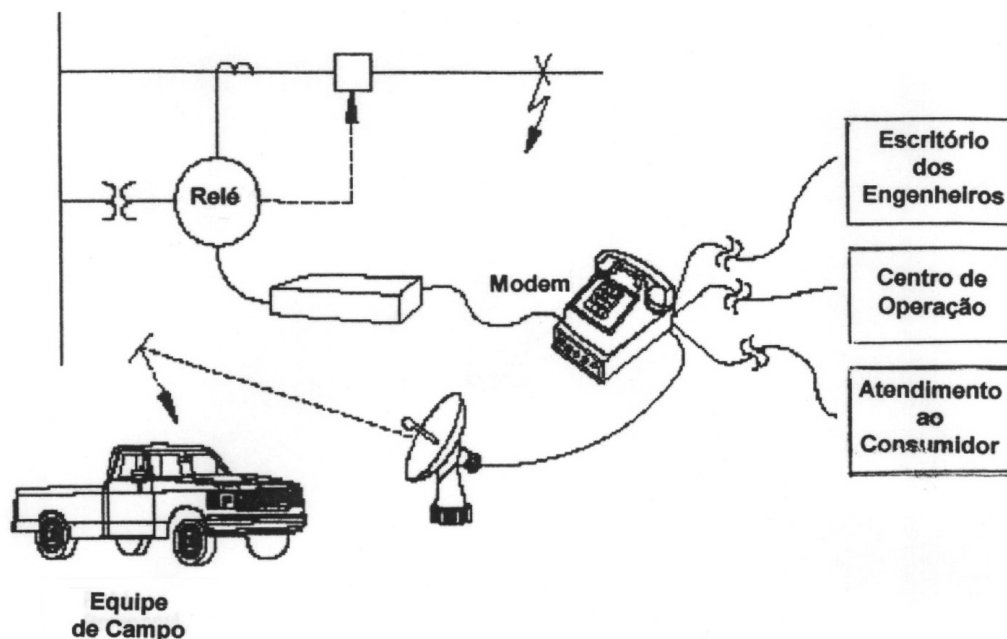


Figura 15: Acessando Remotamente um Relé para Dados de Faltas e de Eventos

CONCLUSÕES

Muitas empresas estão atualmente utilizando relés microprocessados em circuitos de distribuição. Uma delas atribui uma economia de \$40.000,00 nas suas subestações de 13 kV e economia de \$150.000,00 nas suas subestações de 34 kV, ao uso de relés microprocessados na distribuição [1].

Embora a tecnologia esteja continuamente evoluindo, os relés microprocessados não podem ser considerados “novos”. Relés de proteção têm sido produzidos desde o meio da década de 80 (mid-1980’s), com mais de 100.000 relés/ano de experiência. No futuro, nós esperamos ver mais inovações e melhorias que contribuam para uma maior confiabilidade e menor custo para os sistemas elétricos de potência.

REFERÊNCIAS

1. J. A. Schwenk, “Innovations in Distribution Substation Relay Protection at Philadelphia Electric Company,” 20th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, 19-21 de outubro, 1993.
2. Kenneth C. Behrendt, Michael J. Dood, “Substation Relay Data and Communication,” 22nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, 24-26 de outubro, 1995.
3. Guia de Aplicações SEL AG95-26, “Detecting High-Side Fuse Operations Using An SEL-251 Relay,” 9 de setembro, 1995.
4. IEEE Draft Standard, “IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays,” PC37-112, Preliminar 11, 27 de outubro, 1995.
5. E. O. Schweitzer, III, J. J. Kumm, M. S. Weber, e D. Hou, “Philosophies For Testing Protective Relays,” 20th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, 17-21 de outubro, 1993.