



SEL0354 - Proteção de Sistemas de Energia Elétrica
Prof. Mário Oleskovicz - colaborador

TÓPICOS

A proteção digital de elementos do sistema elétrico de potência

- Introdução
- Proteção digital de transformadores
- Proteção digital de geradores
- Proteção digital de motores
- Proteção digital de barramentos

A proteção digital de elementos do SEP

1 Introdução

- ▶ Filosofias de alguns dos algoritmos para proteção digital de elementos do SEP.
- ▶ A lógica diferencial percentual.
- ▶ Corrente de magnetização, sobre-excitação e saturação.
- ▶ **Aplicação digital para algumas das filosofias.**
- ▶ Uso de um processador para proteção abre espaço para a utilização de técnicas inteligentes.
- ▶ Sistema de proteção digital completamente integrado.

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

- ▶ Capacidade do transformador (10 MVA).
- ▶ Importância dentro do sistema de potência em questão.
- ▶ Escolha entre autotransformadores e transformadores.
- ▶ A presença de enrolamentos terciários.

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

- ▶ Operação diferencial: proteção de grandes transformadores de potência.
- ▶ Aquisição das correntes: **Transformadores de Corrente** (TC) - relação de transformação e efeitos de saturação.
- ▶ Condições normais de operação do transformador: **as correntes do lado primário e secundário serão aproximadamente iguais e a diferença após a passagem pelos TCs desprezível.**
- ▶ **Falta interna ao transformador**: desequilíbrio destes sinais

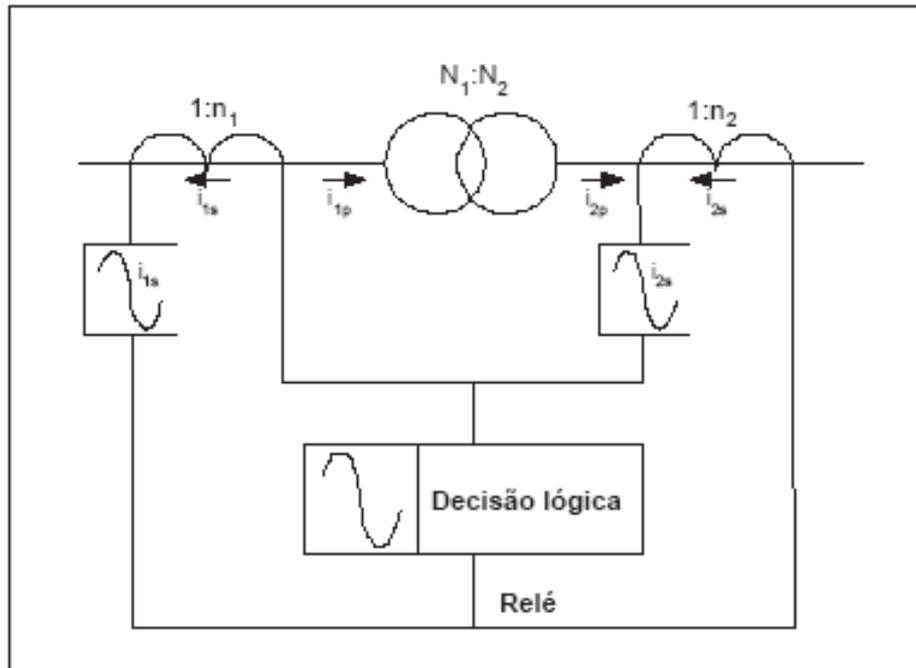
A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

- ▶ **Operação** do sistema de proteção de transformadores: **faltas internas ao transformador.**
- ▶ **Bloqueio**: situações de **faltas externas** ao transformador, **sobre-excitação** e nos casos de **energização** do mesmo (correntes de magnetização – *inrush*)

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores



Corrente efetiva na bobina **retenção**:

$$(I_{1s} + I_{2s})/2$$

Corrente efetiva na bobina **operação**:

$$(I_{1s} - I_{2s})$$

✓ Para uma **falta externa** (ou corrente de carga):

Operação: $(I_{1s} - I_{2s}) = 0 \rightarrow$ enfraquecido

Retenção: $(I_{1s} + I_{2s})/2 = I_{1s} = I_{2s} \rightarrow$ fortalecido

✓ Para uma **falta interna** : (I_2 torna-se negativo)

Operação : $(I_{1s} + I_{2s}) \rightarrow$ fortalecido

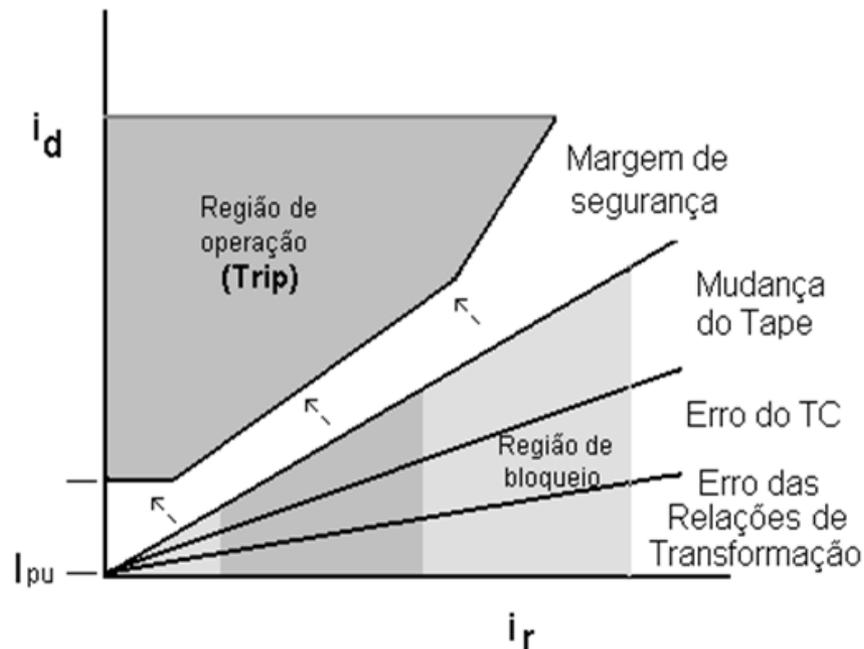
Retenção : $(I_{1s} - I_{2s})/2 \rightarrow$ enfraquecido

Má operação da proteção diferencial: disponibilidade de taps variáveis, má representação das correntes do transformador e pela saturação.

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

✓ **Percentagens ou inclinações:** a relação de transformação, erros dos TCs e mudanças nos *taps* do transformador.



➤ Proteção diferencial percentual: **satisfatória sob condições normais de operação** (propenso a **falsas operações** na presença dos componentes de segundo e quinto harmônico).

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

Surgimento de correntes diferenciais indesejadas:

- ▶ **Corrente de magnetização (corrente de inrush):** energização do transformador (componente harmônico de 2^a ordem).
- ▶ **Faltas externas e próximas ao transformador:** correntes com valores muito elevados (saturação do TC em um dos lados do transformador).
- ▶ **Remoção de faltas externas próximas ao transformador:** situação similar a de energização do transformador.
- ▶ **Sobre-excitação do transformador:** transformador submetido a um valor de tensão superior a sua tensão nominal (componentes harmônicos de 3^o e 5^o ordem).
- ▶ **Saturação de TCs:** para faltas externas ou pela componente assimétrica da corrente de falta.

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

O equacionamento da lógica diferencial

- ▶ $I_{D1} = I_{1s} - I_{2s}$ (Diferencial = Operação)
- ▶ $I_{R1} = (I_{1s} + I_{2s})/2$ **Frequência fundamental!** (Restrição = Retenção)
- ▶ $I_{R2} = I_{D2}$ **Segundo harmônico!**
- ▶ $I_{R5} = I_{D5}$ **Quinto harmônico!**

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

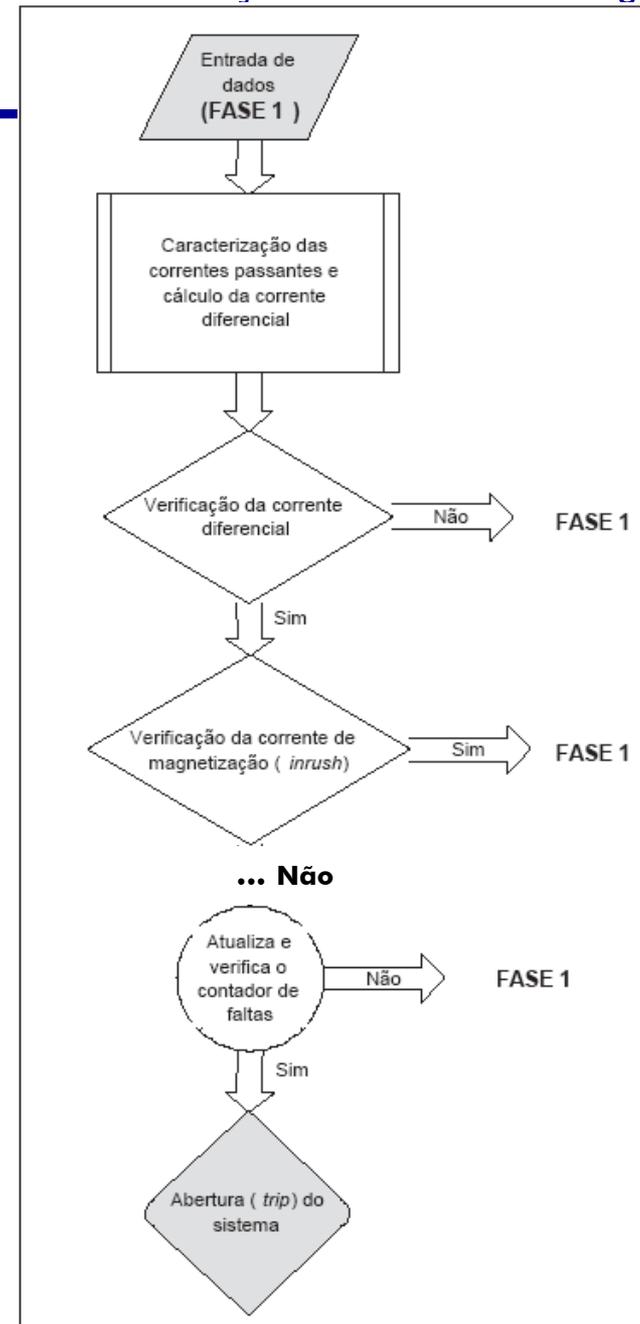
Verificação das restrições harmônicas

- ▶ **Se $I_{R2} > C_2 I_{D1}$ Situação de magnetização!**
- ▶ **Se $I_{R5} > C_5 I_{D1}$ Situação de sobre-excitação!**

2 A proteção digital de transformadores

Algoritmos aplicados à proteção de transformadores de potência (convencional).

Geralmente um sinal de *trip* instantâneo é enviado quando o valor do sinal diferencial excede o valor de 10 p.u. para um número pré-definido de amostras consecutivas.



A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

a) Compensação do defasamento de fases:

- ▶ **Transformador trifásico ligado por uma conexão do tipo estrela-triângulo:**

defasagem angular de 30 graus entre as correntes dos lados primário e secundário do transformador.

- ▶ **É desejável alguma compensação para se ajustar o defasamento entre as fases decorrentes do transformador a ser protegido.**

A proteção digital de elementos do SEP

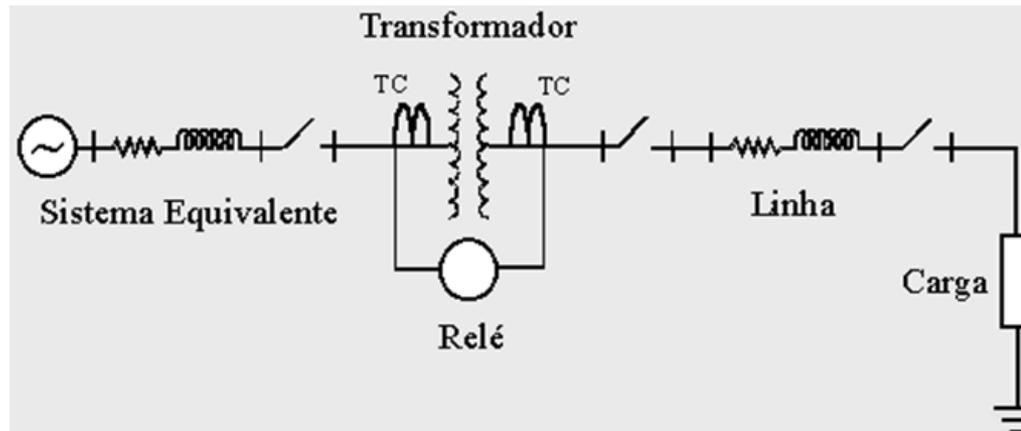
2 A proteção digital de transformadores

b) Restrição harmônica:

- ▶ **Correntes de magnetização:** 2º harmônico (valores acima de 15% com relação ao componente da frequência fundamental, podendo chegar até a 70 % da mesma).
- ▶ **Sobre-excitação do transformador:** transformador submetido a um valor de tensão superior a sua tensão nominal (distorções de 3º e 5º harmônicos - 35%).
- ▶ **Transformada Discreta de Fourier:** a análise espectral é um método para avaliação das frequências contidas dentro de uma série de N valores de dados amostrados na **frequência de resolução de T/N** , onde T é o intervalo amostral (período) e N o número de amostras.
- ▶ **Outras técnicas:** filtro de *Kalman*, método dos mínimos quadrados, técnicas de inteligência artificial, etc.

A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: o sistema elétrico



- ▶ Software ATP (*Alternative Transients Program*);
- ▶ Gerador: 30 MVA, 138 kV
- ▶ TC1: 200/5 A
- ▶ Transformador: 25 MVA, 138/13,8 kV (Δ -Y)
- ▶ TC2: 2000/5 A
- ▶ Linha de distribuição: 5 km
- ▶ Cargas: leve (1,25 MVA), média (10 MVA) e pesada (23,5 MVA)
- ▶ fp: 0,92 indutivo

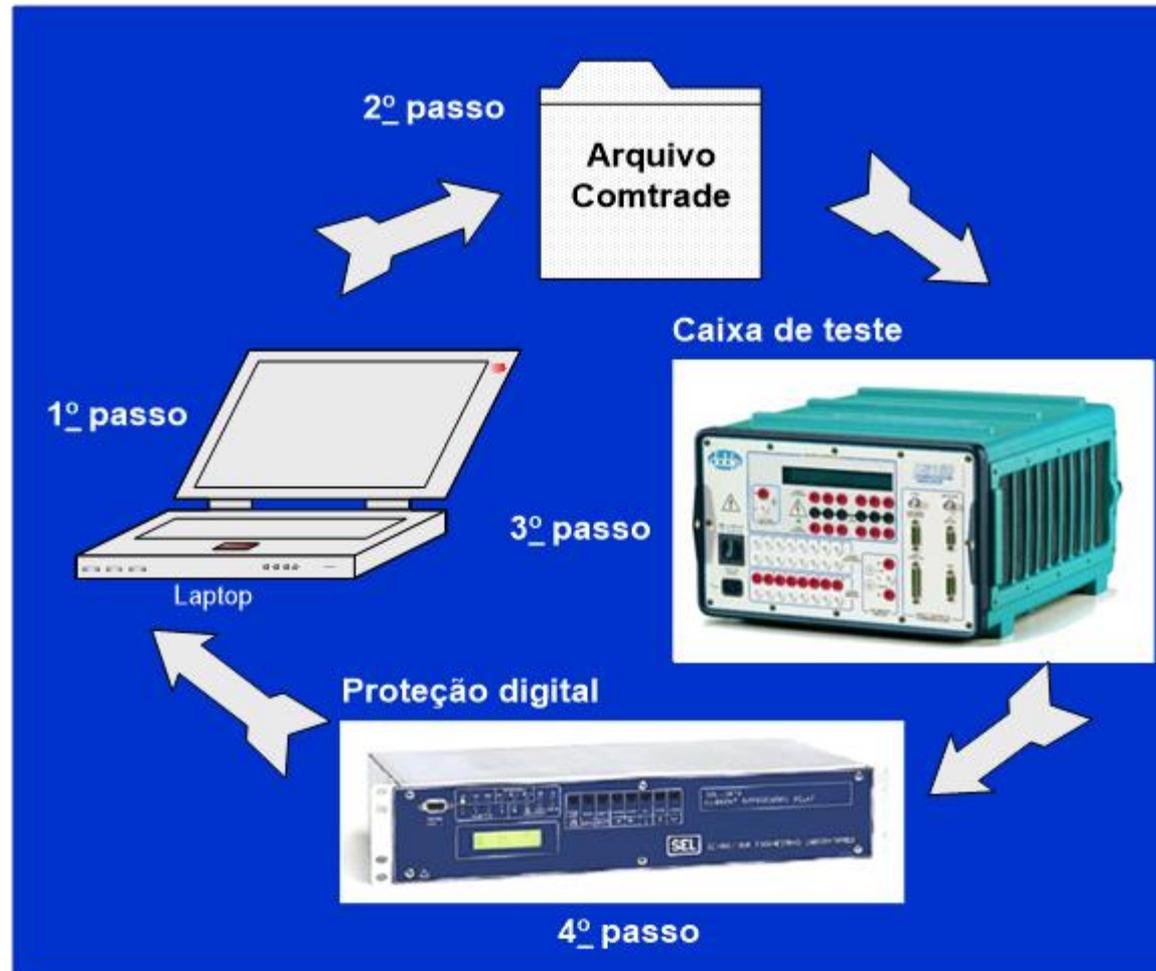
A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: faltas aplicadas

- ▶ Energização com aplicação de falta interna
- ▶ Faltas internas ao enrolamento primário (delta) e secundário (estrela) em 10%.
- ▶ Faltas externas na linha de distribuição
- ▶ Condição de sobre-excitação
- ▶ O relé digital foi ajustado com valores usuais normalmente encontrados em campo
 - Frequência de amostragem de 3.840 Hz (64 amostras/ciclo)
 - Registro dos dados: 15 ciclos (5 de pré e 10 de pós-falta)
 - Ângulo de inserção da falta: 0°

A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: metodologia aplicada



A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: nomenclatura

- 87O – Partida (pick-up) do elemento diferencial;
- 87R – Elemento diferencial com restrição;
- 87U – Elemento diferencial sem restrição (instantâneo);
- TRIPL – Comando de disparo (87R ou 87U);
- 87BL1,2,3 – Bloqueio da proteção diferencial por fase;
- 2HB1,2,3 – Bloqueio por 2º harmônico por fase;
- 4HBL – Bloqueio por 4º harmônico, comum;
- 5HB1,2,3 – Bloqueio por 5º harmônico por fase; e
- I32F1 – Corrente residual de neutro.

A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: oscilografias

A primeira linha vertical pontilhada representa a marcação do *trigger*, que indica o disparo (início) da oscilografia.

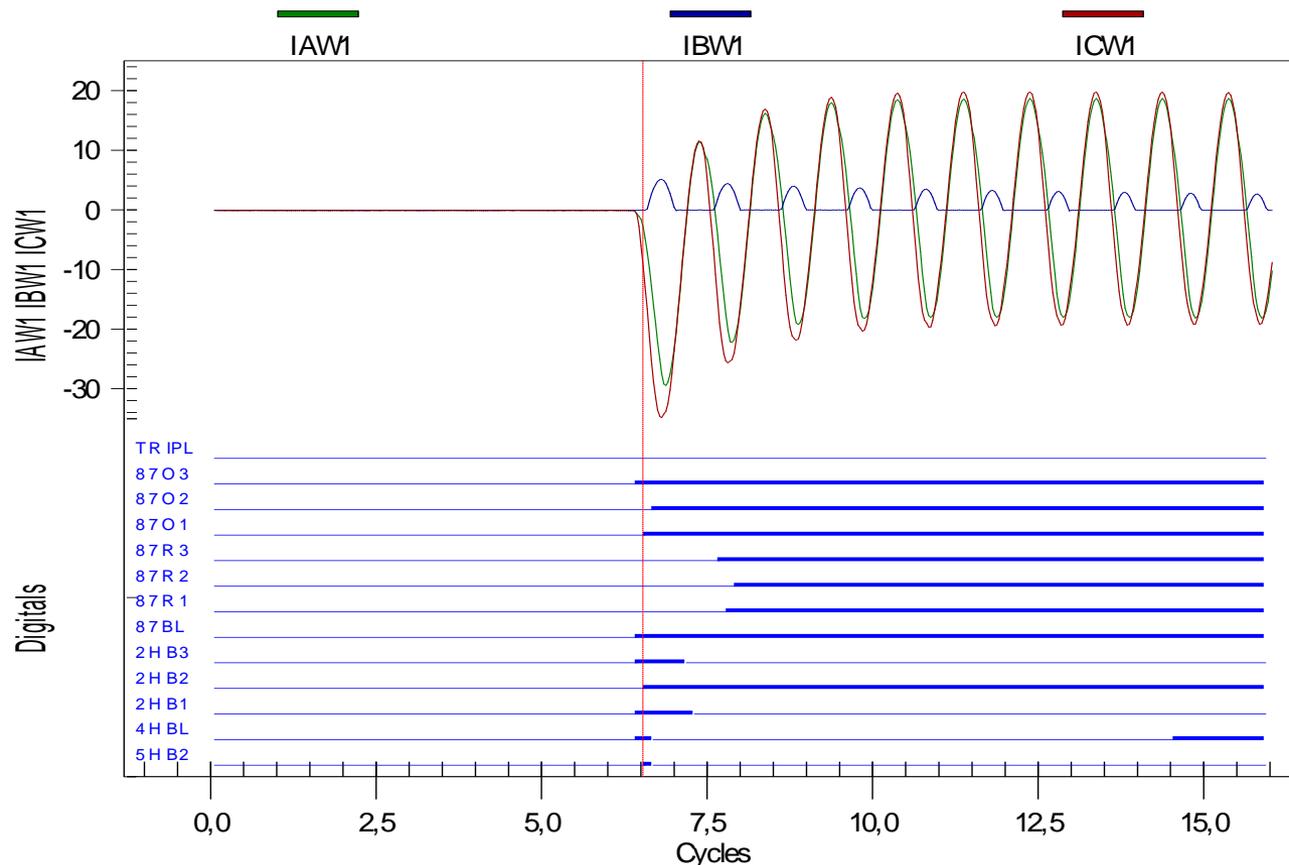
As formas de ondas IAW1, IBW1 e ICW1 ilustram os sinais de **corrente do lado de alta** e IAW2, IBW2 e ICW2 de **baixa** do transformador principal.

As linhas abaixo das formas de onda representam a lógica de operação do relé diferencial por meio de diferentes variáveis intrínsecas à lógica do relé.

As análises serão realizadas utilizando-se da habilitação ou não de funções disponibilizadas no relé comercial considerado.

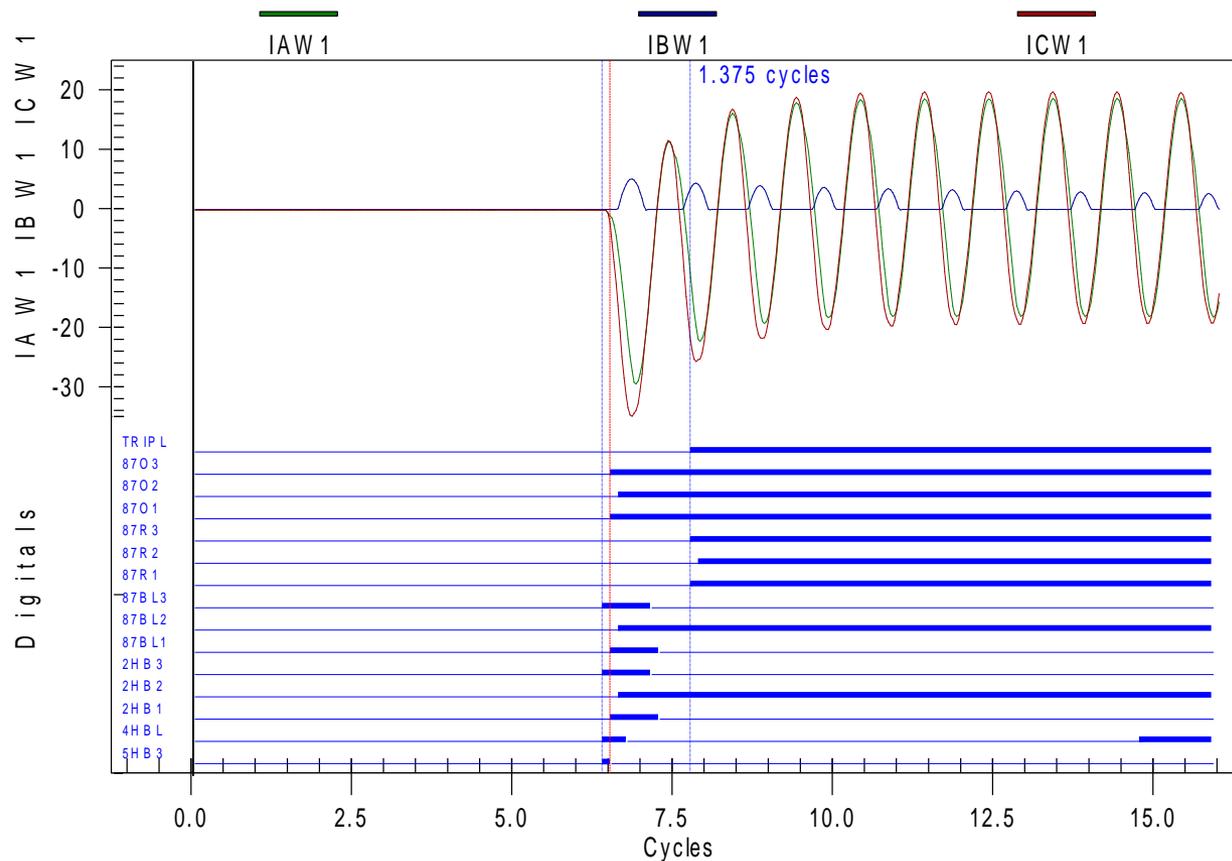
A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: energização com falta interna (função bloqueio comum por harmônicas habilitada). Houve um bloqueio de disparo não desejado!



A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: Energização com falta interna (função de bloqueio independente ou restrição por harmônicas habilitada).



A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: oscilografias

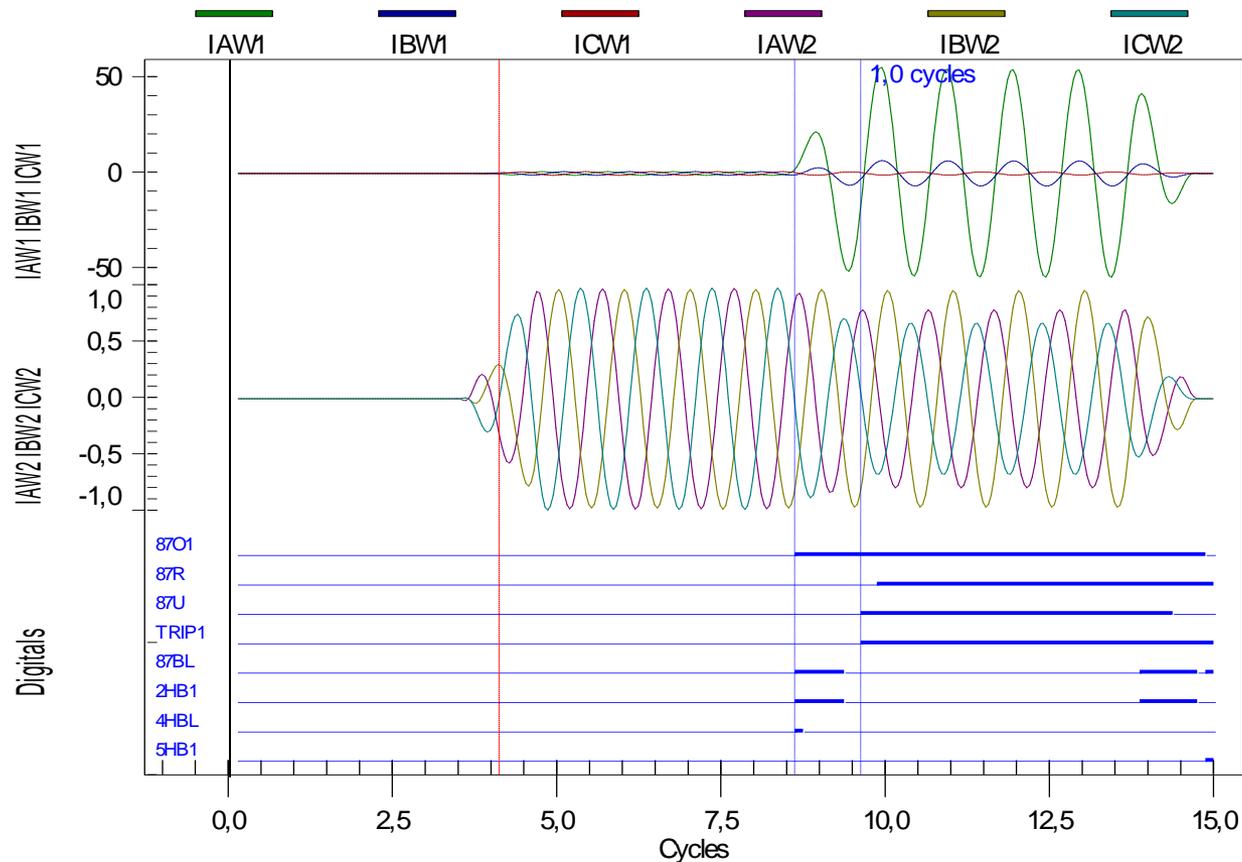
A diferença entre estas duas últimas funções, é que a **opção por restrição** confere uma maior segurança para o esquema de proteção, porém acarreta a um pequeno atraso na atuação.

Para o **caso de bloqueio comum**, o relé irá calcular as componentes harmônicas individualmente em cada fase e irá bloquear a atuação da função diferencial de todas as unidades (fases) caso o conteúdo harmônico medido em qualquer fase esteja acima do nível ajustado.

Já para a **função de bloqueio independente**, o relé irá calcular as componentes harmônicas em cada fase individualmente, porém o bloqueio será ativado somente para as fases em que o conteúdo harmônico medido estiver acima do nível ajustado.

A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: falta interna (10% Δ) e com carga média (Y) e função de bloqueio comum habilitada.



A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: falta interna (10% Δ) e com carga média (Y) e função de bloqueio comum habilitada.

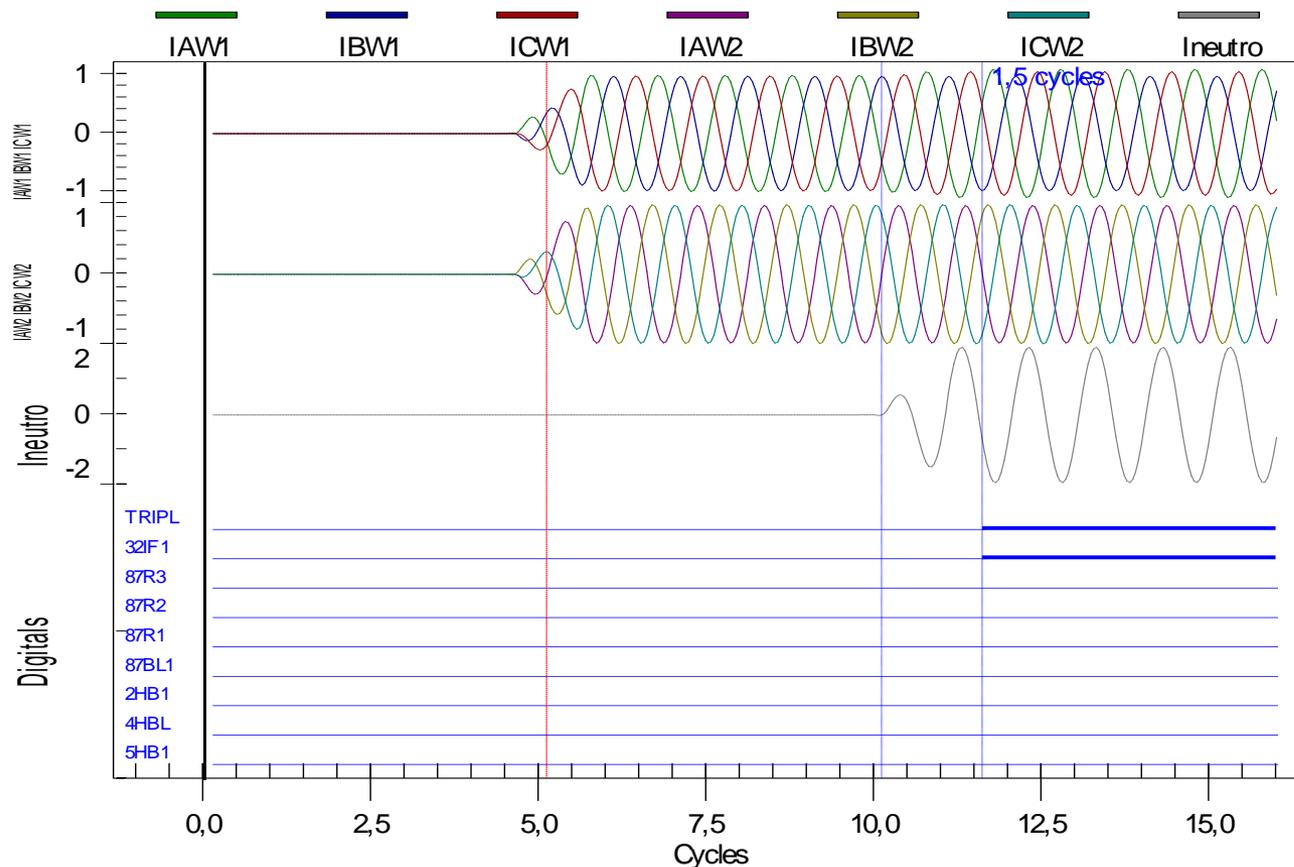
Evidencia-se a sensibilização do elemento da proteção diferencial (87O = 0,3 p.u.) logo no início do distúrbio, a qual habilita a operação com restrição (87R) e instantânea (87U).

Nota-se também no início do distúrbio o bloqueio da proteção diferencial (87BL) por 2ª harmônica (2HB1,2), em parte devido ao transitório inicial da falta.

Todavia, o relé emite o comando de disparo (TR IPL) pelo elemento instantâneo da proteção diferencial (87U), uma vez que a corrente de operação diferencial (IOP) excede o valor de ajuste do elemento instantâneo (U87P = 8,0 p.u.) parametrizado no relé, logo após o bloqueio não mais existir.

A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: falta interna (10% estrela) e com carga média (delta) com a função "REF" habilitada.



A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: falta interna (10% estrela) e com carga média (delta) com a função “REF” habilitada.

Na figura temos a oscilografia referente a uma situação de falta interna (fase-terra) no enrolamento secundário (estrela), fase A, a 10% do centro da estrela, com uma carga de 10 MVA conectada em delta. Nota-se que nenhuma unidade diferencial foi sensibilizada. Apesar de ser uma falta interna a corrente diferencial resultante não foi suficiente para causar a atuação do relé.

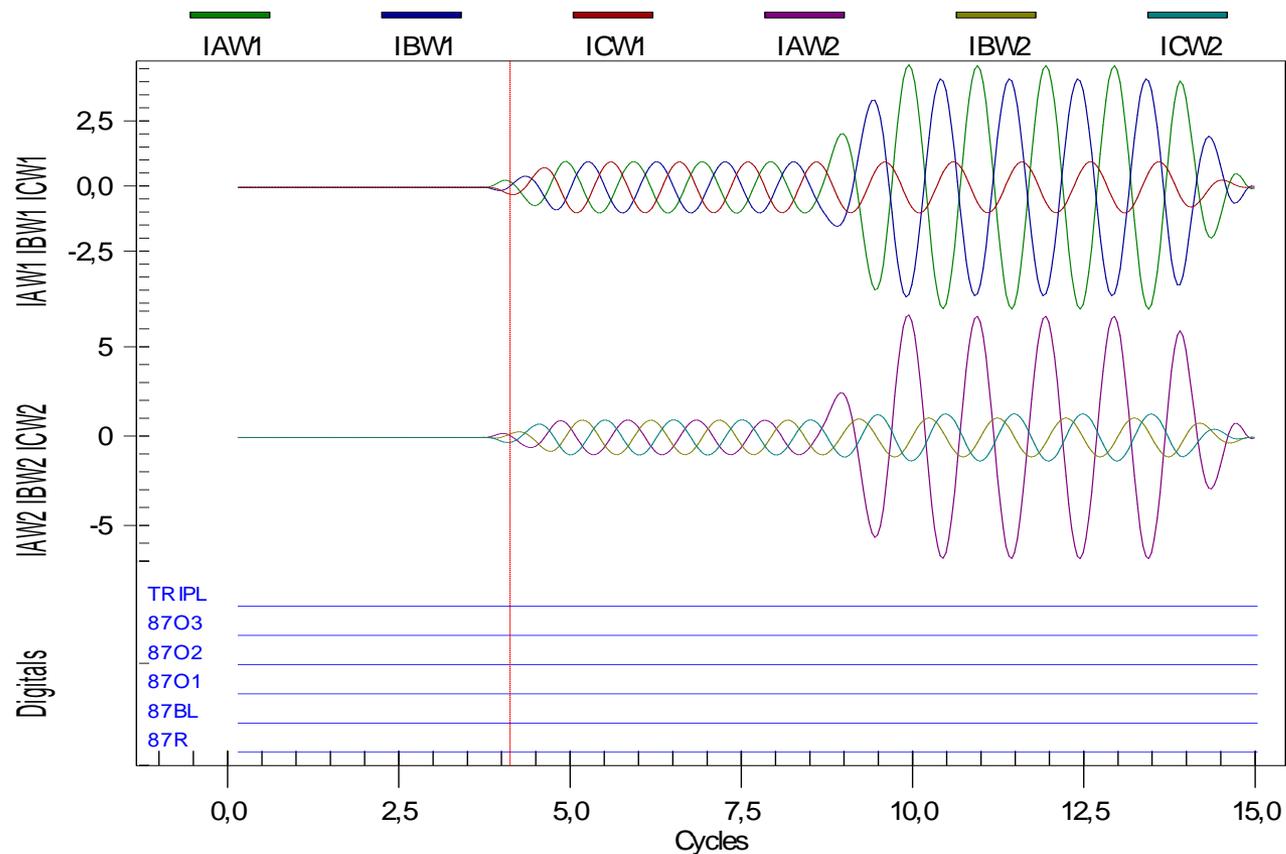
Em casos como este, onde a falta ocorre próxima do neutro, não há um grande desbalanceamento das correntes do primário e do secundário.

Conseqüentemente, a corrente de operação não atinge o valor mínimo de operação (*pickup* - O87P).

Uma solução para este problema foi habilitar função de proteção “falta à terra restrita” (REF - *Restrict Earth Fault*), cujo princípio de operação é baseado na comparação da corrente medida no neutro (I_n) do transformador com a corrente de sequência zero calculada a partir da medição de corrente das fases $((I_a + I_b + I_c)/3)$.

A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: falta externa ocorrida na linha de distribuição com a função de bloqueio comum habilitada.



A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: falta externa ocorrida na linha de distribuição com a função de bloqueio comum habilitada.

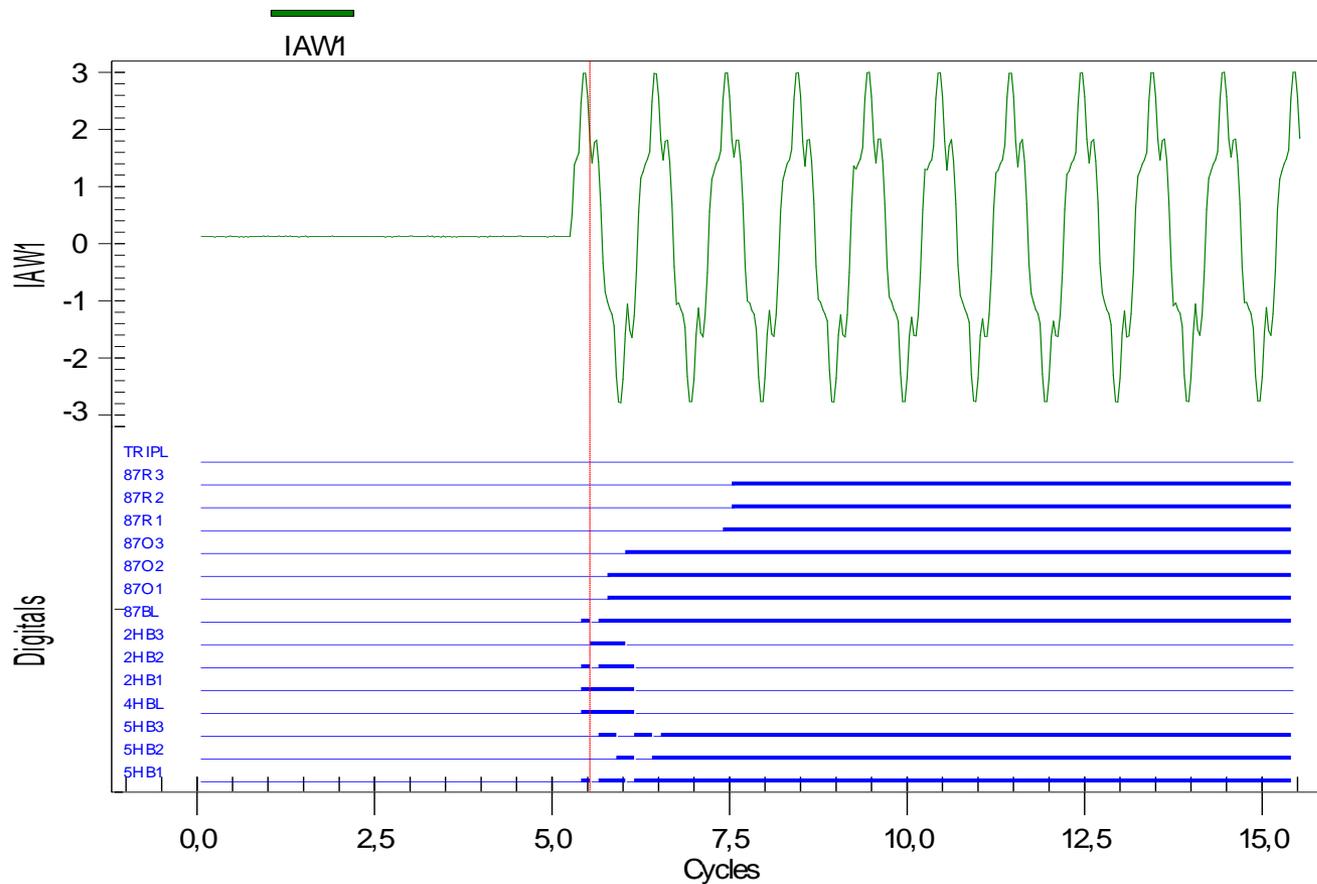
A oscilografia é referente a uma situação de falta externa ao transformador principal.

Esse distúrbio é caracterizado por uma **falta fase-terra** aplicada na linha de distribuição próxima da carga, estando a função bloqueio comum habilitada.

Mediante a esta situação, nenhum dos elementos de proteção diferencial do relé foi sensibilizado, como era esperado, não havendo atuação do mesmo.

A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: sobre-excitação de 140 % de tensão.



A proteção digital de elementos do SEP

2.1 Estudo de caso: sobre-excitação de 140 % de tensão.

Em virtude da sobretensão aplicada ao primário do transformador há uma sobre-excitação do mesmo e, conseqüentemente, deformação das ondas de corrente.

Essa deformação leva ao aparecimento de correntes diferenciais de operação (87O1), sensibilizando o relé.

Em um dado instante após essa sensibilização, ocorre a atuação do elemento de restrição (87R1,2,3), porém a operação do relé (trip) é impedida devido à função de bloqueio por 5º harmônico (5HB1,2.3), garantindo uma resposta correta por parte do relé frente à situação de sobre-excitação.

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

Aplicações destinadas à proteção digital de transformadores:

monitoramento + medição

Dentre as **funções de proteção** devem estar incluídos:

- ▶ proteção diferencial percentual + restrição harmônica adaptável;
- ▶ proteção de sobrecorrente por tempo; e
- ▶ proteção de sobrecorrente instantânea.

A proteção digital de elementos do SEP

2 A proteção digital de transformadores

As funções de controle e medição devem permitir:

- ▶ a medição de corrente, tensão e potência;
- ▶ a definição de grandezas fasoriais;
- ▶ a oscilografia de um determinado número de amostras por ciclo;
- ▶ o registro de eventos; e
- ▶ o auto diagnóstico.

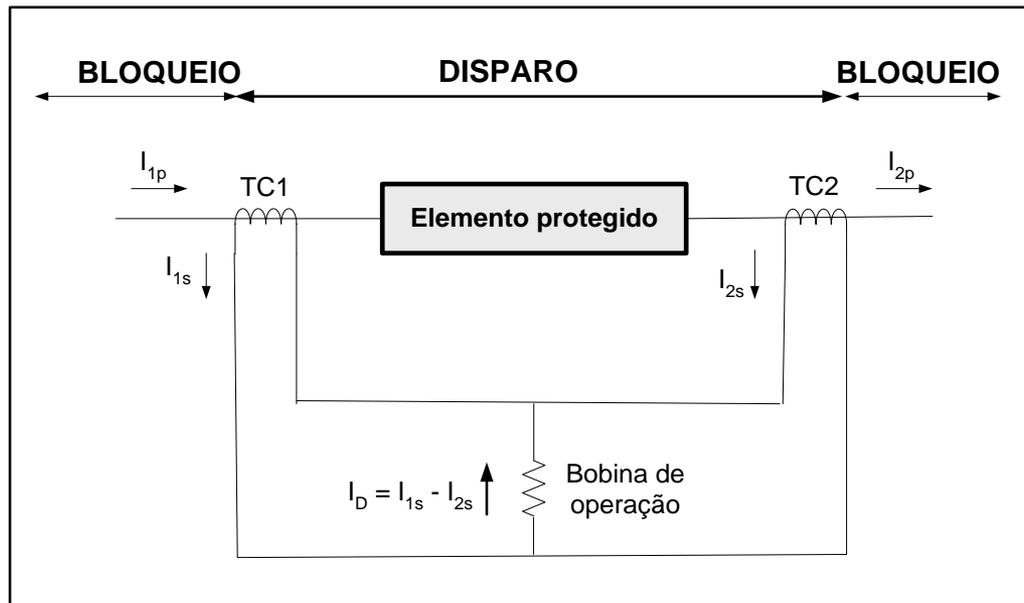
A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

- ▶ Pouca atenção quando comparada a proteção digital de linhas de transmissão ou de transformadores.
- ▶ Número pequeno de sistemas de proteção destinados à geradores. **Mas qual é o cenário atual?**
- ▶ Muitos sistemas de proteção são de **natureza mecânica** direcionados à **proteção do estator e rotor**, sendo que muitas outras funções de proteção e alarmes são próximas às funções de controle. **Mas qual é o cenário atual?**

A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores



Corrente efetiva na bobina ret.: $(I_{1s} + I_{2s})/2$
 Corrente efetiva na bobina op.: $(I_{1s} - I_{2s})$

✓ Para uma **falta externa** (ou corrente de carga):

$$\text{Op: } (I_{1s} - I_{2s}) = 0$$

$$\text{Ret.: } (I_{1s} + I_{2s})/2 = I_{1s} = I_{2s}$$

✓ Para uma **falta interna** : (I_{2s} torna-se negativo)

$$\text{Op: } (I_{1s} + I_{2s}) \rightarrow \text{fortalecido}$$

$$\text{Ret.: } (I_{1s} - I_{2s})/2 \rightarrow \text{enfraquecido}$$

A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

A proteção diferencial dos enrolamentos do estator

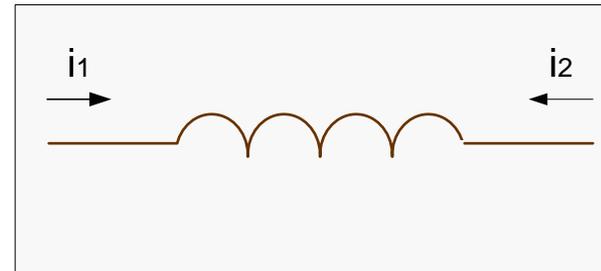
- ▶ Tarefa relativamente de **fácil implementação**.
- ▶ É interessante implementar critérios que se certifiquem da **real ocorrência** de uma **situação faltosa**.

$$i_d(k) = i_1(k) + i_2(k)$$

$$i_r(k) = i_1(k) - i_2(k)$$

$$i_d(k) \leq K i_r(k) \text{ bloqueio}$$

$$i_d(k) > K i_r(k) \text{ operação}$$



Onde K é a declividade da curva característica diferencial percentual.

A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

A proteção diferencial dos enrolamentos do estator

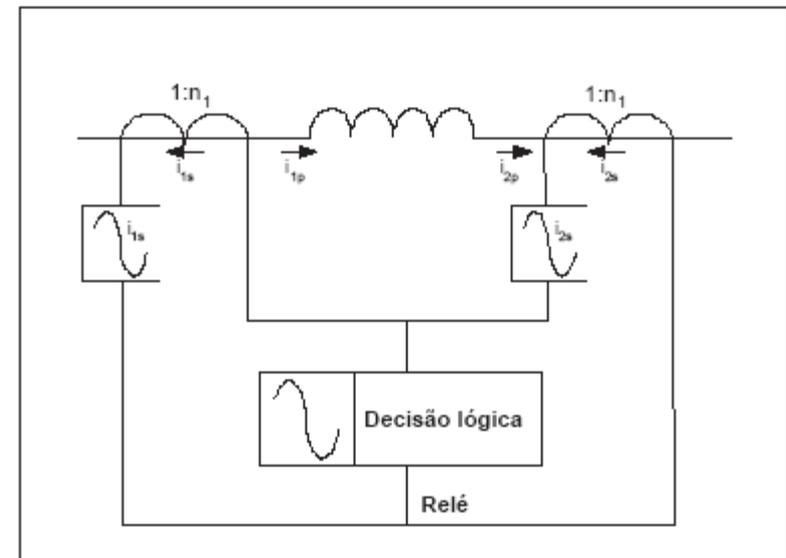
- ▶ Uma decisão mais segura pode ser obtida se os fasores estimados de $i_1(k)$ e $i_2(k)$ forem usados nesta comparação (TDF de ciclo completo).
- ▶ A saturação dos TCs, embora possível, não é uma situação provável no caso da proteção diferencial de um gerador.

$$I_d = |I_1 + I_2|$$

$$I_r = |I_1 - I_2|$$

$$I_d \leq K.I_r \text{ bloqueio}$$

$$I_d > K.I_r \text{ operação}$$



A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

Proteções elétricas sugeridas pelo guia IEEE Std. 1547:

- ANSI 25. Relé de verificação de sincronismo
- ANSI 27/59. Relé de subtensão / Relé de sobretensão
- ANSI 46. Relé de fase reserva (de reversão) ou desbalanceamento de corrente
- ANSI 47. Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão
- ANSI 50. Relé de sobrecorrente instantâneo
- ANSI 51. Relé de sobrecorrente temporizado
- ANSI 67. Relé direcional de sobrecorrente
- ANSI 81. Relé de frequência (sub ou sobre)
- ANSI 87. Relé de proteção diferencial

A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

A Proteção Digital de Turbinas Geradoras Eólicas

- No lado de baixa tensão: elementos de sobrecorrente (respondendo as correntes de sequência-zero, residual e de neutro do transformador).
- O circuito conversor é igualmente protegido por sobrecorrente.
- Outras funções de proteção complementares: desbalanço de tensão; sobreaquecimento; fase reversa; sincronização deficitária; sobretensão e subtensão.

A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

A Proteção Digital de Sistemas Fotovoltaicos

- Subtensão.
- Direcional de corrente.
- Sobrecorrente instantânea: proteção individual das chaves do inversor.

A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

A Proteção Digital de Geradores Síncronos

- Subtensão.
- Sobrecorrente.
- Desbalanço de corrente.

A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

Comentários gerais

- ▶ O **sistema de proteção** associado ao gerador deve ser projetado para proporcionar exatamente o **grau desejado de proteção** para a **necessidade de cada instalação**, permitindo uma **disponibilidade** e **confiabilidade** máxima ao mesmo.
- ▶ Há uma série de sistemas implementados pela aplicação de **relés digitais**, projetados para proporcionar uma **proteção primária** e de **retaguarda**, oferecendo múltiplas funções de proteção, registros de operação, grupos de múltiplos ajustes, mapeamento das entradas e saídas, medições detalhadas e meios de comunicação.
- ▶ A **característica modular** o torna extremamente **flexível** e **simples** para ser adaptado ao tamanho da instalação e à filosofia de proteção desejada.

A proteção digital de elementos do SEP

3 A proteção digital de geradores

Dentre as principais funções a serem alcançadas por uma proteção digital destinada à geradores, podemos destacar:

- ▶ **medição** de todas as grandezas relevantes para o acompanhamento do desempenho da máquina;
- ▶ **funções seletivas** de proteção;
- ▶ **registro de eventos** e **alarmes** em tempo real;
- ▶ **oscilografias** para faltas ou variação de valores limites;
- ▶ **adequação para funções especiais** sem a necessidade de *hardware* adicional; e
- ▶ **comunicação flexível** com as demais interfaces.

A proteção digital de elementos do SEP

4 A proteção digital de motores

- ▶ No sentido de prover **proteção digital para grandes motores**, as **correntes** e **tensões** devem ser **amostradas, calculados os fasores e componentes simétricos**.
- ▶ A **proteção por sobrecorrente** pode então ser efetuada tomando-se a magnitude dos fasores de corrente.
- ▶ Outro tipo de proteção consiste na proteção contra **fontes desbalanceadas de fornecimento da energia**, tomando-se a magnitude da corrente (ou tensão) de sequência negativa como medida da fonte desbalanceada. Se esta exceder um valor pré-estabelecido, o motor é retirado de serviço!

A proteção digital de elementos do SEP

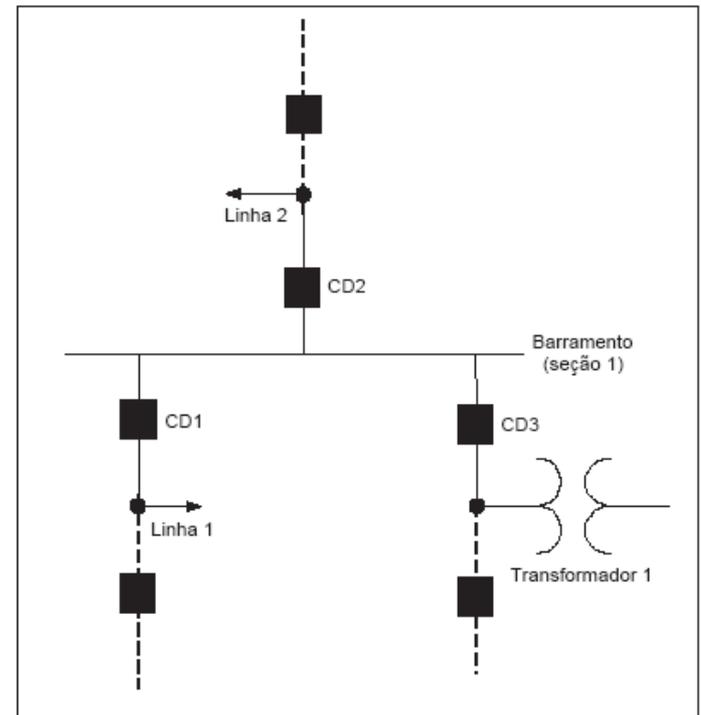
4 A proteção digital de motores

- ▶ Um aspecto interessante da **proteção de motores de indução** é fazer a **proteção responder ao aumento de temperatura nos seus enrolamentos**, ao invés da corrente do estator, como deve ser provido pelo relé de sobrecorrente.
- ▶ A implementação digital oferece a habilidade de criar um **modelo térmico** do estator e rotor.
- ▶ Os relés de sobrecorrente devem ser ajustados para a ação de uma condição de **rotor bloqueado** e ainda devem tolerar a corrente de partida (6 a 7 vezes a corrente nominal) por um tempo que permita o motor alcançar sua velocidade de operação.
- ▶ Como na proteção de geradores, a proteção de motores está intimamente ligada ao controle do mesmo.

A proteção digital de elementos do SEP

5 A proteção digital de barramentos

- ▶ O maior problema com a PB reside na saturação desigual do núcleo dos transformadores de corrente empregados no sistema.
- ▶ Um sistema de PB deve prover um certo grau de **seletividade** para diferenciar entre uma **falta interna** de uma **falta externa**.
 - A PB é uma das mais difíceis proteções a serem implementadas, devido a severidade de uma incorreta operação sobre a integridade do sistema (**efeito desastroso de um grande número de faltas simultâneas**).
 - A PB tornou-se parte de uma **proteção integrada** à um sistema de controle para a subestação como um todo.



A proteção digital de elementos do SEP

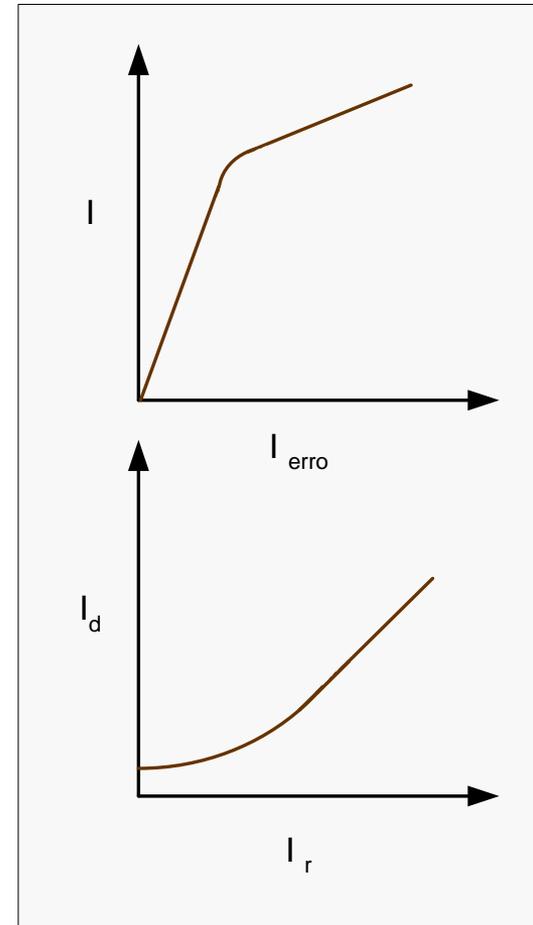
5 A proteção digital de barramentos

- ▶ A proteção diferencial requer que todas as correntes dos transformadores tenham razões idênticas (**relé digital**: possíveis erros na razão do TC pode ser corrigida via *software*).
- ▶ Fica claro que um **relé diferencial percentual** pode ser empregado, seja este baseado na **comparação de amostra** de todas as correntes, ou mesmo utilizando **fasores de corrente**.
- ▶ O modelo baseado em fasores pode ser empregado desde que não haja uma significativa saturação dos TCs, tanto antes quanto depois do efeito ter se manifestado.

A proteção digital de elementos do SEP

5 A proteção digital de barramentos

- ▶ Em geral, um **relé diferencial percentual** opera sobre uma **característica constante**, considerando que o erro do TC é proporcional a corrente primária.
- ▶ É claro que em tal caso o desenvolvimento do **erro** necessita de uma **característica diferencial percentual** com uma **declividade** também **aumentando progressivamente**.
- ▶ Esta declividade variável será desejável para ambos os algoritmos percentuais diferenciais baseados nas amostras do sinal e ou no cálculo do fasor.



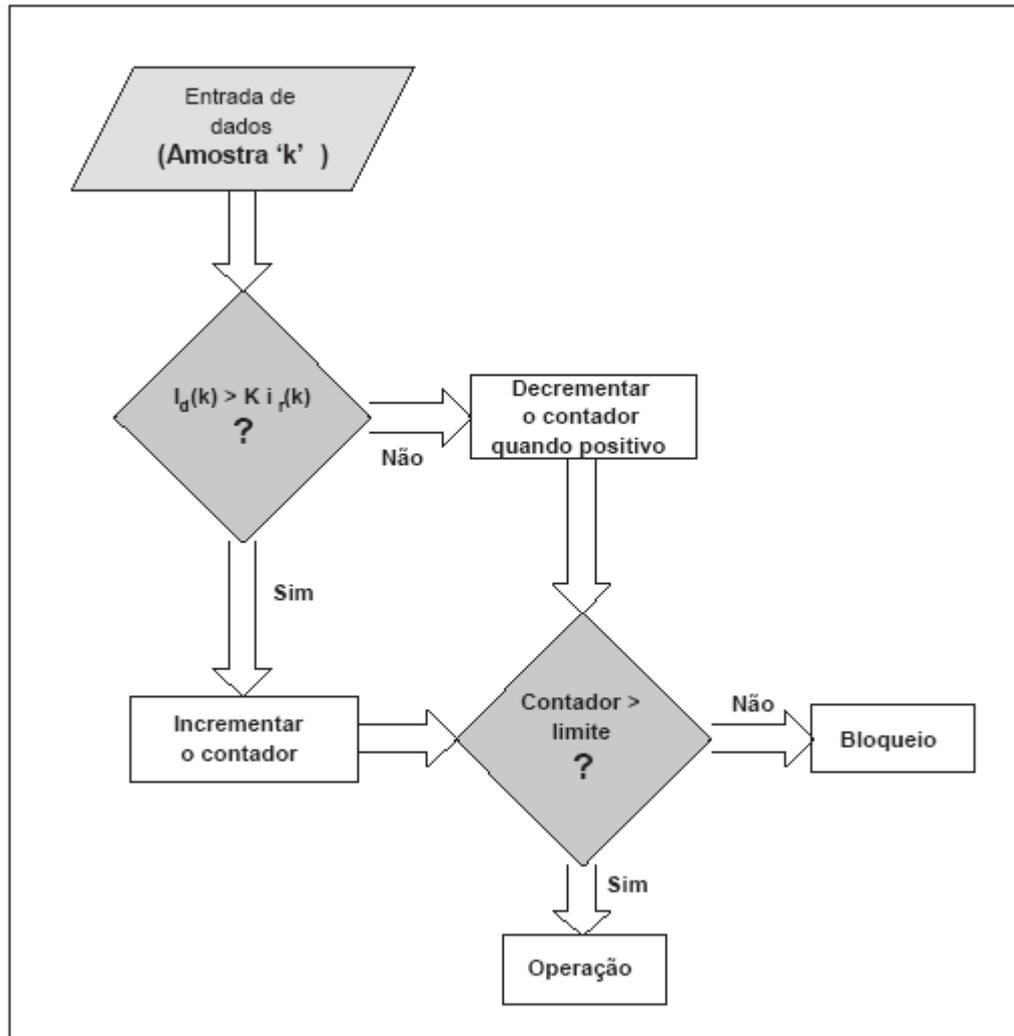
A proteção digital de elementos do SEP

5 A proteção digital de barramentos

- ▶ Um ponto de preocupação comum em toda a proteção diferencial é que a saturação do TC pode começar em poucos milissegundos após a injeção da falta.
- ▶ A proteção diferencial amostra-a-amostra poderia ser utilizada para prover proteção adequada nos primeiros milissegundos após a ocorrência da falta.
- ▶ A saturação pode ser detectada por um monitor de transitórios sobre o sinal.
- ▶ Alternativamente, pode-se verificar a saturação pela mudança na corrente secundária em amostras que compreendem um determinado período.

A proteção digital de elementos do SEP

5 A proteção digital de barramentos



Fluxograma para um relé diferencial percentual baseado na tomada de amostras. Para o *trip*, o contador deve exceder a um certo valor. A lógica é desabilitada quando a situação de saturação for evidenciada.

A proteção digital de elementos do SEP

Obrigado pela atenção!

Prof. Mário Oleskovicz

olesk@sc.usp.br