

Proteção de Filtros de Harmônicos em uma Instalação HVDC ± 600 kV

Eduardo Brandi

Furnas

Ricardo Abboud e Fernando Calero
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
42nd Annual Western Protective Relay Conference
Spokane, Washington, EUA
20–22 de outubro de 2015

Traduzido para o português em fevereiro de 2017

Proteção de Filtros de Harmônicos em uma Instalação HVDC ± 600 kV

Eduardo Brandi, *Furnas*

Ricardo Abboud e Fernando Calero, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Sumário—Diversas aplicações de eletrônica de potência usam filtros de harmônicos para remover os harmônicos gerados pelo processo de conversão. Como parte da Interligação Rio Madeira, duas linhas longas de transmissão em corrente contínua de alta tensão de 600 kV bipolares ligam as subestações de Porto Velho e Araraquara através de uma distância de 2400 km. Este artigo apresenta a filosofia dos relés de proteção adotada para proteger os filtros de harmônicos existentes nesta aplicação.

Especificamente, descrevemos um esquema de proteção dos filtros de harmônicos de cada uma dessas duas subestações associadas com as linhas de transmissão bipolares. O esquema protege cada um dos componentes do filtro de harmônicos individualmente. As funções inovadoras dos relés de proteção apresentadas incluem a proteção térmica dos reatores do filtro, as quais são capazes de calcular os efeitos do aquecimento associados com harmônicos até o 49°. Para detectar a perda das características do filtro causada por falhas dos elementos, utilizamos a proteção de “perda de sintonia do filtro” (“filter detuning”). Esta função opera monitorando as correntes com frequência fundamental em vários elementos do filtro.

I. INTRODUÇÃO

As usinas hidroelétricas de grande porte de Santo Antônio (3150 MW) e Jirau (3300 MW) localizadas no Rio Madeira, Estado de Rondônia, Brasil, são conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro. A linha de transmissão em corrente contínua de alta tensão (HVDC: “High-Voltage Direct Current”) em 600 kV bipolar começa na subestação retificadora de Porto Velho no Estado de Rondônia e termina na subestação inversora de Araraquara no Estado de São Paulo (distante 2400 km), conforme mostrado na Fig. 1.

O sistema HVDC Rio Madeira possui uma capacidade de conversão total de 7100 MW. Este sistema transmite a potência das usinas hidroelétricas de Santo Antônio e Jirau (localizadas no Rio Madeira, perto de Porto Velho) para a subestação inversora de Araraquara, que está próxima dos centros de carga no Sudeste do Brasil.

Este é o primeiro projeto executado para aproveitar o potencial hidroelétrico do Rio Amazonas [1]. Duas linhas de transmissão *dc* bipolares (chamadas de Bipolo 1 e Bipolo 2), com 2400 km de comprimento, transportam a energia das duas usinas de Rondônia previamente mencionadas para os centros de carga de São Paulo, como mostrado na Fig. 1. Por razões econômicas, foram escolhidas linhas de transmissão HVDC para este projeto. Todavia, as subestações retificadoras e conversoras são fontes de harmônicos para o sistema de potência. Isso ocorre devido ao chaveamento e comutação dos tiristores. Consequentemente, é essencial utilizar filtros de harmônicos para reduzir os harmônicos injetados pelos processos de retificação e inversão no sistema de potência brasileiro

(SIN). Isso garantirá que os níveis de harmônicos não comprometam a qualidade da energia, conforme estabelecido pelas normas brasileiras e pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [2]. Contudo, a maior desvantagem dos conversores HVDC é que eles necessitam de potência reativa para o processo de comutação. Os conversores baseados em tiristor sempre absorvem potência reativa, comportando-se da mesma forma que um reator shunt.

O processo de conversão (tanto a retificação quanto a inversão) requer potência reativa, e os filtros de harmônicos são fontes de potência reativa quando existe tensão no barramento. Sem uma fonte de potência reativa, o processo de conversão não pode ocorrer; consequentemente, os relés de proteção do filtro de harmônicos têm que ser seguros e confiáveis.



Fig. 1. Linhas de transmissão HVDC de 600 kV bipolares com 2400 km interligam a subestação retificadora de Porto Velho com a subestação inversora de Araraquara

A Fig. 2 mostra o diagrama simplificado do sistema dos dois bipolos [3]. O projeto de Interligação Elétrica do Madeira (IE Madeira) consiste do Bipolo 2 e dos filtros *ac*, os quais estão destacados por elipses azuis na figura. O foco deste artigo é a proteção destes filtros *ac*. O Bipolo 1 e os outros componentes fazem parte de um projeto diferente.

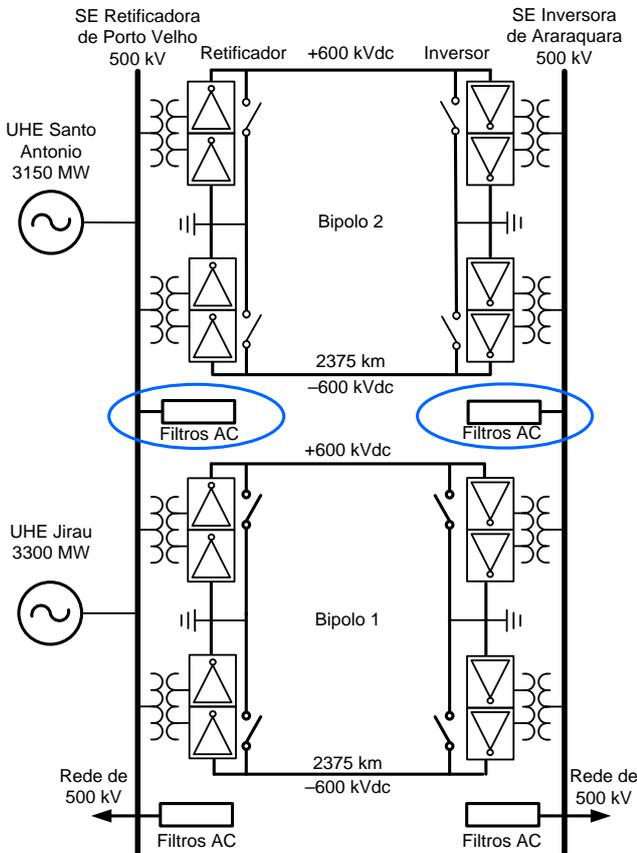


Fig. 2. Diagrama unifilar do sistema do projeto IE Madeira

As duas usinas, Santo Antônio e Jirau, transmitem energia para a subestação retificadora de Porto Velho via linhas de transmissão de 500 kV. Os filtros *ac* estão localizados no lado de 500 kV. De forma similar, na subestação inversora de Araraquara, os filtros de harmônicos estão localizados no barramento de 500 kV.

Como esta é uma aplicação em extra-alta tensão (EHV: “extra-high voltage”) (500 kV) com um fluxo de potência muito elevado, os filtros de harmônicos possuem arranjos complexos. Os filtros de harmônicos são compostos de uma combinação de capacitores em uma configuração em Ponte H (“H-bridge”), reatores, resistores, e unidades de capacitores auxiliares adicionais. Cada um destes componentes foi especificamente projetado para a aplicação. No caso dos capacitores, eles são compostos de unidades individuais apropriadamente conectadas para obter a capacitância exigida. Fisicamente, existem três filtros, um para cada fase, os quais estão separados por vários metros de distância. Isso reduz enormemente a possibilidade de uma falta entre fases. As principais faltas a serem consideradas são as faltas à terra e sobrecargas.

O arranjo dos filtros de harmônicos no projeto IE Madeira consiste de seis filtros de harmônicos na subestação inversora de Araraquara e cinco na subestação retificadora de Porto Velho. A potência nominal e a ordem de

harmônicos, para os quais estes filtros são sintonizados, são diferentes para cada um dos bancos de filtros. As diferentes configurações e tipos de bancos de filtros são mostrados na Seção II.

II. DADOS TÉCNICOS E ARRANJO DOS FILTROS

Na subestação retificadora de Porto Velho, existem os seguintes bancos de filtros de harmônicos: dois Tipo A, dois Tipo B e um Tipo C, cada um com capacidade de 247 MVAR nominal. Os filtros Tipo A são sintonizados para remover o 3°, o 13° e o 40° harmônicos. Os filtros Tipo B são sintonizados para remover o 5°, o 11° e o 23° harmônicos. O filtro Tipo C é sintonizado para remover o 13° e o 31° harmônicos. A Fig. 3 ilustra o arranjo e os dados técnicos desses filtros da subestação retificadora de Porto Velho [4].

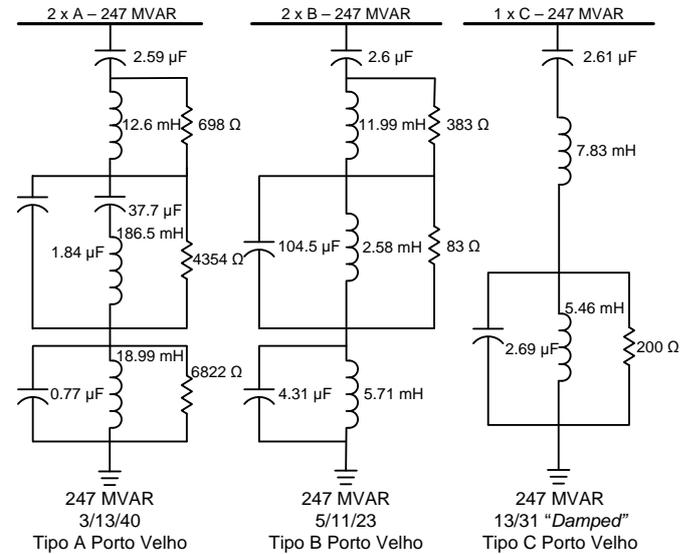


Fig. 3. Dados dos filtros da subestação retificadora de Porto Velho

Na subestação inversora de Araraquara, existem quatro bancos de filtros de harmônicos Tipo D e dois bancos de capacitores shunt Tipo E. Os filtros Tipo D (305 MVAR) são sintonizados com os harmônicos 12° e 24° com a finalidade de remover o 11°, o 13° e o 23° harmônicos. Os bancos de capacitores shunt Tipo E (316 MVAR) foram projetados com capacitores shunt e um pequeno indutor. A Fig. 4 mostra o arranjo e os dados técnicos para os filtros da subestação inversora de Araraquara [4].

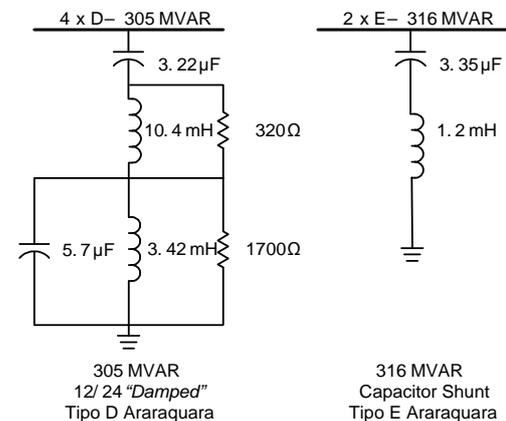


Fig. 4. Dados dos filtros da subestação inversora de Araraquara

A discussão a seguir concentra-se nos filtros Tipo A localizados na subestação retificadora de Porto Velho. Este tipo de filtro possui o maior número de componentes, como mostrado na Fig. 3. A filosofia e as técnicas usadas na proteção de cada elemento deste filtro podem ser estendidas para os outros, tanto na subestação retificadora de Porto Velho quanto na subestação inversora de Araraquara.

III. FUNÇÕES E CONEXÕES DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

A filosofia dos relés de proteção requer que cada banco de filtros tenha um sistema para monitorar a corrente e a temperatura de cada componente. Este sistema tem de fornecer proteção adequada e alertar a equipe de operação em tempo hábil sobre qualquer condição anormal de operação de forma que possam ser executadas ações apropriadas para evitar danos aos componentes [1].

Para atender a este requisito, um dispositivo eletrônico inteligente (IED: “Intelligent Electronic Device”) de proteção dedicado foi instalado para cada um dos principais componentes do filtro, tais como os principais bancos de capacitores, reatores e resistores. A Fig. 5 ilustra as conexões e localizações das medições para os IEDs, implementando as funções de proteção para os filtros Tipo A da subestação retificadora de Porto Velho. A figura mostra somente as principais funções de proteção de cada IED. Por exemplo, o IED F61C1 é responsável pela proteção do banco de capacitores C1. Este IED também detecta falha do elemento capacitivo (61) e fornece proteção contra falha do disjuntor (50BF), proteção de sobretensão (59) e proteção de retaguarda por sobrecorrente (51RMS). Os IEDs F49R1, F49R2 e F49R3 protegem os resistores R1, R2 e R3, respectivamente. Os IEDs F49L1, F49L2 e F49L3 protegem os reatores L1, L2 e L3, respectivamente. A principal função de proteção destes últimos seis IEDs é a imagem térmica (49).

Na Fig. 5, os capacitores auxiliares (C2, C2a e C3) também estão incluídos no esquema de proteção. A proteção destes elementos será discutida na Seção IV. Estes componentes são protegidos através de um controlador de automação em tempo real dedicado que usa as medições fornecidas pelos IEDs descritos acima. Este controlador é denominado P1 na Fig. 5 e também inclui uma entrada para o sensor de temperatura ambiente, denominado P2. A comunicação entre os IEDs e o controlador de automação em tempo real ocorre através de uma rede Ethernet, usando os protocolos IEC 61850 MMS (“Manufacturing Message Specification”) e IEC 61850 GOOSE (“Generic Object-Oriented Substation Event”).

Para melhorar a confiabilidade do sistema de proteção, os IEDs fornecem proteção de retaguarda para os componentes adjacentes. A Tabela I resume as funções de proteção de cada IED designado para proteção dos filtros de harmônicos Tipo A na subestação retificadora de Porto Velho.

A Referência [4] fornece detalhes sobre o desempenho harmônico e capacidades nominais (“rating”) dos filtros de harmônicos. Este tópico está fora do escopo deste artigo; contudo, é interessante notar que cada componente do filtro possui um relatório de teste com suas características definidas para diferentes frequências harmônicas. Os relatórios de testes são fornecidos pelos fabricantes dos componentes individuais do banco de filtros. A resposta à

frequência de cada componente é considerada ao propor os esquemas de proteção.

É importante observar que os IEDs executam o rastreamento da frequência. O sistema de potência raramente opera na sua frequência nominal (60 Hz no Brasil) e os desvios devem ser medidos. A frequência fundamental e respectivos harmônicos não são ajustados; portanto, executar o rastreamento da frequência é uma característica importante dos IEDs, especialmente para aqueles que possuem implementada a proteção de imagem térmica (49) que mede os harmônicos.

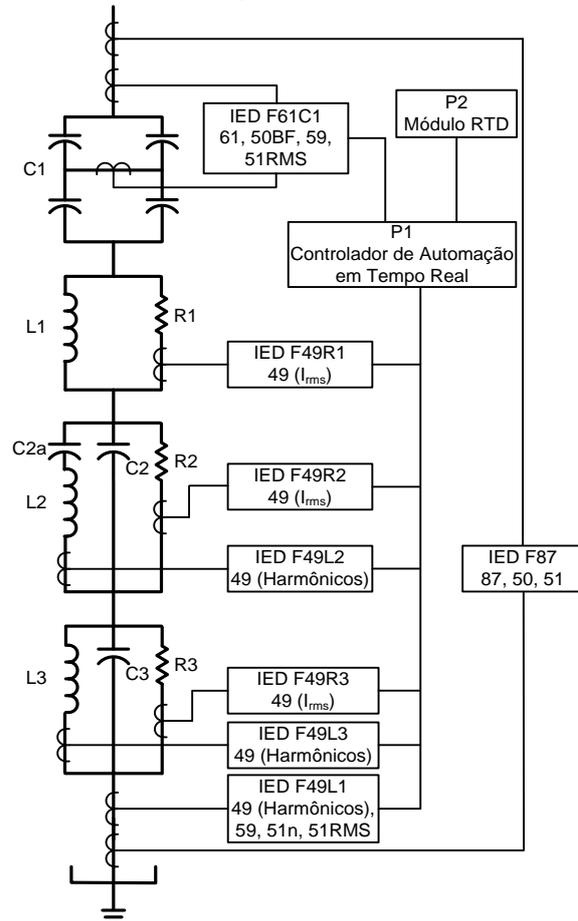


Fig. 5. Diagrama unifilar mostrando as principais funções de cada IED para o Filtro Tipo A da subestação retificadora de Porto Velho

TABELA I
FUNÇÕES DOS RELÉS DE PROTEÇÃO DOS IEDS DO ESQUEMA

IED	Funções de Proteção
F87	Elemento diferencial (87). Sobrecorrente instantâneo (50). Sobrecorrente temporizado (51).
F61C1	Desbalanço da corrente de fase p/ o banco de capacitor C1 (61). Falha do disjuntor (50BF). Sobretensão (59). Proteção de sobrecorrente de retaguarda (I_{rms}) para o reator L1 (51RMS).
F49L1	Imagem térmica (49) para o reator L1 (considerando o conteúdo de harmônicos). Proteção de sobrecorrente de retaguarda (I_{rms}) para o filtro inteiro (51RMS). Sobrecorrente residual temporizado (51N). Sobretensão (59).
F49R1	Imagem térmica (49) para o resistor R1 e retaguarda para o reator L1.
F49L2	Imagem térmica (49) para o reator L2 (considerando o conteúdo de harmônicos).
F49R2	Imagem térmica (49) para o resistor R2 e retaguarda para o reator L2.
F49L3	Imagem térmica (49) para o reator L3 (considerando o conteúdo de harmônicos).
F49R3	Imagem térmica (49) para o resistor R3 e retaguarda para o reator L3.
P1	Fornece proteção de “perda de sintonia do filtro” (“filter detuning”) e detecta faltas nos capacitores auxiliares. Recebe as medições de tensão e corrente dos outros IEDs através de comunicações. Envia os valores da temperatura ambiente para todos os IEDs que possuem a função de imagem térmica implementada para compensar as variações da temperatura ambiente.
P2	Mede a temperatura ambiente usando sensores de detecção da temperatura por resistência (RTD: “Resistance Temperature Detector”), Tipo PT100. Esta medição é enviada para P1 para ser distribuída para os IEDs que possuem a função da imagem térmica implementada para compensar as variações da temperatura ambiente.

IV. FILOSOFIA DE AJUSTES DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

A. Proteção do Banco de Capacitores Principal

O esquema de proteção para o banco de capacitores principal (C1) do filtro de harmônicos consiste na proteção de desbalanço de corrente (60 ou 61) para as três fases.

Os capacitores principais dos filtros das subestações de Porto Velho e Araraquara são configurados como uma Ponte H (isto é, com quatro ramos, dois em série, dois em paralelo, conectados no centro), conforme mostrado na Fig. 6.

Os valores $C1_A$, $C1_B$, $C1_C$ e $C1_D$ são escolhidos de forma que, em uma condição normal de operação, a corrente que flui através do transformador de corrente (TC), I_{UNB} , seja zero. Para esta situação, os valores da capacitância equivalente são escolhidos para satisfazer a relação mostrada em (1), na qual o princípio é o mesmo que o da Ponte de Wheatstone [5].

$$\frac{X_{C1A}}{X_{C1B}} = \frac{X_{C1C}}{X_{C1D}} \quad (1)$$

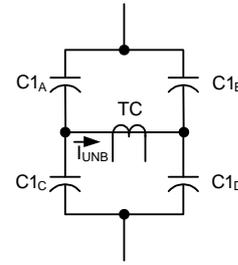


Fig. 6. Conexão em Ponte H

Desde que todos os ramos estejam balanceados, de acordo com (1), nenhuma corrente circulará pelo TC. Se um elemento capacitivo falhar, alguma corrente passará pelo TC no ponto central. A proteção de desbalanço para este banco de capacitores baseia-se na medição da corrente de desequilíbrio no TC do ponto central.

Um TC com uma relação de transformação muito baixa (5:1) permite o monitoramento do desbalanço no banco de capacitores C1. A configuração em Ponte H, conforme mostrada na Fig. 6, permite o monitoramento da conexão do centro da seção “H”. Em condições normais de operação, as correntes medidas devem ser iguais a zero. A falha dos elementos capacitivos do banco de capacitores vai gerar correntes desbalanceadas naquele ponto central. Este desbalanço será detectado pelo IED de proteção associado que está medindo este desequilíbrio. Na verdade, devido às tolerâncias de construção das características dos elementos capacitivos, pode existir um desbalanço de corrente “natural” em condições de regime permanente. A proteção de desbalanço deve ter capacidade para compensar este desbalanço de corrente natural, visando ser tão sensível quanto possível.

O IED F61C1 fornece proteção de desbalanço (60) e compensa automaticamente o desbalanço de corrente natural, evitando operações incorretas e mantendo, ao mesmo tempo, a sensibilidade para detectar faltas internas no banco de capacitores. Esta compensação elimina o efeito do desbalanço de corrente natural no esquema de proteção.

O objetivo deste esquema de proteção consiste em desligar o banco de capacitores antes de um defeito catastrófico, evitando ao mesmo tempo o trip indesejável devido a falhas aleatórias ocasionais. Falhas nos elementos capacitivos resultam em uma modificação na impedância do ramo, causando um desbalanço dentro do banco e um aumento na tensão através de alguns dos elementos remanescentes [6]. Uma sobretensão contínua acima do limite em qualquer unidade deve ser evitada, e um sinal de trip tem de ser emitido para o filtro. De acordo com IEEE C37.99-2000, as condições anormais de operação têm de ser limitadas a 110% da tensão nominal RMS no terminal [7].

O IED F61C1 fornece três estágios de proteção de desbalanço: o primeiro estágio é destinado a dar alarme, o segundo estágio é um trip temporizado e o terceiro estágio é um trip rápido. O alarme é disparado se houver falha de dois elementos (canecas metálicas do capacitor – “capacitor cans”); a falha de apenas um elemento não causa qualquer mudança significativa na operação do banco de capacitores. Além disso, a detecção de um elemento com defeito não é prática. O trip temporizado é ajustado para operar se houver uma chance de a tensão através de um elemento ultrapassar 150% da tensão de operação nominal. Isto é compatível com

110% da tensão nominal. A tensão nominal excede em muito as máximas tensões na frequência fundamental sob condições normais. O ajuste de trip rápido tem como objetivo detectar eventos de *flashover*; portanto, por questões de segurança, ele terá um retardo de 80 milissegundos.

A Tabela II lista os valores da corrente secundária de desbalanço para o número de elementos capacitivos defeituosos no banco de capacitores, e a Tabela III mostra os ajustes propostos para o elemento de proteção. O estudo e a determinação destes níveis de desbalanço foram conduzidos pelo fabricante do filtro de acordo com os critérios mencionados previamente, os quais estão em concordância com as recomendações encontradas em [7].

TABELA II
CORRENTES DE DESBALANÇO PARA O NÚMERO DE ELEMENTOS CAPACITIVOS EM UM BANCO DE CAPACITORES

Elementos Capacitivos Defeituosos	Corrente de Desbalanço (mA sec)
1	5–10
2	13–21
3	23–35
4	36–53
5	52–75
6	73–105
7	102–145
8	144–205
9	213–301
10	342–481

TABELA III
AJUSTES PROPOSTOS PARA A FUNÇÃO DE DESBALANÇO DE CORRENTE (60)

Nível/Estágio	Número de Elementos Capacitivos Defeituosos	Corrente de Pickup (mA sec)	Temporização (s)
Alarme	2	12	300
Trip	5	52	7200
Trip rápido	7	103	0.08

B. Proteção do Reator do Filtro de Harmônicos

Os reatores dos filtros são protegidos, garantindo que operem dentro de sua capacidade térmica. A funcionalidade principal dos IEDs F49L1, F49L2 e F49L3 consiste em implementar a proteção de sobrecarga térmica usando uma imagem térmica (49). O objetivo desta função de proteção é detectar condições de operação que possam prejudicar o desempenho do filtro ao longo do tempo.

Como uma proteção de retaguarda, os IEDs conectados aos TCs de proteção dos resistores do filtro (F49R1, F49R2 e F49R3) também efetuam a proteção térmica dos reatores usando um fator de compensação. Isso é discutido na Seção IV, Subseção G.

Devido ao efeito pelicular (“skin effect”) dos condutores, a resistência do reator não é constante para frequências diferentes e aumenta à medida que a frequência da corrente passante aumenta. Isso está relacionado com a diminuição

da área de condução do condutor em frequências mais altas. O aumento do valor da resistência para frequências mais altas devido ao efeito pelicular foi considerado quando da implementação da imagem térmica do reator. Os diferentes valores de resistência são levados em conta durante o cálculo do efeito térmico dos harmônicos mais altos, que é proporcional a I^2R .

Treze componentes de frequências harmônicas foram considerados para a proteção de imagem térmica (49) de cada reator. Estes harmônicos representam os harmônicos mais relevantes que podem ser medidos com base no processo de conversão da instalação HVDC. Estes harmônicos foram identificados usando simulações e técnicas computacionais que reproduzem o processo de conversão. Este estudo está descrito em [4].

Os IEDs F49Ln ($n = 1, 2$ ou 3) medem os harmônicos em conformidade com a norma IEC 61000-4-30 [8]. Os IEDs são capazes de medir harmônicos individuais até a 63ª ordem. A Tabela IV mostra os harmônicos mais relevantes para cada reator dos filtros de harmônicos do Tipo A da subestação retificadora de Porto Velho.

TABELA IV
HARMÔNICOS RELEVANTES PARA OS REATORES DOS FILTROS DE HARMÔNICOS TIPO A DA SUBESTAÇÃO RETIFICADORA DE PORTO VELHO

Reator L1	Reator L2	Reator L3
1	1	1
2	2	3
3	3	11
7	4	13
9	5	15
11	6	17
13	7	19
15	8	23
17	9	25
35	10	35
37	11	37
47	13	47
49	15	49

A temperatura do reator não é medida diretamente; no entanto, ela é emulada usando um modelo térmico de primeira ordem. A temperatura é determinada pelo estabelecimento de uma equação do equilíbrio de calor (ou seja, a entrada de calor menos as perdas de calor). O modelo é explicado em [9] e [10]. Nesta aplicação, as correntes harmônicas são medidas individualmente e o calor produzido por cada uma delas é calculado levando em conta a dependência que a resistência tem da frequência. A capacidade de rastreamento da frequência dos IEDs é importante para esta função de proteção.

A Fig. 7 mostra um circuito elétrico analógico para o elemento térmico. Os componentes principais do modelo são os seguintes:

- Fonte de calor. O fluxo de calor a partir da fonte é $\sum R_n I_n^2$ watts, onde n é a ordem do harmônico.

- Capacidade térmica (C_T). Representa um reator que tem capacidade (C_T) de absorver calor da fonte de aquecimento.
- Resistência térmica em relação ao ambiente (TRA: “Thermal Resistance to Ambient”). Representa o calor dissipado por um reator para os seus arredores.
- Temperatura ambiente (T_A). A temperatura ambiente medida.
- Comparador. Compara a temperatura calculada do reator em pu com um valor pré-ajustado baseado nos dados do fabricante do reator.

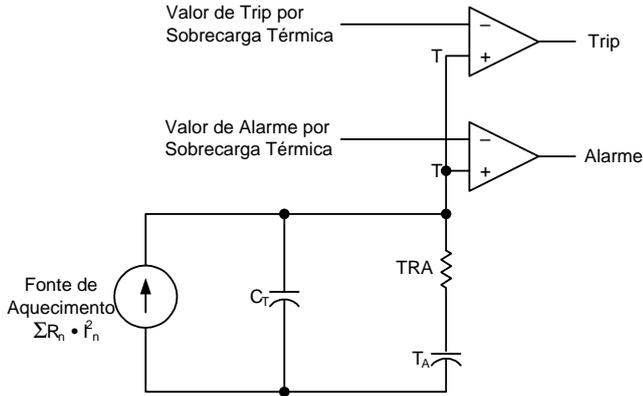


Fig. 7. Circuito elétrico analógico representando o modelo térmico dos reatores do filtro

A equação (2) mostra a fórmula que é implementada nos IEDs, a qual representa a temperatura T da Fig. 7:

$$T_j = \frac{\sum R_n \cdot I_n^2 \cdot N_{CT}^2}{C_T} \cdot \Delta t + T_{j-1} - \frac{T_{j-1} - T_A}{TRA \cdot C_T} \cdot \Delta t \quad (2)$$

onde:

T_j e T_{j-1} são as temperaturas calculadas no processo em j e em um degrau anterior $j-1$ ($^{\circ}\text{C}$).

R_n é a resistência do “ n ” harmônico (Ω), baseada na Tabela V.

I_n é a corrente medida do “ n ” harmônico (A sec).

N_{CT} é a relação do TC.

C_T é a capacidade térmica estimada ($\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$).

Δt é o intervalo de processamento dos IEDs F49Ln ($n = 1, 2$ ou 3), que é de 8 milissegundos.

T_A é a temperatura ambiente medida e fornecida por P1 e P2 na Fig. 5 ($^{\circ}\text{C}$).

TRA é a resistência térmica em relação à temperatura ambiente, fornecida pelo fabricante do reator ($^{\circ}\text{C}/\text{kW}$).

O fabricante do reator forneceu os valores do resistor do reator para cada harmônico. A Tabela V lista a variação da resistência do reator para diferentes harmônicos. Esses valores foram usados para implementar o modelo térmico da função de proteção (49) nos IEDs F49Ln ($n = 1, 2$ ou 3). O fabricante também forneceu todos os dados necessários para implementar o modelo térmico, incluindo os limites para alarme e trip.

TABELA V
VALORES DE RESISTÊNCIA COM DIFERENTES HARMÔNICOS PARA OS CONDUTORES DE CADA REATOR

Ordem	Reator L1 R (mΩ)	Reator L2 R (mΩ)	Reator L3 R (mΩ)
1	60	172	51
2	61	185	54
3	64	206	59
4	68	235	66
5	73	270	75
6	79	312	85
7	85	357	97
8	92	404	111
9	100	451	127
10	108	497	144
11	116	548	162
13	135	661	204
15	156	790	252
17	179	934	307
19	205	1093	369
21	234	1267	437
23	265	1456	512
25	314	1720	605
27	366	2006	705
29	422	2315	814
31	482	2645	930
33	546	2997	1054
35	615	3372	1185
37	687	3768	1325
39	763	4186	1472
41	844	4627	1626
43	928	5089	1789
45	1016	5573	1959
47	1109	6080	2137
49	1205	6608	2323

As constantes térmicas do reator, de acordo com (2), estão mostradas na Tabela VI.

TABELA VI
DADOS DO REATOR USADOS NA PROTEÇÃO DE IMAGEM TÉRMICA (49)

	Unidade	Reator L1	Reator L2	Reator L3
Indutância	mH	12.6	186.5	18.99
Calor específico – C_T	kJ/°C	319.0	3162.0	965.3
Resistência térmica – TRA	°C/kW	6.64	2.56	3.08

A Tabela VII mostra os limites de temperatura usados nos ajustes finais. São considerados dois níveis, um para alarme e outro para trip. Os limites são baseados na temperatura máxima de operação, a qual foi calculada pelo fabricante do reator.

TABELA VII
NÍVEIS DOS LIMITES DE ALARME E TRIP – PROTEÇÃO DE IMAGEM TÉRMICA (49) DO REATOR

	Unidade	Reator L1	Reator L2	Reator L3
Temperatura de alarme	°C	120.6	129.8	118.3
Temperatura de trip	°C	130.6	139.8	128.3

Quando a temperatura calculada atinge o limite de trip, os IEDs F49Ln ($n = 1, 2$ ou 3) abrem os disjuntores associados com o filtro de harmônicos. Há uma histerese de 10°C programada. O sinal de trip não reseta imediatamente quando as correntes são removidas. A reenergização do filtro não é permitida até que o reator esteja suficientemente esfriado.

O algoritmo do modelo térmico mantém sua execução mesmo com o disjuntor aberto e vai emular a refrigeração do reator (isto é, a temperatura calculada começa a diminuir de acordo com (2), considerando que a corrente é zero).

O algoritmo do modelo térmico do reator foi implementado nos IEDs F49Ln ($n = 1, 2$ ou 3) usando as funções lógicas programáveis disponíveis.

O IED F49L1 não mede diretamente a corrente do reator L1; porém, como mostrado na Fig. 5, ele mede a corrente total do filtro. Esta abordagem é possível porque a corrente do reator L1 é muito próxima da corrente total do filtro. A Tabela VIII mostra a relação de I_{L1}/I_{TOTAL} para várias ordens de harmônicos. Para fins práticos, a corrente total do filtro é aquela do reator L1.

TABELA VIII
RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DO REATOR L1 E A CORRENTE TOTAL DO FILTRO

Harmônico	I_{L1}/I_{TOTAL}
1	0.99998
2	0.99991
3	0.99979
4	0.99963
5	0.99942
6	0.99917
7	0.99887
8	0.99852
9	0.99813
10	0.99769
11	0.99721
12	0.99668
13	0.99611
14	0.99549
15	0.99483
16	0.99412
17	0.99337
18	0.99258
19	0.99174
20	0.99086
40	0.96489

C. Proteção do Resistor do Filtro de Harmônicos

O relé de proteção do resistor do filtro segue o mesmo princípio usado na proteção dos reatores. A função principal dos IEDs F49R1, F49R2 e F49R3 é a proteção de imagem térmica (49) para os resistores do filtro Tipo A da subestação retificadora de Porto Velho. A funcionalidade implementa a proteção de sobrecarga destes resistores. O objetivo desta função de proteção é detectar as condições de operação que podem prejudicar ou degradar a operação do filtro ao longo do tempo.

No caso dos resistores, ao contrário da discussão sobre os reatores na seção anterior, a variação da resistência para os diferentes componentes harmônicos é insignificante. A variação estimada encontra-se na faixa de miliohms, em comparação com o valor real do resistor, que é de centenas de ohms. Portanto, é possível considerar um único valor de resistência. Este valor de resistência foi fornecido pelo fabricante do resistor e foi usado no modelo térmico para o resistor do filtro. Neste esquema de proteção, não foi necessário considerar os diferentes harmônicos e a medição RMS das correntes utilizadas para estimar o efeito do aquecimento, ao invés dos harmônicos individuais. A medição da corrente RMS efetuada pelos IEDs (F49R1, F49R2 e F49R3) inclui todos os harmônicos até o 63º, que é a capacidade máxima de cada IED.

A equação (3) mostra a fórmula usada para estimar a temperatura dos resistores do filtro, que é similar àquela utilizada para os indutores.

$$T_j = \frac{R \cdot I_{rms}^2 \cdot N_{CT}^2}{C_T} \cdot \Delta t + T_{j-1} - \frac{T_{j-1} - T_A}{TRA \cdot C_T} \cdot \Delta t \quad (3)$$

onde:

T_j e T_{j-1} são as temperaturas calculadas no processo em j e em um degrau anterior $j-1$ ($^{\circ}C$).

R é o valor resistivo do resistor (Ω).

I_{rms} é a corrente RMS eficaz (A sec).

N_{CT} é a relação do TC.

C_T é a capacidade térmica estimada ($kJ/^{\circ}C$).

Δt é o intervalo de processamento dos IEDs F49Rn, que é de 8 milissegundos.

T_A é a temperatura ambiente medida e fornecida por P1 e P2 na Fig. 5 ($^{\circ}C$).

TRA é a resistência térmica em relação à temperatura ambiente, fornecida pelo fabricante do resistor ($^{\circ}C/kW$).

O fabricante do resistor forneceu todos os dados necessários para implementar o modelo térmico, incluindo os limites para alarme e trip.

A Tabela IX mostra os valores de resistência, assim como as constantes térmicas particulares, de acordo com (3), para cada resistor (R1, R2 e R3) para o filtro Tipo A.

TABELA IX
DADOS TÉCNICOS PARA A PROTEÇÃO DOS COMPONENTES RESISTIVOS DO FILTRO TIPO A DA SUBESTAÇÃO RETIFICADORA DE PORTO VELHO

	Unidade	Resistor R1	Resistor R2	Resistor R3
Resistência	Ω	698	4354	6822
Potência nominal	kW	297	815	144
Calor específico C_T	$kJ/^{\circ}C$	37	55.5	16.5
Resistência térmica TRA	$^{\circ}C/kW$	1.3468	0.4294	3.4722

A Tabela X mostra os valores limites de temperatura usados nos ajustes finais. São considerados dois níveis, um para alarme e outro para trip. Os limites são baseados na temperatura máxima de operação, que foi calculada pelo fabricante do resistor.

TABELA X
LIMITES DE TRIP E ALARME PARA A PROTEÇÃO TÉRMICA (49) DOS RESISTORES DO FILTRO

	Unidade	Resistor R1	Resistor R2	Resistor R3
Talarme	$^{\circ}C$	430	380	530
Ttrip	$^{\circ}C$	440	390	540

Quando a temperatura calculada atinge o limite de trip, os IEDs F49Rn abrem os disjuntores associados ao filtro de harmônicos. Há uma histerese de $10^{\circ}C$ programada. O sinal de trip não reseta imediatamente quando as correntes são removidas. A reenergização do filtro não é permitida até que o resistor esteja suficientemente esfriado.

O algoritmo do modelo térmico mantém sua execução mesmo com o disjuntor aberto e vai emular a refrigeração

do reator (isto é, a temperatura calculada começa a diminuir de acordo com (3), considerando que a corrente é zero).

O algoritmo do modelo térmico do resistor foi implementado nos IEDs F49Rn ($n = 1, 2$ ou 3) usando as funções lógicas programáveis disponíveis.

D. Proteção Diferencial

O princípio diferencial compara as saídas dos transformadores de corrente de todos os circuitos de entrada e saída da área ou zona protegida [11]. A proteção diferencial é um dos meios mais eficazes de proteção de equipamentos de potência. Na sua forma mais simples, a proteção diferencial emite um sinal de trip para uma diferença entre a corrente medida que entra e a que sai da zona protegida. O IED opera com a diferença de corrente ao invés da corrente total do circuito. Isso permite que o IED com proteção diferencial tenha uma sensibilidade maior para faltas do que outros elementos de proteção baseados na medição da corrente total do circuito. A proteção diferencial é altamente seletiva porque a zona de proteção é precisamente definida pela localização dos TCs em torno da zona protegida. Com alta seletividade e sensibilidade, o elemento diferencial pode dar trip rapidamente sem precisar de qualquer intervalo de tempo de coordenação.

Conforme mostrado na Fig. 8, o IED F87 mede a corrente que entra e a que sai de cada fase do filtro.

A proteção diferencial é um método seletivo e rápido de proteção contra curtos-circuitos; entretanto, a aplicação em um filtro de harmônicos tem algumas particularidades. Uma falta fase-terra causará uma redução na corrente ao invés de aumento no que diz respeito ao componente fundamental, conforme mostrado na Tabela XI. Esta redução ocorre porque a impedância total do barramento para a falta é maior do que a impedância total do filtro.

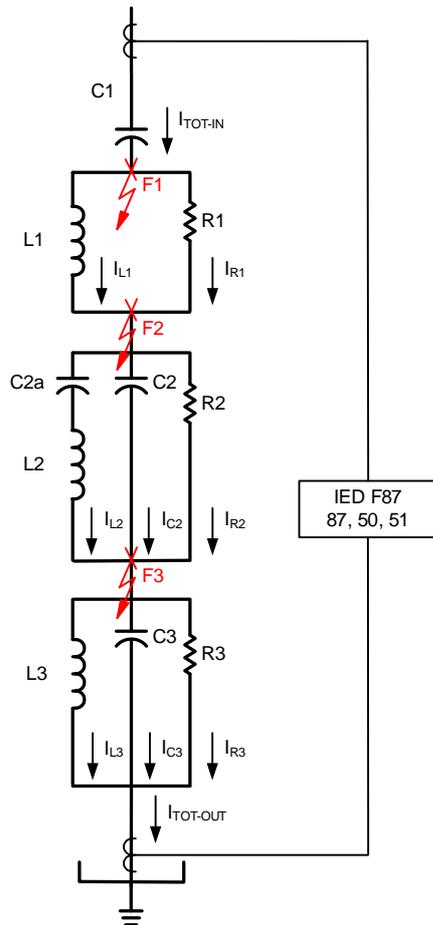


Fig. 8. Proteção Diferencial

Durante uma operação normal, as correntes fundamentais são $I_{TOT-IN} = 281$ A e $I_{TOT-OUT} = 281$ A, as quais resultam em uma corrente diferencial igual a zero. A Tabela XI resume os valores de corrente para faltas fase-terra sólidas nos diferentes locais mostrados na Fig. 8.

TABELA XI
CORRENTE FUNDAMENTAL DA FASE A MEDIDA PELA PROTEÇÃO DIFERENCIAL PARA FALTAS FASE-TERRA SÓLIDAS EM DIFERENTES LOCAIS

Local	$I_{A_{TOT-IN}}$ (A)	$I_{A_{TOT-OUT}}$ (A)	$I_{A_{DIF}}$ (A)
Operação normal	281	281	0
F1	278	0	278
F2	172	0	172
F3	280	0	280

De acordo com a Tabela XI, o elemento diferencial tem de ser suficientemente sensível para detectar faltas no local F2. Nesta aplicação específica, o ajuste mínimo do IED F87 é de 100 A, considerando a relação do TC que foi utilizada; portanto, o IED F87 tem sensibilidade suficiente para detectar faltas em F2.

As considerações sobre curto-circuito são principalmente para faltas à terra. A localização dos componentes do filtro na subestação torna muito pouco provável que possa acontecer uma falta entre fases; todavia, se isto ocorrer, a proteção diferencial fornecerá a proteção necessária.

E. Proteção de Perda de Sintonia do Filtro (“Filter Detuning Protection”)

Nenhuma proteção específica de desbalanço de capacitores é fornecida para os capacitores auxiliares. Existem sete unidades de capacitores auxiliares diferentes fornecidas para os cinco tipos de filtro deste projeto. A proteção de perda de sintonia é necessária para detectar falhas importantes das unidades de capacitores auxiliares. Os capacitores auxiliares são representados por C2, C2a e C3 na Fig. 5.

Os efeitos da falha nos elementos dos capacitores auxiliares (C2, C2a e C3 no caso do filtro Tipo A na subestação retificadora de Porto Velho) são resumidos na Tabela XII.

TABELA XII
VARIÇÃO DA CAPACITÂNCIA BASEADA NO NÚMERO DE ELEMENTOS DEFEITUOSOS NOS CAPACITORES AUXILIARES

Número de Elementos Defeituosos	Variação Percentual Comparada com a Capacitância Nominal (%)		
	C2	C2a	C3
1	1	2	3
2	2	4	6
3	3	8	9
4	5	14	13
5	7	29	16
6	9	–	20
7	12	–	24

Não há IEDs dedicados para detectar falhas nos capacitores auxiliares; entretanto, estas falhas podem comprometer o desempenho do filtro e anular a eficácia da filtragem para os harmônicos alvo, causando uma condição de perda de sintonia.

Um método de proteção inovador foi criado especificamente para este projeto visando identificar elementos defeituosos nos capacitores auxiliares. O método detecta a condição de perda de sintonia por meio da medição da proporção das correntes nos resistores em relação à corrente total do filtro da mesma ordem harmônica específica, selecionada de acordo com as características do filtro.

A função da proteção de perda de sintonia do filtro é baseada na análise e monitoramento das variações nas relações entre as correntes circulantes nos resistores e a corrente total do filtro nas ordens harmônicas específicas.

Os IEDs F49L1, F49R2 e F49R3, mostrados na Fig. 9, medem as correntes harmônicas específicas usadas na proteção de perda de sintonia e transmitem as mesmas para o controlador de automação em tempo real, P1. Este controlador calcula a relação entre estas medições de harmônicos dos resistores R2 (I_{R2}) e R3 (I_{R3}) e a corrente total do filtro (I_{TOT}) para identificar uma condição de perda de sintonia, verificando se essas relações estão dentro das tolerâncias e valores esperados. Se as medições estiverem fora das tolerâncias, o controlador declara uma condição de perda de sintonia e envia um sinal de alarme para o operador. Neste instante, não se considera desligar o filtro a

partir deste elemento, deixando ao operador a decisão de retirar o filtro de serviço de uma maneira programada.

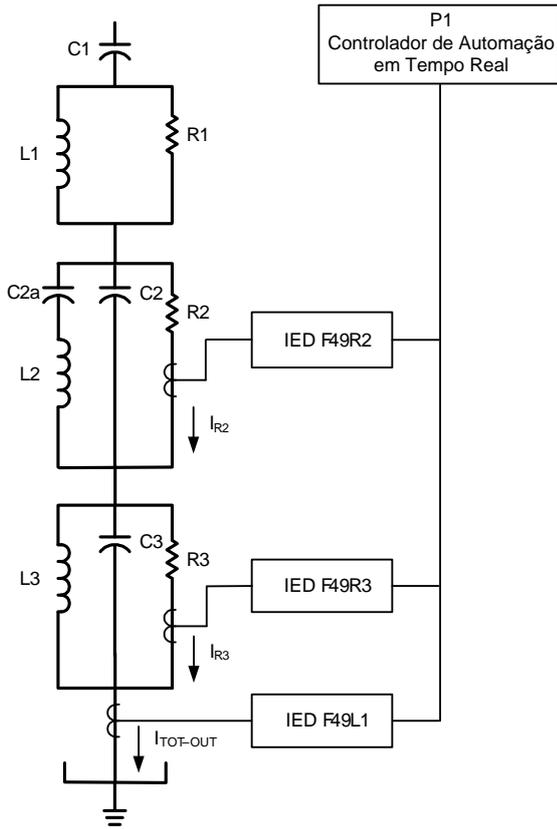


Fig. 9. Proteção de perda de sintonia

Conforme mencionado anteriormente, a proteção de perda de sintonia mede a proporção das correntes nos resistores em relação à corrente total no filtro para uma ordem harmônica específica. Para variações na impedância dos capacitores auxiliares causadas pelos elementos defeituosos do filtro Tipo A da subestação retificadora de Porto Velho, as Tabelas XIII, XIV e XV resumem as ordens harmônicas utilizadas na proteção de perda de sintonia e as relações de I_{R2}/I_{TOT} e I_{R3}/I_{TOT} para estas ordens harmônicas.

TABELA XIII

VARIAÇÕES NA RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE 5º HARMÔNICO NO RESISTOR R2 E A CORRENTE DE 5º HARMÔNICO TOTAL NO FILTRO, COMPARADA À NOMINAL, PARA DEFEITOS NO CAPACITOR AUXILIAR C2

Variação da impedância do capacitor auxiliar C2 em relação à nominal (%)	5	10	20
Variação da I_{R2}/I_{TOT} de 5º harmônico para uma condição sem defeito	-21	-36	-56

TABELA XIV

VARIAÇÕES NA RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE FUNDAMENTAL NO RESISTOR R2 E A CORRENTE TOTAL DO FILTRO, COMPARADA À NOMINAL, PARA DEFEITOS NO CAPACITOR AUXILIAR C2A

Variação da impedância do capacitor auxiliar C2a em relação à nominal (%)	5	10	20
Variação da I_{R2}/I_{TOT} da corrente fundamental para uma condição sem defeito	133	267	537

TABELA XV

VARIAÇÕES NA RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE 23º HARMÔNICO NO RESISTOR R3 E A CORRENTE DE 23º HARMÔNICO TOTAL NO FILTRO, COMPARADA À NOMINAL, PARA DEFEITOS NO CAPACITOR AUXILIAR C3

Variação da impedância do capacitor auxiliar C3 em relação à nominal (%)	5	10	20
Variação da I_{R3}/I_{TOT} da corrente de 23º harmônico para uma condição sem defeito	-29	-46	-66

A corrente I_{TOT} nas tabelas anteriores é a corrente total do filtro medida pelo IED F49L1. A corrente I_{R2} é medida pelo IED F49R2, que é a corrente que passa pelo resistor R2. A corrente I_{R3} é medida pelo IED F49R3, que é a corrente que passa pelo resistor R3. A comparação dos harmônicos particulares é mostrada nas Tabelas XIII, XIV e XV. Para o capacitor C2 na Tabela XIII, por exemplo, o controlador P1 compara o 5º harmônico medido no resistor R2 com o mesmo harmônico medido na corrente total. Um limite específico é fornecido para detectar defeitos nos elementos do C2. No caso do C2a, a relação entre as correntes fundamentais I_{R2} e I_{TOT} é monitorada. No caso do C3, a relação entre as correntes de 23º harmônico I_{R3} e I_{TOT} é monitorada. Dois níveis de alarme foram implementados para o capacitor auxiliar C2, no qual o primeiro e segundo níveis detectaram quatro e sete elementos defeituosos, respectivamente. Para o capacitor auxiliar C2a, o primeiro e segundo níveis detectaram três e quatro elementos defeituosos, respectivamente. Para o capacitor auxiliar C3, o primeiro e segundo níveis detectaram dois e quatro elementos defeituosos, respectivamente. A análise da Tabela XII e Tabela XIII mostra que é possível definir os limites para cada nível de alarme.

A Fig.10 mostra a lógica da proteção de perda de sintonia programada no controlador de automação em tempo real P1 para o Nível 1 de alarme. A lógica da proteção de perda de sintonia para o Nível 2 de alarme é similar.

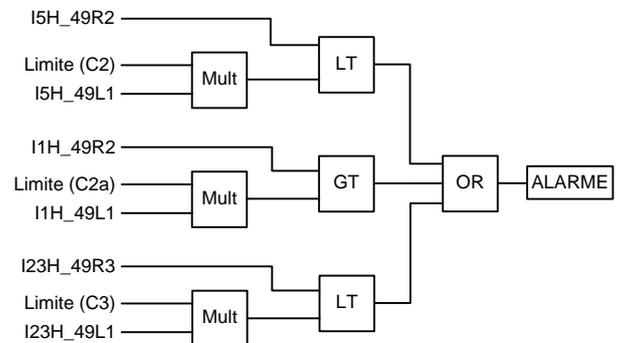


Fig. 10. Nível 1 de alarme para o elemento de perda de sintonia

Os outros tipos de filtro têm lógica similar com os níveis de limites apropriados.

F. Proteção de Sobrecorrente Residual

A proteção de sobrecorrente residual funciona como retaguarda da proteção diferencial.

Conforme mostrado na Fig. 11, o IED F49L1 mede a corrente saindo de cada fase do filtro e calcula a corrente residual fundamental ($I_{RES-OUT}$).

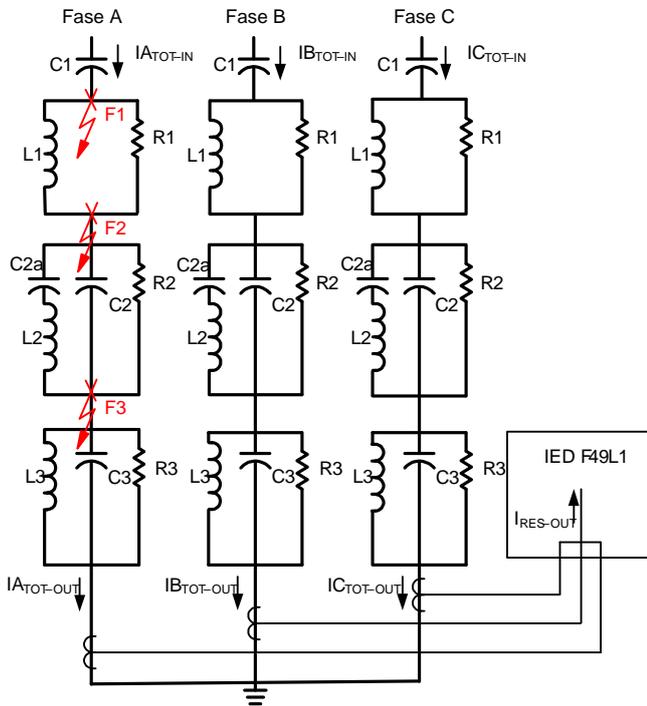


Fig. 11. Proteção de sobrecorrente residual

A proteção de sobrecorrente residual é um método sensível de proteção contra faltas monofásicas; no entanto, a aplicação em um filtro de harmônicos tem algumas particularidades. Conforme mencionado anteriormente, uma falta fase-terra no interior do filtro causará a diminuição da corrente ao invés do aumento. Isto ocorre porque a impedância total do barramento para a falta é maior do que a impedância total do filtro.

A Tabela XVI resume os valores de corrente (em amperes primários) para faltas fase-terra sólidas em diferentes locais, como mostrado na Fig. 12.

TABELA XVI
CORRENTES RESIDUAIS DOS TCS SUPERIORES E INFERIORES PARA FALTAS FASE-TERRA SÓLIDAS EM DIFERENTES LOCAIS

Local	I_{RES-IN} (A pri)	$I_{RES-OUT}$ (A pri)
F1	3	281
F2	223	281
F3	2	281

Os valores na Tabela XVI são resultados de (4) e (5), onde:

$$I_{RES-IN} = I_{A_{TOT-IN}} + I_{B_{TOT-IN}} + I_{C_{TOT-IN}} \quad (4)$$

$$I_{RES-OUT} = I_{A_{TOT-OUT}} + I_{B_{TOT-OUT}} + I_{C_{TOT-OUT}} \quad (5)$$

Na Tabela XVI, é evidente que a corrente residual proveniente dos TCS superiores não é adequada para ser usada para a proteção de sobrecorrente residual porque ela é muito pequena. A corrente residual proveniente dos TCS do lado do neutro tem de ser utilizada para a proteção de sobrecorrente residual, e tem de ser suficientemente sensível para detectar correntes em torno de 281 amperes primários.

Para uma falta fase-terra próxima, ou uma falta bifásica-terra nas linhas adjacentes, a sobrecorrente residual ($I_{RES-OUT}$) terá o mesmo valor que o das faltas internas (ou seja, 281 amperes primários). Isto também é verdadeiro para faltas no barramento. Por esta razão, a proteção precisa ser coordenada com a proteção de linha e a proteção do barramento; portanto, foi adotada uma temporização de 750 milissegundos.

G. Proteção de Retaguarda para os Reatores L1, L2 e L3

Os IEDs que monitoram os resistores F49R1, F49R2 e F49R3 são também responsáveis pela implementação de um algoritmo de imagem térmica que calcula a temperatura nos reatores L1, L2 e L3, respectivamente. O algoritmo e a equação são os mesmos, conforme descrito na Seção IV, Subseção B. A magnitude da corrente utilizada na fórmula é calculada a partir da corrente medida através do resistor. A corrente passante nos resistores R1, R2 e R3 é muito menor do que a corrente passante nos reatores L1, L2 e L3, respectivamente.

A corrente nos resistores é diretamente proporcional à queda de tensão nos mesmos. Como os resistores estão em paralelo com os reatores, uma relação pode ser determinada entre a corrente no resistor e a corrente no reator em paralelo. Portanto, fatores de escala podem ser determinados para estimar as correntes no reator para cada componente harmônico, uma vez que a relação da tensão e corrente é linear nos resistores. Os fatores de escala são usados para multiplicar os harmônicos medidos pelos IEDs F49Rn e indiretamente encontrar os componentes harmônicos da corrente através dos reatores em paralelo. Com as correntes do resistor e os fatores de escala, é possível implementar modelos térmicos nos IEDs F49Rn, conforme descrito na Seção IV, Subseção B, e de acordo com (2). Os níveis dos limites de alarme e trip são os mesmos da Tabela VII que foram propostos para os reatores.

Este método não tem precisão para o reator L2 no caso de defeitos nos elementos do capacitor C2a, porque a relação entre a corrente no resistor R2 e a corrente no reator em paralelo L2 será diferente da nominal.

H. Proteção de Retaguarda para Sobrecarga Harmônica

Uma das etapas do projeto do filtro refere-se aos estudos das capacidades nominais ("rating") que foram realizados com base nas condições pré-determinadas do sistema e dos componentes. O filtro foi avaliado para serviços contínuos e de curta duração. Para todas as condições de operação contínua, incluindo desde a potência mínima até a potência máxima, tensões máximas e mínimas do barramento, correntes harmônicas geradas pelos conversores para diferentes condições, tolerâncias dos componentes do filtro, etc., os filtros foram dimensionados para assegurar que não seja necessária qualquer redução da potência em função das diferentes condições do sistema. Portanto, o filtro tem suas características nominais definidas durante o projeto,

incluindo as correntes máximas contínuas, fundamental e harmônicas permitidas durante diferentes condições de operação.

O excesso de harmônicos do sistema pode danificar os componentes do filtro. Os modelos térmicos são destinados a detectar sobrecargas em cada componente específico. Como proteção de retaguarda para os modelos térmicos, uma proteção contra sobrecarga foi implementada com base no valor das correntes harmônicas no IED F49L1 que está medindo a corrente total do filtro e calculando a distorção harmônica total (THD: “Total Harmonic Distortion”), considerando-se os harmônicos de ordem 2ª até 63ª. A THD para a corrente é a relação entre o valor da corrente RMS apenas harmônica e o valor da corrente fundamental. Portanto, se a THD for multiplicada pelo valor da corrente fundamental, o resultado será o valor RMS da frequência fundamental, como mostrado em (6)

$$IRMS_{HARM} = \sqrt{\sum_2^n I_n^2} = \frac{THD_{current} \cdot I_1}{100} \quad (6)$$

onde:

$IRMS_{HARM}$ é a corrente RMS apenas harmônica (A).

I_n é a harmônica de ordem n (A).

I_1 é o valor da corrente fundamental (A).

$THD_{current}$ é a distorção harmônica total da corrente (%).

n é 63 para o IED F49L1.

O filtro Tipo A da subestação retificadora de Porto Velho foi projetado considerando o valor de 240 A para $IRMS_{HARM}$. Portanto, foi implementado um limite de alarme de acordo com este valor.

O excesso de harmônicos do sistema vai afetar todos os componentes do filtro; todavia, os resistores são os componentes mais fracos em relação à sobrecarga harmônica. Portanto, um limite de trip foi implementado com base na suportabilidade do resistor para a sobrecarga harmônica, que é 25% acima do valor limite de alarme e tem uma temporização de 20 segundos.

V. FILOSOFIA DE PROTEÇÃO PARA OUTROS TIPOS DE FILTRO

Baseando-se na discussão prévia, uma filosofia de proteção similar pode ser aplicada para outros tipos de filtro, como mostrado na Fig. 12 e Fig. 13.

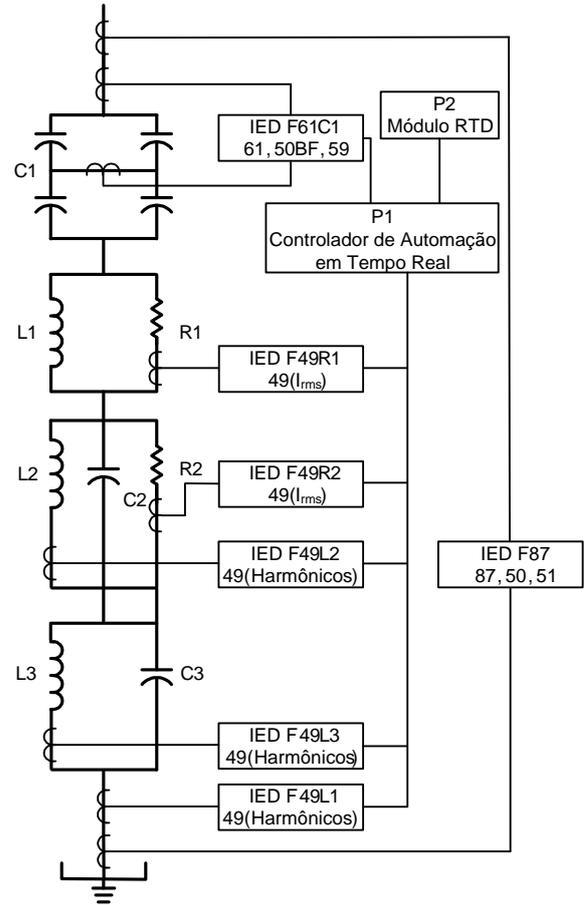


Fig. 12. Diagrama unifilar mostrando as funções principais de cada IED para o filtro Tipo B da subestação retificadora de Porto Velho

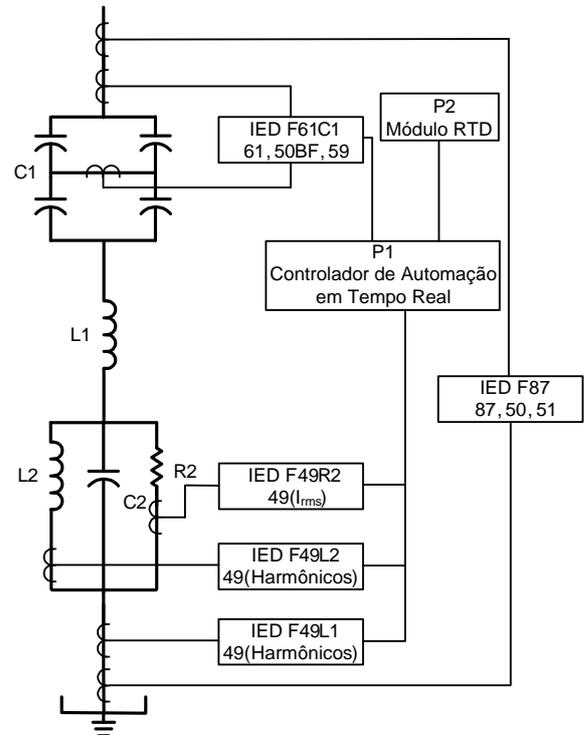


Fig. 13. Diagrama unifilar mostrando as funções principais de cada IED para o filtro Tipo C da subestação retificadora de Porto Velho

VI. CONCLUSÕES

No processo de concepção do projeto IE Madeira, as empresas do consórcio solicitaram que o projeto e operação do sistema de relés de proteção fosse robusto, abrangente e

extremamente confiável. A solicitação também contemplou IEDs de proteção individuais para cada um dos componentes do filtro com proteção de retaguarda adequada.

No sistema de relés de proteção fornecido, foram avaliados os aspectos de sensibilidade e segurança. O relé de proteção de desbalanço para os capacitores que foram conectados em uma configuração de Ponte H, a sobrecarga térmica dos reatores em relação aos harmônicos relevantes e o algoritmo da proteção de perda de sintonia foram fornecidos para atender às exigências.

Estima-se que menos de 2% de todo o potencial hidroelétrico total dos rios na região amazônica tenha sido explorado [12]. Devido à importância fundamental de novas fontes de energia para o crescimento econômico do Brasil, outros projetos similares são esperados no futuro, tais como o IE Madeira e a Usina de Belo Monte no norte do Brasil.

O tópico pertinente da proteção dos filtros de harmônicos EHV possui muito poucas referências bibliográficas em comparação com outras funções de proteção aplicadas nos sistemas de transmissão.

A filosofia de proteção apresentada neste artigo pode servir como suporte para novas aplicações de filtros EHV de forma geral, assim como para projetos futuros relacionados à integração do potencial hidráulico da região amazônica.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] P. C. V. Esmeraldo, E. M. A. Araujo, e D. S. Carvalho, Jr., "HVDC Madeira Transmission System – Planning Development and Final Design", proceedings of the CIGRE Session 2010, Paris, França, 2010.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS – The Electric System National Operator), Procedimentos de Rede, Módulo 2, Submódulo 2.8. Disponível em: <http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL – Brazilian Electricity Regulatory Agency), Edital de Leilão No. 007/2008-ANEEL, Anexo 6F-CC, Lote LF-CC, Integração do Madeira, Vol. III-Fl.473 de 1276. Disponível: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_transmissao/documentos/06_LOTE_LF_CC_Madeira.pdf.
- [4] F. Jusan, L. Carijó, G. Luz, R. Gonçalves, M. Lima, M. Cavaleiro, e G. Oheidhin, "Sistema de Transmissão CCAT do Madeira – Estudos de Desempenho Harmônico e Rating dos Filtros CA do Bipolo 2", proceedings of the XXI Brazilian National Seminar of Production and Transmission of Electrical Energy (SNPTEE), Florianópolis, Costão do Santinho, Brasil, 2011.
- [5] W. Boyes (ed.), *Instrumentation Reference Book* (Fourth Edition). Butterworth-Heinemann (Elsevier Inc.), Burlington, MA, USA, 2010.
- [6] S. Samineni, C. Labuschagne, e J. Pope, "Principles of Shunt Capacitor Bank Application and Protection", proceedings of the 36th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro 2009.
- [7] IEEE Standard C37.99-2012, IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – Brazilian Association of Technical Standards) NBR IEC 61000-4-30:2011, Compatibilidade Eletromagnética – Parte 4-30: Técnicas de Ensaio e Medições – Métodos de Medição da Qualidade da Energia.
- [9] E. Lebenhaft, "First Order Thermal Model Applied to Cyclic Loads", proceedings of the 2007 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, Charleston, SC, abril 2007.

[10] G. Benmouyal, M. B. Bryson, e M. Palmer, "Implementing a Line Thermal Protection Element Using Programmable Logic", proceedings of the 30th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro 2003.

[11] M. J. Thompson, "Percentage Restrained Differential, Percentage of What?", proceedings of the 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, abril 2011.

[12] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL – Brazilian Electricity Regulatory Agency), "Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3a Edição". Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.

VIII. BIOGRAFIAS

Eduardo de Medeiros Brandi recebeu seu BSEE da Universidade Gama Filho (1980), seu MS em Planejamento de Energia e Engenharia Nuclear da COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (1986), e seu MAB em Finanças da COPPEAD/Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005). O sr. Brandi trabalhou na empresa Furnas Centrais Elétricas de 1981 a 2013, atuando em vários departamentos como manutenção, planejamento, engenharia e operações. Ele tem ampla experiência em sistemas de transmissão, incluindo sistema de Transmissão Flexível em Corrente Alternada (FACT: "Flexible AC Transmission"), tendo assumido funções em diversas fases de especificação, projeto, implementação e testes de controle e proteção para sistemas de transmissão. Em 2014, o sr. Brandi trabalhou como consultor no projeto da Interligação Elétrica do Madeira (IE Madeira). Atualmente, ele é consultor da Belo Monte Transmissora de Energia, trabalhando no projeto do bipolo de 800 kVdc. É autor e coautor de diversos artigos técnicos apresentados em seminários nacionais e internacionais.

Ricardo Abboud recebeu seu BSEE em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia em 1992. Em 1993, ele começou a trabalhar na CPFL Energia como engenheiro de proteção. Suas responsabilidades incluíam manutenção, comissionamento, especificações, estudos e ajustes de relés de proteção dos sistemas de potência. Em 2000, o sr. Abboud saiu da CPFL e ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) como engenheiro de aplicação de campo, atuando em todo o Brasil. Suas responsabilidades incluíam fornecer treinamento e suporte técnico para os clientes da SEL nos serviços de automação e proteção de subestações nas áreas de geração, transmissão, distribuição e industrial. Em 2005, ele passou a ser o gerente de engenharia de campo na SEL Brasil. Desde 2014, o sr. Abboud lidera a área de serviços de engenharia do Brasil. Além disso, ele é um instrutor da Universidade SEL e ministra dois cursos de especialização no Brasil. É autor e coautor de diversos artigos técnicos.

Fernando Calero recebeu seu BSEE em 1986 da University of Kansas, seu MSEE em 1987 da University of Illinois (Urbana-Champaign) e seu MSEPE em 1989 do Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. De 1990 a 1996, o sr. Calero trabalhou em Coral Springs, Flórida, para a ABB Relay Division nas áreas de suporte, treinamento, testes e projeto de relés de proteção. Entre 1997 e 2000, o sr. Calero trabalhou para a Itec Engineering, Florida Power & Light e Siemens. Desde 2000, o sr. Calero trabalha na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro de aplicação em marketing e vendas internacionais, fornecendo treinamento e assistência técnica. Atualmente, ele é engenheiro de sistemas de automação sênior no Grupo de Tecnologia Internacional.