



**XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPC/17
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

PROTEÇÃO DOS FILTROS DE HARMÔNICOS DO BIPOLO 2 DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DO RIO MADEIRA

**Renan Bernardes (*)
SEL**

**Ricardo Abboud
SEL**

RESUMO

Este artigo apresenta a filosofia adotada para a proteção dos filtros de harmônicos do bipolo 2 associados ao projeto da Interligação do rio Madeira (ou IE Madeira), localizados nas subestações Coletora de Porto Velho e Araraquara 2. São apresentados dados e parâmetros relevantes dos filtros, bem como ajustes das funções de proteção consideradas. A solução descrita contempla a proteção dedicada para cada componente, considerando retaguarda realizada por relés distintos. São introduzidos temas como proteção térmica para os reatores que considera o efeito pelicular e detecção avançada da perda de sintonia do filtro.

PALAVRAS-CHAVE

IE Madeira, Filtro de Harmônicos, Proteção Térmica, Perda de Sintonia

1.0 - INTRODUÇÃO

As usinas de Santo Antônio e Jirau, localizadas no rio Madeira em Rondônia, estão conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) através da interligação da SE Coletora de Porto Velho (CPV) à Subestação Araraquara 2 (ARA). Trata-se do primeiro projeto para integração do potencial hidrelétrico da Amazônia ao SIN.

São duas linhas de transmissão (bipolo 1 e bipolo 2), com cerca de 2400 km de comprimento cada. Devido a esta grande distância e ao grande bloco de energia a ser transferida, o uso de corrente contínua tornou-se economicamente mais viável. Porém, as estações conversoras responsáveis pela retificação do sinal atuam como fontes de correntes harmônicas no sistema elétrico. Neste cenário, torna-se fundamental a aplicação de filtros, a fim de garantir que os níveis de harmônicos no SIN não comprometam a qualidade da energia, conforme estabelecido pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) [6]. A figura 1 [1] apresenta o diagrama unifilar simplificado do projeto IE Madeira considerando o bipolo 2, enfoque deste trabalho.

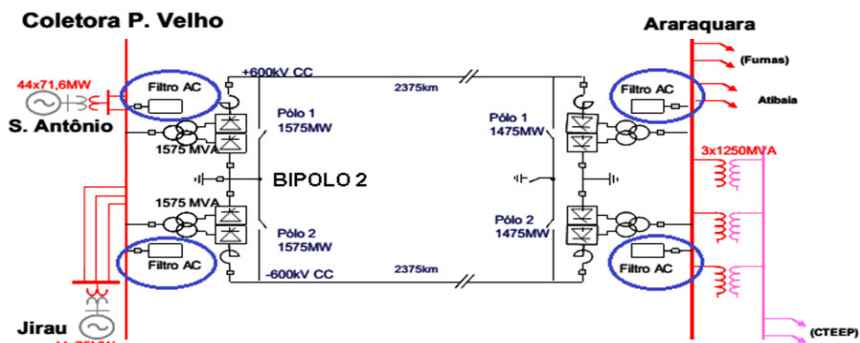


Figura 1 – Diagrama Unifilar do Sistema em Corrente Contínua do IE Madeira

Por tratar-se de aplicação em alta tensão (operação em até 550 kV) e altas potências, os filtros de harmônicos contam com arranjos relativamente complexos, que combinam capacitores em ponte tipo H, reatores e resistores em circuitos série-paralelo, além de unidades capacitivas auxiliares.

Ao todo existem 6 filtros de harmônicos na Subestação Araraquara e 5 filtros na Subestação Coletora de Porto Velho. As potências e as ordens harmônicas a serem sintonizadas variam entre eles, portanto os arranjos dos componentes dos filtros são diferentes conforme apresentado na figura 2 (5).

2.0 - DADOS TÉCNICOS E ARRANJOS DOS FILTROS

Na subestação Araraquara 2, existem 4 filtros chamados de tipo A e 2 filtros conhecidos como tipo B. Os filtros tipo A (305 MVar) foram projetados para filtrar os componentes de 12^a e 24^a ordens harmônicas, enquanto os filtros tipo B (316 MVar) são basicamente compostos por banco de capacitores shunt.

A subestação Coletora de Porto Velho possui 2 filtros tipo A, 2 filtros tipo B e 1 filtro tipo C, todos com potência de 247 MVar cada. Os filtros tipo A estão sintonizados para a 3^a, 13^a e 40^a ordens harmônicas, os filtros tipo B para 5^a, 11^a e 23^a e o filtro tipo C para a 13^a e 31^a. A figura 2 apresenta o arranjo e dados técnicos dos filtros da SE CPV.

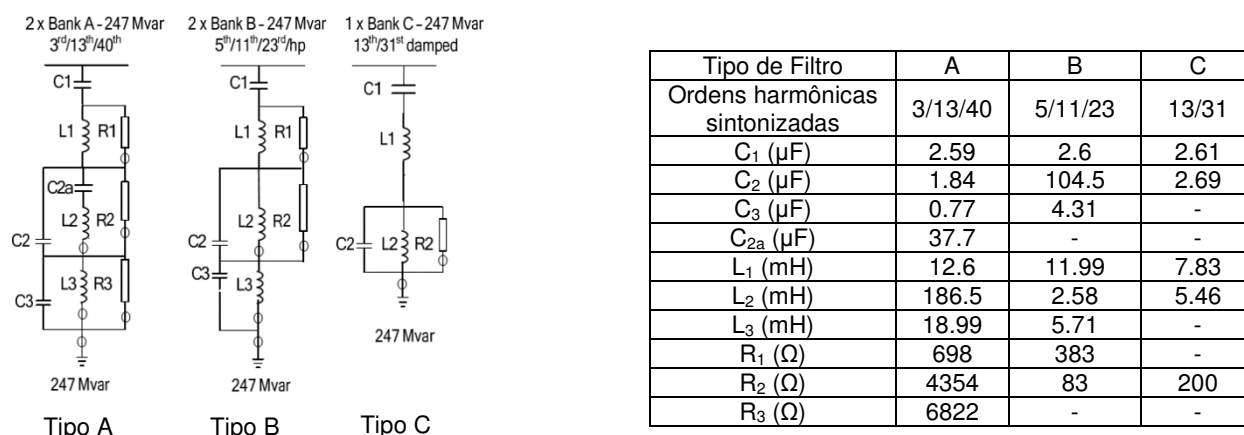


Figura 2 – Arranjos e dados técnicos dos filtros harmônicos na SE Coletora de Porto Velho

Os critérios e ajustes apresentados neste artigo terão como referência o filtro tipo A da SE Coletora de Porto Velho, por se tratar do filtro com maior número de componentes. Porém, a mesma filosofia é adotada para os demais filtros da SE CPV e também para os filtros da SE ARA.

3.0 - FUNÇÕES E CONEXÕES DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

Foi considerado basicamente um relé de proteção para cada componente principal do filtro, tal como banco de capacitores principais, reatores e resistores. A figura 3 abaixo mostra o esquema de ligações para os IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) envolvidos na proteção dos filtros tipo A da SE Coletora de Porto Velho. São evidenciadas nesta figura apenas as funções principais de cada dispositivo para cada componente, onde o IED F50BF é responsável pela proteção do banco de capacitores C1, F49R1, F49R2 e F49R3 realizam a proteção dos resistores R1, R2 e R3 respectivamente, e F49L1, F49L2 e F49L3 realizam a proteção dos reatores L1, L2 e L3 respectivamente.

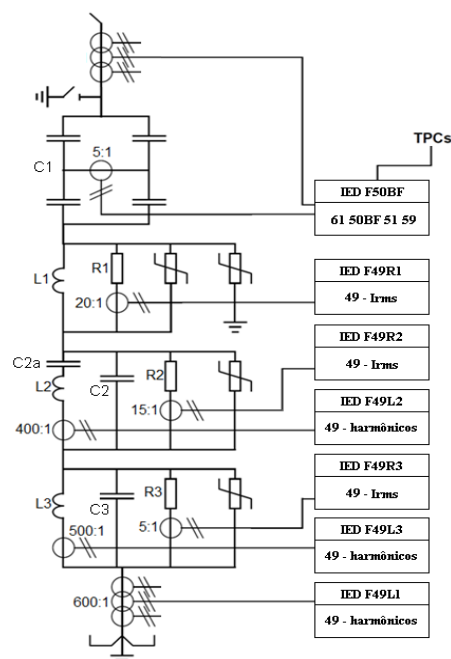


Figura 3 – Diagrama unifilar de proteção com as funções principais de cada IED para os filtros tipo A da SE CPV

Os capacitores auxiliares C2, C2a e C3 da figura 3 também foram considerados no sistema de proteção. Conforme será mostrado adiante, a mesma é realizada através da detecção da perda de sintonia.

Ainda, alguns relés do circuito irão realizar proteção de retaguarda para o componente adjacente, garantindo maior confiabilidade ao projeto do sistema de proteção. A tabela 1 a seguir mostra resumo das funções realizadas por cada IED para os filtros tipo A da Subestação Coletora de Porto Velho.

Tabela 1 – Funções de proteção realizadas por cada IED

IED	Funções de Proteção
F50BF	Desbalanço de corrente de fase para os capacitores C1, falha de disjuntor, sobrecorrente e sobretensão total do filtro e backup do reator L1
F49L1	Elemento térmico para o reator L1 (considerando correntes harmônicas) e backup de todos os demais componentes
F49R1	Elemento térmico para o resistor R1 e backup do reator L1
F49L2	Elemento térmico para o reator L2 (considerando correntes harmônicas)
F49R2	Elemento térmico para o resistor R2 e backup do reator L2
F49L3	Elemento térmico para o reator L3 (considerando correntes harmônicas)
F49R3	Elemento térmico para o resistor R3, backup do reator L3
P1	Envio dos valores de temperatura a todos IEDs para a função térmica. Proteção contra perda de sintonia para detecção de falhas nos capacitores auxiliares
P2	Medição de temperatura ambiente através de sensores RTDs tipo Pt100. A temperatura é enviada ao P1 que retransmite para todos IED com função térmica

4.0 - FILOSOFIAS E AJUSTES DE PROTEÇÃO

4.1 Proteção dos capacitores principais

A proteção dos capacitores principais (C1) será realizada através da proteção contra desbalanço de corrente (código ANSI 60 ou 61) para as 3 fases. Na configuração ponte H, a proteção do banco capacitor utiliza a corrente oriunda do transformador de corrente (TC) localizado no centro do "H". Em condições normais de operação, as correntes nestes TCs devem possuir valores nulos ou próximos de zero. Falhas nos elementos capacitivos internos às unidades irão gerar correntes de desequilíbrio nos pontos médios da ponte H, e consequente operação do relé de proteção associado.

Devido a diferenças das características construtivas dos elementos capacitivos, pode haver corrente de desbalanço "natural" em condições normais de operação. O IED F50BF considerado para tal função realiza a compensação desta corrente de forma automática, para evitar atuações indevidas e medições incorretas, aumentando ainda a sensibilidade para detectar falhas internas. Para esta compensação, o relé cria um fasor de corrente exatamente idêntico à corrente de desbalanço "natural", a fim de eliminar completamente seu efeito para a proteção. A figura 4 [2], mostra o fasor criado pelo IED para compensação desta corrente intrínseca, que deverá ser medida na etapa do comissionamento. Na figura, a corrente 60UIXp é a corrente de desequilíbrio encontrada em condições normais, e UB60Xp é o fasor criado que será subtraído à corrente 60UIXp de forma automática, tornando nula de fato a corrente de desbalanço em condições de operação. A lógica resumida para essa função é também mostrada na figura 4 [2]

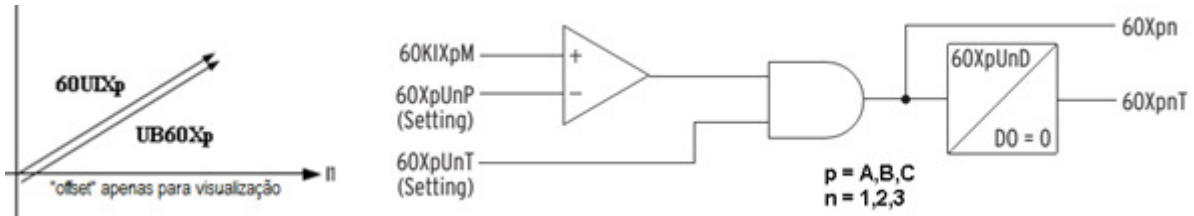


Figura 4 – Compensação automática da corrente de desequilíbrio "natural" e lógica do elemento 61 realizada pelo relé F50BF

As seguintes equações estão associadas à lógica acima:

$$60KIX_p = 60UIX_p - UB60X_p \quad [1]$$

$$UB60X_p = KX_{pIM} \cdot e^{j \cdot KX_{pIA} \cdot \frac{\pi}{180} \left(\frac{CTRW}{CTR_{Xp}} \right) (I\phi W2F)} \quad [2]$$

Onde:

p = A, B, C – elemento para as fases A, B e C

n = 1, 2, 3 – estágios ou níveis do elemento (nível 1 = alarme, nível 2 = trip, nível 3 = trip rápido)

60KIXpM = corrente compensada (conforme eq. 1) usada no elemento

60XpUnP = ajuste de pickup ou partida para cada fase (p) e cada estágio (n) – [A sec]

60XpUnT = equação de controle de torque para habilitar o elemento por lógica customizada caso necessário

IoW2F = corrente de fase (total) do filtro [A sec]

CTRW = relação de TC da corrente total do filtro

CTR_X = relação de TC da corrente de desbalanço

KxpIM = fator de compensação do elemento de desbalanço, magnitude do fasor [A sec]

KXpIA = fator de compensação do elemento de desbalanço, ângulo do fasor [graus elétricos]

As tabelas 2 e 3 apresentam valores de corrente de desbalanço para determinada quantidade de elementos sob falha e os ajustes propostos para este elemento de proteção, respectivamente. Este estudo e definição foi realizado pelo fabricante dos filtros, basicamente conforme recomendações presentes em [3].

Tabela 2 – Correntes de desbalanço

Elementos capacitivos sob falha	Corrente de desbalanço (mA)
1	5 a 7
2	13 a 15
3	22 a 25
4	34 a 38
5	49 a 54
6	69 a 75
7	97 a 104
8	137 a 147
9	202 a 216
10	325 a 346

Tabela 3 – Ajustes propostos para a proteção de desbalanço

Nível / Estágio	Nº de elementos sob falha	Corrente de partida (mA)	Temporização (seg)
Alarme	2	10	300
Trip	5	44	7200
Trip rápido	8	1200	0,08

4.2 Proteção dos Reatores

Os reatores dos filtros harmônicos serão providos de proteção de modo a assegurar que eles operem dentro de sua suportabilidade térmica. A principal função dos IEDs correspondentes, F49L1, F49L2 e F49L3 é realizar a proteção contra sobrecarga baseado na imagem térmica.

Devido ao efeito pelicular (*skin effect*), a resistência aparente dos condutores dos reatores aumenta com o aumento da frequência dos sinais da corrente passante, devido à diminuição da área efetiva do condutor. Este aumento do valor de resistência proporcional à frequência foi incluso no elemento térmico ajustado, uma vez que irá influenciar diretamente o efeito Joule, proporcional a RI^2 . No projeto em questão, foram consideradas as influências individuais de 13 ordens harmônicas mais relevantes para cada reator. Os IEDs F49Ln ($n = 1, 2$ e 3) realizam medição, conforme requisitos de [9] para os sinais de corrente considerando harmônicos individuais até a 63ª ordem.

A proteção de imagem térmica para os reatores será feita conforme leis da termodinâmica e efeito Joule. A referência [8] forneceu subsídios para criação deste elemento. A figura 5 apresenta o circuito elétrico análogo para o elemento térmico e a equação 3 mostra a fórmula implementada nos IEDs F49Ln para cálculo da temperatura T.

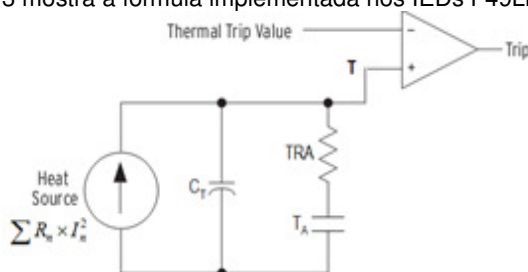


Figura 5 – Circuito elétrico análogo para o modelo térmico dos reatores

O cálculo da temperatura T acima é feito com base na seguinte equação:

$$T_j = \frac{\sum R_n \times I_n^2 \times N_{ct}^2}{C_T} \times \Delta t + T_{j-1} - \frac{T_{j-1} - T_A}{TRA \times C_T} \times \Delta t \quad [3]$$

Onde:

- T_j and T_{j-1} são as temperaturas calculadas no processamento j do IED F49Ln [°C]
- R_n é a resistência para a e-nésima ordem harmônica [ohms] – conforme tabela 5
- I_n é a corrente da e-nésima harmonica no secundário do TC - [A sec]
- N_{ct} é a relação do TC
- C_T é a capacidade térmica - [kJ / K]
- Δt é o intervalo de processamento do IED F49Ln – no caso 8 [ms]
- T_A é a temperatura ambiente fornecida pelo IED P1 – [°C]
- TRA é a resistência térmica ao ambiente [K / kW] fornecida pelo fabricante

De acordo com o fabricante dos filtros, os dados para a proteção térmica dos reatores são mostrados na tabela 4 a seguir. A tabela 5 abaixo apresenta resumo dos ajustes contemplando os níveis de alarme e trip por sobretemperatura, indicando sobrecarga térmica nos reatores dos filtros tipo A da Subestação CPV.

Tabela 4 – Dados para parametrização do elemento térmico

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

Tabela 5 – Ajustes do elemento térmico

	Reator L1	Reator L2	Reator L3
Temp alarme (°C)	120.6	129.8	118.3
Temp trip (°C)	130.6	139.8	128.3

4.3 Proteção dos Resistores

A proteção dos resistores segue o mesmo princípio considerado para a proteção dos reatores dos filtros. A principal função dos IEDs correspondentes, F49R1, F49R2 e F49R3, é realizar a proteção contra sobrecarga baseado na imagem térmica para os resistores.

Para os resistores, contudo, a variação da resistência do seu condutor devido ao efeito pelicular é desprezível se comparado a seu valor ôhmico de mercado, (miliohms versus centenas de ohms). Portanto, foi possível considerar somente o valor do resistor definido pelo fabricante do componente no seu elemento térmico. A corrente usada nos cálculos do efeito Joule é a corrente eficaz “true RMS” que leva em conta componentes harmônicos até a 63ª ordem.

A equação 4 abaixo mostra a fórmula adotada para cálculo da temperatura dos resistores.

$$T_j = \frac{R \times I_{rms}^2 \times N_{ct}^2}{C_T} \times \Delta t + T_{j-1} - \frac{T_{j-1} - T_A}{TRA \times C_T} \times \Delta t \quad [4]$$

Onde:

- T_j e T_{j-1} são as temperaturas calculadas no processamento j do IED F49Rn – [°C]
- R é a resistência do resistor – [ohms]
- I_{rms} é a corrente eficaz (true RMS) no secundário do TC – [A sec]
- N_{ct} é a relação do TC
- C_T é a capacidade térmica – [kJ / K]
- Δt é o intervalo de processamento do IED F49Rn – no caso 8 [ms]
- T_A é a temperatura ambiente fornecida pelo IED P1 – [°C]
- TRA é a resistência térmica ao ambiente [K / kW] fornecida pelo fabricante do resistor

A tabela 6 apresenta os valores ôhmicos dos resistores assim como os dados para cálculo da temperatura conforme equação 4 para os filtros tipo A da Subestação CPV. A tabela 7 apresenta os ajustes do elemento.

Tabela 6 – Dados técnicos para parametrização

		Resistor R1	Resistor R2	Resistor R3
Resistência	Ω	698	4354	6822
Potência nominal	kW	297	815	144
Calor específico - C_T	kJ/K	37	55.5	16.5
Resistência térmica - TRA	K/kW	1.3468	0.4294	3.4722

Tabela 7 – Ajustes do elemento térmico

	Resistor R1	Resistor R2	Resistor R3
Talarm (°C)	430	380	530
Ttrip (°C)	440	390	540

4.4 Proteções de Retaguarda

4.4.1 Proteção de Retaguarda para os Reatores

Os IEDs conectados aos resistores, F49R1, F49R2 e F49R3, também são responsáveis por realizar a imagem térmica para cálculo da temperatura dos reatores L1, L2 e L3 respectivamente, exatamente da mesma maneira que apresentada anteriormente. A única alteração é que as correntes usadas nas fórmulas circulam agora no resistor e precisam ser ajustadas. As correntes que circulam nos resistores R1, R2 e R3 são extremamente inferiores às correntes dos reatores L1, L2 e L3 respectivamente. Portanto, além de possuírem boa precisão para leituras de baixas correntes, será necessário multiplicar as correntes medidas por fatores de ajuste nos relés F49Rn, para indiretamente obter as correntes passante nos reatores para cada ordem harmônica.

Para os reatores haverá ainda proteção de retaguarda de sobrecorrente por tempo definido, considerando a corrente eficaz “true RMS”. São ajustados 2 estágios, sendo o primeiro para alarme e o segundo estágio para trip, com temporização de 20 segundos.

4.4.2 Proteção de Retaguarda para os Resistores

A proteção de retaguarda de todos os resistores será feita pelo IED F49L1 que mede a corrente total do filtro. Este relé irá realizar a medição da corrente chamada ITHD, que na prática refere-se à corrente de distorção harmônica total em Ampères, calculada conforme equação 5 abaixo:

$$I_{THD} = \frac{THDI_p \times I_1 \times N_{ct}}{100} \quad [5]$$

Onde:

- $THDI_p$ – distorção harmônica total de corrente da fase p (A, B e C) – [%]
- I_1 – componente fundamental (60 Hz) da corrente da fase F (A, B ou C) – [A]
- N_{ct} é a relação do TC - $N_{ct}:1$

4.5 Proteção Contra Perda de Sintonia

A proteção contra perda de sintonia é baseada na análise das variações das relações entre as correntes circulantes nos resistores do filtro para frequências específicas. Este elemento foi criado para auxiliar a identificar falhas ou anomalias nos capacitores auxiliares, componentes que não possuem IED dedicado para a proteção, mas que podem comprometer o desempenho do filtro caso apresentem problemas.

Os IEDs F49R1, F49R2 e F49R3 realizam a medição da corrente harmônica individual e transmitem a informação para o processador de comunicação, IED P1. Este dispositivo irá realizar cálculos das relações entre as correntes de diferentes pontos do filtro, verificando se está dentro de valores esperados. Caso contrário, o processador irá detectar perda de sintonia e enviar sinal de alarme ao sistema supervisor.

As figuras 6 e 7 a seguir mostram as lógicas realizada pelo IED P1 para os alarmes da proteção contra perda de sintonia, considerando a fase A. As lógicas para as demais fases são similares.

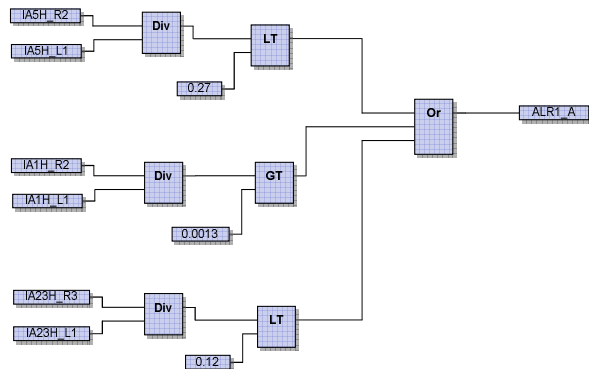


Figura 6 - Lógica para alarme nível 1

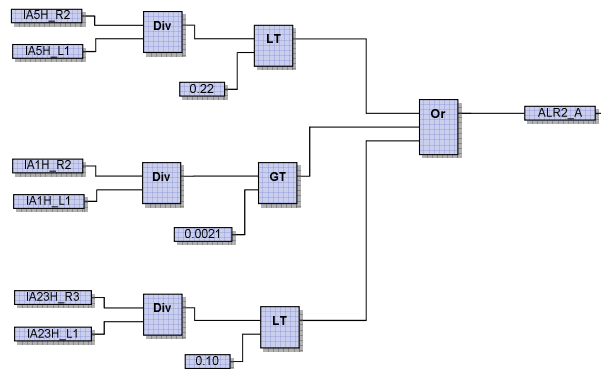


Figura 7 – Lógica para alarme nível 2

Legenda:

- IA5H_R2 – corrente da fase A de 5ª harmônica medida pelo IED 49R2 do filtro 1
- IA5H_L1 – corrente da fase A de 5ª harmônica medida pelo IED 49L1 do filtro 1
- IA1H_R2 – corrente da fase A fundamental medida pelo IED 49R2 do filtro 1
- IA1H_L1 – corrente da fase A fundamental medida pelo IED 49L1 do filtro 1
- IA23H_R3 – corrente da fase A de 23ª harmônica medida pelo IED 49R3 do filtro 1
- IA23H_L1 – corrente da fase A de 23ª harmônica medida pelo IED 49L1 do filtro 1
- Div – operador matemático de divisão
- LT – “lower than” – bloco lógico matemático “menor que”
- GT – “greater than” – bloco lógico matemático “maior que”
- Or – “or” – bloco lógico booleano “ou”
- ALR1_A – sinal de alarme nível 1 de perda de sintonia da fase A do filtro 1
- ALR2_A – sinal de alarme nível 2 de perda de sintonia da fase A do filtro 1

4.6 Proteção do Filtro “Total”

Todos os filtros de harmônicos contam ainda com proteções convencionais adotadas, com o intuito de proteger o filtro contra curto-circuito e anomalias de forma integral, e não individualmente por componente como apresentado.

São aplicadas as funções de sobretensão trifásicas (ANSI 59), diferencial (ANSI 87), sobrecorrente (ANSI 50/51) e falha de disjuntor (ANSI 50/62BF). Os ajustes para estas funções foram definidos conforme critérios convencionalmente adotados.

5.0 - CONCLUSÃO

Na concepção do projeto do IE Madeira, foi solicitada pelas empresas que compõem o consórcio, a utilização e definição de um sistema de proteção robusto, abrangente e extremamente confiável, considerando proteções individuais para os componentes dos filtros com até duas proteções retaguardas quando possível, além da proteção do filtro integral. Ainda, o sistema de proteção implantado primou pela sensibilidade e segurança, fato este evidenciado nos casos da compensação da corrente de desbalanço “natural” para os capacitores principais da ponte H; inclusão do efeito pelicular na proteção contra sobrecarga térmica dos reatores, feita através do uso de resistências e correntes de ordens harmônicas relevantes; e até mesmo a detecção de falhas nos capacitores auxiliares, feita através da proteção contra perda de sintonia.

Estima-se que menos de 1% do potencial hidrelétrico da bacia do Amazonas tenha ainda sido explorada [7]. Tendo em vista a fundamental importância de novas fontes de energéticas para o crescimento econômico do país, é esperado que empreendimentos similares ao IE Madeira e Belo Monte, sejam implantados na região Norte no futuro. Ainda, o tema proteção de filtros harmônicos em alta tensão não possui referências bibliográficas extensas, como acontece para outras funções de proteção aplicadas para ativos nos sistemas de transmissão.

Neste cenário, buscou-se apresentar uma filosofia de proteção que possa servir de apoio para novas aplicações de filtros AC em alta tensão de forma geral, e, futuramente, para projetos relacionados à integração do potencial hidráulico da Amazônia.

6.0 - REFERÊNCIAS

- (1) ANEEL, Edital de Leilão 007/2008 – Anexo 6F-CC Lote LF –CC, Integração do Madeira, www.aneel.gov.br
- (2) Manual de Instruções do Relé SEL-487V, disponível em www.selinc.com
- (3) IEEE C37.99 – 2012 - IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks and Filter Capacitor Banks
- (4) Manual de Instruções do IED SEL-735, disponível em www.selinc.com
- (5) F. Jusan, L. Carijó, G. Luz, R. Gonçalves, M. Lima, M. Cavalheiro, G. Oheidhin, “Sistema de Transmissão CCAT do Madeira – Estudos de Desempenho Harmônico e Rating dos Filtros CA do Bipolo 2
- (6) ONS – Procedimentos de Rede – Módulo 2 - Submódulo 2.8
- (7) B. Kusel, K. Silva, E. Molas, “Pode a Função de Distância Ser Utilizada na Proteção de Linhas de Transmissão com Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda?”, XI STPC, Nov/2012
- (8) Guia de aplicação “Implementação da Proteção Térmica de Linhas, Relé SEL-49 nos relés SEL-421, Usando as Equações SELogic” – www.selinc.com.br
- (9) ABNT NBR IEC 61000-4-30:2011 - Compatibilidade eletromagnética - Parte 4-30: Técnicas de medição e ensaio - Métodos de medição de qualidade da energia