



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

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO –V

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

**FILOSOFIA DE PROTEÇÃO SIEMENS ADOTADA PARA OS GERADORES SÍNCRONOS DO PROJETO RIO
MADEIRA**

Rafael de Oliveira Fernandes *
SIEMENS

RESUMO

A filosofia de proteção adotada para um gerador síncrono muitas vezes se correlaciona à sua potência nominal, tendo em vista as exigências normativas adotadas nos respectivos países. Obviamente que o grau de exigência adotado se correlaciona também à critérios econômicos, porém a integridade do gerador síncrono, durante as condições de defeito, deve ser mantida-sob qualquer hipótese, seja econômica ou técnica.

Este trabalho apresenta a filosofia de proteção Siemens adotada no projeto Rio Madeira e, em particular da proteção de falta à terra no estator com injeção sub-harmônica de 20Hz, para a usina de Santo Antonio, levando-se em conta a seletividade e coordenação da sua respectiva zona de proteção de modo à garantir a máxima disponibilidade do gerador. Para a Usina de Jirau adotou-se outra filosofia a qual não será abordada neste artigo.

PALAVRAS-CHAVE

Relé de Proteção, Falta à Terra, Zonas de Proteção, Injeção Sub-Harmônica-20Hz

1.0 - INTRODUÇÃO

A importância da detecção de faltas à terra nos enrolamentos do gerador torna-se um problema para os relés de proteção devido à adoção do sistema de aterramento. Este aterramento leva em consideração o compromisso entre as correntes originadas durante o curto-circuito fase-terra e as sobretensões originadas nas fases não envolvidas no defeito. Uma vez que o sistema não é considerado eficazmente aterrado essas sobretensões serão originadas levando-se em conta principalmente a relação entre as impedâncias de sequência positiva e zero-vistas no ponto de defeito, que nesta condição provocarão um deslocamento de tensão no neutro e com isso sobretensão nas fases ditas "sadias". Para um sistema solidamente aterrado, o deslocamento de tensão será evitado porém as correntes de defeito fase-terra poderão atingir valores inaceitáveis para os equipamentos e o próprio gerador.

No projeto Rio Madeira, UHE Santo Antonio, o neutro do gerador será aterrado por um transformador e a proteção de falta à terra dos enrolamentos se dará com a injeção sub-harmônica de 20Hz à fim de se garantir que o enrolamento tenha 100% de cobertura durante defeitos fase-terra. Para tanto algumas exigências construtivas de projeto foram adotadas à fim de garantir que a mínima corrente de curto-circuito fase-terra esteja dentro da faixa de sensibilidade do relé de proteção.

2.0 - ESTRUTURA DO EMPREENDIMENTO

O empreendimento Rio Madeira será compreendido por duas grandes hidrelétricas, sendo:

1) UHE SANTO ANTONIO:

- 44 (quarenta e quatro) geradores 82,25 MVA turbinas do tipo Bulbo
- 11 (onze) transformadores elevadores 165 – 165 – 330MVA / 13,8 – 13,8 – 525kV (YNd1d1);
- 3 (três) subestações isoladas a gás SF6 associadas às casas de força, assim constituídas:
 - SE MD (SE Margem Direita) com 1 (um) vão de interligação de barras, com 2 (dois) vãos com Transformadores Elevadores, com 8 (oito) unidades geradoras e 2 (dois) vãos de linhas para interligar com a SE Coletora;
 - SE ME (SE Margem Esquerda) com 1 (um) vão de interligação de barras, com 6 (seis) vãos com Transformadores Elevadores, com 24(vinte e quatro) unidades geradoras e 2 (dois) vãos de linhas para interligar com a SE Coletora;
 - SE LD (SE Leito do Rio) com 1 (um) vão de interligação de barras, 3 (três) vãos com Transformadores Elevadores , com 12 (doze) unidades geradoras e 2 (dois) vãos de linhas para interligar com a SE Coletora;

2) UHE JIRAU:

- 44 (quarenta e quatro) geradores de 83,33 MVA e turbinas do tipo Bulbo
- 12 (onze) transformadores elevadores 170 – 170 – 340MVA / 13,8 – 13,8 – 525kV (YNd1d1);
- 2 (duas) subestações isoladas a gás SF6 associadas às casas de força, assim constituídas:
 - SE MD (SE Margem Direita) com 1 (um) vão de interligação de barras, com 7 (sete) vãos com Transformadores Elevadores, com 28 (vinte e oito) unidades geradoras e 2 (dois) vãos de linhas para interligar com a SE Coletora e um (1) vão de linha curta que interliga com a SEME (SE Margem Esquerda);
 - SE ME (SE Margem Esquerda) com 1 (um) vão de interligação de barras, com 5 (cinco) vãos com Transformadores Elevadores, com 18(dezoito) unidades geradoras e 1(um) vão de linha para interligar com a SE Coletora e um (1) vão de linha curta que interliga com a SEME (SE Margem Direita);

2.1 DESCRIÇÃO DA FILOSOFIA DE PROTEÇÃO

O secundário e o terciário do transformador elevador serão conectados aos geradores através de um barramento de geração. Os geradores serão conectados em paralelo dois à dois e o neutro das máquinas serão aterrados através de um transformador-de acordo com a figura 2, sendo a relação de transformação: 12000-500V e a resistência secundária: 1,2Ω. Na figura 1 verifica-se as funções de proteção que foram adotadas no projeto. Tratar-se-á da proteção de falta à terra do estator com injeção sub-harmônica de 20Hz devido à sua complexidade quanto aos problemas originados pela seletividade e coordenação.



FIGURA 1 – Funções de Proteção Adotadas na UHE Santo Antonio

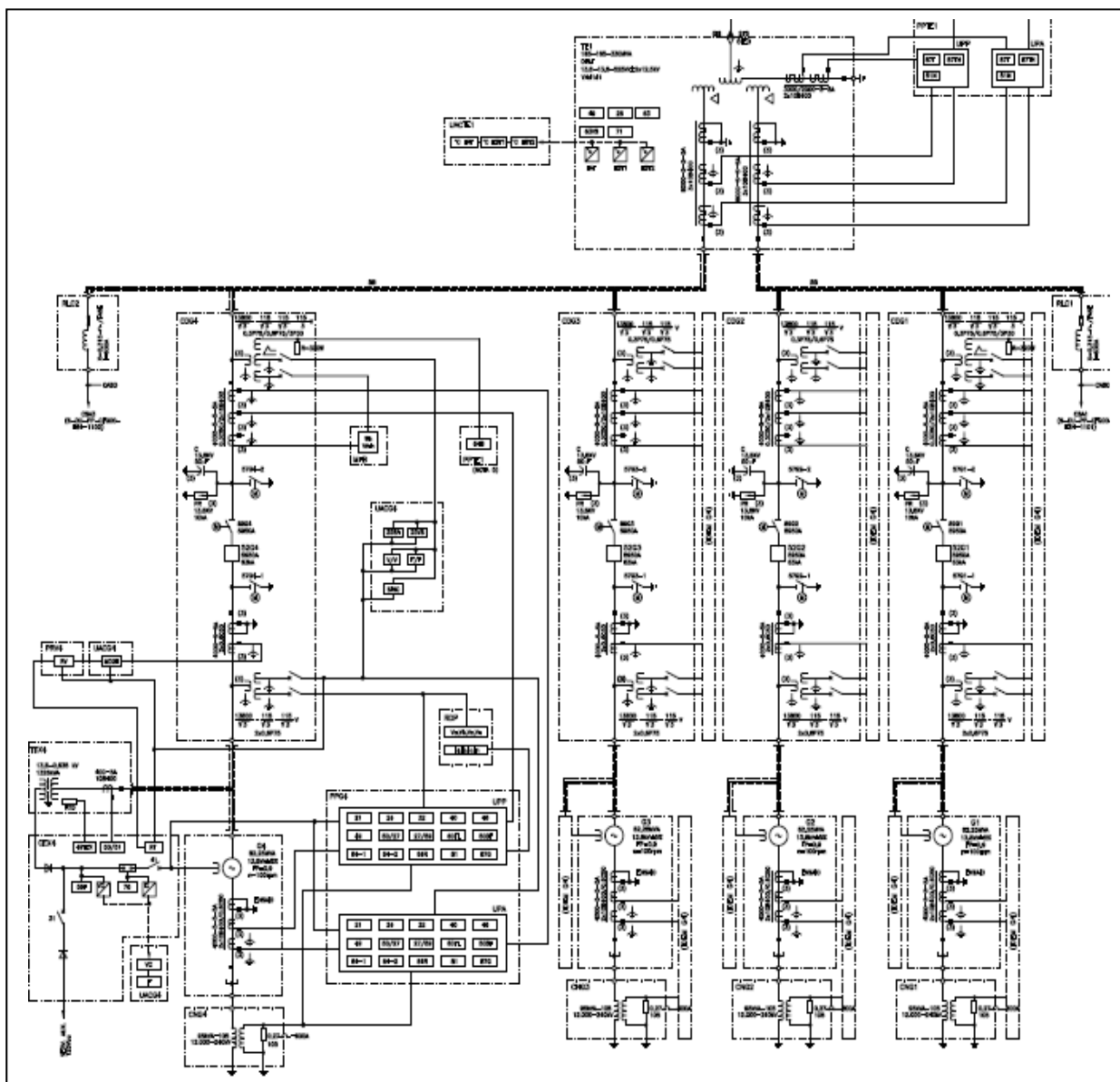


FIGURA 2 – Diagrama Unifilar de um Conjunto do Trafo Principal

Nesta figura observa-se a conexão do conjunto de duas máquinas dispostas em paralelo e com os seus respectivos neutros aterrados por transformador de aterramento. Em função do aterramento do neutro das duas máquinas em paralelo adotou-se uma solução em particular à fim de se garantir a seletividade por atuações sequencias das proteções das máquinas.

O problema de detecção de faltas à terra nos enrolamentos se inicia à medida em que o ponto de falta se aproxima do fechamento do neutro da máquina. Nesses lugares a tensão induzida pode ser tão baixa à ponto do relé não ter sensibilidade de medição da corrente de falta referida ao secundário do trafo.

Para a configuração de duas unidades geradoras conectadas em paralelo a um barramento de geração, a proteção com medição de tensão à 60Hz ou através da medição de sobretensão de terceiro harmônico na saída dos terminais ou subtenção de terceiro harmônico, não funciona. Portanto esta função não será ativada/ usada neste projeto.

2.2 .DESCRIÇÃO DA PROTEÇÃO DE 20Hz

O conjunto é composto de um relé 7UM e dois módulos de injeção de tensão à 20Hz e de leitura da corrente à 20Hz, conforme a figura 3 abaixo:

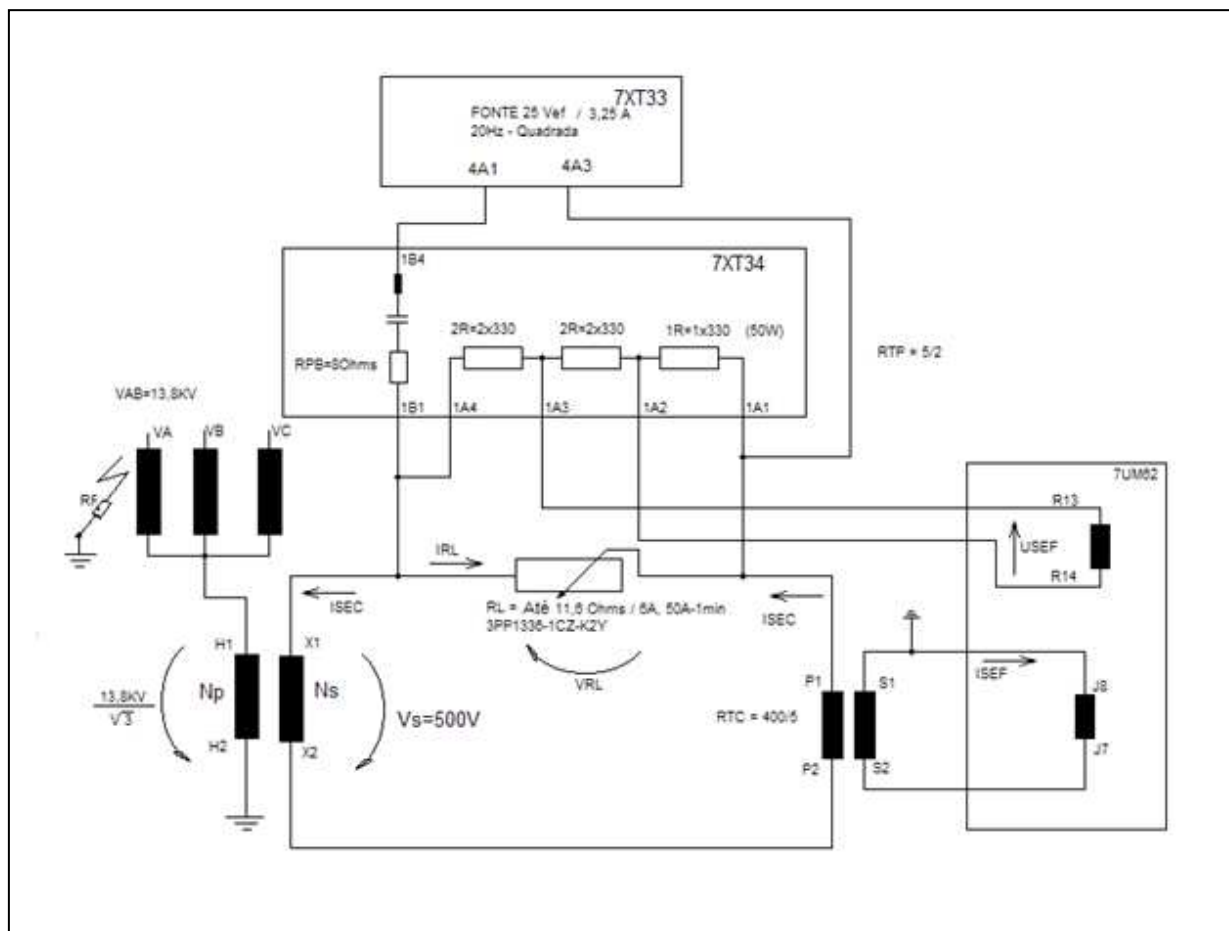


FIGURA 3 – Croqui de ligação da proteção Siemens de 20Hz

O conjunto é formado por uma fonte de 20Hz (de onda quadrada) – 7XT33, um módulo 7XT34 composto de 1 filtro passabanda (ou passafaixa) de 20Hz e um divisor de tensão de valor predeterminado.

O relé irá calcular o valor da resistência de falta dada por: $RSEF = \frac{USEF}{ISEF}$ aonde o objetivo é determinar uma proporcionalidade entre R_F e $RSEF$, chamado de **FATOR SEF** = $\frac{R_F}{RSEF} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \times \frac{RTP}{RTC}$. Observa-se que este fator, utilizado internamente pelo relé de proteção, será uma proporcionalidade entre a resistência de falta real no estator e a resistência medida no relé- $RSEF$. Os valores recomendados para trip e alarme de R_F são:

- 1) Trip entre 1 e 2 K Ω
- 2) Alarme entre 3 e 8 K Ω

Com esses valores de trip e alarme estima-se os valores de $RSEF$ que deverão ser ajustados no relé como:

- 3) $RSEF_{trip} = \frac{1 K\Omega}{FatorSEF}$,
- 4) $RSEF_{alarme} = \frac{3 K\Omega}{FatorSEF}$,

Assim, a fonte de 20Hz gera uma onda quadrada de valor eficaz da ordem de 25V. Esta tensão passando pelo filtro (no módulo 7XT34) é suavizada para uma senoide e que é aplicada sobre RL de acordo com o divisor de tensão $RTP=5/2$.

A tensão no divisor de tensão é fixa e depende somente de RL , no caso é a tensão de referência $USEF$. A tensão de RL , será a fonte de 20Hz que estará sendo aplicada ao transformador de neutro do gerador.

Ao ocorrer uma baixa resistência para terra, estabelecer-se-á uma corrente para terra diferente de uma corrente capacitiva, porém dependente do valor de R_F .

Esta corrente se refletirá no secundário do transformador, obedecendo a relação de transformação, ou em outras palavras no secundário do transformador o valor de R_F irá se refletir conforme: $R_s = R_p \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2$

A corrente no secundário do transformador de aterramento (I_{sec}) será encaminhada ao relé 7UM através de um TC de 400/5 e será denominado de $ISEF$.

O rele 7UM efetuará a relação : $RSEF = \frac{USEF}{ISEF}$,

Como o fator SEF é dependente da relação de transformação do trafo de neutro, RTC e RTP, que são todos fixos, assim o valor calculado pelo relé 7UM de RSEF poderá ser usado para balizar o alarme e o trip em condições de falta à terra.

No caso de um terra no estator na saída da máquina de tensão nominal 13800kV, surgirá: $\frac{13800}{\sqrt{3}}$ V no primário do transformador de neutro e aparecerá $= \frac{13800}{\sqrt{3}} / (500) = 15,94V$ no secundário do mesmo. Nesse caso, o Isec de 60Hz será proporcional ao valor RL.

Para a UHE Santo Antonio a relação de transformação de neutro é: 12000-500V e o resistor de carga será 1,2Ω, assim a corrente secundária será: $I_{sec} = 24/1,2 = 20$ A. A corrente na entrada do rele será: 250mA. Este valor não interfere no cálculo de RSEF, pois dentro do rele há um filtro de 20Hz que filtra valores de 60Hz no cálculo de RSEF. O valor de tensão de 500V também não afetará a fonte de 20Hz, devido ao filtro passa faixa de 7XT34, ou seja; toda tensão gerada pelo neutro do transformador em 60Hz ficará “aprisionada” sobre o filtro de 20Hz.

Em condições normais de operação, de acordo com a figura 3, a grandeza da corrente Isec se limitará à poucos miliampéres devido à alta impedância no primário do transformador. Esta corrente será capacitiva e originada pela capacitância equivalente vista no ponto de fechamento do neutro do gerador.

O valor de RL e da relação se torna essencial quanto à sensibilidade do relé de proteção, sendo que a faixa de tensão para USEF deverá ser de 0,3V à 15V e para ISEF de: 5mA à 40mA. Há um bloqueio da função de proteção caso os dois valores medidos, simultaneamente, estejam abaixo dos valores mínimos de ajuste.

Assim torna-se essencial ter um compromisso entre a resistência RL e relação de transformação do transformador de aterramento. Recomenda-se que o valor secundário do trafo de aterramento seja 500 Volts e a resistência de carga $RL > 0,5\Omega$. Para valores abaixo devem ser realizados ensaios para a correta funcionalidade da proteção.

Com o intuito de se demonstrar o efeito da tensão secundária e do resistor de carga realizou-se alguns ensaios, de acordo com as figuras 4 e 5 abaixo. Neste caso a tensão secundária do transformador de aterramento escolhida foi 240V (tensão secundária nominal encontrada comercialmente no Brasil), variou-se a resistência de carga RL e utilizou-se um reostato para variar a resistência de falta primária RF.

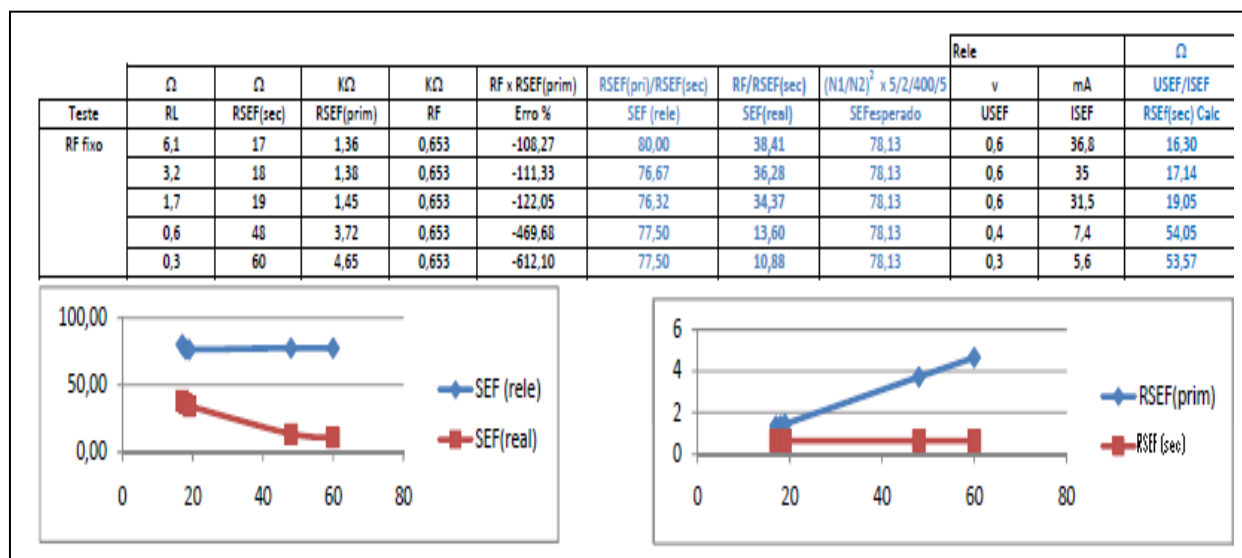


FIGURA 4 – Ensaio hipotético com Resistência de Falta = 0,653 Ω

Na figura acima observa-se uma não linearidade entre o fator SEF lido no relé e o fator SEF real, assim como observa-se uma não linearidade entre as resistências RSEF primária e secundária. Observa-se que o maior erro obtido se deu para valores menores de RL. A explicação se dá em função dos baixos valores de USEF e ISEF medidos.

Em alguns casos aonde a resistência RL projetada é muito baixa, se faz necessário o uso de um TP auxiliar para corrigir esse desvio-aumentar a tensão de referência USEF, porém ainda o melhor caso é quando a tensão secundária é 500V e a resistência de carga é maior que 0,5Ω. A sua conexão se dá de acordo com a figura 5 abaixo:

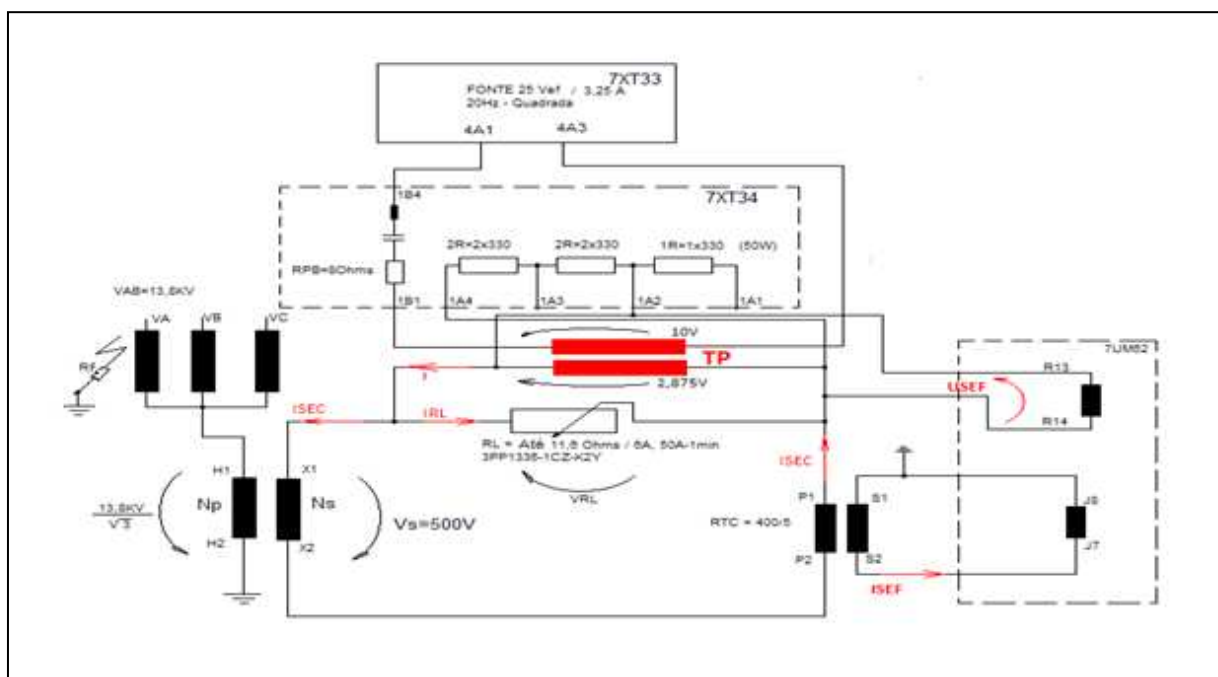


FIGURA 5 – Uso do TP auxiliar para correção de desvios de medição

Uma das dificuldades é encontrar um TP, com relação transformação compatível no Brasil, para realizar o casamento de tensões. Assim é conveniente que o projeto inicial contemple o trafo de aterramento cuja tensão secundária seja 500V.

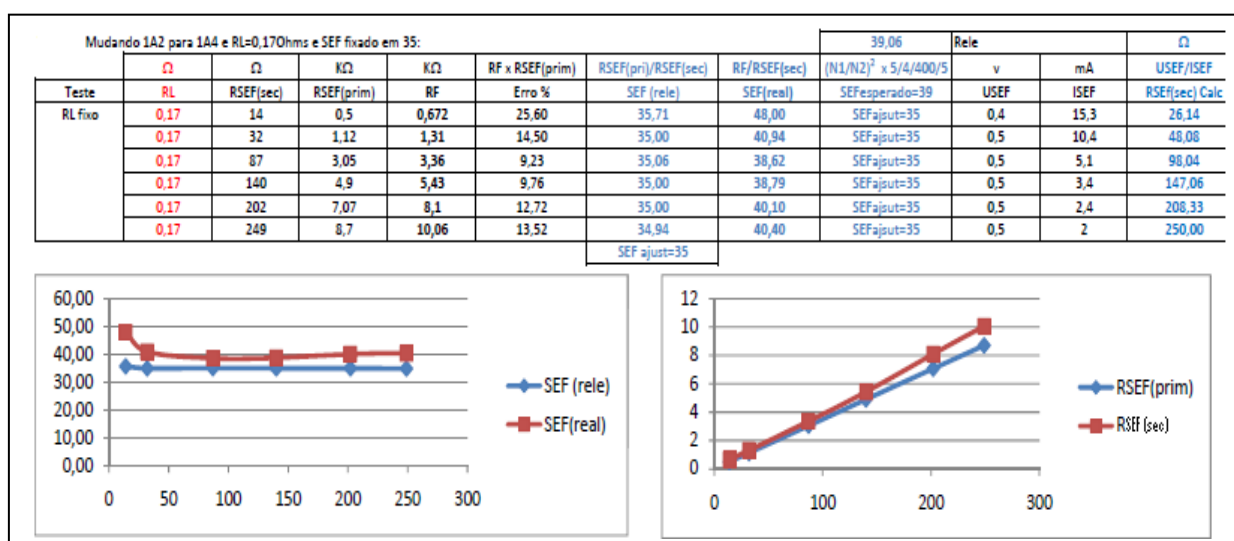


FIGURA 6 – Reajustando o Relé com o Fator SEF = 35

Assim alterando-se a conexão dos terminais de 1A2 para 1A4, houve um ganho de estabilidade na tensão de referência USEF, aonde chegou-se à uma boa linearidade entre a resistência primária de falta e a resistência secundária medida pelo relé.

2.3 DESCRIÇÃO DA COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE 20 Hz

De acordo com a figura 2 verifica-se que as duas máquinas possuem o neutro aterrado através de trafo de aterramento. Originalmente algumas soluções foram levantadas, sendo:

- 1) Isolar o neutro das duas máquinas e aterrar o barramento com um trafo do tipo Estrela AterradoxDelta e injeção de frequência sub-harmônica de 20Hz pelo trafo. Esta condição não foi satisfeita devido principalmente à dificuldade ao acesso do barramento blindado.
- 2) As duas máquinas aterradas e as duas proteções de 20Hz ativadas. Para este caso chegou-se à conclusão de que não seria possível a identificação da falta, uma vez que o gerador de 20Hz de cada máquina tenderia a ler a resistência de falta da máquina adjacente.
- 3) Neste caso conservou-se a condição 2 com a condição de que, estando as duas máquinas em operação, a proteção da máquina permanece em operação e bloqueia a proteção de 20Hz da máquina adjacente. Este bloqueio será realizado através de lógica interna na proteção e através da verificação da posição fechada dos disjuntores-conectados ao barramento de geração comum. Com os dois disjuntores fechados o gerador de 20Hz da unidade geradora de número par será bloqueado.
- 4) Conexão de um TC toroidal nos terminais de saída da máquina e conexão de TC no neutro da máquina, com as mesmas relações de transformação, de forma a permitir usar uma ligação diferencial de desequilíbrio entre os mesmos, com o intuito de se cobrir as faltas à terra nos enrolamentos do gerador.

A segunda opção, com intertravamento realizado via lógica, foi a escolhida. Estando as duas máquinas em operação, havendo um curto-circuito fase-terra na máquina ímpar esta atuará corretamente e abrirá o seu respectivo disjuntor. Após a abertura a proteção de 20Hz da máquina par entrará em operação, porém a falta já terá sido isolada. A segunda condição, considerando as duas máquinas em operação, é a atuação de um defeito fase-terra na máquina par. Neste caso a proteção da máquina ímpar atuará instantaneamente após a abertura do seu respectivo disjuntor a proteção da máquina ímpar entrará em operação e, com o curto ainda persistente, a proteção de 20Hz atuará instantaneamente e abrirá o seu disjuntor.

3.0 - CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi apresentar as dificuldades encontradas para se obter a melhor solução. Apresentou-se também o compromisso necessário e suficiente em relação aos equipamentos e acessórios dos módulos de detecção - à fim de que os limites mínimos de sensibilidade e ajuste do relé de proteção da Siemens, não fossem violados. As soluções dependerão de cada aplicação, porém a melhor será sempre aquela em que se mantenha prioritariamente a máxima proteção, disponibilizando o gerador para a sua máxima operação possível.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manual of Multifunctional Machine Protection 7UM62, Manufacturer-Siemens, ref. C53000-G1176-C149-6.
- [2] R. J. Alcantara, F. G. Garcia, "100% stator ground fault protection-a comparison of two protection methods," Master dissertation, Dept. Electrical Eng., Lund University, 2006.
- [3] C. J. Mozina, "Experience with 100% stator ground fault protection schemes," in Proc. 2009 Industrial & Commercial Power Systems Technical Conf., pp. 1-8.
- [4] *IEEE Guide for Generator Ground Protection*, IEEE Standard C37.101 - 2007, Nov. 2007.
- [5] Ziegler, G., "Numerical Distance Protection – Principles and Applications" Siemens, 1999.
- [6] Viotti, F. A., "Proteção de Geradores de Grande Porte", Ciclo de Palestras e Estudos, GCOI/GTP - Eletrobrás, 1979.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Rafael de Oliveira Fernandes, nasceu em Florianópolis (SC) em agosto de 1977. Ingressou na Escola Federal de Engenharia de Itajubá/MG em julho de 1996, aonde foi monitor de Cálculo I e II. Graduiu-se em Engenharia Elétrica/Sistemas de Potência em 2001. Trabalhou na Alstom Power, na área de comissionamento elétrico de plantas térmicas de 2001 à 2004. Em 2005 foi trabalhar na Vatech T&D e é engenheiro de aplicação de sistemas de proteção elétrica, na Siemens desde o ano de 2005.
e-mail: rafael.fernandes@siemens.com, raf.f@bol.com.br