

**ESTUDO DA PROTEÇÃO CONTRA FALTA À TERRA NO
ENROLAMENTO DO ESTATOR DO GERADOR SÍNCRONO:
SUBSÍDIO PARA DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE
TESTES UTILIZANDO SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL**

RICARDO DE MAGALHÃES ARAÚJO

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Supervisão, Controle e Proteção de SEP, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em 23 de dezembro de 2015

**Clever Sebastião Pereira Filho - Dr.
Supervisor**

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Coordenador do CESEP**

**ESTUDO DA PROTEÇÃO CONTRA FALTA À TERRA NO
ENROLAMENTO DO ESTATOR DO GERADOR SÍNCRONO:
SUBSÍDIO PARA DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE
TESTES UTILIZANDO SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL**

RICARDO DE MAGALHÃES ARAÚJO

Cleber Sebastião Pereira Filho - Dr.

Supervisor

12/2015

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA E CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. ATERRAMENTO DE GERADORES	4
2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	4
2.2 NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE ALTA RESISTÊNCIA.....	5
2.3 NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE BOBINA RESSONANTE	6
2.4 NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE CIRCUITO SÉRIE DE RESISTOR E FILTRO DE BLOQUEIO DE TERCEIRO HARMÔNICO.....	7
2.5 NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE DIVISOR DE TENSÃO CAPACITIVO.....	9
3. PROTEÇÃO CONTRA FALTAS À TERRA NO ENROLAMENTO DO ESTATOR DO GERADOR	10
3.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	10
3.2 PROTEÇÃO DE 90% A 95% DO ENROLAMENTO DE ESTATOR CONTRA FALTA À TERRA..	10
3.2.1 MÉTODO BASEADO NA TENSÃO FUNDAMENTAL DE NEUTRO	10
3.2.2 MÉTODO BASEADO NA CORRENTE FUNDAMENTAL DE NEUTRO	12
3.3 PROTEÇÃO DE 100% DO ENROLAMENTO DE ESTATOR CONTRA FALTA À TERRA.....	12
3.3.1 MÉTODOS BASEADOS NA UTILIZAÇÃO DE TENSÃO DE TERCEIRO HARMÔNICO.....	13
3.3.1.1 MÉTODO BASEADO NA SUBTENSÃO DE NEUTRO DE TERCEIRO HARMÔNICO.....	17
3.3.1.2 MÉTODO BASEADO NA SOBRETENSÃO DE TERCEIRO HARMÔNICO NO TERMINAL.....	18
3.3.1.3 MÉTODO BASEADO NA COMPARAÇÃO DE TENSÕES DE TERCEIRO HARMÔNICO.....	19
3.3.1.4 MÉTODO BASEADO NA DETECÇÃO ADAPTATIVA DO NÍVEL DE TERCEIRO HARMÔNICO .	20
3.3.1.5 MÉTODO BASEADO NA TAXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO DE TERCEIRO HARMÔNICO.....	22
3.3.1.6 MÉTODO BASEADO NA TRANSFORMADA WAVELET	23
3.3.1.7 MÉTODO BASEADO NO DIFERENCIAL DO ÂNGULO DE FASE DAS TENSÕES DE TERCEIRO HARMÔNICO	25
3.3.1.7 MÉTODO BASEADO NOS ALGORÍTMOS DE AGRUPAMENTO FUZZY.....	27
3.3.2 MÉTODO BASEADO NA INJEÇÃO DE SUB-HARMÔNICO	28

4. ESPECIFICAÇÃO PARA SIMULAÇÃO	30
4.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	30
4.2 SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL.....	30
4.3 SISTEMA A SER SIMULADO	31
4.4 ESPECIFICAÇÃO DOS TESTES.....	31
4.4.1 CURTOS-CIRCUITOS INTERNOS	31
4.4.2 CURTOS-CIRCUITOS EXTERNOS	32
4.5 MODELAGEM NO RSCAD	32
4.5.1 SISTEMA ELÉTRICO.....	32
4.5.2 GERADOR.....	32
4.5.3 CIRCUITO DE GERAÇÃO DE TENSÃO DE TERCEIRO HARMÔNICO	32
4.5.4 CIRCUITO DE GERAÇÃO DE TENSÃO SUB-HARMÔNICA	33
4.6 PREPARAÇÃO PARA OS TESTES	34
4.6.1 DADOS PRINCIPAIS	34
4.6.2 MONTAGEM FÍSICA	35
4.7 PROPOSTA DE REALIZAÇÃO DOS TESTES.....	36
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	38
5.1 CONCLUSÕES	38
5.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

RESUMO

Este trabalho é um estudo de esquemas de proteção contra faltas à terra no enrolamento do estator de geradores síncronos, com foco nas condições que possam afetar a performance desses esquemas de proteção. Propõe-se embasar a realização de testes e a elaboração de um procedimento para executá-los cuja finalidade é verificar o desempenho dessa proteção, utilizando o simulador digital em tempo real (rtds), tomando como base para os testes um gerador de 100 MW da UHE Volta Grande.

ABSTRACT

This work is a study of protection schemes against ground faults in synchronous generator estator winding, with focus on conditions that may affect the performance of such schemes. It is proposed to base a test procedure to verify the performance of this protection, using the real-time digital simulator (RTDS), taking as reference for testing a generator of 100 MW from UHE Volta Grande.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e contexto da investigação

A regulamentação do sistema elétrico tem progressivamente conduzido as concessionárias a um maior compromisso com a manutenção da alta disponibilidade das unidades geradoras. O sistema de proteção, como não poderia deixar de ser, tem a função de evitar danos aos geradores e consequentes gastos adicionais, bem como impedir a indisponibilidade do sistema elétrico decorrente de manutenção corretiva. Além disso, tão importante quanto a atuação na ocorrência de uma falta é a operação adequada do sistema de proteção, cuja falha pode comprometer essa disponibilidade. As faltas à terra são as mais frequentes causas de danos ao enrolamento do estator do gerador, além de ser precursoras de todas as outras faltas [Zielichowski et al., 1999]. Portanto a proteção contra a falta à terra é o elemento primário do sistema de proteção da unidade geradora. Uma operação indevida da proteção contra a falta à terra aumenta a possibilidade de essa falta tornar-se bifásica, o que fundamentalmente irá causar sérios danos ao gerador. Logo se torna imprescindível implantar sistemas de proteção que operem adequadamente. Para alcançar esse desempenho satisfatório, é indispensável ter domínio sobre os tipos disponíveis, as limitações e os fatores que afetam o funcionamento do sistema de proteção. Em adição a isso, é oportuno que seja desenvolvida uma metodologia de teste com o intuito de garantir a eficiência do sistema de proteção antes que ele seja acionado. Uma maneira relativamente recente, disponível no mercado, embora pouco pesquisada para aplicação em geradores, é a realização de simulações digitais em tempo real, sustentadas por uma metodologia adequada.

O uso do simulador digital em tempo real (RTDS) possibilita a realização de uma infinidade de testes e simulações com resultados de representatividade significativa, que seria impraticável *in loco* devido ao comprometimento da integridade e disponibilidade dos geradores, limitação de tempo, disponibilidade do equipamento e dos recursos necessários.

Além do mais, o RTDS possui modelos de geradores nos quais é possível realizar simulações de faltas internas necessárias para testar os esquemas de proteção, tema deste trabalho.

1.2 Objetivo e metodologia de desenvolvimento

O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo sobre a função de proteção contra falta fase-terra no enrolamento do estator de um gerador síncrono visando propor o desenvolvimento de uma metodologia de testes dessa função de proteção, utilizando o simulador digital em tempo real, valendo-se de seus dois grandes ganhos. O primeiro deles é a possibilidade de simulação da rede em tempo real e exportação de sinais para o relé de proteção; o segundo é o funcionamento em *loop* fechado, ou seja, a possibilidade de enviar sinais de grandezas para o equipamento de proteção ou regulação também de receber, por exemplo, o comando de abertura de um disjuntor. Em suma, a simulação interage com o equipamento em teste, tal como a rede real.

O desenvolvimento do trabalho deu-se primeiramente a partir de uma elaboração teórica e subsequente proposição de simulações e testes. A finalidade é identificar, dentre outros fatores, as fragilidades da função de proteção, a otimização dos ajustes e a identificação de simulações críticas para avaliação da eficiência da atuação do relé. A simulação terá como objeto o gerador e as barras adjacentes da UHE Volta Grande da Cemig GT.

1.3 Organização do texto

O texto desta dissertação foi distribuído em 6 capítulos, incluindo a presente ***Introdução***.

No ***Capítulo 2***, são apresentados tipos de aterramento no neutro de geradores, tendo como foco as interferências que esses sistemas podem causar nos esquemas de proteção contra falta à terra no enrolamento do estator.

No ***Capítulo 3***, é caracterizada a função de proteção contra a falta à terra do enrolamento de estator, e são apresentados diferentes arranjos e métodos utilizados para realizar essa proteção.

A proposta do ***Capítulo 4*** é caracterizar o simulador digital em tempo real, assim como o modelo do sistema e do gerador definidos para as simulações. Ademais estão propostos preliminarmente os testes a ser realizados durante as simulações, e são descritos, ainda, de forma geral, os preparativos necessários para a realização das simulações como, por exemplo, construção dos modelos e definição preliminar de testes a ser realizados.

O *Capítulo 5* apresenta as conclusões finais desta dissertação decorrentes das avaliações realizadas, bem como os possíveis desdobramentos relativos às propostas de continuidade,

No final do texto, são apresentadas as *Referências Bibliográficas* utilizadas.

2 ATERRAMENTO DE GERADORES

2.1 Considerações preliminares

O método ou filosofia do aterramento do neutro dos geradores, bem como suas características e efeitos, estão estritamente relacionados com a definição, com os ajustes e com a operação da proteção contra a falta fase-terra no enrolamento do estator do gerador.

As condições de operação do sistema de proteção contra falta à terra sensibilizado pelas tensões de terceiro harmônico tanto no neutro quanto nos terminais do gerador, assim como a relação entre elas, dependem do método de aterramento do neutro do gerador. O sistema de aterramento influencia a amplitude e a característica das variações da tensão que alimenta o elemento de medição da proteção durante faltas à terra ao longo de todo o comprimento do enrolamento do estator [Zielichowski et al., 2003].

As faltas à terra são a causa mais comum de danos ao enrolamento do estator, e seus efeitos dependem da energia emitida no circuito de falta e das sobretensões associadas a essa falta. A partir da limitação desses fatores, o objetivo principal do sistema de aterramento é a proteção do gerador contra danos quando ele for submetido a condições elétricas anormais. O sistema de aterramento dedica-se a limitar a corrente de falta à terra a alguns amperes. Por causa disso, o gerador pode ser projetado para resistir a uma corrente de falta menor do que teria, caso seu neutro fosse diretamente aterrado. No entanto, essa estratégia resulta em uma responsabilidade extra para o sistema de proteção. Essa corrente de falta, de valor reduzido, é de difícil detecção; não sensibiliza nem mesmo a proteção diferencial, pois está próxima das correntes normais de desequilíbrio [Nengling et al., 2000]. Além disso, caso não seja detectada, pode evoluir para uma falta não limitada pelo sistema de aterramento, ou mesmo para uma falta polifásica que causará danos drásticos ao gerador.

Além da função principal de reduzir a corrente de falta à terra interna, o sistema de aterramento do gerador tem os seguintes objetivos complementares: limitar o *stress* mecânico na ocorrência de faltas à terra externas, limitar sobretensões temporárias externas, propiciar a detecção de faltas à terra e permitir a coordenação de proteção do gerador com outros equipamentos [Rocha et al., 2014].

A seguir, são caracterizados os principais tipos de aterramento do neutro de gerador, com especial atenção à sua interferência no sistema de proteção contra falta à terra.

2.2 *Neutro aterrado através de alta resistência*

O aterramento do neutro do gerador através de alta resistência está-se disseminando de forma considerável, a ponto de possivelmente se tornar o esquema mais indicado para geradores de médio porte. Nesse esquema, o resistor de aterramento é conectado diretamente entre o neutro do gerador e a terra, alternativamente no circuito secundário de um transformador de aterramento, solução também de reconhecida efetividade. A principal vantagem do emprego do transformador para realizar a conexão de aterramento é a redução dos requisitos de isolamento do resistor, que pode ser de baixa tensão. Em tal esquema, a resistência de aterramento R_N normalmente é maior que 1 k Ω , e a corrente de falta à terra durante faltas nos terminais do gerador é geralmente entre 3 e 25 A, limitando danos associados [Zielichowski et al., 2003];[Rifaat , 1997].

Em circunstâncias ideais, a resistência de neutro deve ser a mais alta possível para reduzir a corrente de falta à terra. No entanto, o maior valor de resistência é determinado pelo valor das correntes da carga capacitiva do sistema elétrico conectada ao gerador. Para evitar a evolução de sobretensão destrutiva causada pelo fenômeno de restabelecimento durante uma falta de fase à terra, a corrente resistiva de falta I_r deve ser maior que a corrente capacitiva. Com base nisso, a resistência equivalente de aterramento do neutro R_N deve ser menor que a reatância capacitiva mais relevante do sistema [Borel , 2012]. Isso é equivalente a instalar resistores em paralelo com a capacitância da isolação para regular o nível de carga, resultando em menores taxas de aumento da tensão [Nengling et al., 2004]. Em um sistema trifásico (fases R, S e T) com a fase T em curto para a terra, a corrente total de carga é:

$$\text{Corrente de carga} = |I_{RC} + I_{SC}| = \left| \frac{E_{LL}}{X_{CO}} + \frac{E_{LL<120}}{X_{CO}} \right| = \sqrt{3} \frac{E_{LL}}{X_{CO}} = 3 \frac{E_{LG}}{X_{CO}} = 3I_{CO} \quad [1]$$

Na qual:

I_{RC} = corrente capacitiva da fase R

I_{SC} =corrente capacitiva da fase S

E_{LL} =Tensão de linha

E_{LG} =Tensão de fase

X_{CO} =Reatância capacitiva de fase para terra

I_{CO} = Corrente de carregamento fase-terra

Os itens dessa equação podem ser visualizados na Figura 1 a seguir:

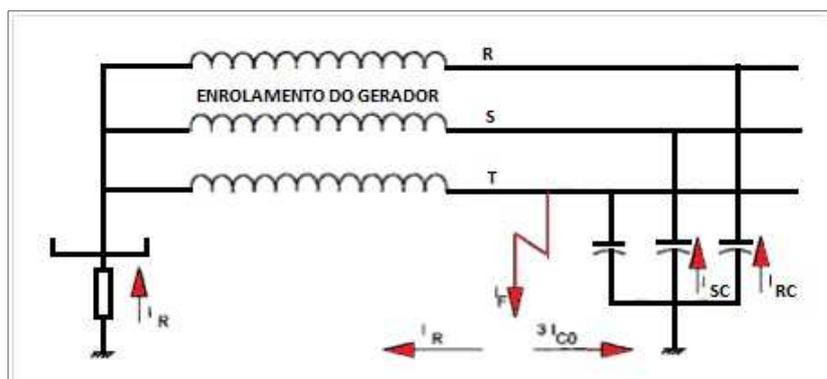


Figura 1: Distribuição das correntes de falta (reprodução de [Rifaat , 1997])

Para determinar o valor do resistor de aterramento, então:

$$I_R > 3I_{CO} \quad [2]$$

$$I_R = \frac{E_{LN}}{R} \quad [3]$$

$$R_N < \frac{X_{CO}}{3} \quad [4]$$

Para calcular X_{CO} , as capacitâncias de carga dos componentes do sistema devem ser identificadas. Informações sobre as capacitâncias do estator e do capacitor de proteção de surto podem ser adquiridas com os fabricantes. Na etapa inicial de projeto, as correntes de carga capacitiva para os outros componentes do sistema podem ser estimadas através de referências disponíveis.

A resistência de aterramento do neutro do gerador influencia, de maneira significativa, a tensão que sensibiliza o sistema de proteção, independentemente da capacitância do disjuntor do gerador. Essa influência praticamente desaparece para valores de resistência maiores que 5 kΩ [Zielichowski et al., 2003].

2.3 Neutro aterrado através de bobina ressonante

O aterramento ressonante, ou aterramento neutralizador, é o arranjo em que o neutro é conectado à terra através de um indutor variável, conhecido como Bobina de Petersen. Durante

uma falta à terra, circulam correntes através das capacitâncias entre as fases que não estão em falta e a terra, conforme indicado na Figura 2 [Borel, 2012]. A finalidade do indutor no aterramento é neutralizar essas correntes capacitivas de forma que a corrente no ponto de falta seja a menor possível. O ajuste da reatância é feito para igualar os módulos das correntes capacitivas com o módulo da corrente que circula pelo neutro, já que elas são vetorialmente opostas, como pode ser verificado no diagrama da Figura 2. Assim sendo, a grande vantagem do uso da bobina de Petersen é a eliminação do componente fundamental da corrente de curto no ponto de falta à terra, a fim de manter a continuidade do funcionamento do sistema de potência durante uma falta. A bobina tem como característica a regulação de sua reatância, através de tapes ou de um núcleo móvel, com o propósito de ajustá-la às mudanças de configuração do sistema.

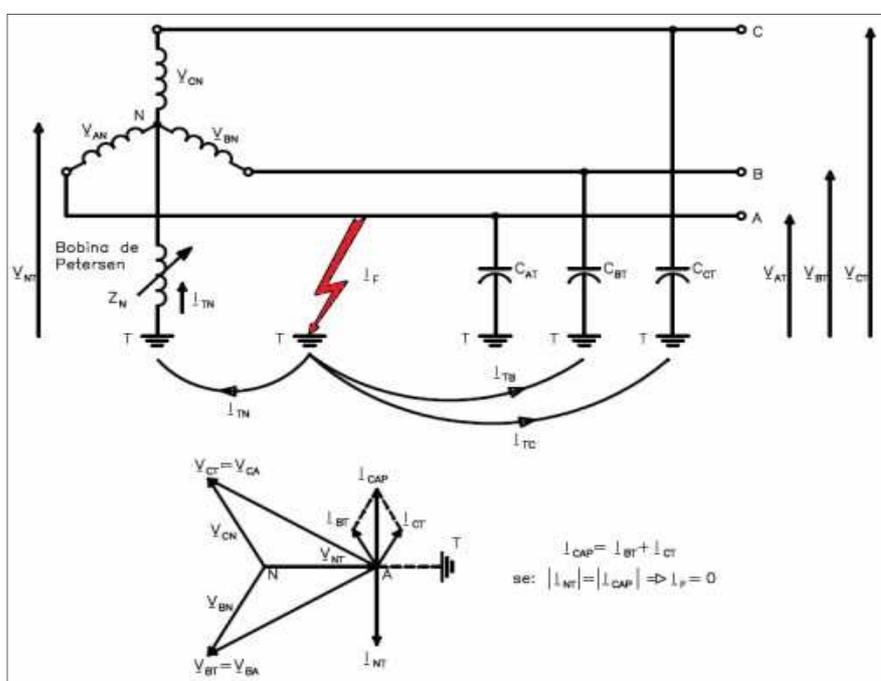


Figura 2: Princípio operacional da bobina de Petersen (reprodução de [Borel, 2012])

Testes mostraram que o aterramento do neutro do gerador através de um neutralizador confirma a ausência de danos por sobretensão na isolação principal do enrolamento de estator durante a interrupção de arco de falta à terra. Para esse método de aterramento, as sobretensões de falta à terra são similares às sobretensões no gerador com neutro aterrado e não excedem duas vezes a amplitude da tensão de fase do gerador. Desde que os neutralizadores diminuam a energia emitida pelo arco de falta à terra, a deterioração do circuito magnético do estator é praticamente eliminada [Zielichowski et al., 2003].

2.4 Neutro aterrado através de circuito série de resistor e filtro de bloqueio de terceiro harmônico

Esse método de aterramento do neutro do gerador consiste em uma conexão em série de um resistor R_N com um filtro de bloqueio de terceiro harmônico, conforme indicado na Figura 3. Esse filtro é caracterizado pelo baixo valor de impedância para o harmônico fundamental. Portanto a impedância equivalente do sistema de aterramento do neutro do gerador para essa frequência tem valor próximo a R_N , que assegura a apropriada operação da proteção convencional contra falta à terra sensibilizada por tensão de sequência zero cobrindo 95% do enrolamento do estator. A impedância do sistema de aterramento do neutro do gerador para terceiro harmônico alcança um valor significativo e é próxima da impedância do filtro de bloqueio de terceiro harmônico. Graças a isso, há alteração nas condições de operação da proteção contra falta à terra, excitada por tensão de terceiro harmônico [Zielichowski et al., 2003]. Além de mudar as condições de operação da proteção contra falta à terra, os parâmetros do filtro de bloqueio influenciam os fenômenos transitórios rápidos durante a interrupção do arco.

Uma análise do transitório rápido em tais sistemas mostrou que o filtro de bloqueio não provoca risco de sobretensão para a isolamento principal do enrolamento do estator da unidade geradora [Zielichowski et al., 2003].

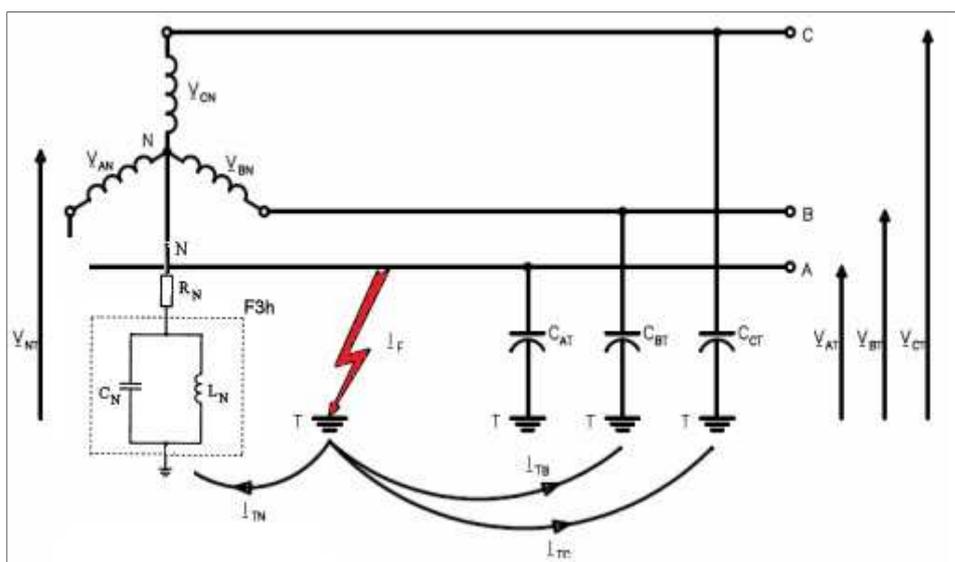


Figura 3: Aterramento através de resistor e filtro de bloqueio de terceiro harmônico (reprodução de [Borel, 2012])

Se o neutro do gerador é aterrado através da ligação série de um resistor e um filtro de bloqueio de terceiro harmônico, a tensão de alimentação do elemento de medição da proteção contra falta à terra diminui com a distância da posição dela a partir do neutro. A escolha apropriada dos parâmetros do filtro de bloqueio permite que sejam criadas condições sob as quais o sistema de proteção cubra 100% do enrolamento do estator [Zielichowski et al., 2003].

2.5 Neutro aterrado através de divisor de tensão capacitivo

Nesse método de aterramento do neutro do gerador, o divisor capacitivo de tensão realiza a função de um transformador de tensão, alimentando o sistema de proteção sensibilizado por componente de tensão de sequência zero conectado aos terminais da capacitância C_{DN2} , conforme indicado na Figura 4. De forma similar ao que foi feito para o aterramento do neutro através de resistor, o máximo nível de corrente de falta à terra é limitado a alguns amperes, ao passo que as capacitâncias próprias do sistema de aterramento propiciam o funcionamento adequado do sistema de proteção contra falta à terra sensibilizado por componente de sequência zero de tensão.

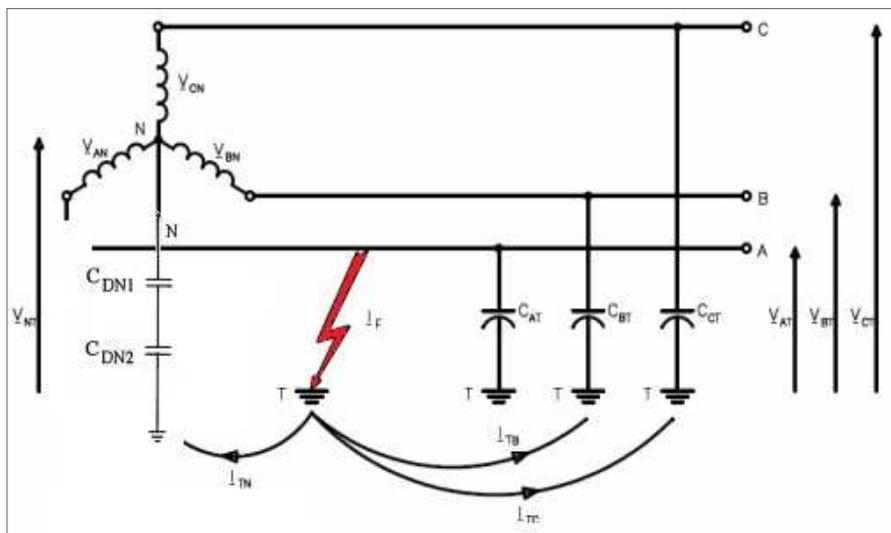


Figura 4: Aterramento através de divisor capacitivo de tensão (reprodução de [Borel, 2012])

O aterramento do neutro do gerador através de divisor capacitivo de tensão, especialmente em unidades equipadas com disjuntores de gerador sem capacitância adicional para a terra, pode tornar impossível a proteção de parte do enrolamento do estator próximo ao neutro porque, nessa porção do enrolamento, a tensão no neutro varia de forma não linear com a posição da falta [Zielichowski et al., 2003].

3 PROTEÇÃO CONTRA FALTAS À TERRA NO ENROLAMENTO DO ESTATOR DO GERADOR

3.1 *Considerações preliminares*

Os esquemas de proteção contra falta à terra no enrolamento do estator do gerador foram aqui divididos em dois grupos. O primeiro é composto pelas proteções tradicionais que cobrem de 90 a 95% do enrolamento do estator. No segundo, são incluídos esquemas mais elaborados que garantem 100% de proteção ao enrolamento do estator. Geralmente os esquemas do primeiro e do segundo grupos são usados concomitantemente, uma vez que os sistemas de cada grupo utilizam parâmetros distintos para sensibilizar a proteção e, por isso, podem reduzir o risco de não operação no momento da falta, ou mesmo de operação indevida.

3.2 *Proteção de 90% a 95% do enrolamento de estator contra falta à terra*

Esses esquemas de proteção utilizam tensões e correntes de sequência zero na frequência fundamental para sensibilizar a unidade de medição do sistema de proteção.

3.2.1 *Método baseado na tensão fundamental de neutro*

Essa proteção baseia-se no aumento da tensão de neutro durante a ocorrência de uma falta à terra no enrolamento do estator causada pela circulação da corrente de falta no resistor de

aterramento. Quanto mais próximo dos terminais do gerador a falta ocorrer, maior será a tensão de neutro, pois haverá uma tensão induzida maior no enrolamento alimentando a falta [Sultan et al., 2013]. Em outras palavras, a tensão no neutro guarda uma relação linear com a posição da falta à terra no enrolamento do estator. Essas características podem ser verificadas na Figura 5.

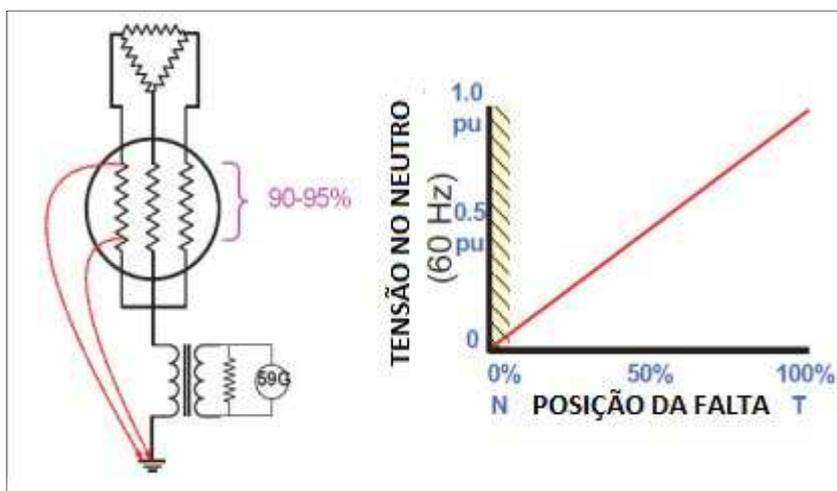


Figura 5: Método convencional de proteção contra falta à terra do estator (reprodução de [Sultan et al., 2013])

Um relé de sobretensão sensibilizado pela tensão de frequência fundamental no resistor de aterramento é usado para fazer a proteção, a qual possui característica de tempo definido ajustada entre 0,5 e 1s. O tempo de atuação está limitado à capacidade de dissipação térmica do resistor de aterramento e ao limite de dissipação de energia no núcleo do estator, a fim de evitar o efeito solda [Silva et al., 2011].

Esse esquema de proteção é incapaz de detectar faltas quando elas ocorrem nos primeiros 5 ou 10% do comprimento do enrolamento do estator a partir do ponto de neutro. Quando as faltas ocorrem nessa porção do enrolamento, a parcela da tensão do estator que alimenta as faltas é pequena, e a corrente associada é muito baixa, ou mesmo nula, quando ocorre exatamente no ponto de neutro. O ajuste da proteção contra a falta à terra no estator através do relé de sobretensão no neutro é o limite de sensibilidade do relé, que pode detectar faltas apenas a partir dos 5% de comprimento de enrolamento tendo o neutro como ponto de início [Helding et al., 2013].

Correntes de falta à terra no enrolamento em estrela do transformador elevador também circulam através do resistor de aterramento de neutro do gerador através do acoplamento capacitivo entre os enrolamentos primário e secundário. A queda de tensão causada pela circulação dessa corrente pode ser suficiente para causar operação indevida do relé de

sobretensão. Para evitar que isso ocorra, uma temporização de 0,5 a 1,0 s é introduzida para retardar a atuação do relé e garantir que a proteção do transformador atue primeiramente [Silva et al., 2011].

3.2.2 *Método baseado na corrente fundamental de neutro*

Assim como o relé de sobretensão é utilizado para detectar a falta à terra, também pode ser usado um relé de sobrecorrente que seja sensibilizado pela corrente de frequência fundamental que passa pelo resistor de aterramento. Essa corrente é proporcional à tensão no neutro. Consequentemente tem o mesmo comportamento que ela em relação à ocorrência da falta.

No caso da proteção por sobrecorrente do neutro, a corrente de *pickup* é ajustada acima dos valores normais de corrente de desbalanceamento e decorrentes harmônicas de sequência zero que aparecem no neutro. Por isso, essa proteção é menos sensível que a proteção por sobretensão [Helding et al., 2013]. Assim como na proteção por sobretensão, ela deve ser coordenada com a proteção do transformador elevador. O ajuste é feito a partir de uma curva inversa ou muito inversa de temporização.

3.3 *Proteção de 100% do enrolamento de estator contra falta à terra*

Devido à importância do enrolamento do estator do gerador, um sistema de proteção contra falta à terra que atue sobre toda a extensão do enrolamento do estator torna-se imprescindível. A importância de se detectar uma falta à terra próxima ao neutro do gerador, mesmo que a corrente para essa falta seja pequena ou mesmo nula, é que, caso uma segunda falta à terra ocorra concomitantemente à primeira, o resultado será um curto-circuito não limitado pela impedância de aterramento. Essa condição pode ser agravada caso a primeira falta à terra ocorra e um ponto próximo do terminal de neutro, ou mesmo nele próprio, porque todos os relés de neutro que operam com tensão ou corrente de neutro se tornarão inoperantes. Nesse caso, nem mesmo a proteção diferencial do gerador será sensibilizada, caso a segunda falta ocorra no mesmo enrolamento.

Os esquemas apresentados neste item são geralmente usados como proteção complementar e utilizam dois princípios para sua operação: injeção de tensão sub-harmônica e utilização de tensão de terceiro harmônico gerada pela própria unidade geradora. Essa tensão, quando medida no neutro e nos terminais do gerador, possui um comportamento peculiar durante a ocorrência das faltas à terra. No entanto, é preciso que a tensão de terceiro harmônico do gerador seja suficientemente elevada para poder ser usada em esquemas de proteção.

3.3.1 *Métodos baseados na utilização de tensão de terceiro harmônico*

As tensões de terceiro harmônico estão presentes, em algum grau, nos terminais de todo gerador. Elas existem devido a diferenças no *design* de fabricação do gerador. Se houver uma quantidade adequada de tensão de terceiro harmônico, a tensão medida nos terminais, no neutro, ou em ambos, pode ser usada para detectar faltas à terra [Helding et al., 2013].

Geralmente a tensão de saída dos geradores não é uma senoide pura; ela é distorcida por componentes harmônicas. Essas componentes podem ser encontradas em múltiplos de 3, como 3^a, 9^a, 15^a e assim por diante. As componentes de terceiro harmônico podem ser encontradas em todas as fases e têm a mesma amplitude e mesmo ângulo de fase; por causa disso, a soma dessas componentes no ponto comum não é igual a zero, ou seja, elas aparecem como uma parte da componente de sequência zero. A tensão de terceiro harmônico é normalmente maior do que a maioria das outras sequências múltiplas de três. As características da tensão de terceiro harmônico, sob condições normais, são mostradas na Figura 6 [Sultan et al., 2013]. Geradores modernos de alta eficiência são fabricados com enrolamento de armadura com fator de campo próximo de 5/6. Esses geradores constituem fontes de tensão de terceiro harmônico mais fortes que as constituídas por geradores com um fator de campo de enrolamento de armadura próximo de 2/3 [Rifaat, 1997].

O nível de tensão de terceiro harmônico no neutro e nos terminais do gerador é dependente das condições de operação do gerador. A tensão é maior para carga plena do que quando não há carga. Existe um ponto no enrolamento, que depende do projeto do gerador, no qual a tensão de terceiro harmônico é zero [Helding et al., 2013].

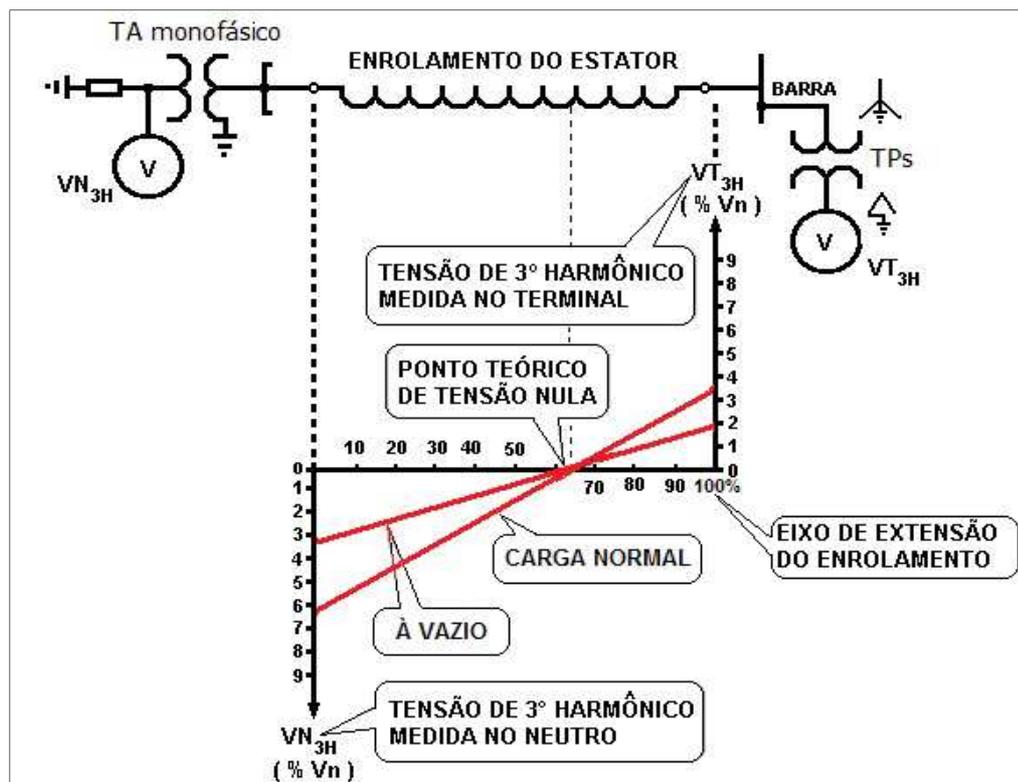


Figura 6: Tensões de 3º harmônico no neutro e nos terminais do gerador em condições normais (reprodução de [Silva et al., 2011]).

Durante uma falta à terra, as tensões de terceiro harmônico no neutro e nos terminais têm seus valores alterados dependendo da posição dessa falta no enrolamento do estator. À medida que a falta se move dos terminais do gerador em direção ao neutro, a tensão de terceiro harmônico nos terminais do gerador aumenta, e a tensão de terceiro harmônico no neutro se reduz. A taxa de aumento ou decréscimo está relacionada às condições operativas do gerador [Helding et al., 2013].

Quando a falta ocorre no neutro do gerador, a tensão de terceiro harmônico nos terminais geradores será equivalente ao terceiro harmônico total produzido pelo gerador; notoriamente a tensão no neutro será nula [Sultan et al., 2013]. O modelo de terceiro harmônico durante a falta à terra no ponto de neutro é mostrado na Figura 7.

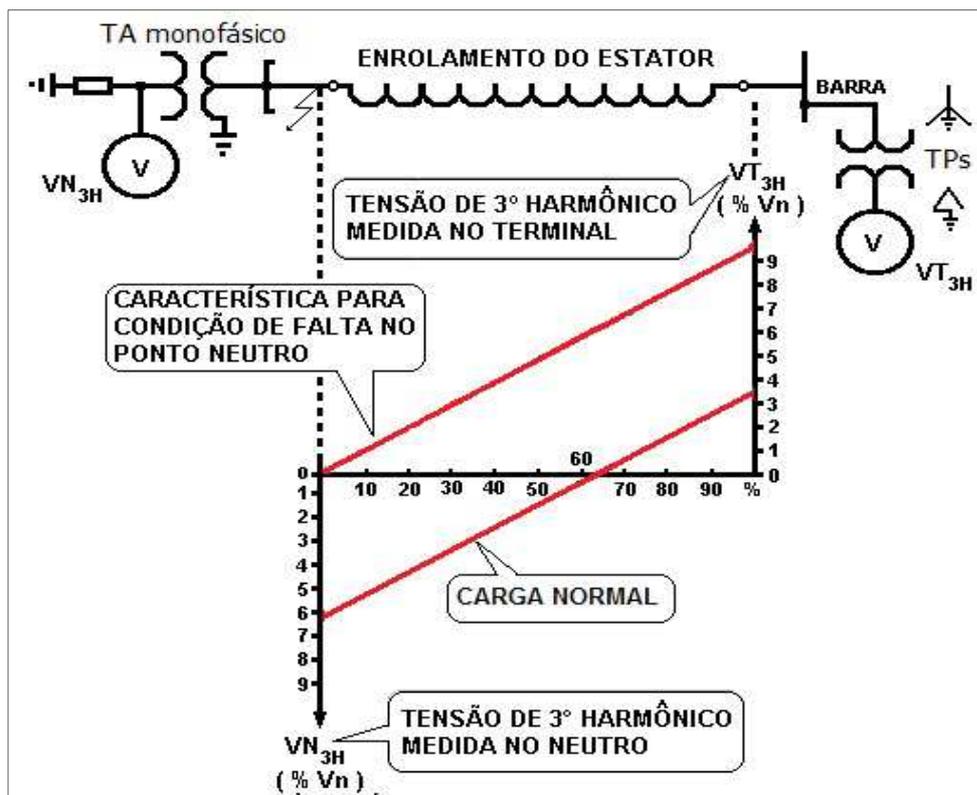


Figura 7: Tensões de 3º harmônico no gerador na condição de falta no ponto neutro (reprodução de [Silva et al., 2011])

O oposto ocorre quando a falta à terra ocorre no terminal do gerador. A tensão de terceiro harmônico no terminal se tornará nula, ao passo que a tensão no ponto de neutro aumentará até se igualar ao valor total da tensão de terceiro harmônico produzida pelo gerador [Sultan et al., 2013]. Essa característica é mostrada na Figura 8.

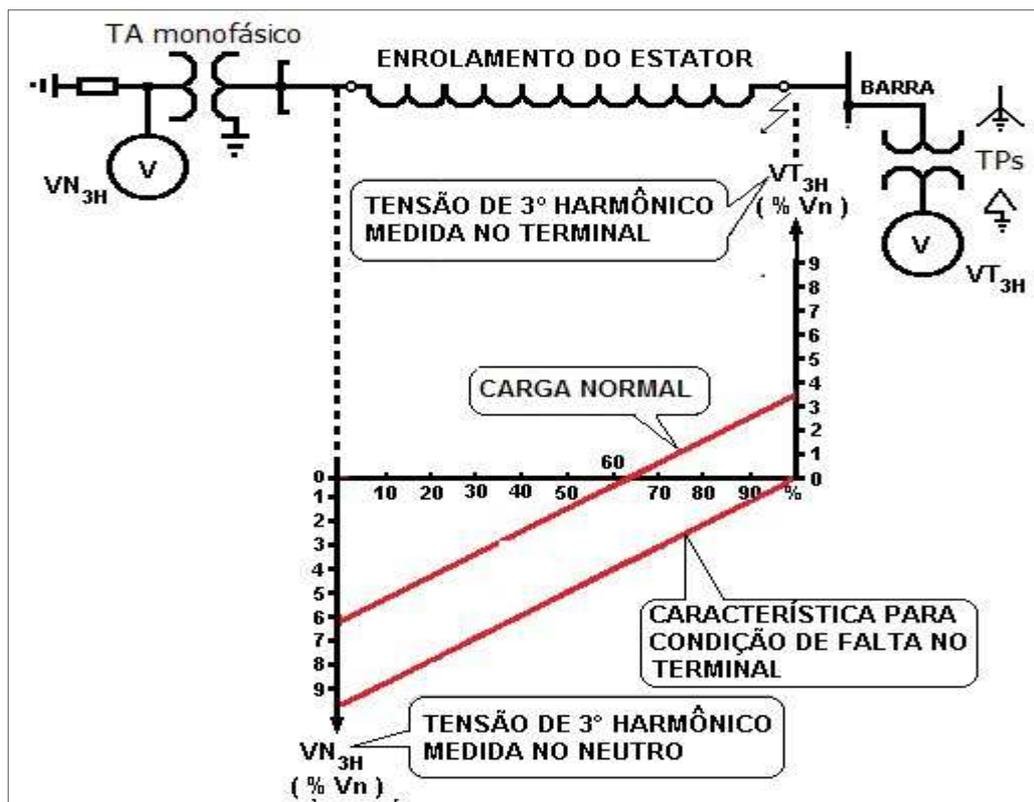


Figura 8: Tensões de 3º harmônico no gerador na condição de falta no terminal (reprodução de [Silva et al., 2011])

As tensões de terceiro harmônico variam com as mudanças nos valores de potência ativa em cada gerador real. O valor máximo da tensão de terceiro harmônico pode atingir valores típicos da ordem de 2 a 9% da tensão fase-terra do gerador na frequência fundamental. Já o valor mínimo da tensão de terceiro harmônico pode atingir valores próximos 50% do valor da tensão de terceiro harmônico máxima, com exceção de alguns casos nos quais o mínimo é uma mera fração percentual do valor da tensão fundamental. Na maioria dos casos, em que a relação entre os valores mínimo e máximo é próxima de 50%, o relé pode ser ajustado para proteger o enrolamento de estator diante de valores extremos sem que haja *trip* indevido [Rifaat, 1997]. Outro fator que influencia o valor da tensão de terceiro harmônico é o método de aterramento do neutro do gerador. O sistema de aterramento influencia a amplitude e a característica das variações da tensão que alimenta o elemento de medição da proteção durante faltas à terra, ao longo de todo o comprimento do enrolamento do estator [Zielichowski et al., 2003].

A medição das tensões de terceiro harmônico é feita geralmente através de transformador de potencial com delta aberto, por meio do qual é possível medir as tensões que se comportam como tensões de sequência zero. O relé é usualmente equipado com filtros

necessários para bloquear a harmônica fundamental e outras além da terceira. O fabricante do relé normalmente fornecerá algumas recomendações a esse respeito [Rifaat, 1997].

As seções seguintes descrevem métodos de proteção que utilizam a tensão de terceiro harmônico como parâmetro sensor para detecção de falta à terra no estator.

3.3.1.1 Método baseado na subtensão de neutro de terceiro harmônico

O método de proteção baseado na subtensão de neutro de terceiro harmônico é combinado com o método baseado na sobretensão fundamental de neutro, conforme indicado na Figura 9.

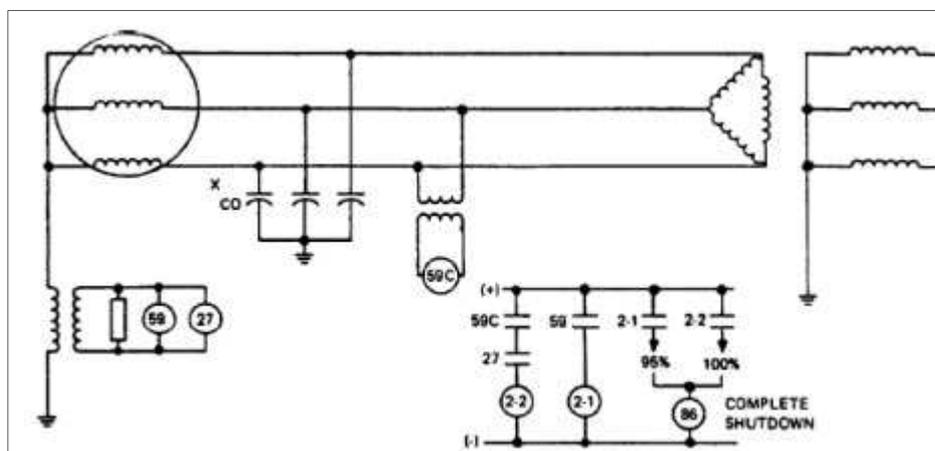


Figura 9: Esquema do relé de subtensão de terceiro harmônico no neutro (reprodução de [Sultan et al., 2013])

A proposição básica desse esquema é que, quando ocorre uma falta à terra no estator do gerador próxima ao neutro, a tensão de terceiro harmônico atinge o valor próximo de zero. A tensão de terceiro harmônico é medida no resistor de aterramento do neutro do gerador e sensibiliza um relé de subtensão de terceiro harmônico. Esse arranjo apenas emite sinal de *trip* se ambas as proteções, a convencional 95% e a subtensão de terceiro harmônico 100%, atuarem juntas para prevenir a falsa operação do relé de sobretensão fundamental no neutro numa energização [Sultan et al., 2013].

Normalmente o relé de subtensão de terceiro harmônico pode detectar faltas entre 0% e 30 % do enrolamento do estator a partir do neutro. O emprego dele, combinado com o relé de sobretensão fundamental de neutro, garante 100% de proteção do estator contra faltas à terra devido à sobreposição das zonas de proteção de ambos os relés [Helding et al., 2013]. Esses relés são conectados em paralelo com o resistor de aterramento, conforme indicado na Figura 9. É uma desvantagem desse esquema a ausência de 100% de cobertura até que o relé de sobretensão fundamental de neutro atue.

O relé de subtensão de terceiro harmônico pode detectar uma ausência de tensão no resistor de aterramento do gerador causada por uma falta à terra próxima ao neutro. Os relés utilizados nesse esquema devem ter filtros para prevenir que tensões fundamentais ou de terceiro harmônico afetem sua operação. O relé de subtensão de terceiro harmônico de neutro deve, se não for autoprotegido, ter um circuito incluído para proteger sua bobina contra sobretensão permanente. Esse esquema oferece a vantagem de não necessitar de nenhum equipamento de alta tensão adicional, exceto aqueles que já são necessários para os sistemas convencionais de detecção de falta à terra do estator.

Esse esquema oferece proteção, mesmo com o disjuntor principal aberto, contanto que a tensão terminal esteja acima do *pickup* do relé de sobretensão fundamental.

Alguns geradores produzem níveis muito baixos de tensão de terceiro harmônico quando estão levemente carregados. A fim de melhorar a segurança do esquema, um relé de subpotência (dispositivo 32) pode ser usado para controlar o relé de subtensão de terceiro harmônico de neutro. [Sultan et al., 2013].

O relé de subtensão é ajustado para operar quando a tensão de terceiro harmônico atingir 30% do valor da tensão de terceiro harmônico para o gerador sem carga, com tempo de atuação entre 0,5 e 5s [Silva et al., 2011].

Esse esquema não é eficaz quando a impedância de falta é média ou alta, pois, nesse caso, a proteção pode não operar [Mondragón et al., 2010].

3.3.1.2 Método baseado na sobretensão de terceiro harmônico no terminal

No método de proteção baseado na sobretensão de terceiro harmônico no terminal, o elemento de medição do sistema de proteção é alimentado por um transformador de potencial (TP) com enrolamento estrela aterrado e delta aberto, que pode ser, também, um TP estrela-estrela se for utilizado um relé digital. Esse esquema é mostrado na Figura 10.

Após a ocorrência da falta à terra do neutro de gerador, a tensão de terceiro harmônico disponível nos terminais do gerador torna-se elevada. Essa sobretensão decorrente da falta é usada para sensibilizar um relé empregado para essa aplicação. Esse relé deve ser ajustado de modo que seja inoperante para a máxima tensão de terceiro harmônico que surge durante a operação normal do sistema, evitando operação indevida da proteção. Para faltas próximas ao terminal do gerador a tensão de terceiro harmônico percebida pelo relé diminui, e sua proteção não opera. Por isso, esse relé deve ser usado em conjunto com um relé de sobretensão de

frequência fundamental em paralelo com o resistor de aterramento do neutro, para atingir 100% de proteção contra falta à terra no estator [Helding et al., 2013].

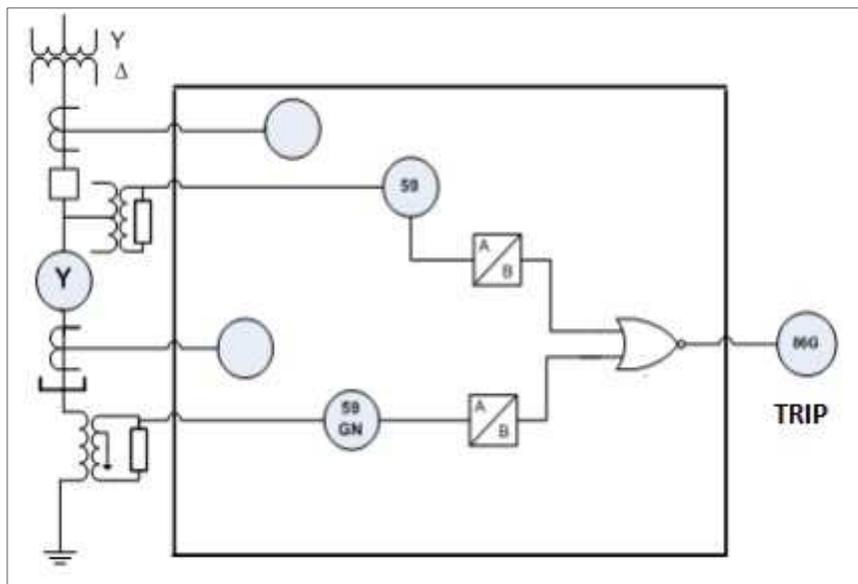


Figura 10: Relé de tensão de terceiro harmônico nos terminais do gerador (reprodução de [Sultan et al., 2013])

O relé de sobretensão é ajustado para operar quando a tensão de terceiro harmônico exceder 30% do valor da tensão de terceiro harmônico para o gerador em plena carga, com tempo de atuação entre 0,5 e 5s [Silva et al., 2011].

Uma vantagem nesse esquema é que ele também irá detectar falta à terra na barra ou no enrolamento em delta do transformador, embora haja necessidade de um transformador trifásico nos terminais da máquina, o que, em contrapartida, representa uma desvantagem em relação ao custo.

3.3.1.3 Método baseado na comparação de tensões de terceiro harmônico

O esquema de proteção baseado na comparação de tensões de terceiro harmônico utiliza-se do fato de que, sob condições normais, a relação entre a amplitude da tensão de terceiro harmônico no neutro do gerador e a amplitude da tensão de terceiro harmônico nos terminais do gerador é quase constante [Helding et al., 2013], mesmo sob condições de carga diversas [Sultan et al., 2013]. Essa relação, detectada pelo relé comparador de tensão terceiro harmônico, é perturbada para falta próxima ao neutro do gerador ou próxima ao terminal do gerador. Faltas à terra nas proximidades do ponto central do enrolamento são detectadas pelo relé de sobretensão de neutro de frequência fundamental, já que a sensibilidade do relé diferencial de terceiro harmônico é mínima para elas. Quando ocorrem, a tensão de terceiro harmônico no

neutro e a tensão nos terminais são muito próximas do ajuste do relé, portanto esses ajustes para o relé são determinados durante teste de campo. O circuito desse esquema de proteção é mostrado na Figura 11.

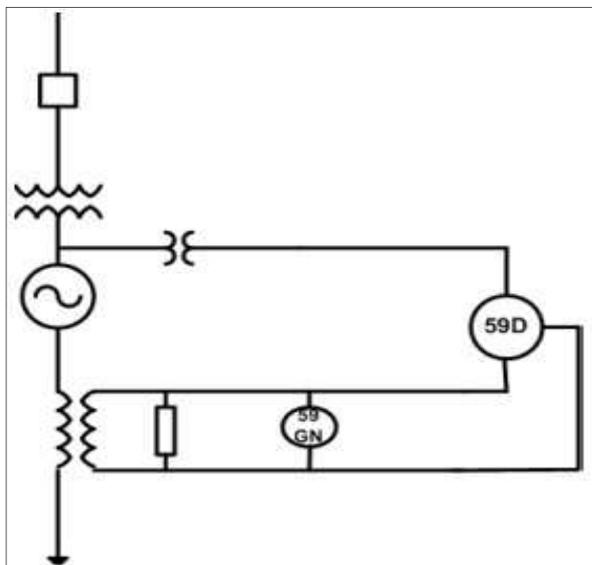


Figura 11: Comparação de relação entre tensões de terceiro harmônico (reprodução de [Helding et al., 2013])

Faltas duplas à terra tendem a reduzir a sensibilidade para um relé diferencial. Máquinas de múltiplos enrolamentos podem oferecer dificuldades para aplicação desse esquema e demandam uma avaliação cuidadosa [Sultan et al., 2013].

3.3.1.4 Método baseado na detecção adaptativa do nível de terceiro harmônico

O método descrito neste item é uma melhoria proposta para os esquemas de proteção baseados na tensão de terceiro harmônico apresentados nos itens anteriores. Ele contempla as variações possíveis das tensões de terceiro harmônico causadas pelas mudanças na carga conectada ao gerador. Para isso, é usado um sistema lógico na avaliação das condições operativas e emissão do sinal de *trip* adaptado a elas.

A lógica usada para determinar a presença de *trip* durante uma sub ou sobretensão de terceiro harmônico (esquemas referentes aos itens 3.3.1.1 e 3.3.1.2, respectivamente) é apresentada na Figura 12. Ela é baseada na comparação entre os valores medidos da tensão de terceiro harmônico (denotada por um índice adicional “m”) e os valores normais corrigidos pela variação da potência ativa, apresentados na Figura 13.

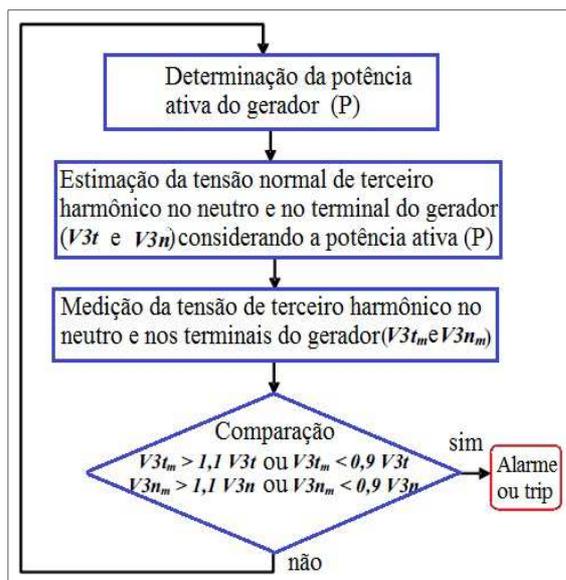


Figura 12: Lógica de alarme e trip usada para esquemas de proteção baseados em subtenção e sobretensão de terceiro harmônico (reprodução de [Mondragón et al., 2010])

O comportamento da tensão de terceiro harmônico em função da potência ativa, descrito pela curva na Figura 13, é específico para cada unidade geradora. As variações são devidas a pequenas imperfeições da distribuição no enrolamento nas ranhuras durante o processo de fabricação, as quais causam pequenas tensões de desequilíbrio. Desse modo, o primeiro passo para usar esse esquema é determinar os valores normais de tensão de terceiro harmônico nos terminais e no neutro do gerador síncrono [Mondragón et al., 2010].

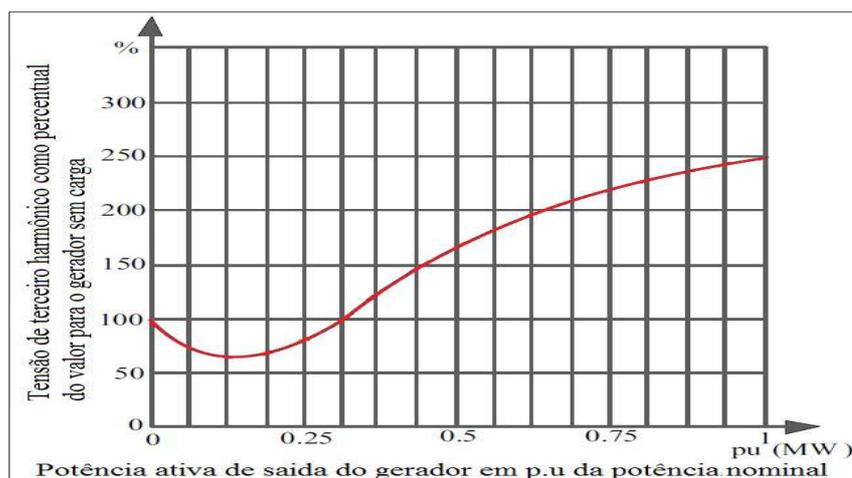


Figura 13: Variação típica da tensão de terceiro harmônico causada pelas mudanças na potência ativa de saída (reprodução de [Mondragón et al., 2010])

A lógica usada para o esquema baseado na comparação entre as tensões de terceiro harmônico (item 3.3.1.3) é um pouco diferente. São definidos os valores limites (que não geram

trip) das tensões de terceiro harmônico no neutro e nos terminais do gerador. Esses limites são os mesmos dos esquemas apresentados nos itens 3.3.1.1 e 3.3.1.2. O valor de *trip* é definido para esse esquema a partir dos referidos valores limites de tensão corrigidos com a variação da potência ativa e aplicados a uma equação (5, 6 ou 7) que estabelece relações entre essas tensões. A seguir, encontram-se três exemplos de equações que podem ser usadas. Simulações feitas para avaliar o desempenho desse esquema mostraram que a equação 5, comparada com as demais, é mais efetiva, por ser possível detectar faltas com as maiores resistências [Mondragón et al., 2010].

$$\Delta V = \frac{|V_{3t}|}{|V_{3n}|} \quad [5]$$

$$\Delta V = \frac{|V_{3n}|}{|V_{3n}| + |V_{3t}|} \quad [6]$$

$$\Delta V = \ln \frac{|V_{3t}|}{|V_{3n}|} \quad [7]$$

Nas quais:

V_{3t} : Tensão de terceiro harmônico nos terminais do gerador

V_{3n} : Tensão de terceiro harmônico no neutro do gerador

O uso das lógicas propostas para definir o valor do *trip* é uma alternativa interessante que ajuda a melhorar o desempenho da proteção, tornando possível a detecção de faltas de alta impedância nos três esquemas básicos baseados em tensão de terceiro harmônico. Entretanto o esquema baseado na relação entre tensões de terceiro harmônico teve o melhor desempenho na detecção de faltas de alta impedância [Mondragón et al., 2010].

3.3.1.5 Método baseado na taxa de variação da tensão de terceiro harmônico

A principal razão para a sensibilidade limitada nos esquemas de proteção utilizando terceiro harmônico é que, para altas impedâncias de falta, a mudança nas tensões nos terminais e no neutro do gerador é muito pequena; considerando o cálculo do erro, essa leve mudança pode não produzir o valor necessário para sensibilizar a proteção. Isso ocorre especialmente em grandes hidrogeradores [Nengling et al., 2000].

É mostrada, em [Nengling et al., 2000, a prova de que a seguinte relação é válida para ocorrência de uma falta à terra no enrolamento do estator de grandes geradores hidráulicos:

$$\Delta U_{3t} \cong \Delta U_{3n}$$

Isso quer dizer que o incremento ou decremento na tensão de terceiro harmônico nos terminais do gerador é igual ao incremento ou decremento da tensão de terceiro harmônico no neutro do gerador diante da ocorrência de uma falta à terra. No entanto, variações nessas tensões causadas por mudanças na excitação, na potência de saída e por outros parâmetros quaisquer não seguem

o mesmo padrão apresentado acima [Nengling et al., 2000]. Essa é uma peculiaridade importante que torna possível desenvolver um esquema de detecção de falta à terra derivado dessa técnica. Esse esquema deve verificar os dois requisitos a seguir para definir a existência ou não de falta, a partir do princípio apresentado.

Primeiro: a relação $\Delta U_{3n} / \Delta U_{3n}$ deve ser unitária (certa tolerância deve ser admitida). Dessa forma, a partir do que foi exposto anteriormente, garante-se que a única mudança passível de ocorrência é uma falta à terra.

Segundo: a variação da tensão de terceiro harmônico no neutro do gerador ΔU_{3n} deve ser diferente de zero.

Para implementação dessa proteção, deve haver um processador para amostrar os sinais de tensão, calcular a variação e compará-los com resultados anteriores regularmente, a fim de detectar a falta [Nengling et al., 2000]:

$$\left[k_1 < \frac{u_{3s}(t) - u_{3s}(t - t_{cc})}{u_{3n}(t) - u_{3s}(t - t_{cc})} < k_2 \right] \cap [u_{3n}(t) - u_{3n}(t - t_{cc})] \quad [8]$$

Na qual:

$t = k_n$ é um ponto de amostra, t_{cc} é o tempo de cálculo, $0 < k_1 < k_2$, sendo k_1 e k_2 parâmetros que devem ser aproximadamente iguais a um, u_{3s} e u_{3n} são tensões de terceiro harmônico nos terminais e no neutro do gerador, respectivamente.

Para garantir a confiabilidade, a verificação acima deve ser repetida algumas vezes (mínimo 6). Testes realizados na unidade geradora da Usina de Three Gorges, na China, mostram que se pode obter uma alta sensibilidade restringida apenas pelas limitações dos equipamentos do sistema de proteção. Esses testes mostraram a eficiência do sistema para detectar faltas, inclusive com alta resistência [Nengling et al., 2000].

3.3.1.6 Método baseado na transformada Wavelet

A transformada Wavelet (WT) é uma ferramenta matemática adequada para tratar sinais não estacionários [Sultan et al., 2013]. Dela é possível obter informações de frequência e tempo simultaneamente. Na análise de Wavelet, o sinal é particionado em diferentes bandas de frequência com escalas de amplitude diferentes, sendo as faixas de escala menor usadas para identificar faltas à terra, pois são os mais baixos níveis de decomposição dos sinais que contêm as bandas de frequência mais altas e adequadas para detecção de singularidade [Nengling et al., 2004].

A tensão de terceiro harmônico no neutro do gerador e nos seus terminais irá variar simultaneamente quando uma falta à terra ocorrer no estator do gerador, mesmo se ele estiver aterrado com alta resistência [Sultan et al., 2013].

Na Figura 14, em a1 e a2, estão representadas as ondas de tensão de terceiro harmônico nos terminais e no neutro de um gerador, respectivamente, durante a ocorrência de uma falta à terra no estator. As imagens logo abaixo representam o resultado da transformada Wavelet aplicada a esse sinal. São representados os níveis 1 e 2, sendo o nível 1 o de mais alta frequência, correspondente aos índices b1 e b2. É possível observar que, na posição correspondente ao início da falta, há formação de picos nos resultados da WT, os quais são chamados módulos máximos. A partir da ocorrência desses módulos máximos, o início da falta pode ser detectado.

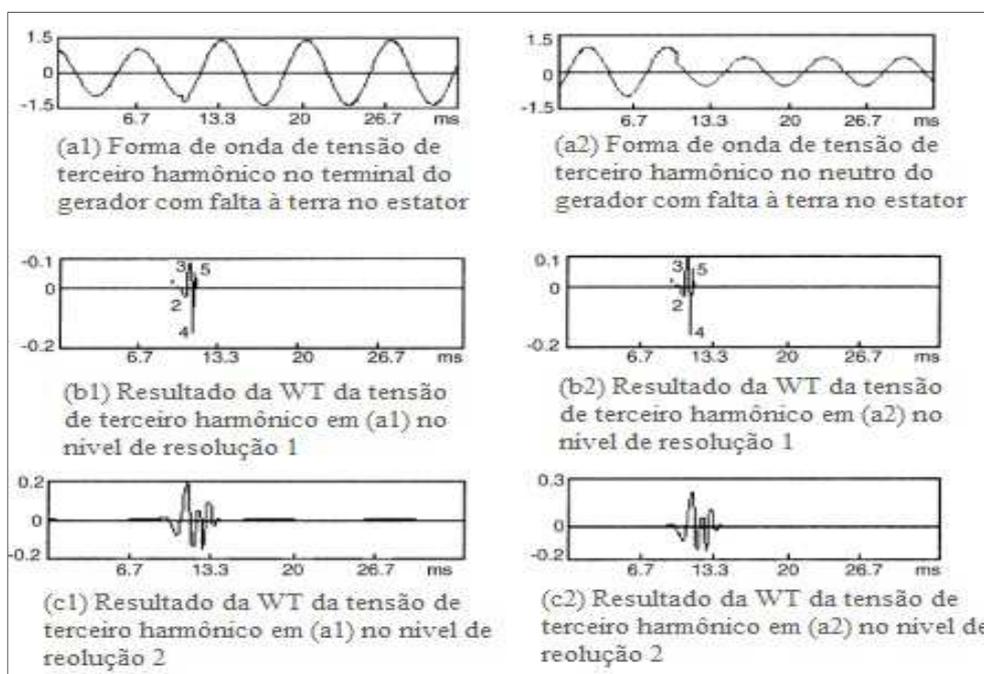


Figura 14: Forma de onda e seus resultados da WT de tensão de terceiro harmônicos nos terminais do gerador e no neutro durante uma falta à terra localizada a 25% com 100Ω (reprodução de [Nengling et al., 2004])

É importante verificar que a polaridade, a localização e o número de módulos máximos são os mesmos entre os resultados da WT das tensões nos terminais e no neutro. Esse fenômeno ocorre em ambas as escalas 1 e 2, e muitos testes mostraram os mesmos resultados [Nengling et al., 2004]. Essa singularidade ocorre somente para faltas à terra nas quais as variações nas tensões no neutro e nos terminais são equivalentes. Com base nisso, é difícil que alguma outra variação súbita na tensão de terceiro harmônico, provocada por outro motivo qualquer, possa causar uma interpretação errada da ocorrência de uma falta à terra. A forma de onda de tensão

de terceiro harmônico possivelmente apresentaria irregularidade quando uma mudança, não causada por uma falta à terra, repentina e suficientemente grande ocorresse. Os resultados de WT apresentariam certa quantidade de máximos de módulos definidos. Contudo as WT referentes a essa irregularidade serão muito diferentes comparadas com as referentes à condição de falta, porque, nesse caso, o ângulo de fase entre as tensões de terceiro harmônico, no neutro e nos terminais, está próximo de 180° [Nengling et al., 2004]. Assim os resultados da WT para as tensões de terceiro harmônico sobre condições normais e sobre falta fase-terra apresentariam características diferentes, conforme mostrado na Figura 15.

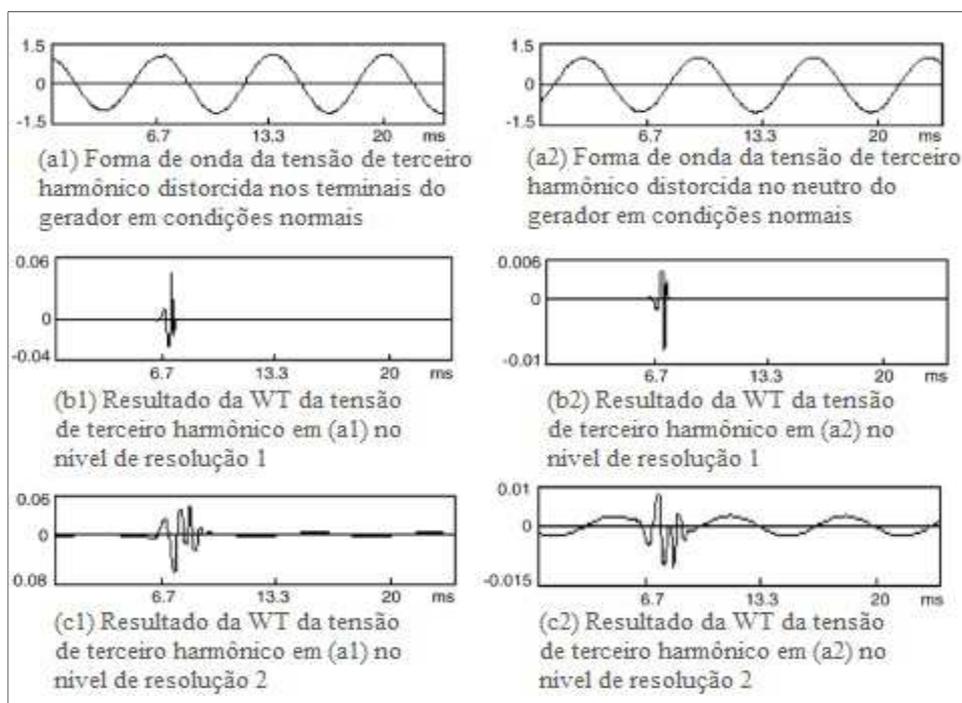


Figura 15: Forma de onda e seus resultados da WT de tensão de terceiro harmônico nos terminais do gerador e no neutro durante a ocorrência de uma mudança repentina na corrente de excitação de campo sob condições normais (reprodução de [Nengling et al., 2004])

O resultado da transformada Wavelet dos sinais de tensão nos terminais e no neutro do gerador, especialmente os módulos máximos nos níveis mais superficiais, fornece evidências suficientes do início da falta à terra.

3.3.1.7 Método baseado no diferencial do ângulo de fase das tensões de terceiro harmônico

O valor do ângulo diferencial de fase das tensões de terceiro harmônico (no neutro e nos terminais) apresenta uma grande diferença durante condições normais de operação dos geradores em relação à situação de falta. Essa característica, no entanto, pode não ser

influenciada pelas condições de operação do gerador. Assim esse esquema pode ser usado para detectar faltas à terra do gerador e pode assegurar alta sensibilidade porque emprega o cancelamento da componente pré-falta [Nengling et al., 2004].

O princípio do relé de proteção diferencial de ângulo de fase é usado apenas para incrementos de tensão de terceiro harmônico, que irão ocorrer devido à falta à terra. É importante perceber que o ângulo de fase entre os valores incrementais da tensão de terceiro harmônico no neutro ($\Delta\dot{u}_{3n}$) e nos terminais ($\Delta\dot{u}_{3t}$) do gerador é praticamente nulo, mas, sob condições de falta, é próximo de 180° . De acordo com esse princípio, o esquema correspondente de proteção diferencial de ângulo de fase para falta à terra é [Nengling et al., 2004].

Opera, se:

$$|[\arg(U_{t3}(t)) - \arg(U_{t3}(t - t_{cc}))] - [\arg(U_{3n}(t)) - \arg(U_{3n}(t - t_{cc}))]| \leq \varepsilon \quad [9]$$

Na qual $t = k_n$ é um ponto de amostragem, t_{cc} é o tempo de cálculo $\varepsilon \leq 10^\circ$.

Para melhorar a confiabilidade, a equação acima deve ser calculada m vezes ($m \geq 6$) repetidamente.

O esquema considera apenas tensões de contribuição para falta através da supressão das tensões pré-falta. Em condições normais, \dot{u}_{3t} e \dot{u}_{3n} são inversos. Por exemplo: o ângulo de fase entre \dot{u}_{3t} e \dot{u}_{3n} é aproximadamente 180° , e o valor da amplitude de \dot{u}_{3t} e \dot{u}_{3n} é normalmente diferente. Então o novo esquema pode ter uma alta sensibilidade, que é restringida apenas pelo equipamento de proteção usado.

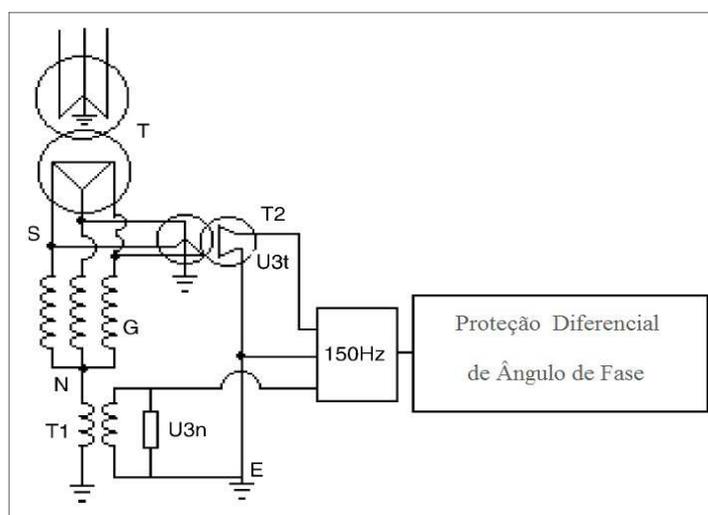


Figura 16: Circuito de proteção do esquema de proteção diferencial de ângulo de fase (reprodução de [Nengling et al., 2004])

3.3.1.8 Método baseado nos algoritmos de agrupamento Fuzzy

Este método é utilizado quando múltiplos geradores estão conectados diretamente a uma mesma barra, conforme indicado na Figura 17. Quando ocorre uma falta fase-terra em um gerador, todos os outros, que estão conectados em paralelo com ele, têm a mesma tensão. Esquemas tradicionais de proteção usando sinais de tensão de sequência zero e sinais de tensão de terceiro harmônico não conseguem detectar qual gerador está em falta [Yuanyuan et al., 2013].

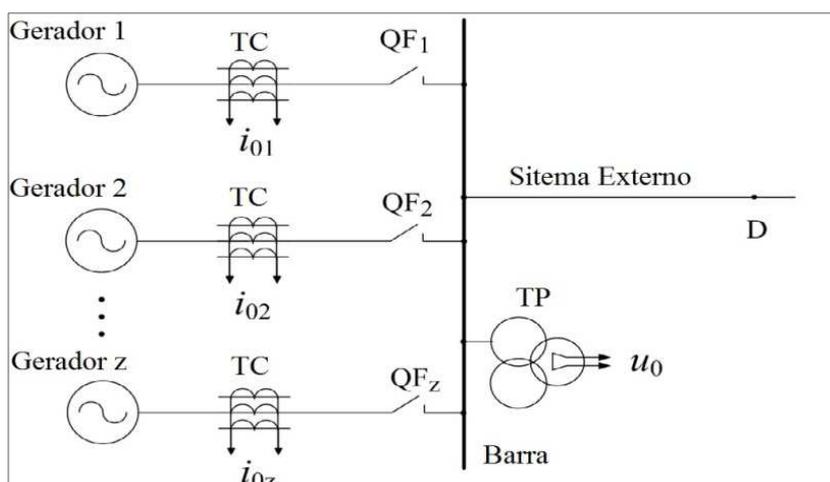


Figura 17: Modelo do sistema (reprodução de [Yuanyuan et al., 2013])

Geralmente, na ocorrência da falta à terra, podem-se obter diversas informações, tais como corrente fundamental de sequência zero, corrente de terceiro harmônico e energia dissipada no ponto de falta. Essas grandezas têm valores distintos em outras situações como, por exemplo, operação normal ou surto de manobra. Portanto, se os sinais da falta puderem ser discriminados corretamente, o gerador em falta pode ser identificado.

Esquemas convencionais de proteção que usam apenas parte da informação sobre a falta têm pouca confiabilidade. Felizmente, devido à característica da fusão de informações dos algoritmos de agrupamento *fuzzy*, inconvenientes dos esquemas convencionais prometem ser superados através da adoção de projetos apropriados. *Fuzzy c-means* (FCM) é um padrão do algoritmo de agrupamento que pode fundir todos os tipos de informação sobre a falta e integrar todos os esquemas de proteção. FMC é aplicado na detecção do gerador em falta [Yuanyuan et al., 2013].

O modelo do esquema de proteção é mostrado na Figura 18. O primeiro passo é a extração dos vetores de características da falta de cada gerador isolado, através de seu sistema de proteção em diferentes condições de operação. Em seguida, esses vetores são armazenados,

formando um histórico. Depois esses dados históricos são projetados em um espaço multidimensional e divididos em dois grupos: grupo “com falta” e grupo “sem falta”, e os elementos da matriz e os centros de agrupamento são calculados por algoritmos FMC. Finalmente, quando ocorre uma falta fase-terra no estator de um dos geradores, são calculadas as distâncias espaciais entre o padrão detectado e os centros de agrupamento dos dados (com falta e sem falta); o padrão detectado irá pertencer ao grupo com a mais curta distância relativa espacial [Yuanyuan et al., 2013].

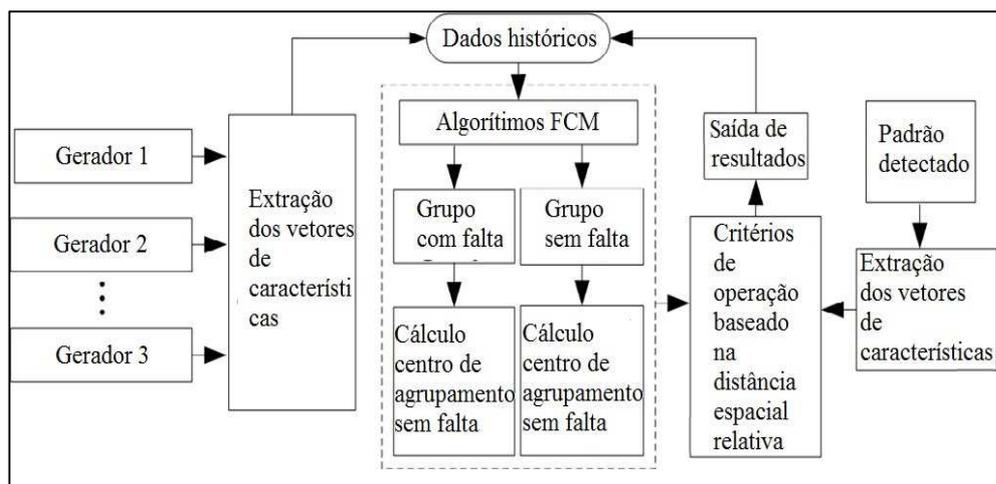


Figura 18: Modelo do esquema de proteção (reprodução de [Yuanyuan et al., 2013])

3.3.2 Método baseado na injeção de sub-harmônico

Alguns geradores não possuem condições de gerar tensão de terceiro harmônico em nível suficiente para implementar uma proteção 100% contra falta à terra no estator a partir dela. Como alternativa, existe o esquema de proteção baseado na aplicação de tensão sub-harmônica no neutro [Silva et al., 2011]. Ele tem a vantagem de garantir 100% de proteção contra falta à terra independentemente do esquema de proteção de 95% [Sultan et al., 2013].

O esquema requer a aplicação de um sinal de tensão de baixa frequência (tipicamente 12,5 Hz, 15 Hz ou 20 Hz) através da impedância de aterramento e de um filtro passa banda, conforme indicado na Figura 19. A partir desse esquema de proteção, é obtida a impedância equivalente através da medição da corrente de baixa frequência, que muda durante a ocorrência de uma falta para a terra. Embora esse esquema seja caro, está-se tornando extensamente usado, uma vez que pode ser mantido em funcionamento mesmo com a máquina desligada. Ele se tem tornado um tópico ativo de pesquisas, principalmente pelo fato de ocasionar *trip* indevido. Uma característica adicional desse esquema de proteção é a medição precisa da resistência equivalente, a partir da qual o valor de resistência de falta pode ser obtido [Blánquez et al.,

2015]. A principal vantagem do relé de proteção sub-harmônico 100% é sua proeminente sensibilidade, que independe da carga ativa da máquina [Sultan et al., 2013].

A aplicação de tensão no neutro (ou residual) no secundário do TP de delta aberto pode detectar faltas à terra em qualquer parte do enrolamento do estator, incluído o ponto de neutro.

Certos esquemas injetam um sinal codificado na frequência sub-harmônica, que pode ser sincronizado com a frequência do sistema. Quando comparada com outro esquema de injeção, essa codificação melhora a segurança dentro do sistema do relé sem sacrificar a confiabilidade. Para o adequado desempenho do relé, o esquema é dependente de uma fonte confiável de sub-harmônico.

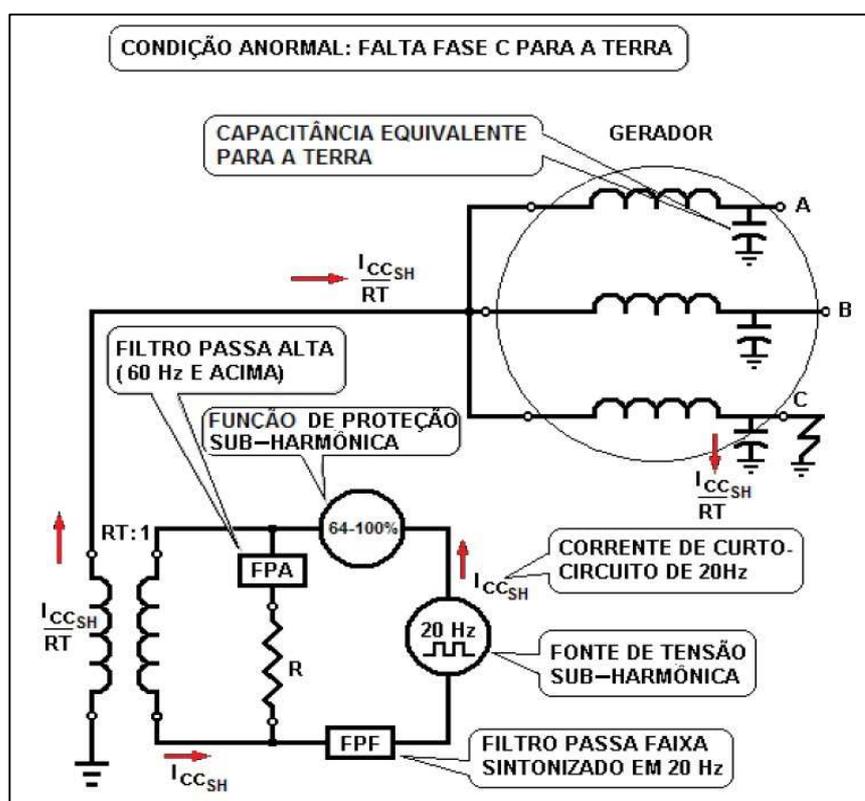


Figura 19: Método baseado na injeção de tensão sub-harmônica - Condição de falta (reprodução de [Silva et al., 2011])

Nesse esquema, pode ser adicionado um reator que conecta o dispositivo de proteção com a resistência no secundário do transformador, com a finalidade de compensar a capacitância de fuga proveniente do enrolamento de estator para a terra. A frequência do sinal de injeção é sintonizada para adaptar a variação da capacitância causada pela variação de temperatura, envelhecimento da isolamento, etc. Assim a influência da capacitância é retirada, e a alta impedância da proteção contra a falta à terra para o enrolamento inteiro do estator é usada com ajuste.

4 ESPECIFICAÇÃO PARA SIMULAÇÃO

4.1 Considerações preliminares

O objetivo deste capítulo é preconizar as condições e condutas para realização dos testes do relé digital de proteção, empregando o simulador digital em tempo real (RTDS), para as funções relacionadas à proteção do enrolamento do estator do gerador contra faltas à terra. Uma vez que os testes não puderam ser realizados antes da conclusão deste trabalho, o enfoque das discussões que se seguem será a preparação para os testes e as especificações necessárias a partir da teoria descrita no capítulo anterior.

4.2 Simulador digital em tempo real

Os testes no relé de proteção das unidades geradoras da UHE Volta Grande serão feitos com o simulador digital em tempo real (RTDS), um *hardware* dedicado a resolver transitórios eletromagnéticos a partir do algoritmo conhecido como algoritmo de Dommel [Borel , 2012]. Ele tem capacidade de operação contínua e fornece respostas em tempo real para testes em malha fechada.

O *software* RSCAD foi projetado especialmente para fazer interface com o *hardware* do RTDS. Através dele, o usuário pode completar todos os passos para preparar e rodar simulações, criar modelos e analisar os resultados.

4.3 Sistema a ser simulado

O sistema simulado, as unidades geradoras e os componentes associados serão os da UHE Volta Grande, sob Concessão da Cemig GT. Nela estão instaladas quatro unidades geradoras de 100 MW cada, que operam em 13,8 kV e estão conectadas ao sistema elétrico em 345 kV através da SE Volta Grande. A Figura 20 ilustra o diagrama unifilar do sistema considerado.

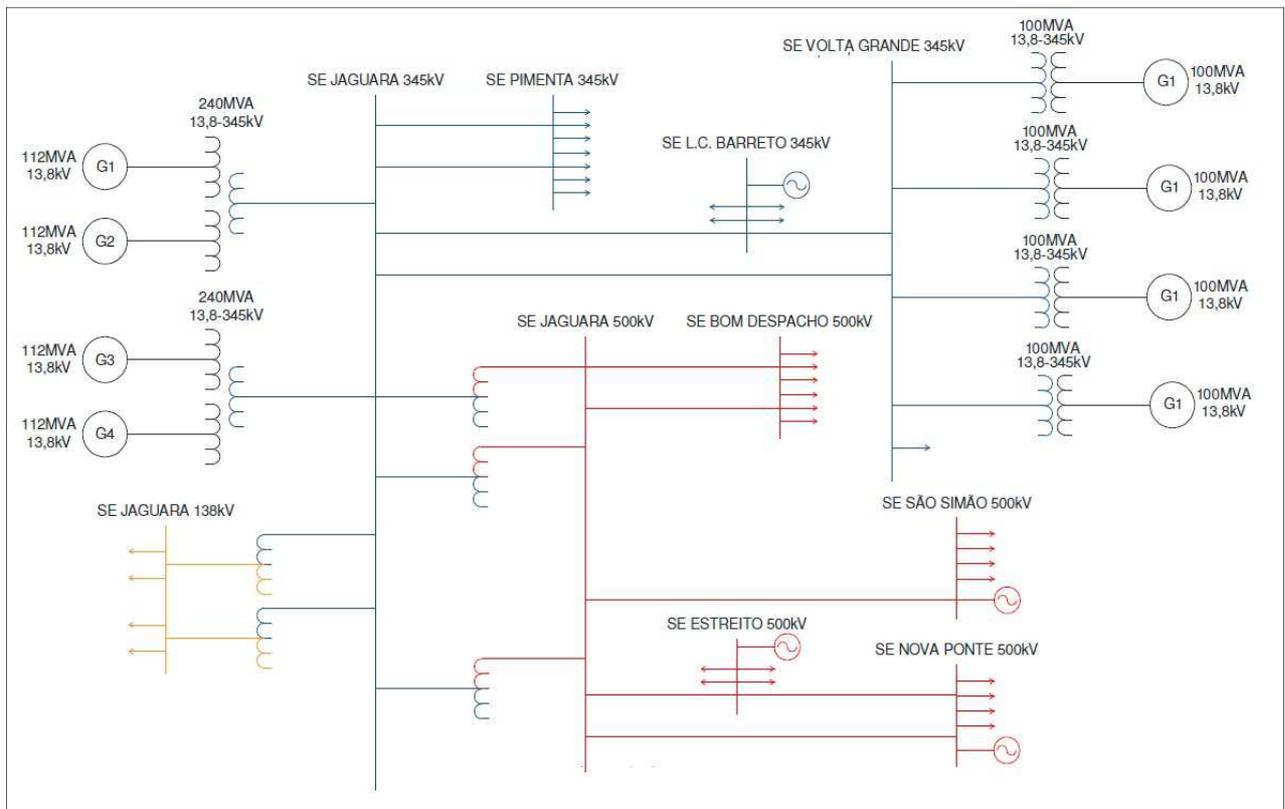


Figura 20: Malha elétrica regional da UHE Volta Grande

4.4 Especificação dos testes

Os testes a ser especificados serão apenas os relacionados à proteção de falta à terra no enrolamento do estator.

4.4.1 Curtos-circuitos internos

Serão aplicados curtos internos fase-terra no enrolamento do estator em todo seu comprimento. Deve-se prever, também, que a aplicação das faltas ocorra para várias condições de carga do gerador e diversos valores de resistência de falta.

Propõe-se testar as funções de proteção contra a falta à terra disponíveis no relé, sobretudo a sobretensão no neutro, sobrecorrente no neutro, subtensão de terceiro harmônico no neutro, sobretensão de terceiro harmônico nos terminais do gerador e injeção de sub-harmônico.

4.4.2 Curtos-circuitos externos

Apesar de a proteção contra curtos externos não ser foco deste trabalho, acredita-se relevante a verificação da seletividade das proteções por meio da realização de curtos externos, com atenção às proteções contra curto interno.

4.5 Modelagem no RSCAD

4.5.1 Sistema elétrico

Os dados do sistema elétrico no qual a usina está inserida são obtidos através de um *software* de cálculo de fluxo de potência que tem o sistema completo modelado, geralmente feito pelas Concessionárias. Nesse sistema, são considerados os barramentos próximos da usina estudada, indicada na Figura 20, sendo o restante do sistema substituído por barras equivalentes.

4.5.2 Gerador

Os parâmetros das máquinas síncronas a ser simuladas no RSCAD devem ser extraídos dos modelos já existentes no próprio *software*. Uma das máquinas da usina deve ser modelada a partir do modelo “_rtds_PDSM_FLT_v1”, que permite aplicar faltas internas no enrolamento do estator, necessárias para os testes nas funções de proteção contra falta à terra [Batista, 2015].

4.5.3 Circuito de geração de tensão de terceiro harmônico

Os modelos disponíveis nos RSCAD não possuem geração de tensão de terceiro harmônico, a qual é necessária para testar as proteções que atuam a partir desse parâmetro. Em [Batista, 2015], é apresentado um modelo simplificado para geração das tensões de terceiro harmônico que pode ser associado ao modelo do gerador. Esse modelo é reproduzido na Figura 21.

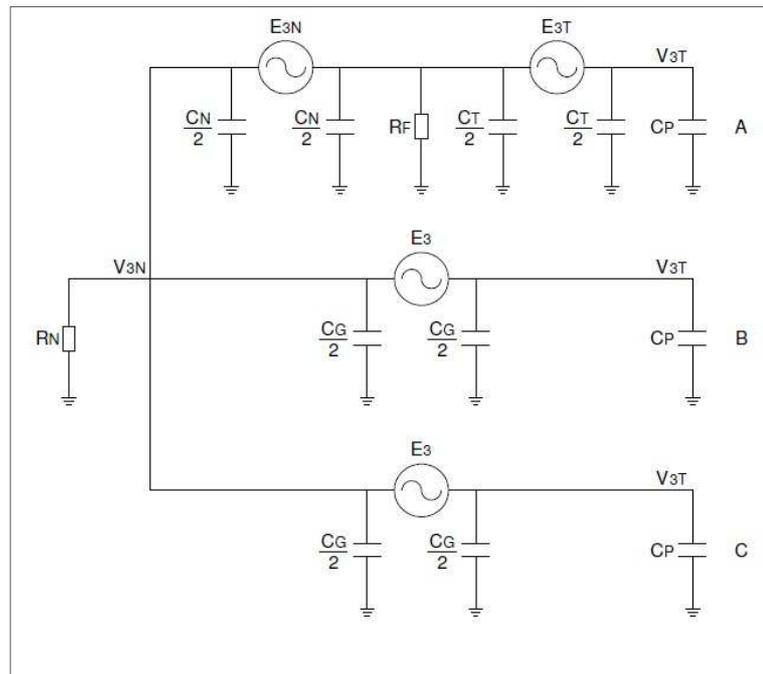


Figura 21: Circuito equivalente para um curto-circuito a terra na fase A (reprodução de [Batista, 2015])

Na Figura 21, R_N e R_F são as resistências de aterramento de neutro e de falta, respectivamente. Na fase A, na qual serão aplicadas as faltas, estão representadas duas fontes de terceiro harmônico retratando a divisão das tensões pela falta do estator. A amplitude da tensão nessas fontes está em função de um fator k , que representa a porção do enrolamento em que a falta foi aplicada. O mesmo procedimento das fontes foi adotado para as capacitâncias do gerador na fase A. Para representar a variação das tensões de terceiro harmônico com o carregamento do gerador, é necessário, através do modo *draft* do RSCAD, programar, usando equações matemáticas, uma rotina que faça a variação da amplitude da tensão em função da carga [Batista, 2015].

4.5.4 Circuito de geração de tensão sub-harmônica

Para testar as proteções que funcionam a partir da injeção de tensão sub-harmônica no neutro do gerador, é necessário criar um modelo no RSCAD. Em [Alcantara et al., 2006], é apresentado um circuito, na Figura 22, no qual é acrescentada uma fonte de tensão com frequência sub-harmônica em série com impedância interna entre o resistor de aterramento e a terra, como indicado na Figura 22. Caso a fonte esteja no secundário de um transformador de injeção de sub-harmônico ou de aterramento, deve ser refletida para o primário. É necessária

atenção para a impedância da fonte, que deve estar corrigida para o valor de frequência sub-harmônica; o ideal é que esteja em função da indutância e da frequência.

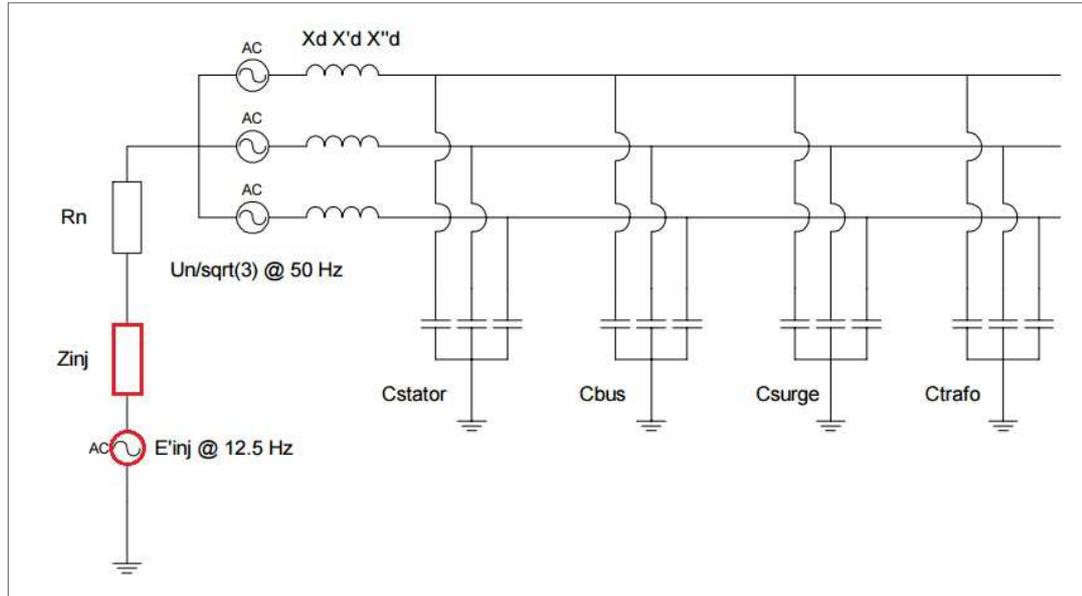


Figura 22: Circuito equivalente do gerador com o esquema de injeção (reprodução de [Alcantara et al., 2006])

4.6 Preparação para os testes

4.6.1 Dados principais

Na Tabela 1 estão relacionados os dados principais das unidades geradoras a serem testados, assim com dos instrumentos de transformação para medição.

Tabela 1: Dados principais

Dado	Valor	Descrição
VN	13,8 kV	Tensão nominal do gerador.
SN	100 MVA	Potência nominal do gerador.
VNS	120	Tensão nominal secundária dos TPs (fase-fase).
INS	5	Corrente nominal secundária dos TCs.
RTCLF	120/240(neutro)	Relação de transformação dos TCs do gerador, lado terminais de fase.
RTCLN	1000	Relação de transformação dos TCs do gerador, lado neutro.

Continuação da Tabela 1

Dado	Valor	Descrição
RTP	120	Relação de transformação dos TPs do gerador.
RTPTRA	50	Relação de transformação do TP de neutro.
ICC-MAX-EXT	828	Contribuição do gerador para um curto-circuito trifásico nos terminais de alta tensão do transformador elevador.
VCC-MAX-EXT	Tensão fase terra cai de 7,9 kV para 4,3 kV em caso de curto trifásico na alta tensão do transformador elevador	Queda de tensão no gerador para um curto-circuito trifásico nos terminais de alta tensão do transformador elevador.
ICC-MAX-INT	34 kA de contribuição do transformador elevador + 20 KA de contribuição do gerador na barra de 13,8 kV da máquina. Fonte: Aspen	Contribuição do transformador elevador para um curto-circuito trifásico nos terminais do gerador.
VN3H-50%	Máquina G1 :262 V primários para um potência de 46 MW; Máquina G2: 206 V primários para uma potência de 52 MW	Tensão de terceiro harmônico no neutro do gerador a 50% da potência ativa nominal (limite mínimo de operação da turbina).
X'd	0,360 pu (base 100MVA)	Reatância transitória de eixo direto do gerador.
ZPS	10.76% na (base 100MVA)	Impedância do transformador elevador, entre os terminais primário e secundário.

4.6.2 Montagem física

A seguir, na Figura 21, está representado o diagrama de conexões elétricas entre os equipamentos do sistema de teste, RTDS, Relé P343 e caixa de testes.

Nas entradas ‘F’ e ‘D’ analógicas, chegam os sinais de tensão e corrente correspondentes aos secundários dos TC’s e TP’s da simulação. Esses sinais são amplificados na caixa de testes depois de saírem do RTDS. Já as entradas digitais E1 a E10 do relé recebem os sinais de configuração dos componentes do sistema vindos do módulo GTFPI do RTDS. Através das saídas R1 a R14 do relé, são enviados os sinais de *trip* das respectivas proteções ao módulo GTI1 do RTDS. A alimentação do relé é em 125Vcc, e nos contatos secos de *trip* do relé é aplicada tensão de 5Vcc proveniente de uma fonte externa.

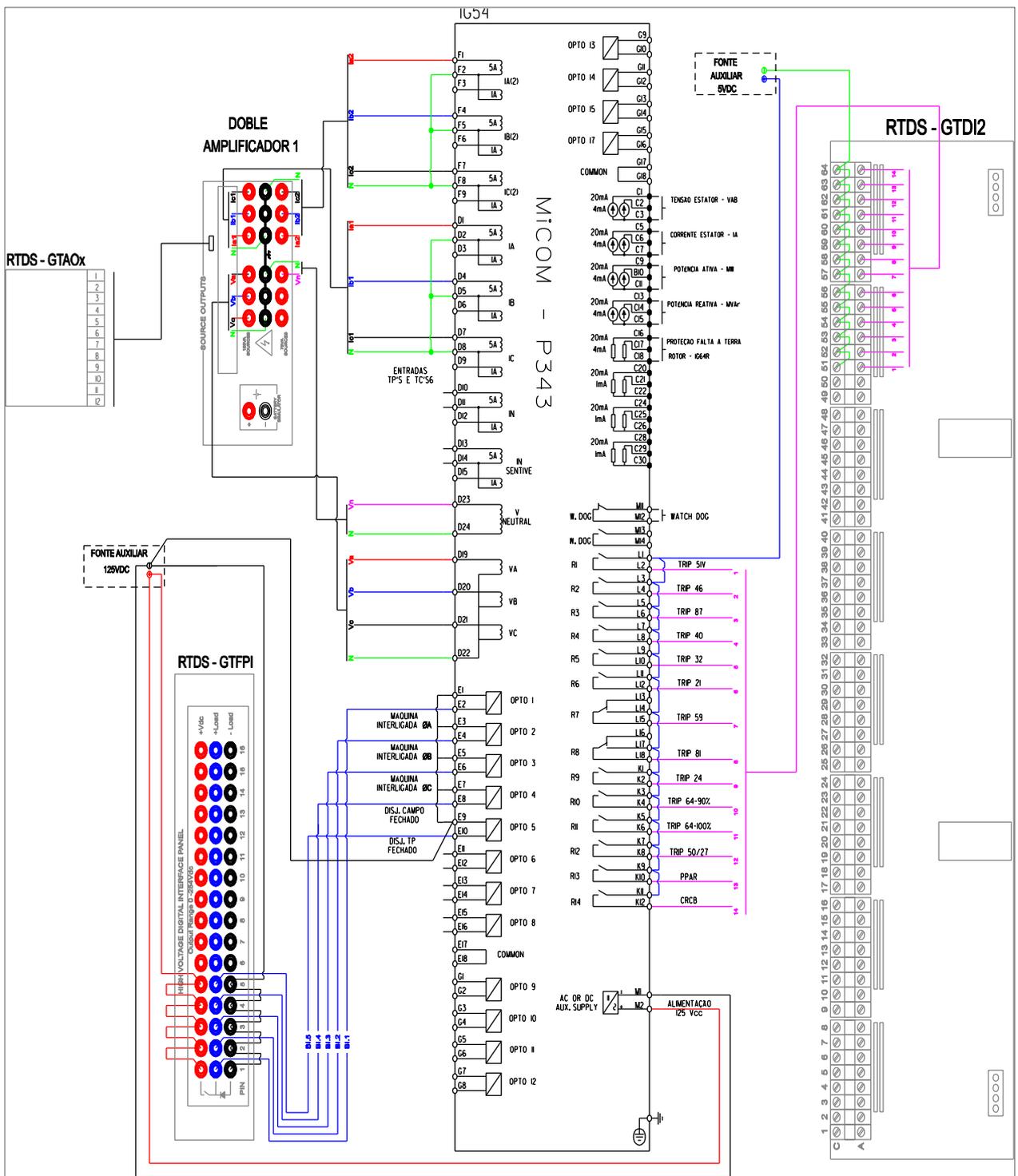


Figura 21: Montagem física

4.7 Proposta de realização dos testes

Propõe-se a realização dos testes aplicando faltas no enrolamento do estator, variando a posição de 1% em %1 do enrolamento e registrando os tempos de atuação das funções de proteção, a partir do momento de ocorrência da falta. Recomenda-se verificar se a atuação foi

devida, se houve falta na atuação de alguma dessas funções e se há plena certeza de que os tempos de atuação estão dentro das tolerâncias garantidas para o relé em teste. Os resultados podem ser organizados conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Registro da atuação das proteções durante os testes de falta á terra no estator.

Percentual do enrolamento onde é aplicada a falta a partir do neutro [%]	Tempo de atuação a partir da ocorrência da falta [ms]							
	50N*	51N*	67N*	67W*	59N*	27TN*	59TN*	64S*
1								
2								
3								
...
100								
Valor da resistência de falta [Ω]								
Valor da Potência Ativa [MW]								
Proteções								
50N	Sobrecorrente instantânea de neutro (ou residual)							
51N	Sobrecorrente temporizada de neutro (ou residual)							
67N	Sobrecorrente de neutro (ou residual) direcional							
67W	Sobrecorrente de neutro (ou residual) wattimétrica							
59N	Sobretensão deslocamento de neutro (ou residual)							
27TN	Subtensão de neutro de terceiro harmônico							
59TN	Sobretensão de neutro de terceiro harmônico							

Recomenda-se repetir o teste variando a impedância de falta. Primeiramente realizá-lo com resistência nula; posteriormente repeti-lo com valores de resistência múltiplos do valor da resistência de aterramento do gerador R_N , como, por exemplo, $0,1 \times R_N$, $1 \times R_N$, $10 \times R_N$, e $100 \times R_N$.

Outra recomendação é a repetição do teste de aplicação de faltas á terra para alguns valores de potência ativa. Em primeiro lugar, com carregamento nulo e, em seguida, variando o carregamento de 20% em 20% do valor da potência ativa nominal do gerador até atingir 100%.

Finalmente recomenda-se realizar o teste de aplicação de falta à terra, considerando simultaneamente a maior resistência de falta e o menor carregamento para os quais as proteções, baseadas em sinais de terceiro harmônico, foram sensibilizadas. Caso elas não se sensibilizem nessa condição, sugere-se realizar novos testes, aumentando o carregamento e reduzindo a resistência de falta gradualmente, a fim de encontrar as condições-limite de atuação das proteções.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

5.1 *Conclusões*

As proteções contra falta à terra, especialmente as que cobrem 100% do enrolamento do estator e as mais tradicionalmente usadas, são afetadas pelas características do sistema de aterramento do neutro, pelas condições de carga, tipo de enrolamento do estator, etc. Portanto o desempenho dessas proteções deve ser avaliado considerando a influência dessas características, de preferência antes da instalação em campo. A perspectiva é que os testes propostos com o RTDS preencham essas lacunas, a fim de, além de avaliar a *performance* do sistema, ajudar a orientar os ajustes mais adequados.

Durante a elaboração do trabalho, foram pesquisados alguns esquemas diferentes de proteção, que utilizam parâmetros até então incomuns para detecção de falta fase-terra do estator e que, segundo demonstrado nas referências, têm sensibilidade e confiabilidade atestadas, pelo menos para os casos experimentados. Alguns deles não exigem dispositivos novos além dos previstos em esquemas tradicionais, pois sua singularidade se expressa na implementação de rotinas que processam os sinais e avaliam se há falha ou não. A questão é determinar se esses novos métodos abrangem vários tipos de máquinas e sistemas, ou se são eficientes apenas para os casos em que foram apresentados.

5.2 *Propostas de continuidade*

Uma proposta evidente de continuidade é a realização dos testes sugeridos através do RTDS e, assim, concluir o procedimento para testar a função de proteção contra falta à terra. Outra proposta é pesquisar meios de detecção da falta diferentes dos convencionais como os aqui citados, mas que tenham sido desenvolvidos para grandes geradores hidráulicos, a fim de

verificar a possibilidade de adoção do seu sistema de proteção em geradores de médio e até mesmo de pequeno porte.



Referências Bibliográficas

- [Alcantara et al., 2006] ALCANTARA, R.J; GARCIA, F.G. "**100% stator ground fault protection - a comparison of two protection methods.**", Tese de Doutorado, Dep. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, 2006, pp. 64-75.
- [Batista , 2015] BATISTA, J.C. "**Metodologia para Ensaio de Modelo de Sistema de Proteção de Geradores Síncronos Utilizando Simulador Digital em Tempo Real.**", Tese de Mestrado, PPGE, UFMG, 2015, pp. 66-108.
- [Blánquez et al., 2015] BLÁNQUEZ, F.R.; PLATERO, C.A.; REBOLLO; et al." **On-Line Stator Ground-Fault Location Method for Synchronous Generators Based on 100% Stator Low-Frequency Protection.**", ELSEVIER, Electrical Engineering Department, Universidad Politécnica de Madrid, Spain, 2015.
- [Borel , 2012] BOREL, U.F.P. "**Desenvolvimento de um Sistema Ativo para Aterramento de Neutro.**", Dissertação de mestrado, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, UFMG, 2012.
- [Cardoso Júnior , 2013] CARDOSO JÚNIOR, G. "**Introdução a Proteção de Sistemas Elétricos.**", CEESP, UFSM, 2013.
- [Costa , 2014] COSTA, P.F. "**Aterramento de Neutro - Capítulo 1 - Escolha do Tipo de Resistor de Aterramento do Neutro em Sistemas Elétricos Industriais.**" O Setor Elétrico, ed. 102, v.62, 2014, pp. 62-68.
- [Helding et al., 2013] HELDING, R; SCHOENHERR, P.E.S. "**100% Stator Ground Fault Detection Implementation at Hibbard Renewable Energy Center.**", Protective Relay Engineers, 2013 66th Annual Conference for, 2013, pp. 529 - 539.
- [Mondragón et al., 2010] MONDRAGÓN, B.R; FLÓREZ, J.M; LONDOÑO, S.P. "**Improvement of the third harmonic based stator ground fault protection for high resistance grounded synchronous generators.**" Fac. Ing. Univ. Antioquia, N.º 52 , 2010, pp. 215-225.
- [Nengling et al., 2004] NENGLIN, T; YAN, D. "**Stator ground fault protection based on phase angle differential of delta third harmonic voltages.**", Department of Power Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, ELSEVIER, Electric Power Systems Research 74, 2004, pp. 203-209.
- [Nengling et al., 2000] NENGLING, T; XIANGGEN, Y; DESHU, C. "**Analysis of Stator Ground Protection Schemes for Hydro-Generator os Three-Gorges Power Plant Based on Zero Sequence Voltages.**" Department of Electrical Engineering Huazhong University of Science and Technology Wuhan, Hubei P.RChina, IEEE, 2000, pp. 1888-1893.
-

-
- [Rifaat , 1997] RIFAAT, R.M. **“Considerations for Generator Ground-Fault Protection in Midsize Cogeneration Plants.”**, IEEE, Transactions on Industry Applications, vol. 33, n. 3, 1997, pp. 628-634.
- [Rocha et al., 2014] ROCHA, G; LIMA, P. **“Proteção de Geradores - Capítulo 1 - Fatores Limítrofes, Arranjos e Aterramento de Geradores”**. O Setor Elétrico, ed. 96 , v.22, 2014, pp. 22-29.
- [RTDS , 2010] RTDS, T. **“Real Time Digital Simulator Tutorial Manual.”**, 2010.
- [Silva et al., 2011] SILVA, A.J.F; ALVES, C.E;RIGOTTO JUNIOR, J. **“Proteções Elétricas de Geradores Hidráulicos.”**, Companhia Energética de Minas Gerais, 2011.
- [Sultan et al., 2013] SULTAN, A.R; MUSTAFA, M.W. **“Ground Fault Protection Methods of a Generator Stator.”**, Technology University of Malaysia, Faculty of Electrical Engineering, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, 2013, pp. 225-229.
- [Yuanyuan et al., 2013] YUANYUAN, W; XIANGJUN, Z;ZHAOYANG, D. **“Novel protection scheme of stator single-phase-to-ground fault for powerformers.”**, Electrical Power and Energy Systems, ELSEVIER, 2013, pp. 321-328.
- [Zielichowski et al., 1999] ZIELICHOWSKI, M; FULCZVK, M. **“Influence of Load on Operating Conditions of Third Harmonic Ground-Fault Protection System of Unit Connected Generators.”**, IEEE Proc. Gener. Tranrm. Distrib., v. 146, n. 3, 1999, pp. 241-248.
- [Zielichowski et al., 2003] ZIELICHOWSKI, M; FULCZYK, M. **“Analysis of Operating Conditions of Ground-Fault Protection Schemes for Generator Stator Winding.”**, IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 18, n.1, 2003, pp. 57-62.
-