

ANÁLISE DE ATUAÇÃO INDEVIDA DA PROTEÇÃO DE NEUTRO FRENTE A CORRENTES CAPACITIVAS DE SEQUÊNCIA ZERO EM SISTEMA DE GERAÇÃO COM FONTES RENOVÁVEIS

HENRIQUE FANTONI PRIMO
SM&A SISTEMAS ELÉTRICOS

FELIPE MURAD DE PINHO
SM&A SISTEMAS ELÉTRICOS

ISRAEL RESENDE ALVES RODRIGUES
SM&A SISTEMAS ELÉTRICOS

THIAGO CARVALHO DIAS
SM&A SISTEMAS ELÉTRICOS

RESUMO

O objetivo do trabalho é demonstrar, através de um caso real e de simulações computacionais, o impacto da presença de corrente capacitiva de sequência zero no desempenho da proteção em sistemas com neutro aterrado por impedância, comum em instalações de geração com fontes renováveis, particularmente, usinas fotovoltaicas, que possuem em seu arranjo, trechos de cabos isolados de média tensão com comprimento significativo.

PALAVRAS-CHAVE

Análise de Ocorrência; Fontes Renováveis; Falta à Terra; Corrente Capacitiva

1.0 - INTRODUÇÃO

A proteção de sistemas elétricos de potência desempenha um importante papel para a qualidade da produção, integridade dos equipamentos e proteção de vidas humanas. Entretanto, é comum a ocorrência de desligamentos parciais ou totais pela atuação de dispositivos de proteção de maneira indevida, gerando, principalmente, atrasos ou perdas de geração e produção. Para que a frequência destes desligamentos errôneos seja diminuída, todos os fenômenos elétricos devem ser estudados e considerados na definição dos parâmetros inseridos nos relés de proteção. Um deles é a presença de correntes capacitivas de sequência zero que surgem em momentos de falta a terra (1).

A circulação de correntes capacitivas é resultado da capacitância distribuída pelo sistema e usualmente pode chegar a valores da ordem de 10 A para sistema de média tensão (2). Plantas de geração renovável, como fotovoltaicas e eólicas, bem como unidades industriais, utilizam em sua configuração longos trechos de cabo isolado, as vezes com múltiplos condutores em uma mesma fase, para realizar a conexão dos parques de geração até uma subestação elevadora de conexão com o sistema elétrico de potência. A capacitância por unidade de comprimento desses cabos é a principal responsável pela circulação de correntes capacitivas, normalmente negligenciadas para o cálculo dos parâmetros inseridos nos dispositivos de proteção (3).

Em condições de operação normal do sistema, as correntes capacitivas são equilibradas e, portanto, existe apenas a circulação de sequência positiva, proporcional a tensão fase-terra e a capacitância do cabo. Em condições de falta à terra, surge uma parcela de corrente capacitiva de sequência zero, cujo valor depende do método de aterramento do sistema.

Sistemas elétricos industriais e usinas de fontes renováveis geralmente possuem o neutro dos transformadores aterrados por impedância no lado de média tensão, via resistores de baixo valor ôhmico (que limitam a corrente elétrica em cerca de 50 a 800 A). Durante faltas à terra, as fases são experimentam sobretensões fase-terra da ordem de sua tensão nominal fase-fase. Esta sobretensão provoca um aumento da circulação da corrente capacitiva em todos os cabos sobretensionados, da ordem de raiz de 3, em que a soma vetorial destas correntes resulta em uma corrente capacitiva circulante de 3 vezes a em regime permanente (4).

O surgimento da corrente capacitiva de sequência zero, pode muitas vezes sensibilizar as unidades de sobrecorrente de neutro e abrir um circuito de forma indevida, implicando em perda confiabilidade e seletividade de atuação do sistema de proteção e conseqüentemente perda de geração em plantas renováveis.

Av. Prudente de Moraes, 135 - Santo Antônio, Belo Horizonte - MG, 30350-093 – Brasil Tel: (+55 31) 3292-5113 – E-mail: henrique.fantoni@sma-eng.com.br

2.0 - COMPORTAMENTO DA CORRENTE CAPACITIVA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A capacitância distribuída para terra dos elementos que compõem o sistema elétrico pode ser representada de maneira equilibrada e concentrada, conforme mostrado na FIGURA 1 para um sistema aterrado por resistor para análise de fenômenos na frequência fundamental.

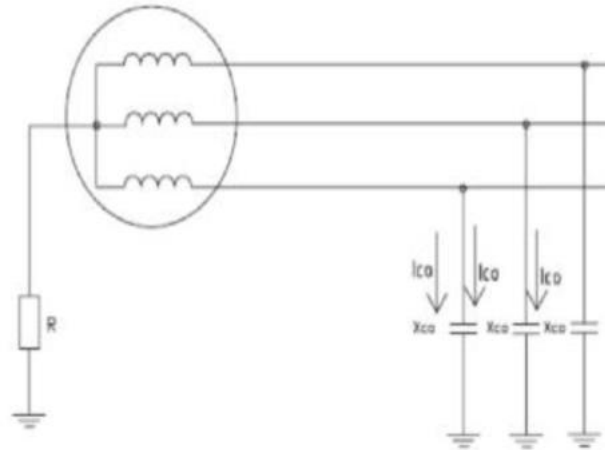


FIGURA 1 – Representação da capacitância para terra do sistema

Na condição de uma fonte equilibrada, as correntes I_{co} estão 90 graus adiantadas da tensão e defasadas em 120 graus entre si, o que leva a corrente que flui para a terra ser praticamente nula. Desta forma, podemos dizer, que em regime permanente, a corrente capacitiva que flui da fonte para os elementos do sistema é puramente de sequência positiva quando analisamos do ponto de vista das componentes simétricas.

Quando ocorre uma falta monofásica em sistemas aterrados por impedância, ocorre um deslocamento do tensão no ponto de neutro e uma consequente elevação das tensões fase-terras nas demais fases que não estão envolvidas no defeito a terra. A FIGURA 2 ilustra esse efeito nos fasores de tensão das fases B e C para uma falta na fase A.

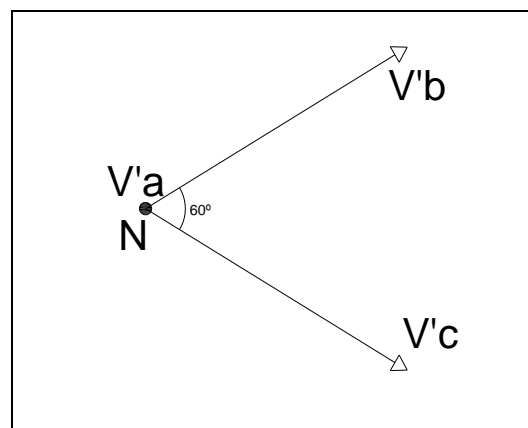


FIGURA 2 – Tensões fase-neutro para Falta a terra na Fase A em sistema aterrado por impedância

Essa elevação de tensão provoca um aumento da corrente capacitiva nas fases sãs, uma vez que a reatância capacitiva não se altera. Conforme pode ser observado na FIGURA 3, o aumento é proporcional ao fator de sobretensão, assumido aqui como raiz de 3. As correntes não estão mais equilibradas devido a falta desbalanceada, e desta maneira surge uma componente de sequência zero, dada pela somatória vetorial das correntes capacitivas de cada fase.

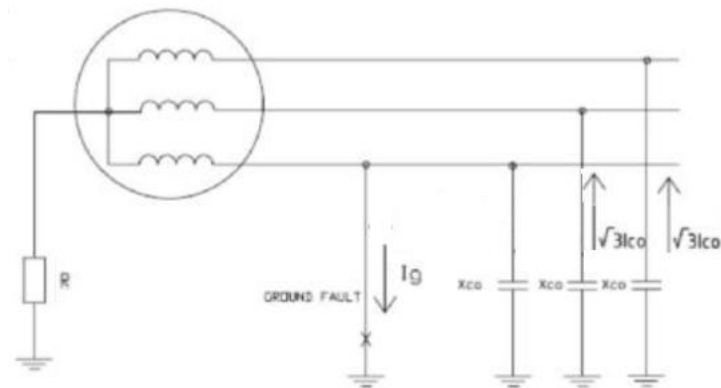


FIGURA 3 – Correntes capacitivas na presença de falta a terra em sistema aterrado por impedância

Pode ser verificado que a soma fasorial das correntes levará ao resultado de 3 vezes o valor da corrente que circula por uma das fases em condições normais de operação.

Essa corrente é comumente medida por transformadores de corrente (TC) toroidais do tipo *ground sensor* instalados em cubículos de saída de circuito de média tensão. Sua corrente primária pode ser escolhida de forma mais coerente com os níveis de falta a terra. Devido ao alto valor da corrente de regime, quando comparado a corrente de falta a terra limitada pelo resistor, não é usual utilizar os TCs de fase já que estes possuem relação de transformação (RTC) perto da nominal do circuito. A FIGURA 4 ilustra um circuito com os TCs de fase de 1200-5 A e *ground sensor* com suas RTCs de 200-5 A.

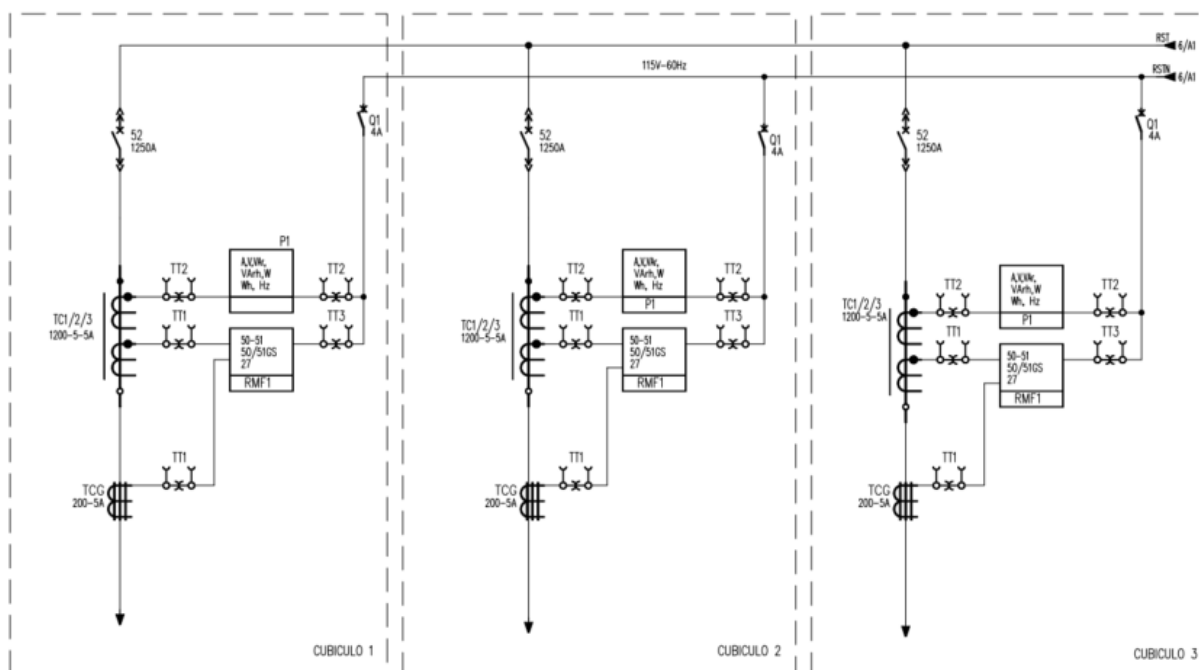


FIGURA 4 – Diagrama unifilar de cubículos de média tensão com TCs de fase e TCs *ground sensor*

Desta forma, em uma eventual falta a terra, o TC toroidal do circuito em falta medirá a corrente limitada pelo resistor e os TCs *ground sensor* nos demais circuitos em paralelo medirão a corrente capacitiva de sequência zero. A depender da capacitância distribuída do circuito, principalmente dos cabos de cada alimentador, essa corrente poderá ser suficiente para sensibilizar a proteção, desligando o alimentador que não está sob falta. O próximo item desse artigo mostra uma simulação em software de transitórios desse comportamento em um sistema real, antes de passar para uma análise detalhada de ocorrência real com atuação indevida.

3.0 - SIMULAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO REAL

O Sistema Elétrico de Potência analisado nesse trabalho trata-se de uma Usina Fotovoltaica real de 203 MW de geração conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) em 230 kV. A energia é gerada em baixa tensão (800 V) através de placas fotovoltaicas e inversores de frequência. Grupos de inversores são conectados aos dois enrolamentos secundários de transformadores de força de 7/3,5/3,5 MVA 34,5-0,8-0,8 kV. Esses transformadores são conectados a uma Subestação Principal através de cabos isolados de 34,5 kV (5) com comprimentos que variam de 800 m a 3,5 km. O transformador principal de 220/110/110 MVA 230-34,5-34,5 kV possui o enrolamento primário fechado em Estrela solidamente aterrada e os enrolamentos secundários são fechados em Delta (YNd1d1). Nesse caso, foram especificados transformadores com os enrolamentos fechados em zig-zag e resistores de aterramento em série no sistema de 34,5 kV, conforme Diagrama Unifilar simplificado apresentado na FIGURA 5.

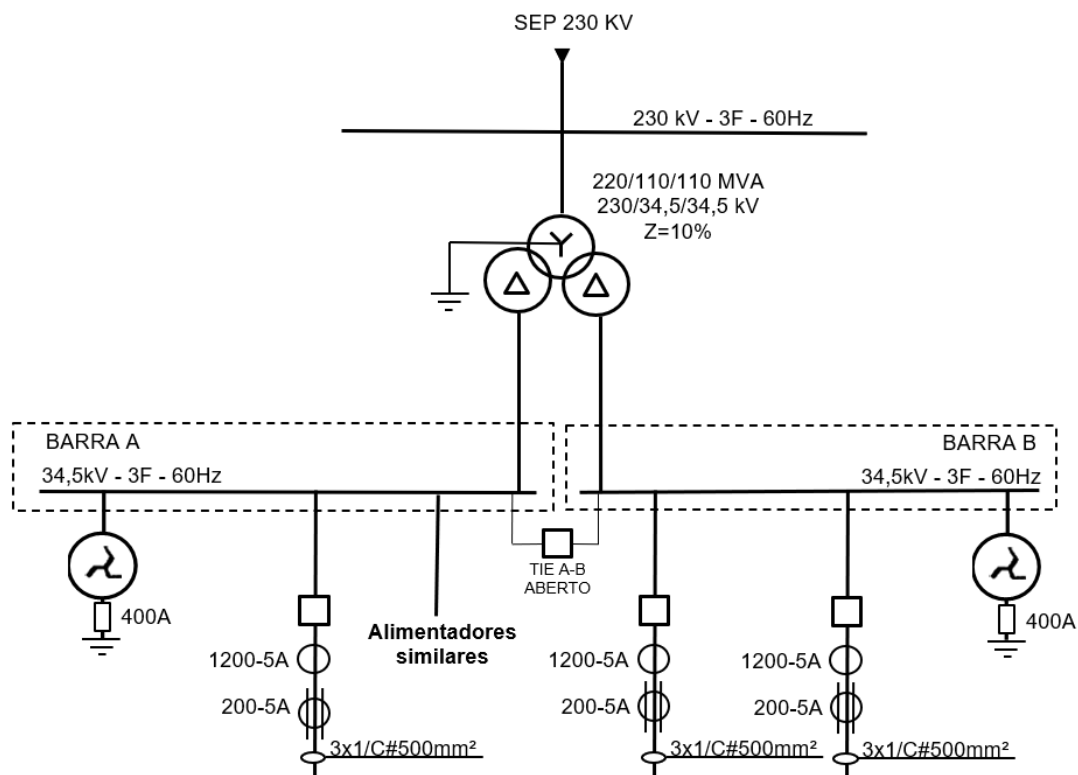


FIGURA 5 – Diagrama Unifilar simplificado da Usina Fotovoltaica real de 203 MW

Para a definição dos transformadores zig-zag e respectivos resistores de aterramento foram consideradas as diretrizes do IEEE 62.92 (6), de forma a obter relações $X0/X1$, $R0/X1$ e $R0/X0$ que garantam as seguintes premissas:

- A corrente de curto-circuito monofásica limitada deverá ser, pelo menos, três vezes maior do que as correntes capacitivas do sistema durante a falta;
- As sobretensões não devem exceder os valores de tensão suportados de manobra dos equipamentos a frequência nominal;
- A blindagem dos cabos de média tensão (34,5 kV) devem acomodar a maior corrente de curto-circuito monofásico simulada.

Diante do exposto acima, foi definido um sistema de aterramento (transformador zig-zag + resistor) limitando a corrente de curto-circuito monofásico em 400 A.

Conforme descrito no item anterior, é de fundamental importância a análise das correntes capacitivas, durante a ocorrência de faltas monofásicas, para a definição dos ajustes dos dispositivos de proteção.

Para a realização das simulações das correntes capacitivas no sistema de 34,5 kV da Usina Fotovoltaica desse estudo de caso, foi utilizado o software Alternative Transient Program (ATPDraw), conforme Diagrama Unifilar simplificado apresentado na FIGURA 6.

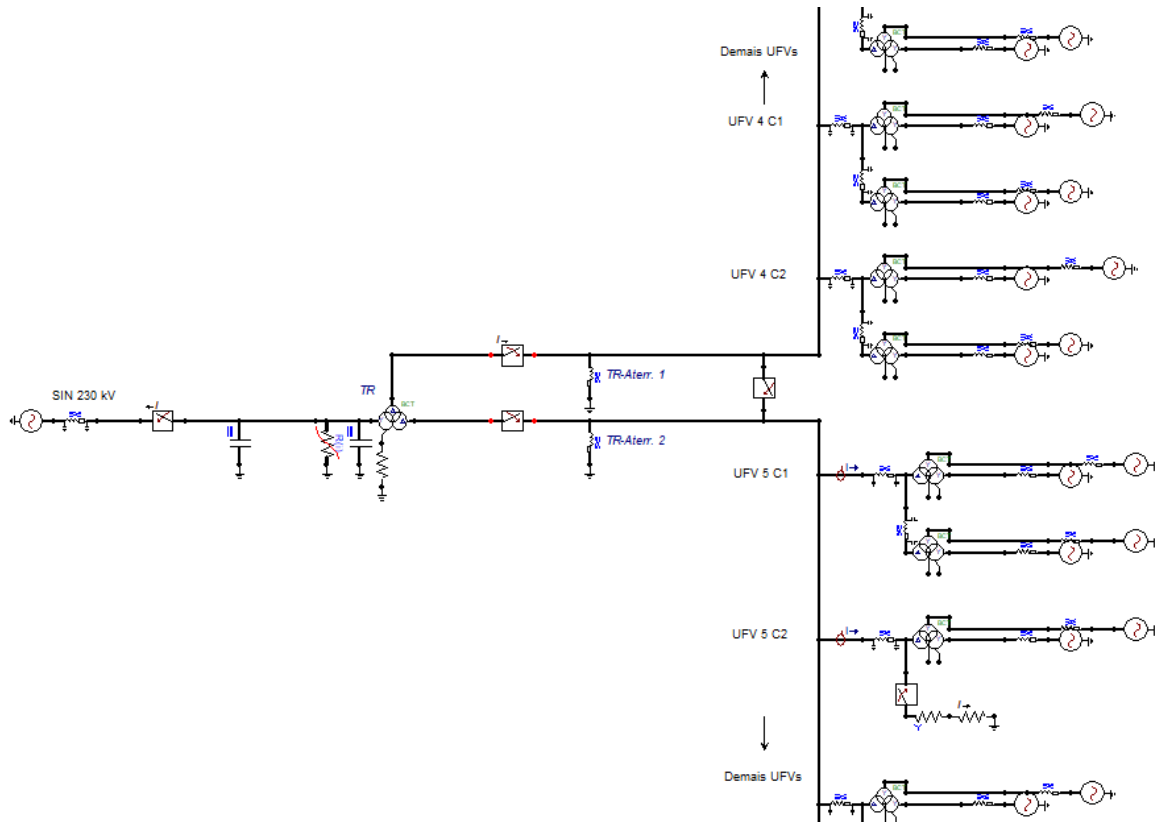


FIGURA 6 – Diagrama Unifilar simplificado da Usina Fotovoltaica modelada no software ATPDraw.

De forma a se obter apenas as parcelas capacitivas das correntes circulando no sistema em regime pré-falta e durante a falta, as simulações foram realizadas com todos os geradores das usinas desligados, ou seja, período noturno.

A FIGURA 7 apresenta as formas de onda das correntes e tensões no circuito de maior comprimento de linha de 34,5 kV, durante uma falta monofásica na Fase B em um alimentador adjacente.

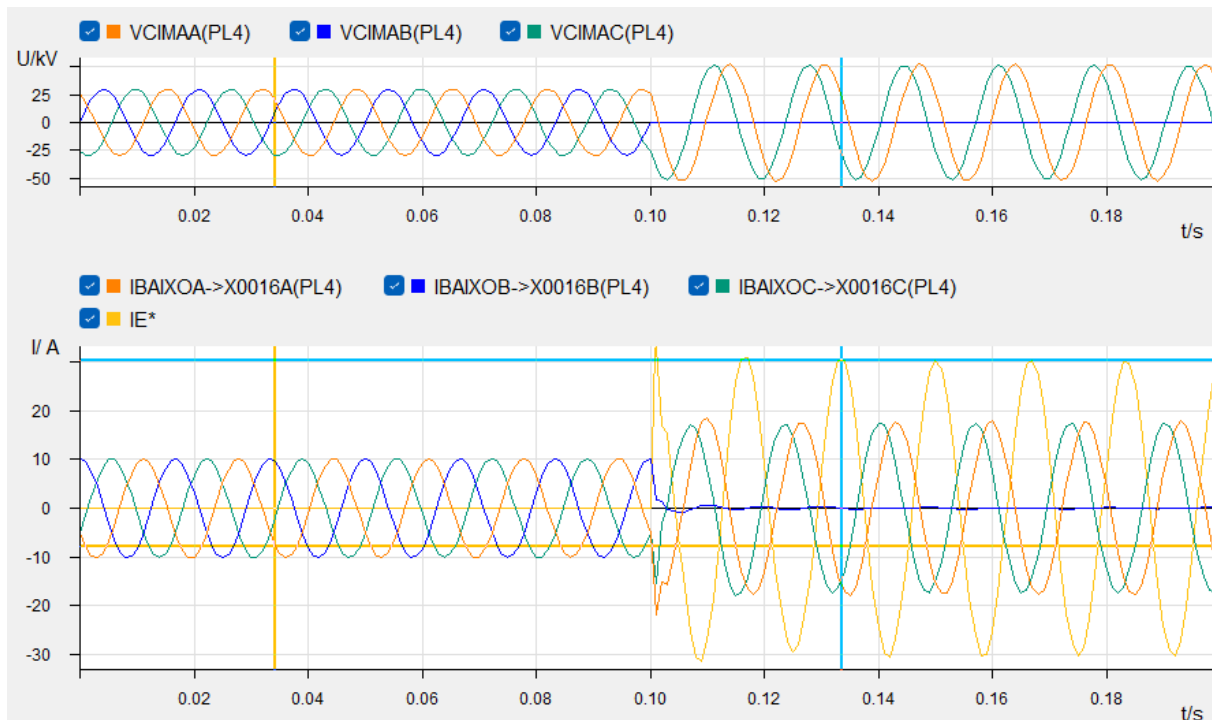


FIGURA 7 – Formas de onda de tensão e corrente no maior alimentador.

Pode-se observar que a corrente capacitiva e a tensão na Fase B do circuito analisado, reduziram para aproximadamente zero no momento da falta ($t=100$ ms) no circuito adjacente. Entretanto, as correntes capacitivas e as tensões nas fases sãs (Fase A e C) se elevaram raiz de 3 vezes, conforme esperado.

Analisando as correntes capacitivas em cada fase sã do circuito adjacente, pode-se verificar que elas atingem um valor de pico de aproximadamente 13 A rms durante a falta monofásica. A soma vetorial das correntes das três fases resulta em uma corrente capacitiva de sequência zero de aproximadamente 22A rms (representada pela grandeza IE^* no gráfico), ou seja, em torno de 10 A rms. Comparando esse valor rms com a corrente limitada pelo sistema de aterramento (400 A) temos um percentual em torno de 5%.

Os ajustes dos dispositivos de proteção do sistema de 34,5 kV da Usina Fotovoltaica analisada nesse artigo, foram definidos com valores de pick-up superiores a 20% da corrente limitada pelo sistema de aterramento (400 A) de forma a evitar a atuação indevida dos mesmos e consequentemente o desligamento de circuitos sãos.

4.0 - ANÁLISE DE OCORRÊNCIA REAL

Neste item faz-se a análise de uma ocorrência em um sistema elétrico com características similares às aquelas descritas nos item anterior. Este sistema possui tensão nominal de 13,8 kV e alimenta as subestações secundárias através de cabos isolados de grande comprimento.

Neste exemplo, ocorreu um curto-circuito fase-terra em um dos alimentadores da subestação principal deste sistema, e um dos alimentadores adjacentes (circuito atuado) foi desligado por sobrecorrente de neutro, poucos instantes após a ocorrência da falta. A FIGURA 8 representa diagrama unifilar simplificado do sistema em questão.

7

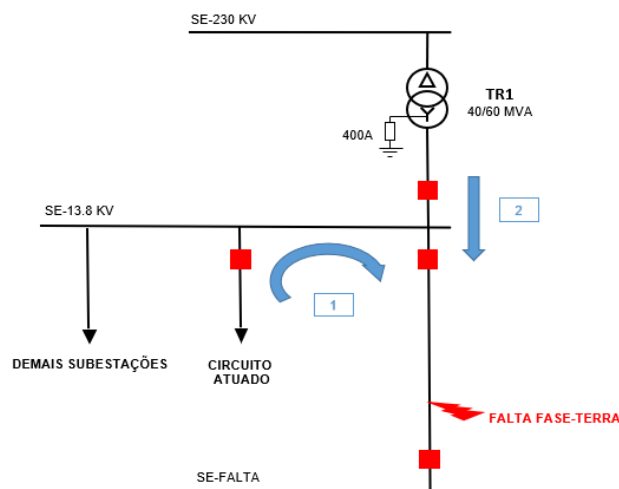


FIGURA 8 – Diagrama simplificado do sistema elétrico analisado

Na análise da atuação, foi verificado que a subestação conectada no circuito atuado está localizada a 2,7 quilômetros de distância da subestação principal, e é alimentada por 9 vias de cabo isolado de 185 mm² em cada uma de suas fases. Desta forma, espera-se uma corrente de falta limitada pelo resistor proveniente da alimentação principal do sistema (Corrente 2), e uma corrente percorrendo o circuito atuado (Corrente 1), que justifique a atuação da proteção deste ramal.

Devido ao número de vias e distância dos cabos isolados utilizados na alimentação do circuito em falta, espera-se que haja uma grande circulação de corrente capacitiva em cada um dos condutores dos circuitos sãos. Para comprovar esta hipótese, os dados dos cabos foram levantados, e a corrente capacitiva de sequência zero teórica passante pelos circuito atuado foi calculada, com base nos dados mostrado na TABELA 1.

TABELA 1 – Dados do circuito para cálculo da corrente capacitiva de sequência zero

Característica	Valor
Seção (mm ²)	185
Distância circuito (m)	2700
Quantidade de cabos	9
Comprimento total de cabos (m)	24300
Reatância capacitiva (ohm.km)	4213
Reatância capacitiva total (ohm)	173,4
Tensão (V)	13800
Corrente Capacitiva (A)	46,01

Desta forma, a corrente capacitiva teórica gerada pelos cabos é de cerca de 46 A. Esse valor foi comparado com a oscilografia da atuação, gravada pelo relé alimentador do circuito em falta. Os valores encontrados, bem como suas respectivas formas de onda são mostrados na FIGURA 9.

8

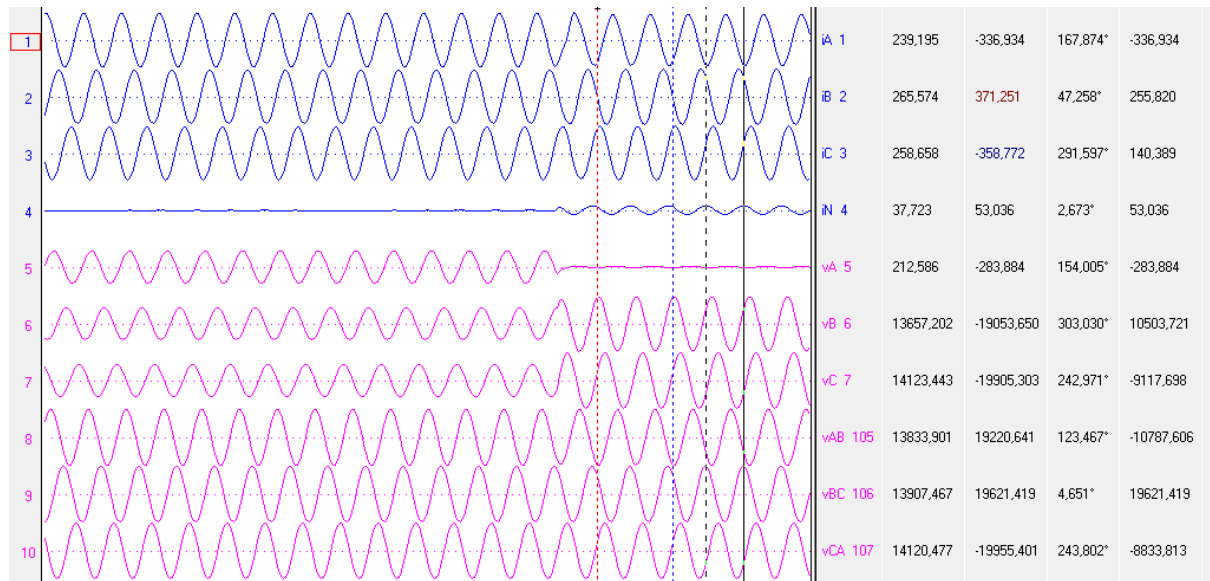


FIGURA 9 - Oscilografia do dispositivo de proteção do circuito atuado indevido

Como pode ser verificado, no momento da ocorrência da falta, em que a tensão da fase A (V_a) registra valores muito próximos a zero, uma corrente de neutro, inicialmente nula, começa a circular no sistema, com valor absoluto de 37,7 A, menor do que o calculado de 46 A, apenas considerando as capacitâncias dos cabos. Essa diferença se deve ao fato de que parte da corrente é contrabalanceada pelo reativo indutivo também dos condutores do circuito.

A característica capacitiva da corrente pode ser verificada através da FIGURA 10, onde é mostrada a corrente de sequência zero no mesmo gráfico vetorial da tensão de sequência zero. Percebe-se que a corrente de sequência zero é 90° adiantada da tensão de sequência zero.

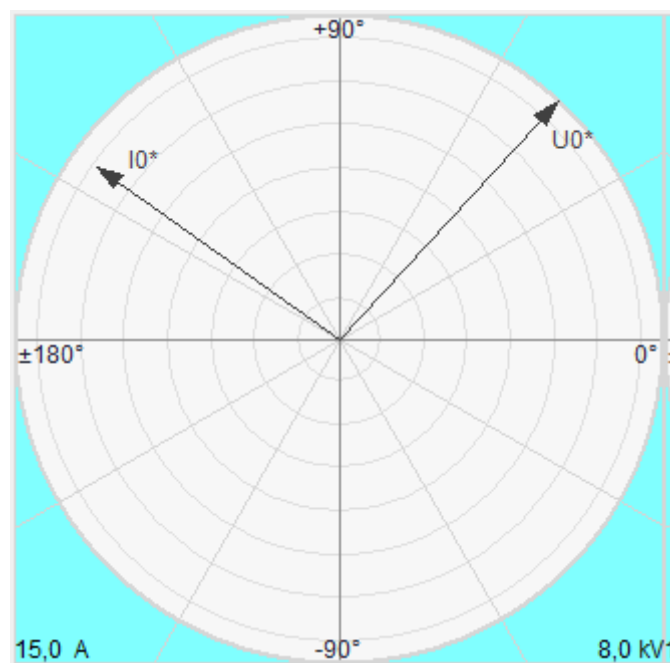


FIGURA 10 - Fasores de corrente e tensão de sequência zero no alimentador atuado

5.0 - CONCLUSÃO

Esse artigo buscou mostrar a importância de se considerar o cálculo da corrente capacitiva de sequência zero medida pelos relés de proteção em instalações de energia elétrica do tipo renovável. A circulação dessa corrente em condições de falta à terra pode provocar a sensibilização das unidades de sobrecorrente de neutro, principalmente em sistemas cujo neutro dos transformadores é aterrado por impedância e a conexão entre os parques geradores e o sistema interligado exige o uso de longos cabos isolados cuja capacitância distribuída pode se tornar relevante.

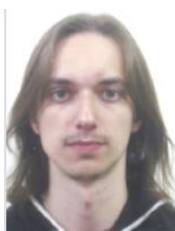
Foi demonstrado através de uma ocorrência real a atuação indevida da proteção, em um alimentador que não estava sob falta, ocasionando perda de seletividade e consequente impacto na produção. As análises das oscilografias do distúrbio permitiram concluir que o desligamento foi errôneo, frente a uma circulação de corrente capacitiva de sequência zero medida pelo TC toroidal na saída do alimentador para uma falta externa ao circuito.

Uma proposta de reajuste das funções de sobrecorrente de neutro, individualizada por alimentador, foi realizada visando garantir a estabilidade e confiabilidade da proteção para esse tipo de ocorrência, e ainda assim mantendo sensibilidade e seletividade para faltas à terra no circuito protegido.

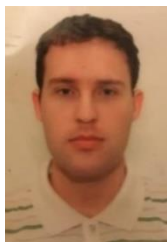
6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) John P Nelson, P.E. and Sergio Panetta, "High resistance Grounding Analysis Using Symmetrical Components – IEEE PES/IAS Power Africa, 2019.
- (2) IEEE Std. 242-2001, "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems" - 2001.
- (3) Fidelis Galla Limbong, "Investigation of Zero Sequence Capacitive Charging at Feeder X and Y on Ground Fault at Feeder Z", IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy – ICPERE 2018.
- (4) Blackburn, J. Lewis and Domin, Thomas J, "Protective Relaying Principles and Application" - Florida : CRC Press, 2006.
- (5) Prysmian Group, "Cabo Voltalene Grid AIB B16B 20/35 kV" – Revisão 01, jan/2021.
- (6) IEEE 62.92-2016, "IEEE Guide for application of neutral grounding in electrical utility systems".

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS (CVS DOS AUTORES)



Felipe Murad de Pinho nasceu em Lavras/MG no ano de 1986. Gradou-se em Engenharia Elétrica no ano de 2010 e especializou-se em proteção, controle e supervisão de sistemas elétricos de potência em 2014; todos os títulos concedidos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Experiência de 12 anos na área de Projetos, Estudos Elétricos, testes e comissionamento, principalmente na área de Proteção, tanto na área de sistemas de potência quanto industrial. Atualmente também é coordenador da equipe de Estudos Elétricos da SM&A Sistemas Elétricos e Automação



Israel Resende Alves Rodrigues nasceu em Belo Horizonte/MG no ano de 1986. Gradou-se em Engenharia Elétrica no ano de 2009, especializou-se em proteção, controle e supervisão de sistemas elétricos de potência em 2014 e recebeu o título de mestre em Engenharia Elétrica no ano de 2017; todos os títulos concedidos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Experiência de 12 anos na área de Projetos, Estudos Elétricos, testes e comissionamento, principalmente na área de Proteção, tanto na área de sistemas de potência quanto industrial. Atualmente trabalha no Departamento de Estudos Elétricos da SM&A Sistemas Elétricos & Automação e também é professor do curso de pós-graduação de Proteção de Sistemas Elétricos, da PUC-MG.



Thiago Carvalho Dias nasceu em Lavras/MG no ano de 1989. Gradou-se em Engenharia Elétrica no ano de 2012 na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), recebeu o título de mestre em Engenharia Elétrica no ano de 2016 na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI); e especializou-se em automação de sistemas elétricos de potência em 2020 pela PUC-MG. Experiência de 10 anos na área de Projetos, Estudos Elétricos, testes e comissionamento, principalmente na área de Proteção, tanto na área de sistemas de potência quanto industrial. Atualmente trabalha no Departamento de Estudos Elétricos da SM&A Sistemas Elétricos & Automação e também é professor do curso de pós-graduação de Proteção de Sistemas Elétricos, da PUC-MG.



Henrique Fantoni Primo nasceu em Belo Horizonte/MG no ano de 1980. Gradou-se em Engenharia Elétrica no ano de 2003 pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), especializou-se em Sistemas de Energia Elétrica com Ênfase em Qualidade de Energia pela UFMG em 2007 e recebeu o título de mestre em Engenharia Elétrica na linha de pesquisa de Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia no ano de 2019, títulos concedidos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Experiência de 19 anos na área de Projetos, Estudos Elétricos, testes e comissionamento, principalmente na área de Proteção, tanto na área de sistemas de potência quanto industrial. Atualmente Sócio e Gerente do Departamento de Estudos Elétricos da SM&A Sistemas Elétricos & Automação e também é professor dos cursos de pós-graduação de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG).