

Modelagem de Sistema Híbrido: Análise de qualidade de energia e estudos de proteção na integração de Usina Fotovoltaica Flutuante (FVF) à Usina Hidrelétrica (UHE) Usando o Software ATP/ATPDraw

João Daniel Aguiar de Oliveira
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Piauí - UFPI
Teresina, Brasil
joao.aguiar@ufpi.edu.br

Denise da Costa Granjeiro
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Piauí - UFPI
Teresina, Brasil
denise_granjeiro@ufpi.edu.br

Thaís dos Santos Silva
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Piauí - UFPI
Teresina, Brasil
thaissilva@ufpi.edu.br

Aryfrance Rocha Almeida
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Piauí - UFPI
Teresina, Brasil
aryfrance@ufpi.edu.br

Bartolomeu Ferreira dos Santos Junior
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Piauí - UFPI
Teresina, Brasil
bartolomeuf@ufpi.edu.br

Resumo—Este estudo analisa a viabilidade técnica do software ATP/ATPDraw para a proteção e análise da qualidade de energia em sistemas elétricos de potência, utilizando uma Usina Hidrelétrica como estudo de caso. O ATP/ATPDraw foi utilizado para simular transitórios eletromagnéticos, considerando diferentes cenários de curto-circuito e ajustando parâmetros de proteção com base nas curvas resultantes. Além disso, realizou-se uma análise de qualidade de energia, abrangendo fenômenos como afundamentos de tensão, permitindo uma compreensão detalhada do impacto dessas variações no sistema elétrico. O objetivo foi correlacionar as respostas gráficas com as previsões feitas pela concessionária e avaliar sua adequação para estudos de proteção e qualidade em sistemas elétricos de potência. A análise demonstra a capacidade do software de gerar resultados confiáveis e gráficos úteis para fenômenos que impactam diretamente a operação e a integração de fontes renováveis.

Palavras-chaves: *Proteção; ATP/ATPDraw; Curto-circuito; Sistema fotovoltaico flutuante.*

I. INTRODUÇÃO

O crescente uso de fontes renováveis, como sistemas fotovoltaicos flutuantes (FVF), impõe desafios à proteção e operação de sistemas elétricos de potência. A interação entre geração convencional e renovável pode impactar o sistema elétrico e a qualidade da energia. Nesse cenário, ferramentas computacionais como o ATP/ATPDraw (Alternative Transient Program) tornam-se essenciais para modelagem e análise de eventos críticos, auxiliando na compreensão dos fenômenos que influenciam o desempenho do sistema elétrico antes que eles de fato ocorram (CONCEIÇÃO, 2012; IZAGUIRRE, 2016).

O software ATP/ATPDraw é amplamente utilizado para simulações de transitórios eletromagnéticos, destaca-se por sua capacidade de modelar circuitos detalhados e sua

interface gráfica, que simplifica a configuração de estudos específicos, como ajustes de proteção e análise de faltas. Estudos reforçam sua aplicação em diversos contextos, como proteção de alimentadores e modelagem de relés digitais, permitindo análises dinâmicas precisas (MIGUEL, 2011).

A análise da qualidade da energia é igualmente essencial nesse cenário de geração híbrida. Fenômenos como afundamentos de tensão e flutuações de corrente afetam a estabilidade do fornecimento elétrico. Pesquisas destacam a importância do software ATP/ATPDraw para identificar e auxiliar na redução desses impactos (VIEIRA, 2015; RODRIGUES, 2015).

Neste estudo, avaliou-se a viabilidade técnica do ATP/ATPDraw na análise de qualidade e proteção de sistemas integrando geradores síncronos a FVF. Utilizando a UHE como estudo de caso, analisou-se a correlação entre resultados de simulações e dados preditivos das concessionárias, validando o software para reproduzir fenômenos que impactam o fornecimento e a qualidade da energia. A inserção de FVF requer análise detalhada, considerando a intermitência e os transitórios dinâmicos que influenciam a operação do sistema (VIEIRA, 2015).

II. METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizado o estudo dos principais conceitos que embasam o tema em questão. Dentre eles, o estudo de curto-circuito e das funções de proteção encontrados na literatura, bem como as normas que regem o estudo da qualidade de energia. Também foi realizada a revisão bibliográfica sobre Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes (FVF) a fim de realizar a modelagem no software ATP/ATPDraw da Usina FVF.

Logo em seguida, foram realizadas pesquisas sobre o software ATP/ATPDraw e suas diversas funcionalidades para o presente estudo, como por exemplo a linguagem MODELS. Sendo esta, um diferencial do software, permitindo a implementação de módulos personalizados que facilitam as tarefas de simulação, principalmente a criação e edição dos modelos de entrada e representação de componentes não disponíveis no ATP/ATPDraw.

Por fim, após a análise do circuito proposto pelo estudo de caso, foi realizada sua modelagem no software escolhido, sendo assim possível simular casos variados de anomalias

inerentes ao sistema, como também gerar gráficos, realizar análises de qualidade e a implementação dos sistemas de proteção de forma eficaz.

III. CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO DE CASO

A Fig. 1, apresenta o diagrama unifilar que foi usado como estudo de caso para o início das modelagens propostas, a potência gerada pela UHE e pela UFV são de 237 MVA e 1,5 MWp respectivamente.

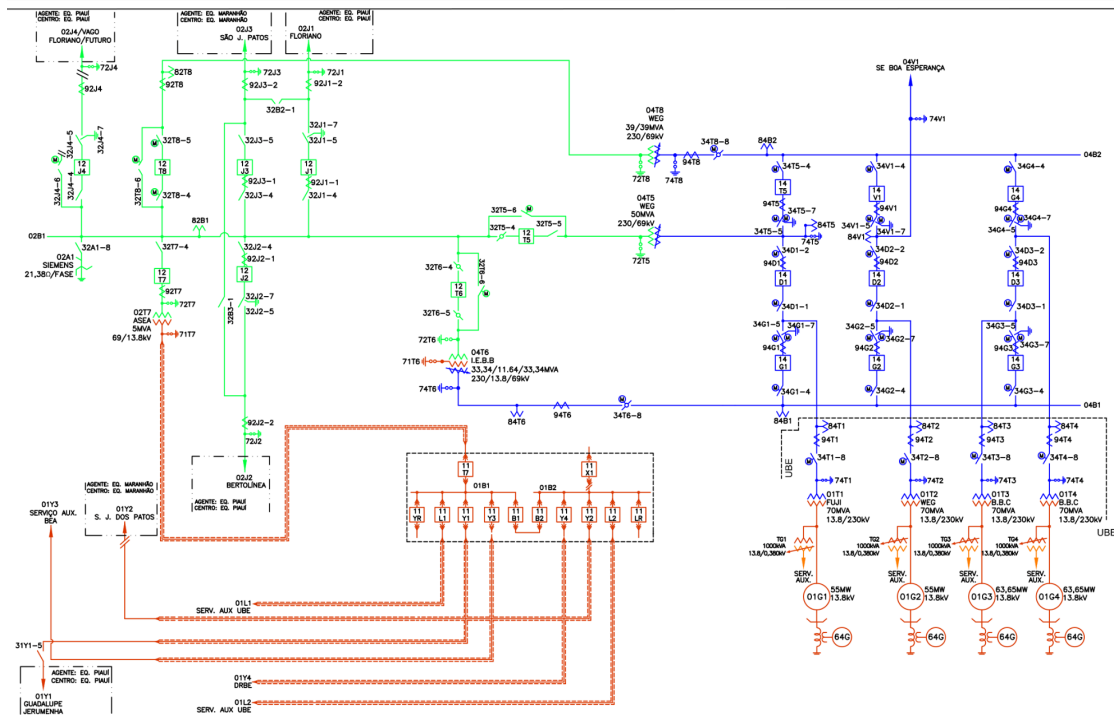


Fig. 1 Diagrama Unifilar de uma UHE

IV. ESTUDO DO CIRCUITO PROPOSTO

A qualidade de energia em sistemas elétricos de potência é definida pelo grau de conformidade do fornecimento elétrico aos padrões de confiabilidade e desempenho, sendo fundamental para a operação eficiente de equipamentos e sistemas. Problemas como afundamentos de tensão, flutuações harmônicas e interrupções afetam diretamente a estabilidade e a eficiência do SEP, especialmente com o aumento da integração de fontes renováveis. Nesse contexto, a norma IEEE 1159 desempenha um importante papel, estabelecendo diretrizes técnicas para monitoramento, análise e classificação de eventos de qualidade de energia.

A IEEE 1159 é amplamente reconhecida por suas definições rigorosas e categorização de fenômenos transitórios e sustentados, incluindo variações de tensão, surtos e harmônicas. Sua aplicação assegura uniformidade na identificação e tratamento de problemas, auxiliando no desenvolvimento de estratégias de mitigação e na conformidade com práticas regulatórias. A norma classifica as variações temporárias de curta duração (VTCD) com base em amplitude e duração, essenciais para diagnóstico preciso e mitigação de falhas. Assim, ao final do estudo de caso, será realizada a classificação de acordo com essa norma para cada um dos casos de falhas (curto-circuito).

O estudo de curto-circuito em sistemas elétricos de potência (SEP) é crucial para garantir a proteção e a estabilidade do sistema. A análise visa entender os impactos dos curtos-circuitos nas condições operacionais, permitindo a definição adequada de dispositivos de proteção. Este trabalho foca em simulações e estratégias para mitigar os efeitos desses eventos.

Abaixo serão apresentados os cálculos essenciais para estudo de curto-circuito:

A. Dimensionamento da proteção em média tensão

Conforme anunciado pela NBR 14039, a proteção em subestações com potência acima de 300 kW devem ser contempladas com disjuntor de média tensão acionado por meio de relés secundários com função 50 e 51 para fase e neutro. Objetivando a proteção da minigeração, nos ateremos, para fins de simplificação, ao transformador associado ao barramento de conexão entre a minigeração e a concessionária. Uma vez que a EQUATORIAL PIAUÍ é a atual concessionária, adotaremos uma metodologia já aceita por essa empresa em conformidade com os padrões estabelecidos em normas brasileiras.

1) *Cálculo da corrente nominal do transformador de força:*

Durante esta fase inicial do estudo de proteção, devemos julgar criteriosamente qual o referencial de corrente nominal deve ser observado. Se a demanda da usina ou a potência máxima do transformador particular. Como o transformador é, em última análise, o primeiro elemento a ser protegido (do ponto de vista do sistema elétrico de potência), nesse estudo, a proteção levará em conta a preservação da vida útil do transformador, e, em seguida, dos demais equipamentos por ele abrigados.

Assim, temos que:

$$I_{n\ trafo} = \frac{S_{trafo}}{\sqrt{3} \times V_{nom.}} \quad (1)$$

Em que $I_{n\ trafo}$ é a corrente nominal do transformador e S_{trafo} é a potência aparente nominal do transformador em kVA e $V_{nom.}$ a tensão primária nominal entre fases, em kV.

2) *Cálculo da corrente transitória de magnetização:*

A corrente de magnetização é aquela necessária para produzir o fluxo no núcleo do transformador (CHAPMAN, 2013). Durante esse período, a proteção não deve atuar sob pena de impedir o funcionamento normal do SEP. Dentro dessa perspectiva, adotaremos o cálculo da corrente de magnetização para um único transformador, com um fator multiplicativo igual a 8, concernente ao transformador a óleo de acordo com a equação:

$$I_{magn.} = 8 \times I_{N\ TRAFO} \quad (2)$$

Em que $I_{magn.}$ é a corrente transitória de magnetização (corrente de inrush), enquanto que $I_{N\ TRAFO}$ é a corrente nominal do transformador.

3) *Cálculo do ponto ansi e nansi:*

O ponto ANSI é definido como o máximo valor de corrente que um transformador pode suportar durante um período, em geral, de 2s. Para o cálculo do ponto ANSI, deve-se levar em consideração a impedância percentual do equipamento (que é um dado de placa). No nosso estudo, utilizaremos os dados de placa do transformador WEG de 2000kVA.

O modelo matemático seguido para esta etapa é dado pela NBR 5356:

$$I_{ANSI} = \frac{I_{N\ TRAFO} \times 100}{Z\%} \quad (3)$$

Onde I_{ANSI} é a corrente máxima do ponto ANSI e $Z\%$ é a impedância percentual do transformador.

Entretanto, deve-se também atentar para a corrente máxima no neutro do transformador NANSI. Analogamente, utilizamos para a corrente NANSI a equação:

$$I_{NANSI} = \frac{I_{ANSI}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Em que I_{ANSI} é a corrente máxima no ponto NANSI do equipamento.

4) *Dimensionamento das funções 51F e 51N:*

Para o ajuste da unidade temporizada, é considerada uma sobrecarga tolerável de 5% acima da corrente nominal do transformador conforme. Já para o neutro, utilizamos como referência o cálculo anterior para a fase multiplicando por um fator de 0,33.

5) *Dimensionamento das funções 50F e 50N:*

Para o cálculo de ajuste para a função de sobrecorrente para a fase, é necessário ter em vista a corrente transitória de magnetização do transformador. Como já mencionado anteriormente, a função instantânea do relé não deve operar, em nenhuma hipótese, durante a magnetização. No estudo apresentado, optou-se por uma proteção mais sensível com um ajuste da unidade instantânea em 5% superior à corrente transitória de magnetização do transformador (inrush).

$$I_{50F} = 1,05 \times I_{MAGNETIZAÇÃO} \quad (5)$$

Em que I_{50F} é a sobrecorrente que sensibiliza a proteção instantânea do relé para a fase, já $I_{MAGNETIZAÇÃO}$ é a corrente transitória de magnetização do transformador.

Equilibrando o critério de sensibilidade, adotou-se um critério em que para o ajuste da corrente instantânea de neutro deveremos multiplicar a análoga para a fase multiplicada por um fator de 0,33.

6) *Dial de tempo:*

Ainda como consequência do que foi mencionado 4.1.2 (corrente de inrush), o relé deve tolerar um tempo para que o ponto de atuação instantânea não seja concomitante à magnetização do transformador. De modo que:

$$t_{magn.} + 0,05s \leq t_{atuação} \leq t_{magn.} + 0,1s \quad (6)$$

V. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A Fig. 2 apresenta a modelagem realizada com base no diagrama unifilar da Usina Hidrelétrica apresentado, a seguir destacamos os principais componentes e interligações da modelagem comparando-os com o circuito proposto, para o melhor entendimento da modelagem. Através da legenda dos níveis de tensão, é possível comparar ambos os diagramas com mais facilidade, identificando os pontos de alta, média e baixa tensão.

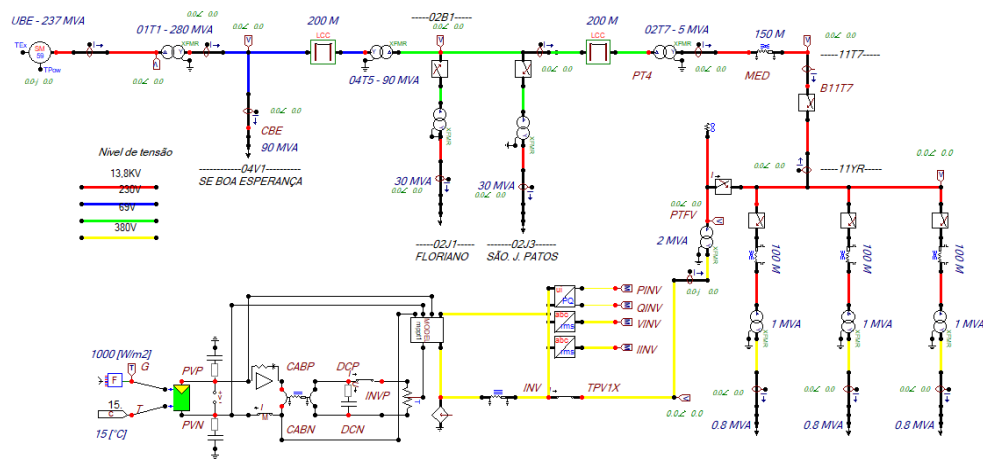


Fig. 2 Modelagem do Sistema Fotovoltaico Flutuante (FVF) na Usina Hidrelétrica (UHE) usando o software Atp/AtpDraw.

A. Os Geradores Síncronos

A seguir, as Fig. 3 e Fig. 4 apresentam o diagrama modelado e o circuito proposto pelo estudo de caso evidenciando os geradores síncronos.

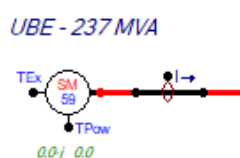


Fig. 3 Recorte do circuito modelado evidenciando gerador síncrono equivalente

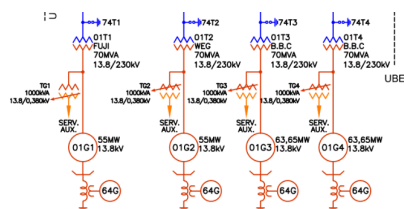


Fig. 4 Recorte do diagrama unifilar evidenciando os geradores individuais da Usina.

B. A Geração Fotovoltaica Flutuante

Para a modelagem da Usina Fotovoltaica Flutuante foi utilizado uma adaptação do Caso 43 disponível em ATPDraw.net. A partir daí foi conectado ao barramento 11YR, a Fig. 5 evidencia como essa modelagem foi realizada e a conexão no barramento e a Fig. 6 mostra o barramento 11YR dentro do diagrama unifilar onde seria inserida a Usina.

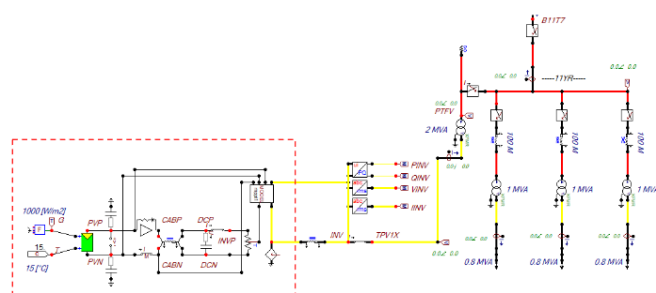


Fig. 5 Recorte do circuito modelado evidenciando a FVF e seu barramento de conexão

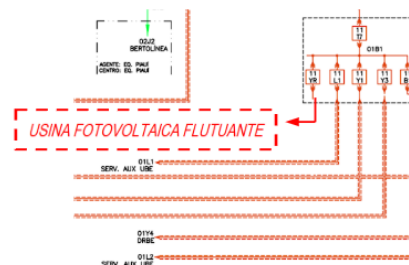


Fig. 6 Recorte do diagrama unifilar evidenciando o barramento 11YR que seria inserida a FVF

C. As Cargas

A forma como as cargas serão dispostas está representada a seguir, na Fig 7.

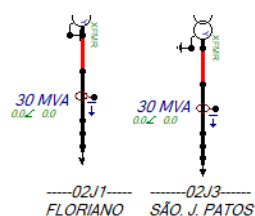


Fig. 7 Recorte do circuito modelado evidenciando as cargas modeladas

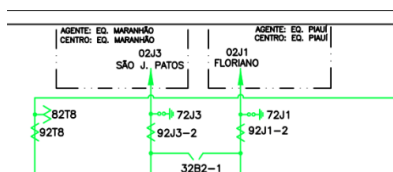


Fig. 8 Recorte do diagrama unifilar evidenciando as cargas do diagrama

D. Local escolhido para inserir os curtos

A fig. 9 apresenta onde foi inserida a falta dentro do sistema e como essa falta foi modelada dentro do ambiente de simulação.

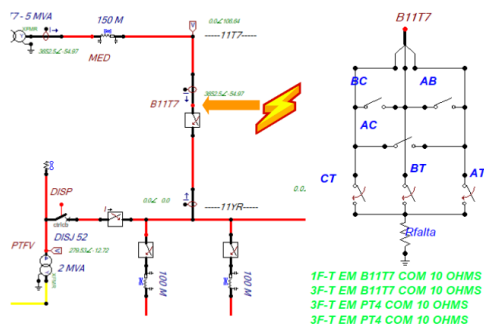


Fig. 9 Recorte do circuito modelado evidenciando o nó B11T7 onde foi inserido o curto-circuito

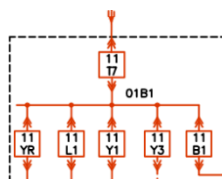


Fig. 10 Recorte do diagrama unifilar evidenciando o barramento em que foi inserido o curto 11T7

VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o software ATP/ATPDraw, foi possível, por meio de sucessivas simulações, identificar os seguintes valores de corrente de curto-circuito no barramento 11T7:

TABELA 1 - VALORES DAS CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Tipos de Curtos-Circuitos	Valor de Corrente (A)
Trifásico	441,4
Bifásico-Terra	708,56
Monofásico	495,67

Gráficos obtidos após a análise de tensão e corrente em situações diversas do sistema, sendo elas: análise em condições normais, análise em condições de falta monofásica, análise em condições de falta bifásico-terra e análise em condições de falta trifásica.

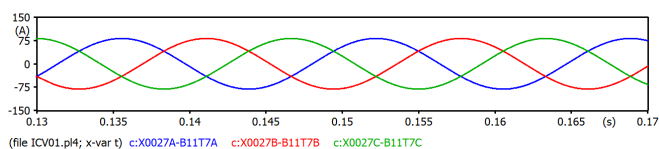


Fig. 11 Gráfico da corrente em condições normais

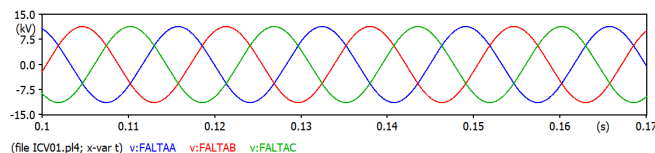


Fig. 12 Gráfico da tensão em condições normais

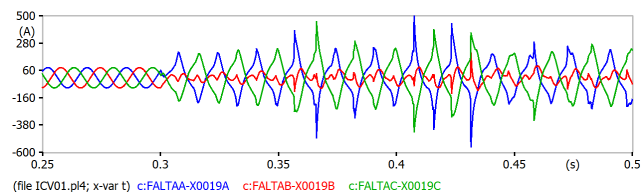


Fig. 13 Gráfico da corrente em condições de falta monofásica (Falta na fase A)

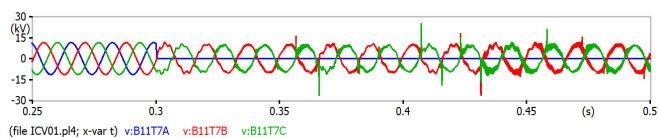


Fig. 14 Gráfico da tensão em condições de falta monofásica (Falta na fase A)

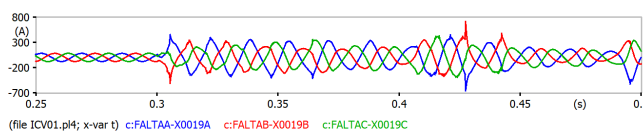


Fig. 15 Gráfico da corrente em condições de falta bifásica-terra (Falta nas fases AB)

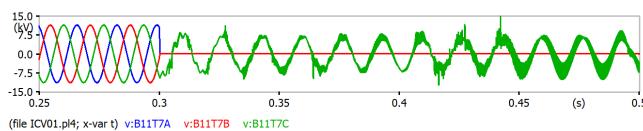


Fig. 16 Gráfico da tensão em condições de falta bifásica-terra (Falta nas fases AB)

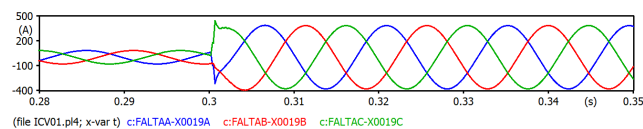


Fig. 17 Gráfico da corrente em condições de falta trifásica (Falta nas fases ABC)

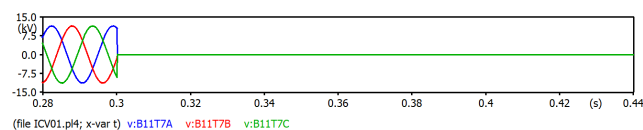


Fig. 18 Gráfico da tensão em condições de falta trifásica (Falta nas fases ABC)

Logo, podemos chegar ao valor da corrente de partida temporizada de fase que é 87,86A e, para o neutro, 28,99A.

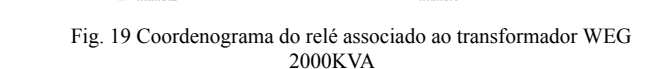
1,000,000,0

Curva de Atuação (NEUTRO), 28,99

Curva de Atuação (FASE), 87,86

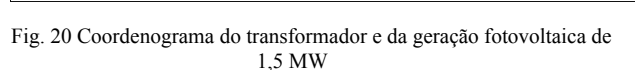
icc30: 441

icc10: 496



Também de maneira semelhante ao que já foi feito, para a proteção instantânea de fase do relé associado à minigeração, obteve-se o valor de 94,14A. Já relacionado ao

Para a função 46 (desbalanço de corrente) a maioria das concessionárias aceitam o valor de 20% da corrente nominal de geração. Como consequência, o valor registrado neste foi de 12,55A. O tempo de atuação dessa proteção deve ser entre 1 e 3 segundos. Consoante a outros casos neste estudo, optou-se pela menor tolerância, isto é, maior sensibilidade. Um segundo estágio (de 30%), deve ser ainda considerado, entretanto, com atuação instantânea. Neste caso, o valor é de 19,77A. Desse modo, podemos determinar um coordenograma mais abrangente (Fig. 20) envolvendo a proteção da geração fotovoltaica e a proteção do transformador.



A aplicação do ATP/ATPDraw mostrou-se robusta ao integrar um sistema FVF de 1,5 MW à uma UHE, demonstrando sua eficácia em estudos avançados de proteção e integração de fontes renováveis, reforçando sua relevância para a confiabilidade de sistemas elétricos. Demonstra-se, aqui também, a qualidade dos dados gráficos e numéricos do programa para um estudo de proteção assertivo.

Conforme se observou, os distúrbios na rede causam picos extremamente danosos e o uso do software como ferramenta auxiliar pode trazer inúmeros benefícios para o estudo de proteção de sistemas elétricos de potência. Através das modelagens realizadas, pôde-se analisar como o sistema se comportaria em seu funcionamento normal e caso

estivesse sob quaisquer situações adversas de curto-circuito. Tendo ciência desse comportamento, é possível realizar e parametrizar as funções de proteção adequadas para cada caso específico de curto-circuito e fazer um estudo aprofundado do sistema elétrico como um todo, a fim de tornar o sistema integrado nacional ainda mais eficiente, cumprindo seu propósito de ser confiável e contínuo.

Este estudo contribui para a sociedade ao otimizar a eficiência, segurança e sustentabilidade no setor energético por meio da integração de sistemas fotovoltaicos flutuantes com usinas hidrelétricas. Essa abordagem combina fontes renováveis, reduz emissões de gases de efeito estufa e utiliza de forma otimizada áreas já ocupadas, minimizando impactos ambientais. O estudo detalhado de proteção e ajustes, realizado com o software ATP/ATPDraw, assegura maior confiabilidade e resiliência operacional, reduzindo falhas, interrupções e custos associados. Além disso, fomenta o desenvolvimento tecnológico, capacita profissionais e contribui para a evolução técnica e a segurança energética, alinhando-se às demandas de sistemas híbridos sustentáveis e de alta eficiência.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão à Universidade Federal do Piauí (UFPI) pelo incentivo e suporte institucional à realização desta pesquisa. Reconhecemos, ainda, o fundamental apoio técnico e acadêmico prestado pelo Grupo de Sistemas de Energia Elétrica (GSEE) da UFPI, que contribuiu significativamente para o desenvolvimento e execução deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356: Transformador de potência. Rio de Janeiro, 2015.
- [2] Belmino, Lucas Martins. Modelagem e simulação da proteção diferencial para transformadores de potência no software ATP. 2017.
- [3] Conceição, E. N. da. Modelagem e Simulação da Proteção de Alimentadores de Distribuição Utilizando Softwares Tipo EMT. Universidade de Brasília, 2012.
- [4] Costa, Max Alexandre Dantas da. Estudo da proteção de sobrecorrente de uma subestação de 500 kVA. 2018.
- [5] De Barros, Benjamim Ferreira; Gedra, Ricardo Luis; Borelli, Reinaldo. Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica. Saraiva Educação SA, 2014.
- [6] de Lima, Rodrigo César Dantas et al. Análise de ferramentas para o ensino de Proteção de Sistemas Elétricos. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 1, n. 1, 2020.
- [7] Equatorial Energia NT.020.EQTL.Normas e Padrões – Conexão de Micro e Minigeração Distribuída no Ponto de Conexão;
- [8] Freitas, Ianna Batista de Oliveira Nogueira et al. Modelagem e análise dos níveis de tensão na rede de distribuição após a inserção da usina fotovoltaica usando o software Atp/AtpDraw. In: 2023 XV Brazilian Conference on Quality of Power (CBQEE). IEEE, 2023. p. 1-7.
- [9] Gieger, S. Proteção de Sistemas de Distribuição. Editora Sagra. 1ª edição, 1988.
- [10] Izaguirre, J. P. Modelagem de um Relé de Proteção Direcional de Linhas de Transmissão no ATP. Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- [11] Mamede Filho, João - Proteção de sistemas elétricos de potência /João Mamede Filho, Daniel Ribeiro Mamede. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [12] Medeiros Júnior, José Francismar de. Estudo de curto-circuito para evitar a superação de equipamentos em subestações. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [13] Miguel, P. M. Introdução à Simulação de Relés de Proteção Usando a Linguagem Models do ATP. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2011.
- [14] Moreno, Hilton et al. NBR 14039: instalações elétricas de média tensão. Guia do setor elétrico de normas brasileiras NBR 5410-NBR 14039-NBR 5419-NR 10, 2011.