

Desempenho de Sistemas Elétricos

19 a 22 de outubro de 2025

RELATÓRIO ESPECIAL PRÉVIO

Ricardo Penido Dutt Ross

Ricardo Penido Dutt Ross, Mateus Duarte Teixeira, SILVERIO VISACRO FILHO

1.0 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os ITs submetidos no GDS contém variadas linhas de investigação. Os temas classificados como principais: Modelos e Ferramentas para análise do desempenho do sistema, Qualidade de Energia Elétrica e Descargas Atmosféricas, Sobreensões transitórias e Coordenação de Isolamento eletromagnéticos estão presentes.

Com relação aos subtemas não apareceram ITs que tratassem de Compatibilidade Eletromagnética, redes elétricas inteligentes. Quanto aos demais subtemas não foram contemplados ITs que tratem de: redes elétricas inteligentes e carregamento de veículo elétricos.

A seguir lista-se alguns tópicos relacionados aos temas principais:

Qualidade da energia elétrica

Impactos de inversores de frequência em eventos de VTCD em sistemas industriais.

Propostas de novos processos e diagnósticos de qualidade da energia.

Estudos de operação e interação de conversores em aplicações com outros componentes do sistema

Campanhas de medição de correntes com foco em harmônicos em geração eólica.

Técnicas de superposição de correntes para reduzir efeitos de tensões harmônicas preexistentes.

Análise de super-harmônicos em geração solar e eólica.

Monitoramento online de indicadores de qualidade em parques eólicos e solares.

Impactos de distorção harmônica em plantas de hidrogênio verde e filtros.

Influência dos transformadores de instrumento na medição de tensões harmônicas

Modelos e Ferramentas para análise do desempenho do sistema

Co-simulação digital em tempo real para inserção de fontes com inversores.

Estimação de parâmetros de modelos dinâmicos de parques eólicos.

Mitigação de instabilidade em equivalentes de 60 Hz com algoritmos de passividade.

Avaliação de modelos dinâmicos de geração eólica/fotovoltaica em colapso de tensão.

Implementação de modelo de reator de saturação natural em fluxo de potência.

Modelagem detalhada de transformadores no ATPDraw.

Uso de equivalentes de rede dependentes da frequência em estudos transitórios.

Investigação de controles em gerações grid-following e grid-forming sob curtos-circuitos.

Descargas Atmosféricas, Sobretensões Transitórias / Temporárias e Coordenação de Isolamento

Uso de modelos digitais de cabos e linhas para simulação de surtos.

Integração com modelagem do efeito do solo, já que a condutividade e a permissividade do terreno afetam a propagação de ondas de surto.

Aplicação de para-raios de óxido de zinco (ZnO), com características não lineares, para maior eficiência na proteção.

Estudos probabilísticos e estatísticos para definir níveis de proteção em função do risco aceitável.

Interação entre Equipamentos e sistemas elétricos

Modelos Dinâmicos de Parques Eólicos causando colapso de Tensão no Sistema do Oeste da Bahia

Reatores a núcleo de ar para limitação de correntes de curto-circuito em subestações.

Efeitos benéficos/adversos de capacitores em série no suporte reativo de partida de motores.

Análise de desbalanço em bancos de transformadores monofásicos operando em paralelo.

Estudos de cabos subterrâneos para análise de transitórios eletromagnéticos (efeito do solo).

2.0 - Classificação dos Informes Técnicos

Os ITs submetidos no GDS contém variadas linhas de investigação. Os temas classificados como principais: Modelos e Ferramentas para análise do desempenho do sistema, Qualidade de Energia Elétrica e Descargas Atmosféricas, Sobretensões transitórias e Coordenação de Isolamento eletromagnéticos estão presentes.

Com relação aos subtemas não apareceram ITs que tratassem de Compatibilidade Eletromagnética, redes elétricas inteligentes. Quanto aos demais subtemas não foram contemplados ITs que tratem de: redes elétricas inteligentes e carregamento de veículo elétricos.

A seguir lista-se alguns tópicos relacionados aos temas principais:

Qualidade da energia elétrica

Impactos de inversores de frequência em eventos de VTCD em sistemas industriais.

Propostas de novos processos e diagnósticos de qualidade da energia.

Estudos de operação e interação de conversores em aplicações com outros componentes do sistema

Campanhas de medição de correntes com foco em harmônicos em geração eólica.

Técnicas de superposição de correntes para reduzir efeitos de tensões harmônicas preexistentes.

Análise de super-harmônicos em geração solar e eólica.

Monitoramento online de indicadores de qualidade em parques eólicos e solares.

Impactos de distorção harmônica em plantas de hidrogênio verde e filtros.

Influência dos transformadores de instrumento na medição de tensões harmônicas

Modelos e Ferramentas para análise do desempenho do sistema

Co-simulação digital em tempo real para inserção de fontes com inversores.

Estimação de parâmetros de modelos dinâmicos de parques eólicos.

Mitigação de instabilidade em equivalentes de 60 Hz com algoritmos de passividade.

Avaliação de modelos dinâmicos de geração eólica/fotovoltaica em colapso de tensão.

Implementação de modelo de reator de saturação natural em fluxo de potência.

Modelagem detalhada de transformadores no ATPDraw.

Uso de equivalentes de rede dependentes da frequência em estudos transitórios.

Investigação de controles em gerações grid-following e grid-forming sob curtos-circuitos.

Descargas Atmosféricas, Sobretensões Transitórias / Temporárias e Coordenação de Isolamento

Uso de modelos digitais de cabos e linhas para simulação de surtos.

Integração com modelagem do efeito do solo, já que a condutividade e a permissividade do terreno afetam a propagação de ondas de surto.

Aplicação de para-raios de óxido de zinco (ZnO), com características não lineares, para maior eficiência na proteção.

Estudos probabilísticos e estatísticos para definir níveis de proteção em função do risco aceitável.

Interação entre Equipamentos e sistemas elétricos

Modelos Dinâmicos de Parques Eólicos causando colapso de Tensão no Sistema do Oeste da Bahia

Reatores a núcleo de ar para limitação de correntes de curto-circuito em subestações.

Efeitos benéficos/adversos de capacitores em série no suporte reativo de partida de motores.

Análise de desbalanço em bancos de transformadores monofásicos operando em paralelo.

Estudos de cabos subterrâneos para análise de transitórios eletromagnéticos (efeito do solo).

2.1 - Qualidade da energia elétrica - 9

2.2 - Modelos e ferramentas para análise de desempenho de sistemas de potência - 13

2.3 - Descargas atmosféricas, sobretensões transitórias e coordenação de isolamento - 13

- Análise de Transitórios Eletromagnéticos na Integração dos Transformadores dos Compensadores Síncronos ± 300 Mvar ao Terminal Inversor do Bipolo HVDC ± 800 kV Xingu-Estreito

- Descrição Sobre os Efeitos Transitórios Durante Manobras de Disjuntores na Operação de Acionamento de Motores
- ESTUDO DE CASO DO FENÔMENO DA AUTOEXCITAÇÃO NAS UNIDADES GERADORES DA UHE COLÍDER - PROBLEMAS E SOLUÇÕES
- Desafios e Soluções em Transitórios Eletromagnéticos para Mitigar Riscos na Energização do Transformador Conversor do Back-to back Operando em Modo Stand-alone com a UHE Jirau
- Diretrizes para a seleção de modelos de cabos subterrâneos para a análise de transitórios eletromagnéticos com ênfase na representação do efeito do solo
- Análise de sobretensões sustentadas em sistemas de transmissão de energia e implicações no dimensionamento de para-raios.
- Análise de Ocorrências de Falhas Cruzadas e Posterior Atuação de Limitadores de Curto-Circuito (LCC) - Comparação entre Resultados de Medições e Simulações em Sistemas Elétricos Industriais
- Desempenho frente a descargas atmosféricas de linhas de transmissão de extra alta tensão circuito duplo considerando a influência do mecanismo de múltiplo backflashover
- Uma discussão relativa ao desempenho de linhas de transmissão HVDC frente a descargas atmosféricas no cenário brasileiro: Avaliação de desempenho e práticas para redução dos índices de desligamentos
- ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES PELA TAXA DE CRESCIMENTO DA TRT EM FALTAS LIMITADAS POR TRANSFORMADOR
- Evolução dos Critérios de Dimensionamento de Para-Raios de Linha: Da Classe de Energia ao Desempenho Específico
- Análise de reignições em disjuntores SF6 durante manobras de banco de reatores em subestações de alta e extra alta tensão
- Avanços na Modelagem Eletromagnética de Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (VFTOs) em Buchas Capacitivas
- IMPLEMENTAÇÃO E TESTE DO MODELO DE REATOR DE SATURAÇÃO NATURAL NO PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA
- Co-Simulação Digital em Escala de Tempo Real para Estudos de Inserção de Fontes Baseadas em Inversores em Sistemas de Potência de Grande Escala
- Estudos envolvidos na definição de reator a núcleo de ar para a limitação de correntes de curto-circuito em subestações.
- Aplicação de equivalentes de rede dependentes da frequência para redução de modelos em estudos elétricos transitórios da transmissão
- Validação de Parâmetros de Geradores Síncronos com Sistemas de Excitação Brushless Usando Dados de PMU e Simulação Dinâmica Híbrida
- Mitigação de Instabilidade em Equivalentes de 60 Hz Utilizando Algoritmo de Garantia de Passividade
- Análise do desempenho dos modelos dinâmicos de geração eólica e fotovoltaica: estudo de caso sobre colapso de tensão no oeste Bahia
- Estimação de Parâmetros de Modelos Dinâmicos Genéricos para Representação de Parques Eólicos do Subsistema Nordeste
- Análise de desbalanço de impedâncias em bancos de transformadores monofásicos operando em paralelo devido a condição de troca de uma das fases – um estudo de caso.
- Modelagem de Transformadores no ATPDraw: Precisão e Complexidade
- Uma abordagem sobre os Efeitos Adversos e Benéficos de Capacitores em Série como Suporte de Potência Reativa na Partida de Motores

- Desempenho dinâmico de redes elétricas com alta concentração de IBRs: Análise das regiões do Seridó Paraibano e estados do Rio Grande do Norte e Ceará.
- Investigação sobre a Influência de Aspectos de Controle na Resposta Transitória de Gerações Grid-Following e Grid-Forming Frente a Cenários de Curtos-Circuitos Próximos
- Impactos, propagação e soluções para mitigação de desligamentos de inversores de frequência durante eventos de VTCD em sistemas elétricos industriais com cogeração
- Proposta de Novo Processo de Qualidade de Energia Elétrica com Foco no Estudo de Diagnóstico
- Análise do Comportamento de Super-Harmônicos em Sistemas de Geração de Energia Fotovoltaica e Eólica
- Avaliação de DHI e DHT em Plantas de H2V de grande porte e seus impactos no dimensionamento de filtros harmônicos.
- Aplicação do método da superposição das correntes nos terminais de aerogeradores para a redução da influência das tensões harmônicas preexistentes nos extratos de corrente
- Transformadores de Instrumento Convencionais em Cenários de Distorção Harmônica: Análise de Não-Linearidades e Impacto na Classe de Exatidão
- CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DE CONVERSORES DE POTÊNCIA EM PARALELO COM BASE EM MEDIÇÕES E ESTUDOS DE CASOS EM APLICAÇÕES COM AEROGERADORES E ACIONAMENTOS DE MOTORES
- ASPECTOS PRÁTICOS ASSOCIADOS À REALIZAÇÃO DE CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE CORRENTES: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE HARMÔNICOS DE SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA
- Monitoramento online de Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica de parques eólicos e solares fotovoltaicos baseado no Sistema de Medição Sincronizada de Fasores do SIN

3.0 - Relatório sobre os Informes Técnicos

Título - Impactos, propagação e soluções para mitigação de desligamentos de inversores de frequência durante eventos de VTCD em sistemas elétricos industriais com cogeração

Entidade(s) - GSI ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Autor(es) - Gustavo Rodrigues dos Santos, NELSON CLODOALDO DE JESUS, Ahmad Muhammad Laurentino, Adriano Garufe Nogueira, Thiago Pereira Franco, Jesus Daniel de Oliveira

Resumo

Este trabalho analisa variações de tensão de curta duração em três plantas industriais distintas de produção de papel e celulose, considerando a ocorrência no ponto de conexão em alta tensão entre a rede básica e o sistema elétrico das unidades. Avalia-se a propagação dessas perturbações e seus impactos nos inversores de frequência utilizados em áreas sensíveis do processo. Adicionalmente, são propostas soluções para mitigar desligamentos indesejados.

A investigação foca em a fundamentos de tensão e sua influência sobre inversores em processos contínuos, comparando eventos registrados com curvas de sensibilidade dos fabricantes e limites normativos do PRODIST e dos Procedimentos de Rede do ONS. Foram analisadas medições de qualidade de energia no ponto de

acoplamento comum, nos níveis de tensão de 230 e 440 kV, caracterizando eventos de VTCD conforme magnitude e duração e correlacionando-os aos impactos diretos no setor produtivo.

Os resultados indicam que, na ausência de um sistema de desacoplamento entre a geração industrial e a rede básica do Sistema Interligado Nacional, VTCDs podem levar ao desligamento de inversores em certas áreas de processo, ocasionando o desligamento completo da planta e interrupção total da produção. Mesmo dentro dos limites regulatórios, os impactos analisados foram significativos, demonstrando a necessidade de analisar a propagação dessas perturbações. Como solução, propõe-se o ilhamento do sistema interno em relação ao Sistema Interligado Nacional, ajustando a curva de suportabilidade das unidades geradoras a sub tensões transitórias estabelecida pelo ONS.

Perguntas e Respostas

A metodologia proposta na condição 2 ainda considera as contingências até a terceira vizinhança. Os estudos elétricos de transitórios voltados a novos empreendimentos e a superação de equipamentos considera somente até a primeira. Não estaria muito restritivo até a terceira considerando que transitórios são eventos mais severos que as distorções harmônicas?

Como os autores avaliam o impacto econômico e técnico da adoção desse novo procedimento para os agentes de geração e para o sistema elétrico?

Os autores não consideram realizar estudos práticos utilizando dados de desligamentos de LTs e medições de DHT em regiões de alta concentração de parques eólicos e solares para validarem os estudos computacionais? Os agentes possuem estas informações.

O artigo aponta que, mesmo com VTCDs dentro dos limites normativos do PRODIST e dos Procedimentos de Rede do ONS, os impactos foram significativos nos processos industriais. Os autores consideram que os atuais limites normativos são insuficientes para instalações industriais sensíveis? Há alguma recomendação para revisão desses critérios regulatórios?

De fato, o artigo demonstra que mesmo quando os eventos de VTCD permanecem dentro dos limites, ainda assim foram observados impactos relevantes nos processos industriais, conforme a análise dos resultados de monitoramento. No entanto, isso não significa que os limites normativos atuais sejam insuficientes em termos do desempenho sistêmico.

Por outro lado, conforme mencionado no item 4.2, com uma proposta específica para os casos envolvendo processos contínuos de produção de papel e celulose (Vide Figura 11), a proposta de alteração das curvas de referência do ONS e dos itens relacionados ao fator de impacto (FI) do PRODIST não representam adequadamente a sensibilidade desses processos industriais, cuja alteração poderia mitigar diversas ocorrências de desligamentos intempestivos. Entendemos como um ponto importante a inclusão de casos reais que demonstrem as áreas de

vulnerabilidade de cargas sensíveis frente as VTCDs.

De qualquer modo, os prejuízos operacionais estão mais relacionados a deficiências sistêmicas, especialmente quanto aos equipamentos utilizados, do que propriamente aos limites definidos pelo ONS.

Hoje, existem recursos técnicos disponíveis para assegurar a operação dos inversores diante de distúrbios na rede elétrica, como a utilização de UPS, proteções contra subtensões e sistemas de controle de tensão durante afundamentos de tensão (ride-through). A adoção desses recursos depende do projeto básico do sistema e de sua filosofia de operação. Em projetos mais antigos, como os analisados no estudo, implementar essas soluções pode ser mais difícil.

A modificação da curva de suportabilidade prevista nos Procedimentos de Rede deve ser considerada apenas em caráter excepcional, após esgotadas todas as alternativas técnicas internas para evitar desligamentos. Essa medida, a ser avaliada pelo ONS, busca mitigar os impactos das VTCDs tanto no sistema interno quanto no ponto de conexão das cargas, conforme demonstrado nesta análise técnica.

Quais são os desafios técnicos e operacionais associados à proposta de ilhamento do sistema interno industrial em relação ao Sistema Interligado Nacional (SIN)? como ficariam aspectos como estabilidade dinâmica, seletividade na proteção e coordenação durante o ilhamento?

Os principais pontos que merecem atenção durante a condição de ilhamento são a estabilidade dinâmica do sistema, seletividade e coordenação da proteção e a reconexão com o SIN.

- Estabilidade dinâmica: Durante o ilhamento, o sistema industrial passa a operar sem o apoio inercial e de potência do SIN. Isso exige que os turbogeradores da planta mantenham estabilidade de tensão e frequência, mesmo sob distúrbios e variações bruscas de carga, influenciando diretamente o balanço energético da planta e implicando em descartes de carga, caso necessário. Do ponto de vista do SIN, com o desacoplamento dos geradores (que apresentam uma potência considerável), também a inércia do sistema como um todo pode ser afetada.

- Seletividade e coordenação da proteção: O sistema de proteção precisa ser capaz de detectar corretamente quando um evento de VTCD exige o desacoplamento do SIN. Isso envolve ajustar relés de subtensão e temporização com precisão, para que o ilhamento ocorra rapidamente, sem atuações indevidas. Após o ilhamento, devem ser previstas lógicas de proteção para o regime de operação isolado.

- Reconexão segura: Após o evento, a reconexão com o SIN deve ocorrer de forma sincronizada e segura, respeitando critérios de tensão, frequência e fase, o que exige sistemas de sincronismo automáticos e confiáveis.

Ressalta-se que o ilhamento e a reconexão do sistema ao SIN devem ser previstos - com todos os seus casos particulares de operação - nos estudos de estabilidade dinâmica e de seletividade e coordenação da proteção, uma vez que essas

condições operacionais são comuns em sistemas elétricos com cogeração.

Na opinião dos autores, quão importante é conhecer sobre o modelo dos inversores para a proposta de soluções de mitigação de VTCDs para as indústrias?

É importante conhecer detalhadamente as curvas de sensibilidade a afundamentos de tensão dos modelos de inversores utilizados, pois a escolha adequada desses equipamentos pode impactar diretamente no atendimento às exigências normativas do ONS.

Cada fabricante estabelece limites diferentes de suportabilidade para seus inversores. Por isso, em partes mais críticas do sistema, é recomendável optar por modelos com características especiais, que ofereçam maior robustez operacional.

Um outro ponto de destaque é a necessidade de análise da propagação das VTCDs até o ponto de alimentação dos inversores de frequência, possíveis influências dessas variações, seja em termos de módulo ou do ângulo das tensões durante a ocorrência de afundamentos de tensão.

Além disso, a utilização de inversores mais modernos, aumento da capacidade dinâmica do Link DC e a utilização de sistemas de UPSs do tipo rotativas contribui significativamente para aumentar a confiabilidade e a resiliência da operação do sistema elétrico industrial.

Título - Proposta de Novo Processo de Qualidade de Energia Elétrica com Foco no Estudo de Diagnóstico

Entidade(s) - Operador Nacional do Sistema Elétrico, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELETRICO ONS

Autor(es) - Jaqueline Gomes Pereira, RICARDO ANTUNES, Fabiano Andrade de Oliveira

Resumo

Este artigo dá continuidade à avaliação contínua do processo de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) conduzida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A proposta apresentada resulta das contribuições da Consulta Externa CE 0013-2023, realizada pelo ONS no contexto do processo de revisão dos Procedimentos de Rede relacionados à QEE em 2023. O artigo propõe a inclusão de um estudo de diagnóstico de violação de distorção harmônica de tensão, incluindo seus critérios e premissas, como uma alternativa menos conservadora de identificação da necessidade de instalação de filtros harmônicos para empreendimentos de geração eólica e solar fotovoltaica. Enquanto o estudo de dimensionamento de filtros busca garantir que as distorções harmônicas permaneçam dentro dos limites para qualquer condição mais extrema, o estudo de diagnóstico adota uma abordagem mais flexível, considerando cenários menos conservadores. Após a realização do estudo de diagnóstico, caso a instalação de filtros seja recomendada, deverá ser conduzido um estudo de dimensionamento dos filtros, atendendo a todos os requisitos de segurança tradicionais esperados desse tipo de estudo, a fim de assegurar uma operação adequada dos equipamentos

dimensionados. Embora a proposta de inclusão desse estudo esteja sendo avaliada pelo ONS, até que o processo de revisão não seja finalizado, aprovado pela Aneel e publicado no site do ONS, esta proposta ainda não pode ser considerada vigente e alterações ainda podem ser realizadas em todo o processo. Isso reforça o compromisso do ONS em buscar uma melhoria contínua do processo, refletindo sempre as melhores práticas diante dos desafios atuais do setor elétrico.

Perguntas e Respostas

A metodologia proposta na condição 2 ainda considera as contingências até a terceira vizinhança. Os estudos elétricos de transitórios voltados a novos empreendimentos e a superação de equipamentos considera somente até a primeira. Não estaria muito restritivo até a terceira considerando que transitórios são eventos mais severos que as distorções harmônicas?

A condição 2 considera contingências até a 3ª vizinhança somente de equipamentos shunts, ou seja, possíveis bancos de capacitores e reatores presentes nas vizinhanças do PAC (Ponto de Acoplamento Comum) do empreendimento. Nessa condição não foram consideradas contingências dos demais equipamentos, como transformadores e linhas de transmissão.

A metodologia proposta na condição 2 ainda considera as contingências até a terceira vizinhança. Os estudos elétricos de transitórios voltados a novos empreendimentos e a superação de equipamentos considera somente até a primeira. Não estaria muito restritivo até a terceira considerando que transitórios são eventos mais severos que as distorções harmônicas?

Como os autores avaliam o impacto econômico e técnico da adoção desse novo procedimento para os agentes de geração e para o sistema elétrico?

Avaliamos que serão indicados menos filtros para os empreendimentos, sendo um ganho econômico para os empreendimentos de geração. Além disso, pretende-se que o estudo de diagnóstico seja realizado com as correntes certificadas antes da integração do empreendimento (na época do estudo pré-operacional, por exemplo), o que poderia acelerar o processo de integração e ter ganhos econômicos na obtenção da DAPR-D. Tecnicamente, avaliamos que a diminuição do conservadorismo na identificação da necessidade de filtros evita a indicação de filtros que poderiam ser desnecessários e não causar ganhos ao sistema, sendo benéfico também nesse sentido.

Os autores não consideram realizar estudos práticos utilizando dados de desligamentos, faltas em LTs e SEs, além de medições de DHT em regiões de alta concentração de parques eólicos e solares para validarem os estudos computacionais? Os agentes possuem estas informações.

Não foi avaliada essa possibilidade dentro do trabalho desenvolvido, mas podemos considerar essa avaliação em trabalhos futuras implementações no processo de qualidade de energia e/ou no processo de definição dos critérios para o estudo de diagnóstico ou .

Título - Análise do Comportamento de Super-Harmônicos em Sistemas de Geração de Energia Fotovoltaica e Eólica

Entidade(s) - GSI ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Autor(es) - Adriano Garufe Nogueira, NELSON CLODOALDO DE JESUS, Ahmad Muhammad Laurentino, Gustavo Rodrigues dos Santos, Jesus Daniel de Oliveira, Thiago Fernandes Dias, Thales Fernandes Dias

Resumo

A escalada do uso de energias eólicas e fotovoltaicas intensifica a necessidade de compreender os denominados supra-harmônicos (3,0 a 150 kHz), distorções de altas frequências originadas em conversores de potência. Este estudo avalia sua emissão em três sistemas distintos, uma usina fotovoltaica de 150 MWp, um complexo eólico de 115 MWp e uma instalação fotovoltaica residencial de 10 kWp, evidenciando impactos na qualidade da energia elétrica (QEE). Com base nos resultados de medições são abordados os componentes harmônicos até a 255ª ordem, os quais serão referenciados neste trabalho como super-harmônicos. Com analisadores de energia de classe A, é possível avaliar harmônicos até a 255ª ordem (15,36 kHz), constatando elevadas distorções. A propagação dessas distorções, influenciada por condições locais no ponto de acoplamento comum (PAC), como cargas não lineares e impedâncias, revela a insuficiência dos métodos tradicionais de mitigação, como filtros passivos, para frequências elevadas. A ausência de normas específicas para supra-harmônicos, apesar de sua crescente relevância com a expansão da geração distribuída (GD), expõe possíveis lacunas regulatórias das redes modernas. Este trabalho enfatiza a necessidade de desenvolver padrões e soluções, de modo a aprofundar as avaliações dos efeitos e técnicas de mitigação.

Perguntas e Respostas

Qual solução imediata os autores considerariam para os problemas de super-harmônicas?

Como se trata de fenômenos relativamente recentes, medições, análises de impactos, propagações e investigações de problemas ainda carecem de maiores históricos, pois além dos problemas clássicos relacionados aos harmônicos, novos problemas podem ocorrer (falhas de capacitores, problemas de compatibilidade eletromagnética, interferências e falhas de equipamentos). A utilização de analisadores de qualidade de energia e sistemas de aquisição de alta velocidade com a utilização de equipamentos avançados devem garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados. Porém, não podemos definir categoricamente ainda as soluções imediatas para os problemas de super-harmônicos, mas como recomendações técnicas em termos práticos, pode-se citar a otimização de técnicas de chaveamentos, bem como a necessidade de uso de filtros específicos de altas frequências nas instalações afetadas.

Os autores consideram que o Inmetro poderia atuar na restrição à gerção de super-harmônicas pelos inversores comercializados no Brasil?

No mesmo sentido de realçar a necessidade de investigações nessa nova área de qualidade da energia, entende-se como importante a possibilidade de atuação e certificação do Inmetro frente a investigação de super-harmônicos no SEP, bem como sobre os ensaios específicos de emissões e imunidades, tais como EMI (Electromagnetic Interference), EMS (Eletromagnetic Susceptibility) e EMC (Eletromagnetic Compatibility), relacionados aos aspectos envolvidos com as eminentes ondas do processo de transição energética.

Ademais, o Inmetro poderia impor aos fabricantes que forneçam os respectivos espectros harmônicos até a 50ª ordem de seus equipamentos, de forma que no

projeto sejam identificados e solucionados os problemas relacionados aos harmônicos de baixa frequência. Com os harmônicos de baixa frequência dentro dos parâmetros considerados adequados, certamente, os super-harmônicos serão menos nocivos ao SEP do ponto de vista da injeção.

Os valores das super-harmônicas poderiam ser amplificados pela capacitância de cabos isolados e blindados das instalações elétricas avaliadas? Em caso negativo, a geração das super-harmônicas seria "culpa" 100% dos inversores?

Sim, os componentes super-harmônicos de altas frequências podem ser amplificados pelas capacitâncias de cabos isolados e blindados. Na seção 4, é mencionado que a livre circulação de altas frequências no sistema elétrico pode provocar ressonâncias entre si e com a frequência natural de componentes do sistema, como cabos, que podem amplificar as distorções e causar problemas como aquecimento excessivo ou defeitos em equipamentos. Por outro lado, os efeitos das capacitâncias de cabos isolados e as formas de blindagem podem contribuir para a atenuação ou a amplificação dos componentes super-harmônicos. Portanto, a geração, propagação e a interação de super-harmônicos não são integralmente oriundas dos inversores, já que as características do sistema elétrico, como as capacitâncias dos cabos, também influenciam. Os chaveamentos de inversores são a principal fonte de injeção de super-harmônicos, mas os efeitos são potencializados por interações com outros componentes do sistema, como cabos e demais equipamentos presentes nos sistemas elétricos.

Título - Avaliação de DHI e DHT em Plantas de H2V de grande porte e seus impactos no dimensionamento de filtros harmônicos.

Entidade(s) - HITACHI ENERGY BRASIL LTDA., HITACHI ENERGY BRASIL LTDA

Autor(es) - Vinícius Pereira Soares Sobral, Leticia Ribeiro Moog

Resumo

As Plantas de H2V são fundamentalmente compostas por cargas lineares e não-lineares. A fração linear diz respeito aos equipamentos periféricos aos processos, como as bombas, compressores e serviços auxiliares em geral. O montante não-linear está atrelado às cargas destinadas a eletrólise, que em termos numéricos totalizam cerca de 90% da carga total das Plantas de H2V. Devido à natureza elétrica dos eletrolisadores, seu atendimento é feito por meio de retificadores de alta potência, que convertem o sinal AC para DC.

Essa característica não linear faz com que haja uma injeção de correntes harmônicas significativa, o que gera Distorções Harmônicas Individuais e Totais (DHI e DHT) no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) consideravelmente elevadas, trazendo impactos na qualidade da energia.

Para tanto, analisa-se os valores de DHI e DHT para três Plantas de H2V de 1,4 GW, 2,6 GW e 3,0 GW de carga total instalada, o que acarreta, respectivamente, 1,1 GW, 2,0 GW e 2,65 GW destinados à eletrólise. A modelagem considerada para o montante não-linear, considerando a injeção de correntes harmônicas para retificadores padrão, à tiristor, de 12 pulsos e 5 MW, resume-se a fontes de injeção de correntes harmônicas no programa computacional Harmzs (CEPEL).

Além disso, apresentam-se combinações diferentes para esta análise, como

considerar o valor de DHI e DHT para as Plantas de H2V operando sem e com Bancos de Capacitores para atendimento a faixa de fator de potência (0,98 ind. – 1,0), conforme submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede do ONS, e os filtros harmônicos que serão dimensionados para adequação aos valores de DHI e DHT conforme submódulo 2.9.

Perguntas e Respostas

Qual o motivo de se adotar valores tão altos de carga pra as plantas H2V? Qual é a potência padrão de uma única planta comercial?

Teoricamente não existe um valor padrão para uma planta comercial. Em nossa experiência, tivemos a chance de trabalhar em projetos de acesso e conceitual de plantas de centenas de MW, como em plantas de unidades de GW. A escolha por valores altos de carga pode ser justificado por motivos econômicos, visto que a viabilidade financeira pode não ser tão atrativa para plantas de "pequeno porte" (centenas de MW); pelo atendimento a alta demanda industrial de H2V como combustível e insumo para a nova era energética; e o custo relativamente baixo relacionado à contratação de energia elétrica no Brasil, tendo em vista o atendimento energético é feito, em boa parte do tempo, por energia renovável confiável.

Nos Casos 4 das simulações computacionais, o que significa "Com Compensação Reativa"? Banco de capacitor puros?

Exato! O Caso 4 é uma configuração operativa que leva em consideração os Bancos de Capacitores dimensionados previamente para atendimento ao critério de fator de potência, e os filtros dimensionados para atendimento aos limites de DHI e DHT. Da mesma forma, o Caso 2 também considera esses Bancos de Capacitores.

A quantidade de filtros e potências (Mvar) individuais nas tabelas 6, 9 e 12 para cada harmônica não somam o montante reativo estipulado para compensação reativa especificada no início de cada caso. A que situações corresponderia estas tabelas?

As quantidades de Filtros de Potência mostrados nas tabelas 6, 9 e 12 são exclusivamente relacionadas ao montante reativo (Mvar) dos filtros harmônicos dimensionados para atendimento ao critério de DHI e DHT. Esse montante é, de fato, diferente do montante reativo (Mvar) dimensionado para atendimento ao critério de fator de potência. Em resumo, são dois critérios a serem atendidos: o de fator de potência e o de distorção harmônica (individual e total). Para cada um desses critérios, são dimensionados volumes de equipamentos diferentes.

Título - Aplicação do método da superposição das correntes nos terminais de aerogeradores para a redução da influência das tensões harmônicas preexistentes nos extratos de corrente

Entidade(s) - CENTRAIS ELETRICAS BRASILEIRAS SA ELETROBRAS

Autor(es) - Miguel Pires De Carli

Resumo

Estudos de avaliação do desempenho harmônico de parques eólicos são normalmente exigidos por operadores de rede previamente à conexão de novos empreendimentos para verificar o impacto destes no sistema elétrico. Para conduzir esses estudos, é necessário ter conhecimento das emissões de correntes

harmônicas dos aerogeradores utilizados no projeto. No entanto, essas correntes são tipicamente influenciadas pelas tensões harmônicas preexistentes no sistema. Para abordar esse problema, a IEC 61400-21-1 fornece técnicas que visam a identificar e excluir a influência das tensões harmônicas de fundo sobre as correntes harmônicas medidas nos terminais dos aerogeradores. Ocorre que essas técnicas, normalmente, só permitem a obtenção de resultados qualitativos e podem ser de difícil aplicação prática.

Neste sentido, o artigo apresenta e propõe a utilização do Método da Superposição em Terminais de Aerogeradores para definir as responsabilidades sobre as correntes harmônicas medidas, ou seja, definir o valor gerado pelo sistema e o valor gerado pela turbina eólica – somente este último deveria ser utilizado na produção dos extratos. Esta atribuição de responsabilidades é fundamental para se realizar avaliações de desempenho justas e realistas, bem como evita a instalação de filtros desnecessários.

O artigo contextualiza o problema da influência das tensões harmônicas preexistentes nas medições de correntes harmônicas e seus impactos nos resultados de estudos de desempenho harmônico. Apresenta brevemente as técnicas propostas na IEC 61400-21-1 para mitigar o problema, apresenta a metodologia proposta e os dados necessários para sua aplicação. Por fim, aplica a metodologia proposta em um aerogerador para produzir um extrato de correntes eliminando a porção das correntes originadas da rede. O artigo destaca as diferenças nas magnitudes das correntes harmônicas em comparação a um extrato produzido sem usar o método proposto.

Perguntas e Respostas

Os autores chegaram a calcular a ordem de grandeza da diferença dos filtros harmônicos calculados com a metodologia atual (ONS) e com o Método da Superposição em Terminais de Aerogeradores?

Esta avaliação não chegou a ser realizada, uma vez que o objetivo do artigo era apresentar a metodologia e demonstrar a redução dos valores das correntes harmônicas que podem ser obtidos com a sua aplicação. A avaliação do impacto da aplicação da metodologia proposta no dimensionamento dos filtros deverá ser realizada em um próximo artigo sobre o tema. De qualquer forma, com os resultados apresentados no artigo já é possível verificar indiretamente o quanto as distorções de tensão verificadas nas simulações podem ser reduzidas, por exemplo, as distorções na 5ª e 7ª harmônicas seriam da ordem de 50 a 70% em relação a um estudo que não aplicasse a metodologia no caso em estudo.

Um dos grandes desafios atuais na medição de distorções de tensão pré-existent (distorções de fundo) trata-se em considerar os erros do TPC utilizado nesta caracterização. Como qual a visão do autor sobre a influência do sensor na caracterização de tais distorções e seus impactos para a aplicação do Método da Superposição em Terminais de Aerogeradores ?

Como as tensões harmônicas aplicadas na metodologia são aquelas medidas nos terminais dos aerogeradores, tipicamente na faixa de 400 a 1000 V, não é necessária a utilização de TPCs nas medições, conforme ocorre normalmente nas medições realizadas em barramentos de alta tensão como os pontos de acoplamentos dos empreendimentos. Assim, como as ponteiros de medição são os próprios qualímetros, os erros que normalmente são verificados em medições com TPCs não ocorrem na aplicação da metodologia proposta.

Os autores fizeram comparações do método proposto com outras metodologias de aplicação de responsabilidade propostas na literatura nos últimos anos? Qual a vantagem do Método da Superposição em Terminais de Aerogeradores sobre estas outras propostas?

Sim, embora não tenham sido apresentados no relatório comparações da metodologia proposta com outras metodologias recentes, por limitação do número de páginas no artigo, tais comparações foram realizadas. Destaca-se comparações quantitativas realizadas com resultados da aplicação de um método desenvolvido pelo CEPEL, o qual utiliza filtros ativos, e também outros métodos propostos na brochura técnica 468 do CIGRÉ com abordagens mais qualitativas. Todas as comparações de resultados validam os resultados da metodologia proposta. As principais vantagens que podem ser citadas para o método proposto são o fato de não necessitar da instalação de equipamentos adicionais como filtros ativos ou passivos, como é o caso do método da superposição com impedância dominante, e só necessitar das próprias medições de um qualímetro. Outros pontos a destacar é que o método permite a obtenção de resultados quantitativos, diferentemente dos métodos apresentados no anexo D da norma IEC 61400-21-1, os quais só permitem, na maioria dos casos, resultados qualitativos. Além disto, o método proposto permite avaliar simultaneamente todas as ordens harmônicas necessárias, o que não é possível no método com filtros ativo ou no da superposição com impedância dominante.

Título - Transformadores de Instrumento Convencionais em Cenários de Distorção Harmônica: Análise de Não-Linearidades e Impacto na Classe de Exatidão

Entidade(s) - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO.

Autor(es) - LEONARDO AUGUSTO ABREU DE SOUZA, Marcus Vinicius Viegas Pinto, Marcelo Britto Martins

Resumo

Este trabalho analisa os impactos das distorções harmônicas na exatidão de Transformadores de Instrumento (TIs) convencionais, essenciais para medição, proteção e monitoramento em sistemas elétricos. A modernização das redes e a crescente presença de geração distribuída e cargas não-lineares elevam os níveis de distorção harmônica, exigindo maior confiabilidade metrológica. TIs eletromagnéticos, projetados para operar com sinais senoidais, podem apresentar não-linearidades que afetam a razão de transformação e o ângulo de defasamento, comprometendo sua classe de exatidão. Normas internacionais, como a série IEC 61869, estão sendo revisadas para contemplar esses efeitos. A metodologia adotada neste estudo emprega o Método do Domínio Harmônico (MDH), que utiliza sinais multi-tone para identificar desvios provocados por não-linearidades. Simulações com modelos polinomiais de diferentes ordens mostram que esses efeitos podem gerar distorções na saída, mesmo com entrada senoidal. Além das simulações, o trabalho destaca a importância de sistemas de medição multi-harmônica com alta confiabilidade metrológica. Nesse contexto, o Inmetro vem desenvolvendo o Sistema de Medição Multi-Harmônica (SMMH), que, embora atualmente restrito a aplicações em baixa tensão, apresenta resultados preliminares promissores na detecção de desvios com alta precisão, além de potencial para expansão a níveis de alta tensão. A análise reforça a necessidade de revisão

normativa e de metodologias que considerem explicitamente os efeitos dos harmônicos nos TIs.

Perguntas e Respostas

Na Tabela 1, O que significa RTC? Poderia traduzir em palavras para um dos modelos de TP apresentados na Tabela 1 os dados da mesma?

Agradecemos o comentário e a oportunidade de esclarecer. No artigo, a sigla RTC refere-se à Relação de Transformação Complexa, conceito tradicionalmente empregado para caracterizar a relação entre grandezas de entrada e saída em transformadores de instrumento, considerando tanto a razão de magnitude quanto o ângulo de defasagem.

Entretanto, nos casos específicos apresentados na Tabela 1, optamos por utilizar a nomenclatura RTC_DH para indicar que a relação de transformação analisada foi obtida por meio do Método do Domínio Harmônico (MDH). Essa modelagem, ao incorporar efeitos não lineares, permite representar qualitativamente como a não-linearidade impacta a relação entrada-saída do transformador de potencial (TP). Assim, a notação RTC_DH foi introduzida apenas para diferenciar esses casos das análises convencionais de RTC, nas quais se assume linearidade.

Esse procedimento teve caráter essencialmente didático, para deixar explícito que os modelos avaliados no domínio harmônico capturam fenômenos não lineares que não são contemplados na caracterização tradicional da RTC.

Os autores poderiam comentar sobre qual tipo de TP foi usado para os resultados apresentados no IT? Poderiam comentar sobre os erros para TCs., bobinas de Rogowski. TPI e TPC, frente a metodologia MDH?

Agradecemos a observação e esclarecemos que as simulações teóricas utilizaram modelos de TPs com não-linearidades típicas, porém idealizadas, representadas pelo Método do Domínio Harmônico (MDH), permitindo avaliar qualitativamente o impacto de diferentes níveis de não-linearidade na relação de transformação e no ângulo de defasagem. A avaliação quantitativa também é possível, porém fugia ao escopo do artigo. Quanto à aplicação da metodologia a TCs, TPI, TPC e bobinas de Rogowski, ressaltamos que o MDH é de utilização geral e pode ser empregado para representar transdutores de diferentes tecnologias. Entretanto, os erros esperados podem variar conforme o princípio físico do transdutor a ser caracterizado.

Para as medições reais, utilizamos um TP padrão de baixa tensão da marca Conimed, com múltiplos taps disponíveis. A relação de transformação 2:1 foi escolhida por compatibilidade com o setup do Sistema de Medição Multi-Harmônica (SMMH). Nesse caso, as não-linearidades eram desconhecidas a priori, sendo o objetivo justamente caracterizar os desvios reais sob condições harmônicas.

A ideia futura é expandir o SMMH do Inmetro para que seja capaz de realizar caracterizações metrológicas em laboratório para todos esses tipos de equipamentos, incluindo aplicações em alta tensão e alta corrente.

Os autores quantificaram o impacto econômico que os erros apresentados na seção 5.2.2 podem representar? Se sim, quais seriam estes valores?

Agradecemos a observação e ressaltamos que a quantificação econômica dos erros associados aos desvios apresentados na seção 5.2.2 é, de fato, um aspecto extremamente relevante para o setor elétrico. Entretanto, tal análise não foi realizada no presente trabalho, pois envolve um nível de complexidade que extrapola o escopo do artigo.

A proposta de desenvolvimento do Sistema de Medição Multi-Harmônica (SMMH) visa justamente habilitar o Inmetro a realizar caracterizações metrológicas abrangentes de equipamentos de utilização em campo — como TPs, TCs, TPIs, TPCs, entre outros — de modo a quantificar, com confiabilidade, os erros que esses dispositivos possam apresentar não apenas sob condições de distorção harmônica, mas também em situações adversas, tais como:

- Operação sob diferentes perfis de carga;
- Regimes de saturação;
- Operação fora da faixa nominal para TCs;
- Outras condições reais de distribuição e transmissão de energia.

Somente com a infraestrutura adequada, incluindo a expansão do SMMH para níveis de alta tensão e alta corrente, será possível avaliar o impacto metrológico e, conseqüentemente, realizar estudos mais robustos que permitam quantificar eventuais impactos econômicos dos desvios identificados em condições reais de operação em campo.

Portanto, embora os autores reconheçam a importância dessa análise, a sua execução depende de investimentos adicionais e da conclusão das etapas de desenvolvimento do SMMH, de forma a possibilitar uma avaliação confiável e representativa dos equipamentos reais inseridos no sistema elétrico.

Título - CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DE CONVERSORES DE POTÊNCIA EM PARALELO COM BASE EM MEDIÇÕES E ESTUDOS DE CASOS EM APLICAÇÕES COM AEROGERADORES E ACIONAMENTOS DE MOTORES

Entidade(s) - GSI ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Autor(es) - NELSON CLODOALDO DE JESUS, Adriano Garufe Nogueira, Jesus Daniel de Oliveira, Ahmad Muhammad Laurentino, Gustavo Rodrigues dos Santos, Luiz Marlus Duarte

Resumo

Este informe técnico apresenta inicialmente os conceitos relacionados a operação em paralelo de conversores de potência e os possíveis impactos causados por desequilíbrios e circulação de correntes entre os módulos, podendo contribuir para falhas prematuras de operação, especialmente dos semicondutores de potência. Na prática, esse fenômeno é conhecido como “phase-sharing”, existindo métodos específicos que devem ser aplicados para a melhoria do balanço de potência e equilíbrios entre os multi-conversores. Serão apresentados os resultados das avaliações por meio de medições de dois casos específicos. O primeiro envolveu a

operação de conversores “full-converter” utilizados na geração de energia eólica e, o segundo, associado ao acionamento controlado de velocidade de um motor de indução trifásico, instalado em sistema industrial. Os casos relatam os potenciais problemas de desequilíbrios na operação de conversores estáticos em paralelo, com possibilidade de falhas destrutivas, circulação de elevadas correntes pela instalação, sendo apresentadas as recomendações utilizadas para mitigação dos efeitos adversos na operação de conversores em paralelo sob condições desequilibradas.

Perguntas e Respostas

O trabalho menciona a utilização de reatores de interfase (Interphase Reactors) e aumento da impedância de sequência zero como soluções. Houve alguma análise comparativa entre essa solução e métodos baseados em controle digital avançado, como controle adaptativo ou balanceamento ativo de corrente? Quais são os critérios para escolha entre soluções passivas (reatores) e ativas (controle)?

No caso específico dos inversores no acionamento controlado do motor, o próprio fabricante do equipamento indicou que o método de seu padrão de controle digital já estava implementado, mas sem uma otimização necessária. Após a devida explicação da origem dos fortes desequilíbrios, em módulo e ângulo, houve concordância com a utilização dos reatores, inclusive foi informado que esse equipamento se classificava como um componente opcional de sua linha. De qualquer modo, entende-se que a solução mais interessante seria uma compensação com soluções ativas, mas, dependendo da abrangência, urgência e da disponibilidade comercial, a solução passará por alterações na instalação, seja por mudanças nas rotas dos cabos entre os inversores e o motor, ou pela inserção de reatores entre os inversores (“Interphase”), como a solução que foi implementada em um dos casos estudados.

NO caso dos inversores industriais, o desequilíbrio apresentado está relacionado ao desequilíbrio da impedância por fase do motor? A troca do motor por outro de maior equilíbrio poderia ser uma solução?

Não, o desequilíbrio está diretamente relacionado a operação dos inversores em paralelo, sendo que o motor e o sistema são afetados por essa condição (desequilíbrios entre os módulos dos inversores).

Uma possibilidade seria lançar os cabos em paralelo diretamente dos inversores aos terminais dos motores, aumentando o caminho físico do paralelismo e a impedância entre os inversores e o motor, mas nesse caso, essa opção era inviável em termos construtivos e, assim, a opção técnica recomendada e que foi confirmada pelo próprio fabricante foi a inserção de reatores de “interphase” entre ambos os terminais de saída dos inversores.

Os fenômenos de desequilíbrio de corrente (phase sharing) e seus impactos operacionais foram analisados em sistemas de geração eólica e em acionamento de motores. Os autores consideram que as conclusões podem ser estendidas para outros sistemas baseados em conversores de potência, como sistemas fotovoltaicos, sistemas de armazenamento ou veículos elétricos? Existem limitações para essa extrapolação?

Os fenômenos e efeitos de desequilíbrios (“phase sharing”) entre inversores com operação em paralelo, indicam que em determinadas condições, tais efeitos podem

ser significativos e causarem diversos problemas operacionais. O foco deste trabalho foi centralizado na operação de inversores com a conexão em paralelo localmente, mas o mesmo conceito geral pode ser aplicado aos demais tipos de fontes de tensão em paralelo (Vide Figuras 2 e 3).

As conclusões indicam um direcionamento depende fortemente dos níveis de desequilíbrios, sendo que na maioria das situações, tais efeitos podem ser tolerados. Portanto, entende-se que, apesar das diferenças em relação a sua abrangência para sistemas fotovoltaicos, de armazenamento ou veículos elétricos, a operação em paralelo de conversores deve ser analisada detalhadamente, apresentando além dos parâmetros de desequilíbrios, uma possível correlação com os conceitos da operação nos modos de inversores "seguidores de rede" (grid-following) e "formadores de rede" (grid-forming). Nesse contexto, entende-se que esses tipos de problemas associados aos possíveis desequilíbrios e demais flutuações entre inversores em paralelo devam ser detalhadamente analisados, assim como nos casos de flutuações de tensão, frequências, componentes harmônicos e Inter harmônicos, relacionados aos demais casos que utilizam amplamente como base o controle dos sistemas por inversores de frequência.

Título - ASPECTOS PRÁTICOS ASSOCIADOS À REALIZAÇÃO DE CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE CORRENTES: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE HARMÔNICOS DE SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA

Entidade(s) - GSI ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Autor(es) - NELSON CLODOALDO DE JESUS, Adriano Garufe Nogueira, Jesus Daniel de Oliveira, Ahmad Muhammad Laurentino, Gustavo Rodrigues dos Santos, Thiago Pereira Franco, Luiz Marlus Duarte, LUIZ OTAVIO MOREIRA DA SILVA, Antônio Leydson Pitombeira Xavier

Resumo

Este informe técnico tem como objetivo apresentar uma análise relacionada aos requisitos técnicos, procedimentos e aspectos operacionais vinculados às etapas de realização e análise das campanhas de medição de qualidade da energia elétrica. As campanhas de medição para o ONS contemplam as medições de tensão e corrente de cargas não lineares, cujos dados são também utilizados nas avaliações, simulações e definições do desempenho harmônico do sistema. Nesse trabalho, serão apresentados os detalhes e resultados das análises de campanhas de medição de tensão em quatro pontos de conexão com sistemas elétricos de 69 e 230 kV, bem como a comparação entre as correntes representativas da operação de dois tipos de aerogeradores, instalados nos respectivos complexos de geração de energia eólica.

Perguntas e Respostas

O artigo propõe a medição agregada das correntes no secundário da subestação coletora ou nos alimentadores da média tensão, em vez de medições individuais nos aerogeradores. Como ela influencia na representatividade dos resultados frente às exigências dos Procedimentos de Rede?

Devido as diversas incertezas relacionadas com a metodologia atual das campanhas de medição das correntes e estudos de fluxo harmônico, a medição agregada das

correntes efetivamente injetadas no sistema elétrico de MT, poderia contribuir para uma melhor assertividade na definição dos filtros harmônicos. Como as exigências dos Procedimentos de Rede do NOS, no que tange as campanhas de medição das correntes falam da necessidade de medição nos terminais de um aerogerador por cada usina, a medição agregada só atenderia essa exigência caso de tivesse uma única usina, na qual a medição ao invés de ser realizada em um aerogerador, seria realizada no secundário do transformador, registrando a soma total dos sistemas de geração eólica.

Quanto a representatividade, é justamente nesse ponto que, como proposta de uma medição agregada, entende-se que essa alternativa representaria melhor o lado real da injeção das correntes harmônicas, sendo recomendado inclusive avaliar o sistema por meio de um fluxo harmônico com base no método de injeção das correntes, para os carregamentos, tomando-se como base o real perfil harmônico de cada uma dessas condições. Na metodologia atual, além de desvios entre as medições individuais, ocorre uma utilização dos valores máximos percentuais, os quais ainda são utilizados para a condição nominal, o que tende a aumentar as questões conservativas relacionadas a esse processo.

Portanto, sendo os dois lados bastante conservativos (aplicação do método do lugar geométrico com as medições individuais dos aerogeradores), a proposta poderá minimizar possíveis inconsistências de filtros que normalmente são instalados no lado de 34,5 kV. Portanto, além de uma validação da metodologia, torna-se necessário avaliar o sistema como um todo e, não somente o Ponto de Acoplamento Comum, uma vez que os indicadores são verificados na AT, mas os bancos de capacitores, reatores ou filtros harmônicos, em sua grande maioria, são projetados para a conexão no lado de média tensão.

Dada a ausência de transformadores de potencial (TPs) no ponto de interesse, o artigo sugere o uso da tensão do transformador de serviços auxiliares como referência. Quais são os limites de precisão e as possíveis fontes de erro associadas a essa prática, especialmente em cenários de alta variabilidade de geração eólica?

Essa tensão de referência é somente para certificar as medições em comparação com as indicações dos sistemas de supervisão dos próprios aerogeradores.

Na realidade, existem limites quanto aos valores das distorções variáveis das tensões dos transformadores de serviços auxiliares, pois, normalmente, tem-se elevadas distorções de tensão, mas a ideia principal nessa proposta foi o de simplesmente utilizar a base da componente fundamental (módulo e ângulo), sendo que as comparações realizadas indicam validação plenamente adequada, durante as campanhas de medição das correntes, em toda a faixa de variação das potências de geração, realizadas durante os referidos testes de monitoramento das últimas quatro usinas eólicas. Com isso, além das correntes, tem-se uma indicação das potências ativa e reativa muito próximas aos respectivos valores de “setpoints” e dados operacionais, durante os testes e a obtenção das correntes harmônicas representativas dos aerogeradores.

O trabalho observou a presença de harmônicos de ordens pares (2ª e 4ª) e de alta frequência nas correntes, além dos harmônicos clássicos (3ª, 5ª e 7ª) nas tensões. Existe, na visão dos autores, a necessidade de revisão ou atualização

dos critérios normativos frente ao comportamento observado nas plantas eólicas modernas?

Para as tensões tem-se observado os componentes harmônicos clássicos, na sequência (3ª, 5ª e 7ª) ou ainda na sequência (5ª, 7ª e 3ª).

Para as usinas A e B, com conversores do tipo (DFIG), ocorreu predominância dos componentes de ordens pares (2 e 4) e de altas frequências nas correntes. Para as usinas C e D que utilizam conversores do tipo “Full Converter”, ocorreu uma maior preponderância dos harmônicos de baixa ordem (ímpares e pares), com valores percentuais maiores do que os obtidos nas usinas do tipo DFIG.

Em duas análises complementares realizadas pode-se observar que no lado MT de 34,5 kV, observam-se componentes de 5ª, 7ª ordens por exemplo, enquanto no lado de 230 também foram observados valores adequados.

Tem-se percebido uma tendência de necessidade de filtros de 3ª ordem, apontadas nos estudos, mesmo que nas tensões de 34,5 kV os componentes mais importantes sejam os de 5ª e 7ª ordens, por exemplo.

Subentende-se a partir desses casos, que, naturalmente, a metodologia carece de algum aperfeiçoamento, sendo importante algum tipo de validação entre os resultados reais e os obtidos por meio de simulação. Em termos das medições não existe critério sobre os pontos de medições, mais próximos ou mais distantes da subestação, pois nesses casos, podem ser obtidos resultados completamente diferentes. Nesse ponto, a medição agregada pode ser um referencial mais adequado. Sendo assim, sugere-se rever o critério de medição utilizando os valores agregados por enrolamento secundário ou terciário dos transformadores das subestações coletoras eólicas ou fotovoltaicas, bem como verificar o porquê do não efeito de enrolamentos conectados em delta, em possíveis atenuações dos componentes harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos, quando se utiliza o programa de fluxo harmônico recomendado para esse tipo de análise e definição dos filtros harmônicos. Tem-se observado em diversas instalações de plantas eólicas modernas, indicadores plenamente adequados, as quais a princípio não necessitariam de quaisquer filtros, mas, com o uso dos procedimentos e metodologias atuais, dificilmente essa condição é obtida com as exigências dos estudos de conexão de acesso ao SIN.

Título - Monitoramento online de Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica de parques eólicos e solares fotovoltaicos baseado no Sistema de Medição Sincronizada de Fasores do SIN

Entidade(s) - Operador Nacional do Sistema Elétrico, Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina - FEESC

Autor(es) - Fabiano Andrade de Oliveira, Jaqueline Gomes Pereira, Ildemar Cassana Decker, ulisses chemin netto

Resumo

Considerando o aumento crescente de solicitações de conexões de fontes renováveis de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), notadamente as usinas eólicas e solares fotovoltaicas, com suas características não lineares geradoras de correntes harmônicas, é importante avaliar o impacto da operação dessas usinas, no tocante à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), em especial, aos quesitos da Distorção Harmônica Total de Tensão e de Corrente (THD).

A expansão das fontes renováveis de energia elétrica e as consequentes alterações regulatórias advindas dessa expansão na matriz energética vêm reforçando o comprometimento do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em aprimorar seus processos, com destaque para os de QEE e com soluções inovadoras de aproveitamento técnico e econômico dos recursos disponíveis no SIN, para o acompanhamento dos principais indicadores de desempenho elétrico. Para tanto, o ONS buscou o apoio de pesquisadores e instituições de ensino (UFSC e UTFPR) que pudessem investigar e propor formas mais céleres de avaliação do “status” da Rede Básica (RB) com respeito à QEE através da realização do monitoramento online de indicadores utilizando, por sua vez, a infraestrutura existente na própria RB de sistemas de medição sincronizada de fasores (SMSF), com a aplicação de PMUs (Phasor Measurement Units) habilitadas em IEDs multifuncionais.

Outro ponto importante a ser destacado da aplicação de PMUs na RB é a substituição futura das campanhas de medição de monitoramento semanais realizadas pelos qualímetros, de forma offline, pelo proposto monitoramento contínuo online a ser realizado pelos equipamentos de medição fasorial (PMU), que possuem a capacidade de cálculo do THD na origem.

Perguntas e Respostas

O equipamentos PMU utilizados para monitoramento das distorções de tensão conseguem monitorar toda a faixa de espectro de frequência pelo menos até a quinquagésima harmônica? Foi feito estudo comparativo e metrológico?

Existem qualímetros classe S de excelente desempenho metrológico e de baixíssimo custo, não seria mais interessante a exigência destes equipamentos do que o uso de dados de PMU para tratamento de forma de onda?

Dentro da proposição da arquitetura de medição, por que não foi solicitado a utilização dos métodos da IEC 61000-4-30? Com isso não se evitaria possíveis reclamações futuras dos agentes por violação de limites?

Título - IMPLEMENTAÇÃO E TESTE DO MODELO DE REATOR DE SATURAÇÃO NATURAL NO PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA

Entidade(s) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, Bambu - Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda

Autor(es) - Augusto César Cavalcanti de Oliveira, Vicente Ribeiro Simoni, Carlos Augusto da Cunha Santiago, Marcelo José de Albuquerque Maia, Luiz Antônio Magnata da Fonte, Matheus Vinícius Ferro de Oliveira

Resumo

O reator de saturação natural (RSN), concebido pelo engenheiro Erich Friedlander [1, 2, 3], é um equipamento que devido a sua característica construtiva do núcleo e ligação dos seus enrolamentos apresenta uma faixa de operação em saturação. O RSN mostra um desempenho excelente em termos de controle de tensão sistêmica, isto porque abaixo da tensão de operação, que pode ser especificada, o RSN está

fora de operação, absorvendo uma potência reativa insignificante da rede. Ele só começa a absorver uma potência reativa quando a tensão do barramento de conexão se eleva acima da tensão de operação, chegando a sua potência nominal quando a magnitude da tensão atinge um valor preestabelecido, que está acima do valor da tensão de operação, portanto ele apresenta um controle de tensão contínuo. Para determinar a eficácia deste equipamento na rede se faz necessário atualizar a maioria das ferramentas de análise de rede com as quais os engenheiros da área planejam e operam os sistemas. O presente trabalho tem como objetivo apresentar o modelo estático do RSN na formulação de equações de fluxo de potência (FP) através da implementação computacional no programa de análise de rede. Em combinação com um banco de capacitores, o RSN pode ser aplicado como limitador de corrente de curto-circuito e também como um compensador estático de reativo (CER), com desempenho muito semelhante ao conjunto TCR (Thyristor Controlled Reactor) e banco de capacitores [4]. Esta foi, aliás, a primeira aplicação comercial do RSN com o propósito de promover a estabilidade de tensão e controle de potência reativa num sistema elétrico de potência.

Perguntas e Respostas

1- Os autores podem explicar o que está sendo mostrado nas figuras 13 a) e 13 b)? Na figura 13b) no caso sem o CSN a tensão começa mais baixa? Porque?

1- Os autores podem explicar o que está sendo mostrado nas figuras 13 a) e 13 b)? Na figura 13b) no caso sem o RSN a tensão começa mais baixa? Porque?

2- Poderiam os autores satisfazerem a curiosidade da assistência indicando se há algum RSN ou CER/RSN em operação? Ou protótipo? O que se pretende fazer no futuro?

3- Dentro de um cenário de dificuldades devido ao aumento de geração intermitente baseada em inversores em que se tem dificuldades de suporte de tensão durante contingências, como ficou demonstrado no evento de agosto de 2023, o ESN ou CER/RSN poderão ajudar o sistema?

Título - Co-Simulação Digital em Escala de Tempo Real para Estudos de Inserção de Fontes Baseadas em Inversores em Sistemas de Potência de Grande Escala

Entidade(s) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fundação COPPETEC

Autor(es) - Rodrigo Vasconcelos Glória, Gabriel de Souza Antero, Joao Marcelo Amaral, Robson Francisco da Silva Dias

Resumo

A crescente complexidade dos sistemas elétricos modernos, impulsionada pelo uso de fontes baseadas em inversores (FBIs), demanda modelos mais representativos e precisos. Um exemplo dessa necessidade foi evidenciado pelo evento de 15 de agosto de 2023 no Brasil, causado por discrepâncias de modelos dos sistemas de controle apresentados e a planta real. Nesse contexto, a simulação em tempo real e a co-simulação surgem como ferramentas essenciais para validar controles e

hardwares, permitindo estudos mais fiéis à realidade.

A co-simulação digital possibilita a divisão do sistema em partes menores, otimizando o processamento por meio de hardwares distribuídos. Este trabalho apresenta uma co-simulação entre os simuladores Typhoon HIL e Opal-RT, aplicada à integração de renováveis em sistemas elétricos. A abordagem permite maior capacidade de processamento e criação de cenários complexos, explorando a especialidade de cada simulador: Opal-RT para sistemas elétricos de larga escala e Typhoon HIL para dispositivos de eletrônica de potência, com passos de integração de poucos .

A metodologia foi validada com um benchmark do IEEE adaptado, substituindo um gerador síncrono por um gerador eólico do tipo 4. A resposta dinâmica do sistema foi analisada e comparada com uma simulação monolítica, demonstrando que os erros introduzidos são desprezíveis. Além disso, a co-simulação expande significativamente a capacidade computacional, viabilizando estudos mais robustos, incluindo a validação através de Controller Hardware-in-the-Loop (CHIL).

Os resultados confirmam a viabilidade e os benefícios da co-simulação digital, que se apresenta como uma ferramenta promissora para o estudo de sistemas elétricos complexos e futuros avanços em simulação em tempo real.

Perguntas e Respostas

1- No item 2 os autores declaram que a co-simulação refere-se à prática de integrar e simular, de forma simultânea, modelos provenientes de diferentes domínios ou ferramentas de simulação. Por favor esclareçam se no caso em uma mesma ferramenta de simulação em tempo real o fato de se dividir a rede a ser simulada em regiões para que diferentes processadores se encarreguem da simulação de diferentes regiões; este procedimento também é chamado de co-simulação? Os autores usaram diferentes processadores no exemplo IEEE 9 barras?

2- No item 5.2 os autores mencionam que a co-simulação introduz perdas no sistema. Podem os autores desenvolver um pouco mais o tópico, porque dependendo do estudo, do sistema e do nível das perdas o resultado da simulação fica comprometido

3- Na opinião dos autores qual o futuro da co-simulação em tempo real? Plataformas diferentes integradas por comunicação? Domínios diferentes por exemplo EMT e fasores dinâmicos?

Título - Estudos envolvidos na definição de reator a núcleo de ar para a limitação de correntes de curto-circuito em subestações.

Entidade(s) - Universidade Federal de Itajuba, Grid Solutions Transmissao de Energia LTDA

Autor(es) - Gabriel Rabelo Tavares

Resumo

Este informe técnico apresenta os estudos para aplicação de reatores a núcleo a ar na limitação de correntes de curto-circuito em subestações de 138 kV. Os efeitos

colaterais do campo magnético gerado pelo equipamento foram analisados bem como as formas de mitigá-los, respeitando distâncias magnéticas normativas e usando tecnologias para este objetivo. Baseando-se na área metropolitana do Rio de Janeiro foi criado um sistema modelo com subestações e linhas de 138 kV onde a inserção de novas usinas termoeletricas no sistema elevou os níveis de curto-circuito para 93,4% da capacidade nominal dos disjuntores de 31,5 kA, fazendo-se necessário, segundo os critérios da ONS, o estudo de aplicações para contornar esta situação. Como uma proposta de solução, a inserção de uma indutância (reator de núcleo a ar) no sistema foi proposta e os estudos foram realizados no software ATPDraw para analisar os resultados em regime transitório e estacionário. A aplicação do equipamento projetado foi capaz de reduzir a corrente para 72,5% da capacidade nominal dos disjuntores, resolvendo a superação. Entretanto, ao analisar a tensão de restabelecimento transitória (TRT) nos disjuntores, a inserção do reator aumentou a taxa de crescimento das envoltórias, superando a capacidade dielétrica dos disjuntores. Desta forma, foi levado em consideração a adição de capacitores shunt para garantir a conformidade com as envoltórias normativas e a confiabilidade do sistema.

Perguntas e Respostas

1- As 6 colunas mostradas na figura 1 são de apenas 1 único reator de núcleo de ar? Ou diversos?

1- As 6 colunas mostradas na figura 1 correspondem a quantos reatores de núcleo de ar?

Este conjunto da Figura 1 correspondem a 12x unidades de reatores com núcleo de ar.

Nesta aplicação, foram ligados 4x reatores (2x duplas empilhadas) em série. Cada conjunto de 4x reatores está associado a uma fase do sistema.

2- No item 2 menciona-se que a queda de tensão em regime permanente deve ser mínima. No entanto, na tabela 4 menciona-se que a queda de tensão máxima é de 13,75kV. Esta queda de tensão é com ou sem curto-circuito? Na tabela 4 mencina-se também que a a tensão nominal do reator é 138kV. A ligação do mesmo é entre fases? Caso afirmativo como limita o curto fase-terra?

Esta queda de tensão de 13,75kV é considerando a corrente nominal da linha (2500A). 138 kV é a tensão nominal do sistema. A ligação do reator é série, em fase (1 reator por fase).

3- Poderiam os autores fornecer uma ideia aproximada do custo desta solução de reatores de núcleo de ar acompanhados de capacitâncias adicionais?

Infelizmente este é um dado privado à relação fornecedor-cliente.

Título - Aplicação de equivalentes de rede dependentes da frequência para redução de modelos em estudos elétricos transitórios da transmissão

Entidade(s) - Universidade Federal de Minas Gerais ,TRACTEBEL ENGINEERING LTDA

Autor(es) - Davi Gabino Canesso Moreira, Alberto Resende De Conti, Maria Tereza Cristeli Souza, Matheus Garcia Assis

Resumo

Este informe técnico investiga a determinação de equivalentes de rede dependentes da frequência (FDNE – Frequency Dependent Network Equivalent) a partir da parametrização desses equivalentes por meio da aplicação de sinais impulsivos no domínio do tempo, em uma rede complexa. Nesse contexto, foi realizada a modelagem caixa-preta da rede, que consistiu em caracterizar seu comportamento terminal através de simulações transitórias no ATP e, posteriormente, calcular as funções racionais que representam sua matriz de respostas em frequência de admitâncias, através do método matemático Time-Domain Vector Fitting (TDVF). Após a parametrização das funções, foi calculado o circuito RLC equivalente que representa o comportamento terminal da rede modelada. Por fim, tal equivalente foi utilizado para modelar em ampla faixa de frequências a parte simplificada do sistema, conectada ao restante da rede retida no modelo original, para aplicação direta em um estudo de energização de uma linha de transmissão de 230 kV, instalada no sistema avaliado. Com base nas simulações determinísticas e estatísticas realizadas, constatou-se que o equivalente de rede foi capaz de reproduzir o comportamento da rede associada e manter a coerência do estudo de energização realizado, sem grandes desvios nos resultados. Em relação ao tempo de simulação, foram alcançadas reduções de até 12,5%, com potencial para ganhos mais relevantes em modelos mais complexos e considerando reduções maiores da rede retida. Com os devidos aprimoramentos, espera-se que a estratégia seja estendida aos demais estudos transitórios, com foco nos estudos estatísticos, nos quais os benefícios relacionados ao tempo de simulação são mais significativos.

Perguntas e Respostas

1- Podem os autores caracterizarem melhor o conceito de segunda vizinhança a partir da barra de interesse? Por exemplo na rede da figura 1 se a energização da LT de 230kV for realizada pela SE B, onde seria a segunda vizinhança? E se a energização for feita pela SE A?

Conforme definição das “Diretrizes para a elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão” do ONS, a primeira vizinhança está a uma barra de distância (adjacente) à barra de manobra e a segunda vizinhança está a duas barras de distância da barra de manobra. No entanto, é necessário avaliar criticamente a proximidade elétrica do ponto de manobra para definição das barras de fronteira, extrapolando a segunda vizinhança quando necessário. Como por exemplo, no caso de subestações separadas por linhas de transmissão curtas e no caso de regiões menos robustas do sistema.

Em geral, a modelagem utilizada nas simulações deste trabalho vai até a terceira vizinhança, considerando as subestações A e B como barras de manobra, para garantir que os equivalentes em frequência fundamental não tenham impacto sobre os resultados dos estudos transitórios. Tendo em vista a Subestação A, a própria Subestação B está na sua primeira vizinhança, porém, também é considerada como barra de interesse. Então, a partir da SE A serão consideradas como primeira vizinhança as duas outras barras de 230 kV que possuem linhas de transmissão diretamente conectadas a ela, bem como a barra de 138 kV conectada à SE A por dois transformadores 230-138 kV. Por meio da mesma lógica, constituem a segunda vizinhança da Subestação A todas as barras diretamente conectadas a essas três

barras da primeira vizinhança, totalizando 5 barras (uma de 230 kV, duas de 138 kV e duas de 69 kV). Infelizmente, não foi possível adicionar imagens ao REP para detalhar a resposta à pergunta diretamente no diagrama da Figura 1.

2- Podem os autores explicar a afirmação contida nas Conclusões de que: os recursos para ajuste de tensão são reduzidos ?

A afirmação se refere ao ajuste de tensão pré-manobra para simulação no ATP. Uma vez que a rede a ser simplificada seja substituída pelo FDNE correspondente, não há possibilidade de alteração de parâmetros de equipamentos internos a ela para ajuste da tensão inicial de simulação, por meio da modificação das condições operativas de taps de transformadores, bancos de capacitores e de reatores, compensadores estáticos, compensadores síncronos e geradores. Assim, eventuais mudanças de tensão pré-manobra ficariam restritas as alterações na rede retida, a menos que sejam repetidas etapas do processo de extração do FDNE, de acordo com as alterações realizadas. Nesse contexto, é mais prático que o equivalente de rede dependente da frequência seja calculado a partir do ajuste de tensão adequado à simulação de interesse.

3- Algum dos geradores simulados na área retida são conectados à rede através de inversores? Caso afirmativo indique como foi feita a simulação.

Não há geradores conectados à rede através de inversores no modelo completo do ATP utilizado como base para o trabalho, tanto na área simplificada como na área retida, conforme base de dados do ONS.

Título - Validação de Parâmetros de Geradores Síncronos com Sistemas de Excitação Brushless Usando Dados de PMU e Simulação Dinâmica Híbrida

Entidade(s) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina - FEESC, Universidade Federal de Santa Catarina, Petróleo Brasileiro S.A.

Autor(es) - Daniel Dotta, Ildemar Cassana Decker, Aguinaldo Silveira e Silva, Fernando Elias de Freitas Fadel, Patricia Naomi Sakai, Yashira Wendy Raymundo Yauri

Resumo

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a validação de parâmetros de geradores síncronos, utilizando dados de Unidades de Medição Fasorial (PMUs) e Simulação Dinâmica Híbrida (SDH). As variáveis de interface entre o gerador e o resto do sistema são medidas e injetadas na simulação. A potência mecânica, não mensurável diretamente, é estimada a partir da equação de oscilação, com uso de medições da velocidade e da potência ativa do gerador. Para o caso de sistemas de excitação brushless, a tensão e corrente de campo do gerador não podem ser medidas diretamente. Um modelo da excitatriz principal é então usado e a tensão e corrente de campo da excitatriz são medidas. A SDH é implementada no software ANATEM com injeção das variáveis medidas por meio do método da Carga Dinâmica Controlada (CDC), usando a facilidade CDU.

A metodologia foi aplicada a um gerador com sistema de excitação brushless, de uma planta da Petrobras. Uma PMU customizada, que além da medida das grandezas terminais, tem uma função adicional de medida de campo e pode incorporar ao frame de dados a velocidade do gerador medida por um sensor, foi

instalada nesta planta. Os resultados demonstram o potencial da metodologia para a validação de parâmetros de geradores com o equipamento em operação normal.

Perguntas e Respostas

1- Por favor esclareçam a figura 1. O lado direito da figura mostra o modelo do subsistema simulado a partir de CDC no Anatem usando os dados medidos de PMU. Mas e o lado esquerdo da figura? Foi efetivamente realizada a simulação no Anatem? Qual a rede externa simulada? Na figura observa-se que foi aplicada uma falta ou uma perturbação. Que perturbação simulada foi esta?

Na Figura 1 é apresentada uma visão geral do método proposto, a ilustração da esquerda representa o sistema completo e a da direita, o subsistema simulado. No Anatem foi simulado o subsistema, ou seja, o gerador e seus controles, sendo que a rede externa é representada apenas pelas medições de fronteira, obtidas na barra terminal do gerador, entre os subsistemas e o sistema externo, injetadas na simulação. Ou seja, o efeito do sistema externo é completamente incorporado na simulação do subsistema.

Para o método de validação uma ou um conjunto de perturbações registradas, podem ser usados. No caso do gerador em questão, no período de observação disponibilizado, foi pequeno o número de ocorrências de perturbações significativas e, conseqüentemente, a quantidade registros usados. Uma perturbação mais significativa, ocorrida no sistema externo ao da planta sob estudo, em 17/05/2024, produziu variações significativas nas medidas de fronteira entre o subsistema de interesse e o sistema externo, e foi usada nos resultados.

2- Podem os autores comentar a discrepância dos parâmetros do gerador síncrono do item 4.1 o do IDT da tabela 3?

2- Podem os autores comentar a discrepância dos parâmetros do gerador síncrono do item 4.1 o do IDT da tabela 3 em se tratando dos valores de tensão da figura 7?

Na Figura 7 foram apresentadas a tensão medida e a tensão obtida da simulação, usando os parâmetros fornecidos pelo fabricante, dados na Tabela 1. A variação paramétrica visando determinar a sensibilidade do índice de discrepância IDT, apresentada na Tabela 3, mostra como o IDT se reduz quando alguns parâmetros são variados em torno do valor nominal. Se os parâmetros ajustados pela variação que levou a uma redução do IDT forem usados na simulação, a Figura 7 resultará em maior aderência visual entre medição e simulação. Este resultado não foi apresentado no artigo dada à restrição de espaço.

Teste

3- Os autores visualizam outras aplicações da técnica empregada de validação de parâmetros para outros equipamentos ou controles do sistema brasileiro?

Sim. Embora o foco deste trabalho tenha sido a validação de parâmetros de geradores síncronos com sistemas de excitação brushless, a técnica apresentada pode ser estendida a outros equipamentos e controles relevantes no sistema elétrico brasileiro. A combinação de dados de PMU com simulação dinâmica híbrida é

suficientemente geral para permitir a validação de modelos de turbinas eólicas, inversores fotovoltaicos, compensadores síncronos, controles de FACTS (como STATCOM e SVC).

Essa flexibilidade é especialmente importante no contexto brasileiro, onde a diversidade tecnológica e a forte presença de renováveis intermitentes exigem modelos consistentes para estudos de estabilidade e confiabilidade. Portanto, acreditamos que a abordagem apresentada representa um caminho promissor não apenas para geradores síncronos, mas também para a validação de modelos de outros recursos energéticos e dispositivos de controle já presentes ou em expansão no sistema interligado nacional.

Título - Mitigação de Instabilidade em Equivalentes de 60 Hz Utilizando Algoritmo de Garantia de Passividade

Entidade(s) - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA

Autor(es) - Thomas Moreira Campello, Filipe Rodrigues Coelho, Sergio Luis Varricchio, Glauco Nery Taranto

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para correção de modelos racionais derivados de equivalentes de curto-circuito fornecidos pelo programa ANAFAS, garantindo estabilidade e passividade sem comprometer sua precisão. Ao contrário de abordagens empíricas com ajustes diretos de parâmetros negativos, a metodologia demonstra como recalcular o circuito equivalente utilizando funções simples de otimização e métodos de passividade. Neste trabalho também é apresentado um método de passividade que realiza perturbações seletivas nos polos e resíduos com perturbação seletiva da matriz assintótica D.

A abordagem é validada em um sistema didático com dois casos representativos: um com instabilidade e outro com violação de passividade. Os resultados obtidos demonstram que a proposta corrige o problema com precisão superior às abordagens usuais, preservando a fidelidade do modelo original.

Perguntas e Respostas

1-Na introdução é mencionado que os Procedimentos de Rede recomendam incluir três vizinhanças elétricas e que na prática áreas maiores costumam ser necessárias. Poderiam os autores ilustrar o que significa três vizinhanças elétricas?

Vizinhança elétrica refere-se ao conjunto de barras diretamente conectadas a uma determinada barra por meio de linhas, transformadores ou outros elementos de rede. A “primeira vizinhança” é o conjunto de barras ligadas diretamente à barra de interesse, a “segunda vizinhança” é o conjunto de barras ligadas às barras pertencentes à primeira vizinhança (mas não diretamente à barra de interesse), e assim por diante. Assim, incluir “três vizinhanças elétricas” significa que, a partir da(s) barra(s) de interesse que se deseja estudar, inclui-se na área de estudos todas as barras que estejam até três conexões elétricas de distância. O equivalente é então construído a partir do restante do sistema.

2-Por favor comentem alguns resultados: a) Figura 4 sem aplicação de evento. Há uma instabilidade do equivalente em regime permanente? b) Figura 7. Há uma componente CC nas respostas dos equivalentes?

a) As figuras 4 e 5 mostram os resultados do caso 1, onde o sistema exemplo é montado de forma que o equivalente de 60 Hz gerado pelo ANAFAS seja instável (valor de resistência positiva e indutância negativa). Assim, na figura 5 é mostrado os resultados deste equivalente após correções, no caso a correção usual e a proposta, onde pode-se observar que o equivalente com a correção proposta possui uma precisão maior do que a correção feita usualmente.

b) Sim, após a remoção do curto existe um deslocamento e assimetria da forma de onda, típico da presença de uma componente contínua de um transitório eletromagnético que tende a se anular com o tempo. Esse comportamento é observado em todas as 4 respostas apresentadas na Figura 7. Porém, na resposta do equivalente do ANAFAS e com a correção usual, é apresentado um offset CC maior, causado pela falta de passividade do equivalente e pela imprecisão da metodologia de correção, respectivamente. No equivalente proposto, já é observado uma maior precisão na resposta do equivalente de 60 Hz.

3-Poderiam os autores comentar as vantagens e desvantagens de equivalentes de rede realizados com o método deste IT (60 Hz) e outras abordagens realizadas pelos mesmos autores, em outros artigos, com equivalentes com respostas em frequência?

O equivalente de 60 Hz apenas reproduz precisamente a impedância da área externa na frequência fundamental. Devido a isso, observa-se comportamentos diferentes das respostas do sistema com este equivalente e do sistema completo para um mesmo evento. Para mitigar esta característica, é necessário que se aumente a área de estudo (rede interna) que será modelada em detalhes no ATP. Isso não é observado no equivalente dependente da frequência (FDNE), que consegue reproduzir de forma muito fiel a resposta da área externa para uma ampla faixa de frequências, reduzindo a área de estudos que deve ser modelada.

A vantagem do equivalente de 60 Hz é o fato de ser uma metodologia simples, fácil de ser aplicada e de existir diversas soluções comerciais que disponibilizam seu cálculo. Por outro lado, o FDNE é uma metodologia mais complexa e que não possui soluções comerciais com ferramental robusto para poder aplicá-lo.

Título - Análise do desempenho dos modelos dinâmicos de geração eólica e fotovoltaica: estudo de caso sobre colapso de tensão no oeste Bahia

Entidade(s) - Operador Nacional do Sistema Elétrico

Autor(es) - Taís Souto Almeida, Felipe Diógenes de Mendonça, Dilton Serra Seca Vasconcelos Filho

Resumo

Este trabalho consiste em um estudo de caso na região oeste da Bahia com foco no impacto da modelagem de usinas eólicas e fotovoltaicas no desempenho elétrico do Sistema Interligado Nacional – SIN. Após a perturbação ocorrida em 15 de agosto de 2023, identificou-se uma discrepância entre o desempenho dinâmico observado em campo e o simulado com os modelos fornecidos pelos agentes de geração ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Essa diferença motivou ajustes na

base de dados para compatibilizar o tempo de resposta dos inversores e aerogeradores com os valores verificados durante a referida perturbação, enquanto a atualização oficial pelos respectivos agentes não fosse concluída. Com a nova configuração de dados, foram identificados cenários de instabilidade dinâmica em situação de contingência simples até então não observados. Dentre as avaliações realizadas durante este trabalho, serão comparadas e analisadas as diferenças de respostas dos inversores e aerogeradores para a contingência da LT 500 kV Sol do Sertão – Bom Jesus da Lapa II considerando a base de dados do ANATEM publicada pelo ONS em março/2023 e em julho de 2024, portanto, antes e após o evento de 15 de agosto de 2023.

Perguntas e Respostas

1-No item 2 é mencionado que os estudos apresentados no IT foram realizados antes do comissionamento de duas LT adicionais entre as SEs Gentio do Ouro II e Bom Jesus da Lapa II que ocorreu em abril de 2025. Na nova configuração o problema do colapso de tensão após contingência simples ainda ocorre?

O problema de colapso de tensão permanecerá ativo, no entanto a contingência crítica deixa de ser a da LT 500 kV Sol do Sertão - Bom Jesus da Lapa II e passa a ser da LT 500 kV Morro do Chapéu II - Poções III C1. Cabe destacar que com a entrada das LTs 500 kV Gentio do Ouro II – Bom Jesus da Lapa II C2 e C3, houve aumento no limite de FBASO.

2-Nas conclusões é citado que como medida operativa para mitigar o risco dinâmico de colapso de tensão o limite de FBASO é monitorado em tempo real. Como é feito este monitoramento e quais são as medidas adotadas quando se verifica a tendência de o limite ser ultrapassado?

O monitoramento é feito através de medição em tempo real do somatório dos fluxos de potência ativa das linhas de transmissão que compõem o limite FBASO, sejam elas:

LT 500 kV Sol do Sertão – Bom Jesus da Lapa II;
LT 500 kV Morro do Chapéu II – Poções III C1;
LT 500 kV Morro do Chapéu II – Sapeaçu; e
LT 500 kV Buritirama – Barreiras II

Atualmente também compõem o limite FBASO as LTs 500 kV Gentio do Ouro II – Bom Jesus da Lapa II C2 e C3.

Quando há tendência de violação do referido limite, a operação em tempo real deverá realizar uma alteração na topologia da SE Sol do Sertão (abertura de disjuntor) de modo que a contingência da LT 500 kV Sol do Sertão - Bom Jesus da Lapa II provoque o desligamento de toda SE Sol do Sertão. Essa medida garante que a geração derivada da SE Sol do Sertão seja desconectada simultaneamente à referida contingência. Nesse contexto, a abertura do disjuntor implica em um aumento do limite de FBASO.

Se nessa topologia o tempo real verificar que o fluxo FBASO está próximo a violar o novo limite, deverá ser realizado o redespacho de geração de modo a reduzir o referido fluxo.

3-Na opinião dos autores qual deve ser a solução a médio e longo prazo para conjugar o uso da energia renovável (eólica e solar) com os problemas de instabilidade dinâmica do SIN?

Garantir a aderência entre o desempenho em campo das usinas eólicas e fotovoltaicas e aquele simulado através dos modelos dinâmicos é fundamental para que os estudos de estabilidade reflitam corretamente o comportamento do sistema. A ocorrência de 15/08/2023 evidenciou que a discrepância entre esses desempenhos levou o SIN a operar em condição insegura que não pôde ser identificada previamente. Com uma base de dados aderente, problemas dinâmicos que venham a surgir poderão ser detectados ainda na etapa de planejamento e endereçados de forma preventiva.

De forma mitigadora, o ONS, em conjunto com a EPE, vem desenvolvendo estudos para propor soluções estruturais que assegurem a segurança do sistema diante dos problemas de colapso de tensão identificados após a adequação da base de dados a partir de agosto de 2023. Paralelamente, o operador tem reavaliado os requisitos técnicos mínimos de conexão de novos geradores eólicos e fotovoltaicos, de modo a garantir que as futuras usinas contribuam de forma efetiva para a estabilidade do sistema. Por fim, aprimorar o desempenho das usinas já em operação, de modo a extrair mais recursos destas, também seria uma ação que traria benefícios sistêmicos.

Título - Estimação de Parâmetros de Modelos Dinâmicos Genéricos para Representação de Parques Eólicos do Subsistema Nordeste

Entidade(s) - Universidade de São Paulo, Fundação Universidade Federal de São Carlos, Fundação Universidade Federal do ABC, Universidade Federal do Paraná, Casa dos Ventos S.A., totalenergies EP Brasil Ltda

Autor(es) - Rodrigo Andrade Ramos, Tatiane Cristina da Costa Fernandes, Giovanna Siqueira Mayese, Luis Otávio de Angeles Dias, João Pedro Peters Barbosa, Matheus Rosa Nascimento, Ahda Pionkoski Grilo Pavani, ROMAN KUIAVA, EDUARDO NOBUHIRO ASADA, Claudio Teixeira Junqueira, João Carlos C. Gonzaga

Resumo

Os sistemas elétricos de potência enfrentam novos desafios operacionais devido à crescente utilização de geradores interfaceados por conversores (GICs) a partir de fontes renováveis (FRs), como eólica e solar. Nesse contexto, o subsistema Nordeste (NE) do Sistema Interligado Nacional se destaca, com uma elevada penetração de GICs e com projeções de expansão significativa na próxima década. No entanto, estudos relacionados à redução da inércia equivalente e à estabilidade de frequência nesse subsistema, devido à sua complexidade, demandam elevado esforço computacional. O desenvolvimento de um modelo de ordem reduzida que permita avaliar o comportamento dinâmico de sistemas com alta penetração de GICs torna-se, portanto, uma ferramenta estratégica. Nesse sentido, este artigo apresenta os mais recentes avanços na construção de um sistema-teste baseado no subsistema NE, com foco na parametrização dos modelos dinâmicos dos agregados de parques eólicos desse sistema. Para isso, este trabalho propõe a utilização de modelos genéricos desenvolvidos pelo Western Electricity Coordinating Council, os quais possibilitam a simulação aproximada do comportamento dinâmico de parques

eólicos (PEs) de diferentes fabricantes e tecnologias. A metodologia proposta envolve a estimação dos parâmetros desses modelos por meio de um processo de otimização, iniciando com uma análise de sensibilidade para identificação dos parâmetros mais relevantes, seguida da aplicação do Algoritmo Diferencial Evolutivo para estimação desses parâmetros. Os resultados indicam que os modelos genéricos reproduzem qualitativamente a dinâmica dos agregados de PEs, embora apresentem limitações para reproduzir dinâmicas específicas induzidas pelos modelos dos fabricantes.

Perguntas e Respostas

1- Porque o sistema de referência baseou-se no sistema reduzido juntamente com os modelos originais dos fabricantes de aerogeradores (parques eólicos) ? Porque a referência não foi a resposta do modelo completo da rede no Anatem?

O sistema-teste adotado na execução deste trabalho é um sistema reduzido de 224 barras baseado no subsistema Nordeste e consiste em um benchmark IEEE para estudos de estabilidade de frequência. Dada essa característica, no processo de redução, os autores optaram por transformar as interconexões do subsistema Nordeste com os demais subsistemas do Sistema Interligado Nacional (SIN) em barras com injeção de potência constante (do tipo PV). Dessa maneira, tais interconexões não correspondem fielmente aos comportamentos dinâmicos do SIN frente a perturbações.

Portanto, se fosse considerado o SIN completo para a obtenção dos sinais de referência no processo de parametrização dos aglomerados de parques eólicos, haveria a inclusão da dinâmica das interconexões com as demais regiões do sistema. Nesse formato, a construção do modelo de referência estaria em desacordo com a hipótese de modelagem adotada para o sistema-teste, dificultando a comparação das respostas.

Por fim, ressalta-se que a opção pela inclusão dos modelos originais de fabricantes dos aerogeradores no sistema reduzido garante maior coerência analítica ao estudo, preservando o alinhamento com as premissas estabelecidas na elaboração do sistema-teste empregado no artigo.

2- No item 3.3 os autores se referem à adequação dos modelos dinâmicos dos fabricantes de aerogeradores (parques eólicos) após a ocorrência de agosto de 2023. Pode o modelo simplificado ser útil neste processo?

Historicamente, os modelos de geradores eólicos disponíveis no mercado para estudos dinâmicos de estabilidade transitória são desenvolvidos pelos próprios fabricantes, especificamente para cada equipamento. Portanto, apresentam uma natureza proprietária e comercial, com especificidades voltadas ao atendimento do código de rede ao qual estão vinculados. Aos usuários e demais agentes de um sistema elétrico de potência, os detalhes de implementação são ocultados por questões confidenciais, resultando, muitas vezes, em modelos do tipo black-box.

Diante desse cenário, ao longo dos últimos anos, foram desenvolvidas iniciativas para construção de modelos genéricos, independentes e não proprietários, capazes de representar diferentes geradores eólicos baseados em tecnologias semelhantes.

Essas iniciativas têm como premissa padronizar a modelagem, facilitar a adequação das respostas dos geradores e permitir a intercambialidade entre diferentes pacotes de software e sistemas. Na execução deste trabalho, foi adotado o modelo genérico do tipo 3 (fase 2) produzido pelo Conselho de Coordenação de Eletricidade do Ocidente (Western Electricity Coordinating Council - WECC), resultante desses esforços.

Nesse contexto, observa-se uma tendência global de adoção crescente desses modelos genéricos por fabricantes e desenvolvedores de software. Atualmente, pacotes de software comerciais como o PSS®E (Power System Simulator for Engineering), da Siemens PTI, e o PSLF® (Positive Sequence Load Flow), da General Electric Company, já incorporam modelos genéricos validados para diversas marcas de geradores eólicos.

Embora os modelos genéricos ofereçam flexibilidade e permitam a equivalência entre diferentes tecnologias, é importante ressaltar que eles apresentam certas simplificações, o que dificulta a representação de alguns comportamentos transitórios observados na resposta dos modelos de fabricantes. Além disso, é fundamental considerar que os modelos proprietários de geradores eólicos contêm malhas de controle específicas para atender aos requisitos dos códigos de rede aos quais estão vinculados. Cada código de rede possui particularidades que, muitas vezes, não estão contempladas nos modelos genéricos.

Por isso, não se deve esperar que um modelo genérico, aplicado sem ajustes, consiga atender integralmente às exigências regulatórias da mesma forma que um modelo proprietário. Assim, desde que devidamente ajustados, os modelos genéricos representam uma base promissora e versátil, que pode ser ajustada e aprimorada para atender a requisitos específicos, como os dos códigos de rede vigentes.

3- Na figura 3c os autores colocam que a resposta da variação de frequência entre ambos modelos é semelhante. Podem explicar a semelhança?

A semelhança observada refere-se ao aspecto qualitativo das curvas. De fato, do ponto de vista quantitativo, existem diferenças entre os resultados, e essas discrepâncias decorrem da natureza dos modelos utilizados. Os modelos genéricos aplicados para representar os aerogeradores utilizam simplificações e não contemplam blocos específicos que os fabricantes desenvolvem para caracterizar de forma mais precisa a resposta dinâmica do gerador.

Essa ausência de blocos específicos implica que os modelos genéricos não são capazes de reproduzir certas dinâmicas exigidas pelos códigos de rede, as quais são geralmente bem representadas nos modelos proprietários dos fabricantes. Assim, a resposta obtida com modelos genéricos tende a reproduzir apenas o comportamento do sistema de forma aproximada, sem capturar todas as nuances que os modelos detalhados são capazes de representar.

Cabe ressaltar que a inclusão desses blocos proprietários extrapolaria o escopo do estudo, cujo objetivo é justamente analisar a parametrização de modelos genéricos. Portanto, a semelhança apresentada é qualitativa e esperada dentro da proposta metodológica, ao passo que as diferenças quantitativas refletem as simplificações

inerentes ao uso de modelos genéricos.

Título - Análise de desbalanço de impedâncias em bancos de transformadores monofásicos operando em paralelo devido a condição de troca de uma das fases – um estudo de caso.

Entidade(s) - TRACTEBEL ENGINEERING LTDA, ELEC NOR DO BRASIL LTDA

Autor(es) - Renato Marques da Silva Rodrigues, FIEL RIBEIRO MATOLA FILHO, Matheus Garcia Assis

Resumo

Em uma subestação do Sistema Interligado Nacional foi necessário a troca de uma das fases de um banco de transformadores monofásicos 230/69-13,8 kV por um novo equipamento de características similares. Contudo, após a entrada em operação dessa nova máquina, observou-se uma corrente circulante pelo neutro deste banco de transformadores capaz de sensibilizar as proteções associadas a este equipamento.

Uma vez constatada essa corrente circulante pelo neutro do transformador, este trabalho se dedicou a avaliar o desbalanço de corrente entre fases na condição de regime permanente em diferentes cenários de operação deste equipamento. Também foi avaliada a variação da corrente de neutro para a condição de aplicação de curto-circuito no terminal de alta e de baixa do transformador.

Na sequência, buscou-se avaliar alternativas que pudessem minimizar a corrente circulando no neutro. Para tal, foi verificado os efeitos da inserção de uma reatância no neutro do transformador, a qual teve seu valor ôhmico variado para permitir a análise da sua influência na corrente circulante. Uma segunda solução avaliada foi a inserção de uma reatância em série com uma das fases do transformador.

Posteriormente, foi avaliada a variação do nível de curto-circuito para as barras de alta e baixa do transformador quando considerada uma das proposições estudadas. O intuito foi de verificar os possíveis impactos do desbalanço de impedâncias e das soluções propostas na presença de defeito trifásico e monofásico.

Por fim, são apresentadas as conclusões obtidas a nível das análises desenvolvidas, bem como as definições a nível de projeto.

Perguntas e Respostas

1- Os autores não mencionaram claramente a razão da substituição de um transformador do banco trifásico. Consideramos esta razão importante pois o mesmo pode ocorrer com outras concessionárias em outras subestações
Em determinado momento de operação da subestação, ocorreu um sinistro em uma das fases do segundo banco de transformadores. Isto resultou na necessidade de substituição do equipamento.

Infelizmente, não obtivemos maiores detalhes do que levou à ocorrência.

2- O elevado valor da corrente de neutro do transformador tem alguma implicação na proteção do banco de transformadores? Por exemplo relés de sobrecorrente 50-N ou 51-N ?

Sim, verificou-se que uma corrente circulante pelo neutro do segundo banco de transformadores era capaz de sensibilizar as proteções intrínsecas do transformador, neste caso, ocorreu a atuação da função 51N na baixa tensão (69 kV) do transformador.

3- Na alternativa de inserção de reatâncias em série com as fases do transformador foram verificadas variações significativas da queda de tensão no mesmo em regime permanente? Considerando variados carregamentos possíveis?

Sim. Observou uma variação significativa da queda de tensão sobre as reatâncias quando variado o carregamento. Os maiores valores de queda de tensão ocorrem para os casos pesados (3,405 kVrms no lado de 230 kV e 1,100 kVrms no lado de 69 kV). Já para os casos leves os valores de queda de tensão foram da ordem de 0,640 kVrms para o lado de 230 kV e 0,207 kVrms para o lado de 69 kV.

Título - Modelagem de Transformadores no ATPDraw: Precisão e Complexidade

Entidade(s) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, Operador Nacional do Sistema Elétrico

Autor(es) - Herbert Farias de Miranda Filho, Vicente Ribeiro Simoni, Marcos Andre de Almeida da Silva, João Pedro Rego Carvalho

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa de quatro modelos amplamente utilizados na representação computacional de transformadores com múltiplos enrolamentos: polígono completo, polígono em estrela, cascata e estrela. A modelagem desses equipamentos é essencial para estudos de regime permanente, curto-circuito e transitórios eletromagnéticos, especialmente frente ao aumento da participação de fontes renováveis no sistema elétrico brasileiro, onde transformadores com quatro ou mais enrolamentos são comuns.

Foram considerados aspectos técnicos e práticos, como o grau de liberdade dos modelos, sua fidelidade na representação dos acoplamentos mútuos e a complexidade de implementação. Os modelos por polígono completo e por polígono em estrela apresentaram maior precisão, devido à sua capacidade de representar todas as impedâncias de transferência entre pares de enrolamentos, exigindo, entretanto, dados completos de ensaios de curto-circuito. Já os modelos em cascata e estrela, embora mais simples e viáveis quando há escassez de dados experimentais, apresentaram menor acurácia, principalmente nas impedâncias associadas aos enrolamentos terciários.

Foram realizadas simulações comparativas entre os valores obtidos e os dados reais de ensaio de transformadores com quatro e cinco enrolamentos, as quais evidenciaram que, quando disponíveis, os modelos mais completos são preferíveis. No entanto, os modelos simplificados podem ser úteis em estudos preliminares ou quando a precisão extrema não é necessária.

Perguntas e Respostas

1- Os autores poderiam explicar melhor como foram obtidos os erros das tabelas 3, 4 e 5? através de comparações em regime permanente? se em situação de curto- circuito ? Ou com relação à resposta transitória?

Os resultados mostrados nas tabelas 3 a 6 foram obtidos tanto via ensaio de curto-circuito em ambiente computacional, quanto pelas suas equações mostradas no tópico 2. Os resultados obtidos foram coesos entre si.

2- Os autores podem citar quais os tipos de simulação e estudos estão sendo realizados atualmente com transformadores com quatro enrolamentos ou mais?

Em virtude do grande penetração de gerações renováveis no Brasil, transformadores com mais de 3 enrolamentos vem sendo cada vez mais encontrado nas subestações coletoras dessas centrais de geração. Dessa forma, todos os estudos que são necessários para dimensionar tais equipamentos e comprovar os requisitos mínimos exigidos pelos procedimentos de rede para acesso ao SIN tem a necessidade da modelagens desses transformadores. Como exemplo, podemos citar: Estudo de curto-circuito, estudo de proteção e seletividade, estudo de energização de transformador, estudo religamento de linhas de transmissão (sendo este de linhas na sua primeira vizinhança) e estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

3- Foi verificado se os modelos de transformadores descritos neste IT apresentam boa estabilidade numérica no cálculo de transitórios?

Nenhuma avaliação quanto a sua resposta a fenômenos transitórios foi realizada frente ao escopo deste IT, estando tais avaliações ainda em desenvolvimento. Entretanto, como já apontado pela atual literatura, modelos que necessitem da criação de nós fictícios e/ou que resultem em valores negativos de resistência/reatância em suas impedâncias tendem a apresentar problemas numéricos.

Título - Uma abordagem sobre os Efeitos Adversos e Benéficos de Capacitores em Série como Suporte de Potência Reativa na Partida de Motores

Entidade(s) - GSI ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Autor(es) - NELSON CLODOALDO DE JESUS

Resumo

Este informe técnico apresenta inicialmente os conceitos básicos sobre a compensação série de reativos, direcionada aos sistemas elétricos de distribuição. Serão descritos os efeitos da aplicação dessa técnica, no que tange aos benefícios diretos, tais como, redução das quedas de tensão, melhoria da regulação e perfil de tensão, redução do impacto de flutuações de tensão e VTCDs, devido ao suporte de potência reativa durante partidas de motores. Nesse particular, as partidas de motores podem causar potenciais transtornos à operação dos sistemas elétricos de distribuição e aos consumidores finais, pois nessas condições, demandam elevadas correntes e potências reativas durante o período do processo de partida, especialmente, quando conectados em linhas longas e cargas concentradas nos trechos finais dos alimentadores. Desse modo, a compensação série se caracteriza como uma das formas mais propícias para mitigação desse tipo de perturbação. Por outro lado, deve-se considerar também os possíveis efeitos adversos, sobretudo, em relação as oscilações subsíncronas que podem causar instabilidades e variações periódicas no sistema, sendo um dos grandes desafios sobre o referido tema. As informações e resultados de projetos desenvolvidos com a instalação de bancos de capacitores em série serão apresentados, como forma de difundir essa alternativa destinada à melhoria da qualidade da energia elétrica.

Perguntas e Respostas

1- A aplicação do capacitor série no tronco alimentador de MT é recomendada apenas para alimentadores que suprem uma carga contendo grandes motores do meio para o final do alimentador? Como ficaria a tensão / suporte de reativos com a presença em larga escala de MMGD na BT ao longo do alimentador?

A aplicação da técnica de compensação série na distribuição não está restrita somente a alimentadores com motores do meio para o final do alimentador, mas com base em experiências práticas essa é uma configuração onde se obtêm os melhores resultados de desempenho. Essa característica de alimentador é especialmente atrativa para uma compensação do tipo série.

Deve-se ser ressaltado que os efeitos do capacitor em serie depende diretamente da corrente da carga e de seu fator de potência. Num dos referidos casos de aplicação apresentados no Informe Técnico, o capacitor série opera em um sistema com geração fotovoltaica no final do alimentador, desde a sua entrada em operação. O desempenho do capacitor série em termos do perfil de tensão e suporte de reativos com a presença em larga escala de MMGD na BT ao longo do alimentador não foi considerado, mas tais efeitos influenciarão a rede de MT, em termos da corrente passante pelo capacitor série e do respectivo fator de potência. Na medida em que se tenha mais aplicação de capacitores em série na distribuição, tais efeitos e impactos poderão ser compreendidos, mas um ponto importante a destacar é que a aplicação da compensação série aumenta a potência de curto-circuito do sistema a partir do ponto de instalação e nesse caso, tem-se uma tendência de aumento da margem de operação do sistema, inclusive para a entrada de novas cargas não-lineares.

2- Não ficou clara a explicação das figuras 10 e 11. Em quais casos o fenômeno transitório é estável e em quais não são?

Em relação as Figuras 10 a 12, esclarecemos que, quando o sistema tende a ser instável, com probabilidades de ressonâncias, os pontos dos eixos X e Y tendem a estar contidos dentro das envoltórias. Por outro lado, o sistema tende a ser estável quando os valores dos pares das coordenadas e abscissas estão fora dos “diagramas circulares”, conforme melhor detalhamento na seguinte referência: [2] "Análise Paramétrica de Motores em Condições Subsíncronas para Sistemas Elétricos de Distribuição com Compensação Série", XV CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, São Luís, MA, 2023.

3- Não ficou clara a parte esquerda da figura 14. Aparentemente para a rede sem compensação série (curva vermelha) há uma oscilação de correntes ao longo do alimentador. Isso corre em regime permanente ou durante a partida de motor?

Esclarecemos que na Figura 14 tem-se dois exemplos de aplicação de sistemas com compensação série, sendo o primeiro no Estado do Rio Grande do Sul [8] e outro no Estado de São Paulo [9].

No primeiro gráfico a curva em vermelho mostra uma tendência em condição próxima a instabilidade, quando alguns dos motores entram em operação, resultando em quedas de tensão que acabam propiciando outros desligamentos durante esse período transitório, indicando que o sistema se encontra próximo ao seu limite de operação em termos de carregamento e perfil das tensões. A curva em

azul no mesmo gráfico ilustra a aplicação no mesmo alimentador do capacitor série em um ano seguinte, onde comprovou-se que não ocorreram as mesmas variações das correntes no alimentador, com uma melhoria significativa de seu desempenho em termos transitórios e em regime permanente.

No segundo gráfico da Figura 14, a direita, tem-se o resultado de medição de um outro alimentador de distribuição, onde pode ser verificado claramente as respostas instantâneas desse tipo de técnica de compensação, pois antes da entrada em operação do banco de capacitores em série, a medida em que as correntes aumentavam, observam-se quedas proporcionais ao aumento da corrente, mas após a entrada do capacitor série, com um comportamento completamente oposto ao anterior, pois nesse caso, quando do aumento das correntes de carga, as tensões também se elevam instantaneamente, mostrando a interessante característica peculiar desse tipo de compensação.

Para um melhor detalhamento consultar as seguintes referências:

[8] Figueiredo, C.E.C.; Jesus, N. C.; Silveira, M.; Quadros, L.; Santos, G.; Compensação Série em Sistemas Radiais de Média Tensão. Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI). Curitiba, 2016.

[9] Cláudio, C.V.; Rissi, G.F.; Figueiredo, C.E.C. Jesus, N.C.; Ahn, S.U.; Suzuki, M.; Duarte, L.M.; Cogo, J.R.; Jesus, W.S.; Teixeira. M.D.; Garcia, F.R.; Almeida, P.R.; "Systematic Application of Series Compensation in Distribution Networks with Control and Protection", 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rome, Italy, 2023, pp. 3839-3843, doi: 10.1049/icp.2023.0558.

Título - Desempenho dinâmico de redes elétricas com alta concentração de IBRs: Análise das regiões do Seridó Paraibano e estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

Entidade(s) - Operador Nacional do Sistema Elétrico

Autor(es) - Eliamare Alves, Thiago Oliveira Costa, Felipe Diógenes de Mendonça, Dilton Serra Seca Vasconcelos Filho, Nathalia de Souza Feitosa, Fabricio Andrade Mourinho, João Pedro Rego Carvalho

Resumo

A transformação na matriz elétrica do Nordeste vem sendo fortemente apoiada pelo crescimento expressivo das fontes renováveis variáveis conectadas por inversores (Inverter-Based Resources – IBR), as quais não agregam consigo características naturais dos geradores síncronos convencionais, como potência de curto-circuito e inércia. Nesse contexto, os desafios à estabilidade de tensão, tradicionalmente associados às cargas no Sistema Interligado Nacional (SIN), se mostraram relevantes também na necessidade de transmitir energia a longas distâncias a partir de fontes distribuídas e remotas. A variabilidade da geração renovável e a falta de suporte de potência reativa imediata podem dificultar a estabilização da tensão, intensificando o risco de colapsos de tensão em situações extremas, como contingências ou elevada geração. Este trabalho apresenta dois casos de estudo do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), realizados com o intuito de observar os fenômenos discutidos nesse tipo de cenário e a crescente complexidade imposta à segurança operativa. Nos referidos estudos, são apresentadas as particularidades observadas no desempenho dinâmico do sistema diante da alta penetração de fontes conectadas por inversores e baixa potência de curto-circuito, com destaque aos problemas de colapso de tensão. No primeiro caso, referente à região do Seridó

paraibano, essas questões são observadas no sistema de uma forma mais localizada, com características específicas da área. Por outro lado, no segundo caso, que abrange os estados do Ceará e Rio Grande do Norte, os desafios são verificados em um contexto mais amplo, envolvendo uma extensa região, com múltiplas subestações operando em diferentes níveis de tensão e com a atuação de elementos de controle de tensão.

Perguntas e Respostas

1- No item 2 do IT é colocada a afirmação que em sistemas com baixo valor desses índices, tem-se como uma das maiores características a alta sensibilidade da tensão às variações das injeções ou absorções de potência, resultando em mudanças rápidas na tensão conforme a potência reativa é injetada ou absorvida, tornando o sistema mais vulnerável a problemas como instabilidade de tensão. Pergunta-se quais as fontes de potência reativa que foram consideradas nos estudos?

Foram considerados todos os equipamentos disponíveis do SIN com capacidade de suporte de potência reativa, por exemplo, compensadores estáticos, reatores, capacitores, usinas EOL/UFV e máquinas síncronas disponíveis na região. No entanto, o principal objetivo do IT foi destacar a característica dinâmica de tensão de uma rede com grande volume de IBRs, sendo estas as principais fontes de suporte dinâmico de potência reativa.

2- Nas conclusões é dito que entender o comportamento dinâmico de sistemas com alta penetração de IBRs é essencial para garantir o pleno desenvolvimento das fontes renováveis e o aproveitamento máximo da sua utilização no SIN. Neste sentido tentou-se modificar o comportamento dinâmico nas simulações supondo-se, por exemplo, que os IBRs tivessem característica de GMF em vez de GFL?

O objetivo do IT foi realizar um estudo de caso de duas regiões reais do SIN, abordando suas características atuais. Sendo assim, foram consideradas as características de cada um dos equipamentos na base de dados de transitórios eletromecânicos disponibilizada pelo ONS, a partir das informações dos proprietários dos equipamentos. No caso do Brasil, as usinas eólicas do tipo full-converter e as usinas fotovoltaicas são conectadas ao sistema por meio de inversores seguidores de rede (Grid Following - GLF).

No conhecimento dos autores, não existem ainda, de forma comercial no Brasil, usinas EOL/UFV conectadas por meio de inversores formadores de rede (Grid Forming - GFM). Por esse motivo, não foi realizada nenhuma alteração no controle dos equipamentos a fim de simular esse comportamento. No entanto, apesar de não ter sido realizada essa avaliação, é esperado, para as regiões analisadas, que a característica GFM tenha possibilidade de trazer benefícios para o comportamento dinâmico dessas regiões. No entanto, uma análise mais aprofundada teria que ser realizada que não foi alvo desse IT.

3- Olhando-se o problema, bem colocado no IT, à respeito de diversas regiões do SIN que são extremamente vulneráveis a contingências e variações de tensão. Quais poderiam ser as soluções para melhorar o desempenho dinâmico destas regiões? Mais LTs? Controladores de tensão? BESS?

A solução depende das características particulares de cada região e deve ser objeto de um estudo específico, a fim de se obter a solução mais adequada para cada

problema. As quais, perpassam uma avaliação técnica, financeira e de viabilidade de implantação. Espera-se, no entanto, que as soluções sejam uma combinação particular de linhas de transmissão, que permitem dar mais capacidade de transferência de potência entre as regiões, e fontes de controle dinâmico de tensão, que possibilitam mais flexibilidade e suporte dinâmico em contingências, sendo Compensadores Síncronos uma das soluções mais eficientes para cenários de grande inserção de IBRs. Em relação ao BESS, seus benefícios são esperados se associado a ele uma característica Grid Forming, pois introduz a bateria a possibilidade de controle inerente de tensão, podendo ter benefícios em sua utilização.

Considerando as regiões analisadas, para o sistema do Seridó Paraibano, uma nova LT em 500 kV está prevista, que se trata da LT 500 kV Bom Nome II – Santa Luzia II. A nova linha permitirá aumentar a capacidade de transferência de potência entre as regiões e dar mais confiabilidade. Para a região do Rio Grande do Norte, como forma emergencial, foram indicados compensadores síncronos para mitigar os problemas de colapso de tensão. A medida vai promover melhora dos índices de curto-circuito e melhora do desempenho do sistema em contingências. Sendo assim, as soluções são dadas de acordo com as necessidades e características específicas de cada região.

Título - Investigação sobre a Influência de Aspectos de Controle na Resposta Transitória de Gerações Grid-Following e Grid-Forming Frente a Cenários de Curtos-Circuitos Próximos

Entidade(s) - Universidade Federal da Paraíba

Autor(es) - Jean Filipe Santana de Melo, Felipe Vigolvinho Lopes, Camila Seibel Gehrke, Ronaldo Ribeiro da Costa Neto, Pedro Henrique de Moraes Martins

Resumo

Apresentam-se neste trabalho estudos sobre a influência dos controles empregados em Inverter-Based Resources (IBRs) no que se refere à resposta dessas gerações frente a curtos-circuitos nas linhas de transmissão de interconexão com o sistema interligado. Para tanto, diferentes controles são implementados e simulados para avaliar respostas de IBRs básicas do tipo Grid-Following (GFL) e Grid-Forming (GFM), destacando as particularidades das respostas e esclarecendo a capacidade de mitigação de desafios da proteção quando do uso de cada um dos tipos de IBR avaliados. Dentre os pontos mais críticos analisados, destacam-se questões relacionadas à instabilidade dos Phase-Locked Loops (PLLs) em comparação com o desempenho dos controles de frequência por inclinação do tipo droop, bem como questões associadas a aspectos circuitais de interligação da IBR que podem ditar as características das respostas a faltas de IBRs, questões de controle, sejam de unidades GFL, ou mesmo GFM, e ainda questões sobre a influência de estratégias de limitação de corrente, especificamente nas IBRs GFM. Dos resultados obtidos, fica evidente que o uso de tecnologias GFM poderá favorecer a proteção em diferentes aspectos, porém, não totalmente, fazendo-se necessário o emprego de controles adequados e de dimensionamentos apropriados dos conversores para que seja possível aproximar sua resposta às de geradores síncronos convencionais.

Perguntas e Respostas

1- Poderiam os autores explicar claramente onde são medidas as correntes IA, IB, IC e as tensões VA, VB e VC mostradas nas figuras 3 a 9? É no PCC na saída dos inversores? Ou em outro ponto da rede?

Dado que o foco do estudo é avaliar os impactos na resposta de curto-circuito nas linhas de interconexão, a medição de corrente e tensão está sendo realizada no terminal local da LT 500 kV, isto é, no lado da geração interfaceada pelo inversor.

2- Ainda com relação a pergunta anterior caso tenha sido respondido que as correntes são medidas no PCC, poderiam os autores explicar como é que as correntes das fases A, B, mostradas na figura 3 a), são muito semelhantes e a corrente da fase C um pouco diferente? Se o curto aplicado no meio da LT de AT é da Fase A para Terra?

No caso da falta monofásica AT aplicada em 50% da LT de 500 kV (Figura 3), de fato verifica-se que as correntes das fases A e B apresentam magnitudes semelhantes, enquanto a fase C possui uma resposta ligeiramente diferente. Considerando a baixa contribuição de corrente de falta das IBRs e, em virtude do enrolamento delta no primário do transformador de média tensão, não existe contribuição de sequência zero proveniente do terminal da IBR. Assim, o resultado apresentado é alinhado com a literatura, dado que, no caso de faltas monofásicas à terra, há a predominância de componente de sequência zero que advém da rede através dos aterramentos dos transformadores (LOPES et al., 2024). Desta forma, como pode ser observado na Figura 3a, as correntes das fases aumentam de magnitude e se alinham entre si, produzindo uma assinatura típica de corrente nesses terminais.

Referência:

F. V. Lopes, M. J. B. B. Davi, M. Oleskovicz, A. Hooshyar, X. Dong e A. A. A. Neto, "Maturity Analysis of Protection Solutions for Power Systems Near Inverter-Based Resources," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 39, no. 5, pp. 2630-2643, out. 2024, doi: 10.1109/TPWRD.2024.3420421.

3- Num sistema não convencional com IBRs, como mostrado no IT, não é de estranhar que a componente das correntes de curto circuito nos IBRs seja limitado pelo controle de corrente caso contrário os IGBTs podem queimar. Portanto peço para explicarem a afirmação contida na introdução: "fica evidente que o uso de tecnologias GFM poderá favorecer a proteção em diferentes aspectos, porém, não totalmente". O que significa "favorecer a proteção"? Porque o GFM não o faz?

Quando afirmamos que o uso de tecnologias GFM pode "favorecer a proteção", estamos nos referindo ao fato de que, em comparação com IBRs GFL, os inversores GFM apresentam sinais de corrente e tensão mais estáveis durante as faltas. Isso reduz problemas típicos dos PLLs, como excursões de frequência e instabilidades de sincronismo, que podem comprometer a atuação correta de proteções baseadas em tensão e corrente (por exemplo, proteção de distância).

Entretanto, esse favorecimento não é total porque o limitador de corrente ainda se faz presente também nos GFM. Ou seja, a amplitude da contribuição de corrente de curto-circuito permanece reduzida, diferindo do comportamento típico de geradores síncronos. Essa limitação reduz a sensibilidade de proteções convencionais e pode comprometer a seletividade.

Assim, soluções mais robustas podem envolver controles adicionais (como injeção de correntes de sequência positiva/negativa ou inércia virtual), além de esquemas de proteção adaptados à nova realidade dos sistemas com alta penetração de IBRs.

Título - Análise de Transitórios Eletromagnéticos na Integração dos Transformadores dos Compensadores Síncronos ± 300 Mvar ao Terminal Inversor do Bipolo HVDC ± 800 kV Xingu-Estreito

Entidade(s) - Operador Nacional do Sistema Elétrico

Autor(es) - Antonio Ricardo de Mattos Tenorio, Karina Stockler Herszterg

Resumo

Este artigo analisa os fenômenos de transitórios eletromagnéticos decorrentes da integração de transformadores elevadores de Compensadores Síncronos (CS) ao terminal inversor do Bipolo HVDC ± 800 kV Xingu-Estreito, na SEC (subestação conversora) Estreito. Três compensadores com capacidade de -300 (indutivo)/ $+300$ (capacitivo) Mvar, com transformadores de $500/13,8/13,8$ kV, foram conectados à SEC 500 kV Estreito em 2024 para melhorar a controlabilidade da tensão e a confiabilidade operativa do sistema.

A metodologia utilizada neste trabalho envolveu análises de impedância harmônica, $Z()$, para identificar as configurações críticas do sistema no estudo de energizações dos transformadores elevadores, considerando diversas combinações de filtros harmônicos e bancos de capacitores. As simulações focaram em cenários com poucas unidades geradoras despachadas na área da SEC Estreito, em condições de rede íntegra e com indisponibilidade N-1 de componentes conectados à SEC Estreito.

Os resultados mostraram que as manobras de energização, para os casos considerados, não apresentaram severidade significativa devido a dois fatores principais: o uso de resistores de pré-inserção (RPI) de 450Ω /fase nos disjuntores e o fortalecimento da SEC Estreito desde o comissionamento da SE Fernão Dias em 2020, resultando em impedâncias harmônicas de baixa ordem de valores baixos.

As máximas sobretensões registradas foram moderadas, com valor máximo de $1,553$ pu no setor de 500 kV durante a energização do primeiro transformador com indisponibilidade da LT 500 kV Estreito-Jaguara. A corrente máxima de inrush atingiu $4,308$ pu, também considerada moderada.

O estudo concluiu que as energizações dos transformadores podem ser realizadas individualmente sem restrições de tensão até 550 kVef (máxima tensão operativa), independentemente da configuração de filtros harmônicos e bancos de capacitores do Bipolo Xingu-Estreito, na SEC Estreito. Recomenda-se apenas que a energização do segundo e terceiro transformadores ocorra com os anteriores já energizados e sob carga.

Perguntas e Respostas

Podem os autores explicarem a necessidade da conexão dos 3 compensadores síncronos (-300; +300) MVar nesta subestação?

A entrada em operação dos 3 compensadores síncronos ± 300 Mvar se destina a prover uma maior controlabilidade da tensão local, além de proporcionar maior confiabilidade e flexibilidade operativa para o sistema, em cenários críticos de elevada importação de energia pela região Sudeste. Por ser uma estação conversora, a entrada em operação desses compensadores também aumenta a

potência de curto-circuito da SEC Estreito melhorando o desempenho dinâmico da região e reduzindo a probabilidade de falhas de comutação do Bipolo de HVDC, +/- 800kV, Xingu-Estreito no terminal inversor de Estreito.

No item 3.0 afirma-se que os estudos foram realizados na condição de rede íntegra e com indisponibilidade de N-1 em relação aos componentes conectados à SEC 500 kV Estreito. Podem comentar exatamente o que consiste a condição N-1 desses componentes? Quais as contingências consideradas?

A indisponibilidade simples, também conhecida como critério N-1, é ausência de um elemento do sistema de transmissão, podendo ser uma linha de transmissão, transformador, gerador, etc. As indisponibilidades N-1 consideradas foram: LT 500 kV Estreito – C. Paulista; LT 500 kV Estreito – Fernão Dias; LT 500 kV Estreito – Jaguará; LT 500 kV Estreito – Nova Ponte; LT 500 kV Estreito – Ribeirão Preto; e um transformador 500/345/13,8 kV da SE Estreito.

No item 3.0 há um parágrafo em que se comenta à respeito do cálculo da impedância harmônica visto do terminal onde ocorrerá a energização (valores limítrofes). Daí é mencionado os procedimentos de diversos países: Holanda, Irlanda e França. Pergunta-se: Há alguma norma internacional ou procedimento técnico internacional que busque padronizar estes procedimentos?

Não, que seja do conhecimento dos autores. Os sistemas de transmissão têm as suas especificidades dependendo das extensões territoriais e fontes de energias disponíveis. Outro ponto relevante é o uso de transmissão aérea ou de cabo isolado subterrâneo. Isso tudo tem muita influência nas ressonâncias de baixa ordem.

Título - Descrição Sobre os Efeitos Transitórios Durante Manobras de Disjuntores na Operação de Acionamento de Motores

Entidade(s) - GSI ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Autor(es) - Ahmad Muhammad Laurentino, NELSON CLODOALDO DE JESUS, Adriano Garufe Nogueira, Jesus Daniel de Oliveira, Gustavo Rodrigues dos Santos, Thales Fernandes Dias, Thiago Fernandes Dias

Resumo

Este Informe Técnico apresenta uma análise dos efeitos transitórios observados durante manobras de disjuntores na partida de motores de indução trifásicos de 13,8 kV, em instalações industriais, com ênfase nos impactos dessas oscilações transitórias sobre as correntes e tensões de partida, bem como nos dispositivos de proteção e componentes relacionados. A análise abrange dois tipos específicos de motores: um motor com rotor bobinado, cuja partida é realizada por meio de reostato líquido e controlada por cascata subsíncrona, e um segundo motor de mesmo nível de tensão, cuja partida ocorre por autotransformador. Esses métodos distintos de acionamento são relevantes para entender as diferentes características transitórias observadas em cada motor. As medições realizadas revelaram a ocorrência de picos de corrente e sobretensões transitórias, com foco especial no fenômeno de pré-ignição (pre-strike) durante a energização dos disjuntores.

Para a investigação dos efeitos transitórios, foram realizadas medições diretas no alimentador dos motores, registrando com alta precisão as variações de corrente e tensão no instante das manobras de disjuntores. Essas medições revelaram que a

ocorrência de pre-strikes, ou pre-ignições, antes do contato completo dos disjuntores, provoca picos de corrente de alta magnitude que superam os níveis normais de operação e afetam diretamente a integridade dos sistemas de proteção e dos próprios motores. Esse comportamento resulta em oscilações transitórias de alta amplitude e curta duração, que aumentam os riscos de falhas nos componentes elétricos e eletromecânicos associados, além dos eventos relacionados às manobras de desligamentos e reignições (restrike)

Para complementar os dados obtidos, foram realizadas simulações no software ATPDraw, que validaram as observações experimentais e permitiram explorar o comportamento do sistema em condições transitórias. Adicionalmente, o estudo avaliou o desempenho dos para-raios com capacitores de surto, constatando limitações na configuração atual e propondo uma reconfiguração para mitigar os efeitos transitórios. Conclui-se que ajustes operacionais e reconfigurações nas proteções são essenciais para garantir a operação segura e confiável dos motores, considerando as particularidades de cada método de partida.

Perguntas e Respostas

As avaliações foram desenvolvidas para um caso estudo, no qual os componentes do sistema constituem condição particular.

Poderia comentar quanto à generalidade das conclusões do trabalho?

Embora o estudo tenha se baseado em um caso específico, envolvendo motores de média tensão operando em 13,8 kV com métodos de partida distintos (cascata subsíncrona e autotransformador), as conclusões podem ser estendidas a outras instalações industriais que apresentem características semelhantes. Os fenômenos analisados; como pré-ignições, reignições, supressão de corrente e sobretensões transitórias; são inerentes a manobras de disjuntores a vácuo em sistemas de média tensão, independentemente do tipo de motor ou setor. Assim, os resultados obtidos reforçam boas práticas de proteção e apontam a necessidade de revisão de dispositivos como para-raios e capacitores de surto, além da possível adoção de supressores do tipo RC, medidas que podem ser aplicadas de forma geral em ambientes industriais críticos para mitigar riscos de falhas. Portanto, mesmo que os valores exatos variem conforme a topologia de cada instalação, a essência das recomendações é válida para sistemas elétricos que envolvam grandes motores e manobras frequentes de disjuntores a vácuo.

Poderia desenvolver uma breve discussão sobre a qualidade dos resultados de simulação em relação àqueles dos testes experimentais?

No trabalho, as simulações foram desenvolvidas considerando parâmetros reais de projeto, dados de placa e dados típicos para eventos de manobras, de forma a reproduzir da forma mais fiel possível os fenômenos transitórios esperados. Apesar de não terem sido realizados testes experimentais diretos para este caso específico, os efeitos simulados — como reignições, sobretensões e oscilações — são condizentes com medições de qualidade de energia em campo, obtidas com instrumentos com taxas de amostragem da ordem de 1 MHz, aplicados em instalações industriais reais. Esses registros reforçam que os resultados simulados reproduzem bem a dinâmica física das manobras de disjuntores a vácuo em acionamentos de motores de média tensão. Recomenda-se, contudo, que projetos específicos complementem os estudos por simulação com medições de alta resolução no sistema real, garantindo maior precisão na definição de estratégias de proteção e mitigação.

No último parágrafo das conclusões se coloca a necessidade de considerar o transitório como critério técnico de escolha ...em ambientes industriais críticos."

Esclareça o significado de "ambientes críticos".

No contexto do trabalho, "ambientes industriais críticos" referem-se a instalações em que a ocorrência de sobretensões transitórias, reignições ou pré-ignições durante manobras pode impactar diretamente a continuidade da operação, a vida útil dos equipamentos e a segurança de processos produtivos. Exemplos são processos contínuos de plantas de papel e celulose, data centers, refinarias, indústrias químicas, grandes sistemas de bombeamento, linhas de produção contínua e outras instalações onde paradas inesperadas podem gerar perdas significativas e riscos operacionais. Nesses casos, os efeitos transitórios devem ser considerados não apenas como critério técnico para a escolha e especificação de disjuntores e dispositivos de supressão, mas também para verificar a adequação do nível de isolamento dos transformadores e motores, evitando falhas prematuras e garantindo maior confiabilidade ao sistema elétrico, especialmente em instalações com transformadores a seco e motores de grande porte importantes aos processos críticos de produção contínua e sequencial.

No último parágrafo das conclusões se coloca a necessidade de considerar o transitório como critério técnico de escolha ...em ambientes industriais críticos."

Esclareça o significado de "ambientes críticos".

Título - ESTUDO DE CASO DO FENÔMENO DA AUTOEXCITAÇÃO NAS UNIDADES GERADORES DA UHE COLÍDER - PROBLEMAS E SOLUÇÕES

Entidade(s) - COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A.

Autor(es) - Douglas Paladine Vieira, Daniel Saito, JEAN RONIR FERRAZ RODRIGUES, Luciano Vasconcelos Antunes, Andre Leite Schaskos

Resumo

Durante a elaboração do estudo pré-operacional para entrada em operação da UHE Colíder (3x100 MW) foi identificado que a rejeição da LT de uso restrito que conecta a SE Colíder à SE Cláudia poderia resultar no fenômeno de autoexcitação das UGs.

O fenômeno identificado pode ocorrer quando da rejeição da LT 500kV Cláudia-Colíder (CLA/CLR), no terminal de Cláudia, resultando que toda a energia reativa acumulada na LT em vazio possa provocar um impulso de tensão, podendo alcançar 1,8pu (900 kV), superando a capacidade de abertura dos disjuntores (DJ) e, consequentemente, levando ao fenômeno da autoexcitação.

Dada a fase em que se identificou o problema (pré-operacional), a imposição de medidas estruturais poderia impedir a entrada em operação da usina, trazendo inúmeros prejuízos. Diante disto, medidas mitigatórias de riscos foram implantadas, permitindo a operação da usina.

Posteriormente houve a definição da solução estrutural, proposta e aprovada para a implantação de um reator de linha de 75Mvar para compensação reativa.

Adicionalmente, ações de contingência e um Sistema Especial de Proteção foram implementados buscando a segurança das UGs para o caso de perda do reator. O SEP consistiu em uma lógica adicional instalada na proteção da SE Colíder visando a redução do número de desligamentos da LT, atuando de forma seletiva para a perda do reator.

Com isto, o objetivo deste trabalho é apresentar as fases, desde a identificação do problema, modelagem e simulação, estudo de soluções operativas mitigatórias na fase pré-operacional, projeto e execução de solução estrutural, estudo e implantação de SEP para a LT.

Perguntas e Respostas

1- No item 3 c) é comentado que foi utilizado um sinal de transferência de disparo do terminal Claudia para o terminal Colider para evitar auto excitação. Pergunta-se como é implementada a transferência de disparo (carrier, microondas, etc), qual o tempo esperado de abertura do outro terminal?

2- No item 3 c) é comentado que foi utilizado um sinal de transferência de disparo do terminal Claudia para o terminal Colider para evitar auto excitação. Pergunta-se se este "transfer trip" tenderia a manobrar disjuntores na subestação Colidier exatamente no momento em que a autoexcitação estaria em curso?

3- Os autores podem explicar com maiores detalhes o que são as curvas azul e vermelha da figura 8 a) indicando também qual a manobra que as originou ?

Título - Desafios e Soluções em Transitórios Eletromagnéticos para Mitigar Riscos na Energização do Transformador Conversor do Back-to back Operando em Modo Stand-alone com a UHE Jirau

Entidade(s) - Operador Nacional do Sistema Elétrico

Autor(es) - Karina Stockler Herszterg

Resumo

Durante o período seco, de agosto a novembro, em razão das baixas afluências previstas, existe o risco de parada total das máquinas da UHE Santo Antônio, o que implica na indisponibilidade da geração do setor de 230 kV conectada diretamente ao sistema Acre e Rondônia (AC/RO) e da injeção de potência proveniente das conversoras Back-to-Back (BtB), formadas por dois blocos de 400 MW.

Todos os estudos de transitórios eletromagnéticos (TEM) vigentes para a recomposição do sistema Madeira consideram o sincronismo de unidades geradoras (UGs) na UHE Santo Antônio, tendo em vista que não era prevista sua indisponibilidade. Dessa forma, como a recomposição do BtB stand-alone com a UHE Jirau não foi critério do Projeto Básico dos BtB, tornou-se necessário realizar estudos complementares para minimizar o impacto das solicitações de manobra no sistema elétrico e no próprio transformador conversor.

Os estudos de TEM para energização de transformadores durante o processo de recomposição são extremamente complexos, pois visam resguardar a integridade

dos equipamentos submetidos à manobra em uma rede altamente degradada, não vislumbrada durante as etapas de Acesso e Projeto Básico, bem como também mitigar os impactos sistêmicos dessas manobras.

Nesse contexto, a energização dos transformadores conversores dos BtB sem a presença de um resistor de pré-inserção é um desafio adicional, visto que a magnitude das correntes de inrush pode ser agravada por fatores como fluxo residual dos transformadores, ressonâncias de baixa ordem não observadas em sistema íntegro, além da baixa potência de curto-circuito da rede que depende da sazonalidade das vazões do Rio Madeira. A solução original de manobra desses transformadores conversores foi a utilização de dispositivos de manobra controlada com estimativa de fluxo residual.

O artigo apresenta os desafios e as soluções utilizadas pelo Operador para as manobras de energização do transformador conversor do BtB e do transformador TF-13 525/230/13,8 kV da SE Coletora Porto Velho, durante o processo de recomposição da área do Madeira, considerando o BtB operando no modo stand-alone com a UHE Jirau [1].

Perguntas e Respostas

1- O primeiro parágrafo do IT (item Resumo) está de difícil compreensão. Compreende-se a questão da baixa afluência da usina de Santo Antônio, mas, não a indisponibilidade de geração do sistema Acre-Rondônia uma vez que indo-se adiante no IT há configurações de energização com UGs na usina de Samuel. Também não está clara a indisponibilidade do back to back uma vez que este cenário foi considerado nas energizações. Podem os autores explicar melhor?

2- Os autores podem explicar melhor a figura 6, principalmente 6 c) pois a energia dissipada pelos pára-raios aumentam no início do transitório e volta a aumentar entre 6 e 8 segundos após o início da manobra (sem que se perceba um aumento da sobretensão na figura 6a). Há alguma razão conhecida para este fenômeno?

3- Está um pouco difícil a compreensão da figura 2. Podem os autores caracterizar melhor quais as LTs, trafos e Ugs que foram consideradas em operação ?

Título - Diretrizes para a seleção de modelos de cabos subterrâneos para a análise de transitórios eletromagnéticos com ênfase na representação do efeito do solo

Entidade(s) - CENTRO FEDERAL DE EDUCACAO TECNOLOGICA DE MINAS GERAIS, Universidade Federal de Minas Gerais

Autor(es) - Naiara Figueiredo Duarte, Rafael Silva Alípio, Alberto Resende De Conti

Resumo
Este trabalho apresenta uma análise rigorosa da modelagem de cabos subterrâneos em estudos de transitórios eletromagnéticos, com ênfase na representação do solo. Avalia-se a modelagem de cabos baseada na teoria de linhas de transmissão, considerando a admitância do solo e a dependência da frequência da resistividade e

da permissividade elétricas do solo. Com base em expressões recentes propostas pelos autores para o cálculo da impedância e da admitância de retorno pelo solo e validadas por duas abordagens complementares também desenvolvidas pelos autores deste informe técnico, sendo uma modelagem eletromagnética rigorosa e outra experimental, os resultados nos domínios da frequência e do tempo demonstram que a simplificação da modelagem pode levar a erros significativos, sobretudo em solos de alta resistividade e em seções curtas de cabos subterrâneos. Além disso, desprezar a dependência em frequência dos parâmetros elétricos do solo pode resultar em respostas não conservadoras, especialmente em solos com altos valores de resistividade. Por fim, demonstra-se a aplicabilidade do modelo universal de linha (ULM), recentemente incorporado ao ATP, o qual permite simulações no domínio do tempo de sistemas multicondutores com parâmetros dependentes da frequência e sem a necessidade de desacoplamento modal. Com base nos resultados, o artigo propõe diretrizes práticas para a seleção do modelo mais adequado conforme as características do solo e da faixa de frequências do transitório analisado, evidenciando a necessidade de uma modelagem mais precisa sempre que resultados confiáveis sejam exigidos.

Perguntas e Respostas

Os autores poderiam descrever como tem sido a prática atual das avaliações com modelos de cabos subterrâneos para a análise de Transitórios Eletromagnéticos no setor elétrico nacional?

Atualmente, a prática predominante no setor elétrico nacional consiste no uso das formulações clássicas de parâmetros de cabos subterrâneos, implementadas internamente nas plataformas EMT mais utilizadas, como o Alternative Transientes Program (ATP). Essas rotinas, em geral, calculam a impedância de retorno pelo solo com base na formulação de Pollaczek ou em aproximações equivalentes, desprezando a admitância do solo e a dependência da frequência da resistividade e da permissividade elétricas. Essas simplificações são suficientes em solos de baixa resistividade e para fenômenos de baixa frequência, mas podem levar a erros significativos em condições mais críticas. Ressalta-se que, embora avanços recentes — como formulações que incorporam a admitância do solo e a representação rigorosa da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo — tenham possibilitado uma modelagem mais rigorosa de sistemas de cabos subterrâneos, tais recursos ainda não foram plenamente incorporados às plataformas comerciais de simulação de transitórios. Como consequência, permanecem incertezas na comunidade técnica quanto à formulação mais apropriada para o cálculo dos parâmetros de cabos subterrâneos e à escolha do modelo de simulação, a depender do tipo de transitório em análise. Por isso, este trabalho propõe diretrizes para orientar a comunidade técnica quanto ao modelo mais adequado em função do solo e da faixa de frequências analisada.

Como ter em conta na modelagem as discontinuidades nas blindagens dos cabos subterrâneos, em decorrência da presença dos aterramento das caixas de passagem do sistema ?

Uma forma de se ter em conta as discontinuidades nas blindagens é modelar cada trecho de cabo entre caixas de passagem como uma seção independente, com terminais explicitamente conectados às impedâncias de aterramento correspondentes. No ATP, por exemplo, isso pode ser implementado utilizando o ULM para cada trecho de cabo e conectando os nós das blindagens às impedâncias

de aterramento medidas ou estimadas. Essa técnica tem sido empregada em estudos de sobretensões em cabos enterrados, garantindo uma representação mais realista dos efeitos introduzidos pelas discontinuidades.

Nas avaliações desenvolvidas pelos autores, chegaram a avaliar se as sobretensões tranistórias resultantes da injeção na blindagem dos cabos subterrâneos de parte das correntes descargas atmosféricas incidentes na parte aérea do sistema teriam amplitude suficiente para danificar o isolamento dos cabos ?

A resposta a essa pergunta depende do sistema elétrico em análise, da configuração específica do cabo subterrâneo e, sobretudo, do comprimento da seção subterrânea e da resistividade do solo. Em trabalho recente dos autores, apresentado no International Conference on Power Systems Transients – IPST 2025 [1], foram analisados dois casos de estudo: um referente à injeção de correntes na blindagem de cabos subterrâneos em uma usina eólica e outro em um sistema híbrido de linha de transmissão aéreo–subterrâneo.

Em ambos os casos, demonstrou-se que, para trechos curtos e solos de maior resistividade, as sobretensões resultantes na blindagem dos cabos podem atingir patamares suficientes para provocar danos à cobertura isolante. Além disso, identificou-se que um cenário crítico corresponde aos pontos de transição entre cabos subterrâneos e aéreos, nos quais a modelagem precisa dos cabos subterrâneos assume importância fundamental. Resultados experimentais de colegas parceiros dos autores também evidenciam danos reais à cobertura isolante de cabos subterrâneos em usinas eólicas provocados por correntes de descargas atmosféricas — investigação que está em andamento em conjunto com os autores. Adicionalmente, verificou-se que simplificações na modelagem — como desconsiderar o efeito da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo — podem levar a resultados não conservadores, isto é, a valores menores de sobretensões nas blindagens dos cabos devido à injeção de correntes de descargas atmosféricas. Isso reforça a relevância e o caráter crítico do estudo apresentado neste Informe Técnico.

[1] R. Alipio, N. Duarte, and A. De Conti, “Revisiting the Influence of Dispersive Characteristics of Soil Electrical Parameters on Transient Behavior of Underground Cables: Impacts on Wave Propagation and Practical Case Studies,” Proc. Int. Conf. Power Systems Transients (IPST), Guadalajara, Mexico, Jun. 2025.

Título - Análise de sobretensões sustentadas em sistemas de transmissão de energia e implicações no dimensionamento de para-raios.

Entidade(s) - CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, TRACTEBEL ENGINEERING LTDA, ELEC NOR DO BRASIL LTDA

Autor(es) - Thiago Rodrigues Kleina Lima, Liamara de Fatima Ferreira, Renato Guimarães Ribeiro, Thiago Ferreira da Silva Costa, Maria Tereza Cristeli Souza, FIEL RIBEIRO MATOLA FILHO

Resumo

Este artigo apresenta uma análise detalhada e comparativa entre os resultados obtidos no projeto de uma linha de transmissão de 500 kV e o relatório de referência. O principal objetivo deste estudo é avaliar a adequação dos para-raios de múltiplas

colunas recomendados no relatório de referência para instalação nos terminais de linha, com intuito de mitigar os efeitos das sobretensões sustentadas. Normas internacionais, como as da IEC e IEEE, além de diversas brochuras do Cigré, sugerem que a tensão nominal dos para-raios deve ser adequada para assegurar que eles não atuem durante situações de sobretensão sustentada. Essa modificação pode impactar significativamente a coordenação de isolamento das subestações existentes, uma vez que para-raios com diferentes tensões nominais seriam instalados no mesmo ponto elétrico. Nosso trabalho propôs ajustes que permitiram o dimensionamento dos para-raios de modo a considerar adequadamente as sobretensões sustentadas. A solução desenvolvida assegura que os para-raios não atuem durante estes fenômenos, mantendo uma curva de descarga equivalente à de um para-raios convencional. Este equilíbrio é crucial para garantir a eficiência e segurança do sistema, sem comprometer a coordenação de isolamento das subestações. Além disso, durante o estudo, foi detectada a necessidade de incluir reatores de neutro nos reatores de linha, o que contribui para a ocorrência de fenômenos de sobretensão sustentada. Os resultados do estudo indicam que é possível realizar a coordenação adequada dos para-raios, garantindo a proteção contra sobretensões sem prejudicar a operação da subestação.

Perguntas e Respostas

1- Os autores usam duas terminologias: sobretensão sustentada e sobretensão temporária (TOV). São sinônimos? Caso negativo por favor expliquem a diferença entre elas

São sinônimos, as duas terminologias tratam do mesmo fenômeno.

2- Nas tabelas 2, 3 e 4 que exibem os resultados das simulações na coluna "Sucesso da Manobra" consta SIM / NÃO. Aparentemente duas situações distintas. Por favor expliquem

A manobra avaliada trata-se de religamento tripolar, o qual pode ter ou não sucesso.

No caso de sucesso, a falta é extinta e a operação continua normalmente. Em caso da manobra ser mal sucedida, o religamento ocorre ainda quando há falta na linha, sendo assim, o circuito é desligado.

Os casos com sucesso são utilizados para dimensionar o fator de surto das linhas de transmissão, as quais apresentam "isolação auto-recuperante" (definido na IEC 60071-1). Nesse ponto o desempenho da linha de transmissão não pode ser fator limitante para a operação do sistema. O fator de surto das linhas de transmissão não precisam levar em conta casos sem sucesso, uma vez que não há risco de dano permanente na linha e a operação do sistema será interrompida, dito que a manobra já não teve sucesso em extinguir a falta.

Casos sem sucesso são utilizados para dimensionar o NBI dos equipamentos terminais, os quais apresentam "isolação não auto-recuperante" (definido na IEC 60071-1) e uma falha na isolação (independente da manobras ser ou não bem-sucedida) pode provocar danos permanentes ao equipamento.

3- Poderiam os autores explicar melhor porque o para-raios de 420kV não pode ser adotada? O valor de 1,20 pu em 100ms (figura 4) se refere à energia dissipada anteriormente pelo pára-raios? Houve manobra anterior?

1.2 p.u. para a base de 420 kV é equivalente a uma sobretensão de 504 kV. A tensão sustentada da manobra em questão é de 525,4 kV por 100 ms, o que supera os limites de TOV. Nesse caso, há surto de manobra anterior a sobretensão sustentada, o que justifica a utilização do critério "With Prior Energy".

Título - Análise de Ocorrências de Falhas Cruzadas e Posterior Atuação de Limitadores de Curto-Circuito (LCC) - Comparação entre Resultados de Medições e Simulações em Sistemas Elétricos Industriais

Entidade(s) - GSI ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Autor(es) - Jesus Daniel de Oliveira, NELSON CLODOALDO DE JESUS, Ahmad Muhammad Laurentino, Gustavo Rodrigues dos Santos, Adriano Garufe Nogueira, Thiago Pereira Franco

Resumo

Este informe técnico apresenta a teoria aplicada a faltas cruzadas, relacionando o que é esse fenômeno, razões para o surgimento, consequências ao sistema elétrico e aos sistemas de proteção. Além disso, é apresentado uma análise de ocorrência onde são exibidos os resultados de simulações no software ATP (Alternative Transients Program), que visam comprovar os fenômenos ocorridos em campo e a teoria apresentada nesse estudo por meio da comparação das simulações com as oscilografias das medições obtidas em campo, a partir dos registros dos relés de proteção de alimentadores e dos sistemas de geração de energia.

Perguntas e Respostas

Esclareça, como o resistor ou impedância limitadora de corrente fica fora do circuito no caso de falhas cruzadas (.... nova falta a terra em uma ou nas duas outras fases, que não serão mais limitadas pelo valor definido pela resistência de aterramento).

O resistor (ou impedância) de aterramento limita a corrente de falta fase-terra enquanto a corrente circular por um caminho que envolve o neutro (componente de sequência zero). Quando surge uma nova falta entre fases ou uma segunda falta à terra em outra fase (ou em outro ponto), o circuito da falta passa a se apoiar predominantemente nas impedâncias de fase da rede (componentes de sequências positiva/negativa) e não mais pelo caminho de sequência zero que inclui o resistor de aterramento do neutro. Na prática, isso significa que o resistor fica "fora do circuito", ou com envolvimento de forma reduzida, na nova condição de faltas simultâneas, cujos valores das correntes passam a ser limitados pelas impedâncias das fases do sistema e das malhas de aterramento, "by-passando" o resistor de aterramento, sem a limitação eficaz no caso de uma única falta fase-terra.

No item 3, elabore melhor sobre a "falsa corrente de sequência zero" detectada pela proteção residual dos circuitos alimentadores.

A chamada "falsa corrente de sequência zero" ocorre quando a proteção residual registra um valor da componente residual de corrente sem que exista de fato uma falta fase-terra local no alimentador. Esse fenômeno foi observado no caso estudado e está associado principalmente ao deslocamento do neutro após a primeira falta, que provoca correntes capacitivas de retorno distribuídas entre os diversos

alimentadores. Além disso, durante a ocorrência de faltas cruzadas, parte da corrente passa a circular por caminhos alternativos entre os pontos de defeito, criando desequilíbrios que aparecem nos transformadores de corrente como um valor residual aparente. Somam-se a isso os efeitos transitórios associados à atuação dos limitadores de curto-circuito, que alteram rapidamente as impedâncias do sistema e podem gerar desequilíbrios momentâneos percebidos pelos relés como correntes residuais. Limitações dos próprios TCs e filtros de medição podem intensificar esse efeito, resultando na atuação indevida das proteções residuais, mesmo sem a ocorrência de uma falta real no alimentador. Em resumo, trata-se de um fenômeno inerente à complexidade dos eventos transitórios em sistemas aterrados por impedâncias, cuja compreensão é essencial para ajustes adequados das proteções e para evitar desligamentos indevidos em cascata.

O trabalho conclui que esse tipo de evento é mais comum do que se imagina e recomenda sua inclusão nas avaliações dos sistemas elétricos com transformadores de aterramento ou resistores no neutro dos transfos.

Quais elementos dão suporte à conclusão desta frequência mais significativa do que se imagina (isto não consta do trabalho)?

A conclusão de que faltas cruzadas ocorrem com maior frequência do que se imagina encontra suporte em diferentes elementos. Um dos fatores que colabora com essa afirmação é que diferentemente dos sistemas elétricos de distribuição das concessionárias de energia elétrica, normalmente do tipo solidamente aterrado, os diversos sistemas elétricos industriais e os atuais sistemas de geração de energia eólica e fotovoltaica, são normalmente aterrados por impedância, sendo essa uma das características que podem induzir ao aumento de ocorrências de faltas do tipo “Cross-Country”.

Para esse tipo de configuração, a ocorrência de casos envolvendo falhas de isolamento de cabos ou a contaminação de isoladores por exemplo, tendem a aumentar as solicitações dielétricas durante as faltas monofásicas iniciais, as quais podem evoluir para faltas cruzadas.

Destaca-se ainda o próprio mecanismo físico envolvido após uma falta fase-terra, pois o deslocamento do ponto neutro eleva a tensão nas fases sãs e cria condições propícias para o surgimento de novas falhas em outros pontos frágeis do sistema, favorecendo a ocorrência de faltas cruzadas ou quase simultâneas. Em segundo lugar, os exemplos e os resultados do caso estudado neste trabalho fornecem evidências concretas de como uma falta inicial pode evoluir para um evento mais complexo, confirmando a relevância desse tipo de fenômeno.

Além disso, as simulações realizadas apresentaram boa aderência aos registros de campo, reforçando a validade dos modelos e a representatividade dos resultados. Outro aspecto importante é a provável subnotificação desses eventos, já que muitas vezes são classificados de forma genérica como falhas indeterminadas, quando na realidade podem corresponder aos efeitos das faltas cruzadas.

Cabe destacar ainda que com base em dados históricos em outras análises de ocorrências de “Cross Country Faults” em diferentes instalações industriais, observou-se que a possibilidade de evolução para esse tipo de evento não é rara,

mas sim um risco potencialmente eminente. Portanto, embora não haja estatísticas consolidadas, a soma dos mecanismos físicos envolvidos, das evidências práticas, da coerência entre medições e simulações e, sobretudo da experiência em campo, justifica a recomendação de que esse tipo de evento seja incorporado de forma sistemática às avaliações de sistemas elétricos com transformadores de aterramento ou resistores conectados ao neutro dos transformadores no lado de média tensão.

Título - Desempenho frente a descargas atmosféricas de linhas de transmissão de extra alta tensão circuito duplo considerando a influência do mecanismo de múltiplo backflashover

Entidade(s) - Universidade Federal de Minas Gerais ,UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Autor(es) - FERNANDO HENRIQUE SILVEIRA, Frederico Santos Almeida, Laura Castro de Souza Pires, SILVERIO VISACRO FILHO

Resumo

Este trabalho avalia o desempenho de linhas de transmissão (LT) de extra alta tensão circuito duplo frente a descargas atmosféricas com foco no mecanismo de múltiplo backflashover. As análises do trabalho se basearam em resultados de simulações computacionais sistemáticas considerando um procedimento probabilístico avançado baseado no método de Monte Carlo. Uma configuração típica de linha de transmissão de 500 kV foi assumida como estudo de caso e a influência de duas sequências de fases para os circuitos da LT foi considerada: ABC-ABC e ABC-CAB. Os resultados denotaram o melhor desempenho global da torre da LT considerando ambos os circuitos com a mesma sequência de fases (ABC-ABC). Por outro lado, as análises em termos da ocorrência de backflashovers duplos revelaram que a sequência de fases ABC-CAB foi responsável por maiores correntes críticas equivalentes, indicando uma probabilidade ligeiramente menor de ocorrência de tais eventos em comparação com a probabilidade relacionada à sequência de fases ABC-ABC, para as condições simuladas deste trabalho. Tal fato indica o melhor desempenho de LTs com esta sequência de fases face ao mecanismo de backflashover duplo. O trabalho também destaca as cadeias de isoladores inferior e intermediária como aquelas que sofrem o maior número de backflashovers duplos, principalmente para as condições de elevado valor de impedância impulsiva de aterramento. Este é um indicativo importante quanto à prioridade de instalação de dispositivos para-raios como medida de proteção.

Perguntas e Respostas

Os autores poderiam explicar por que as cadeias de isoladores intermediária e inferior são mais propensas à ocorrência de backflashover?

Os resultados e as análises apresentadas no trabalho se referem à configuração de torre com disposição vertical das cadeias de isoladores. Para esta configuração, as cadeias de isoladores intermediária e inferior estão posicionadas mais distantes do cabo de blindagem da torre. Esta maior distância resulta em um menor efeito do acoplamento eletromagnético com este cabo. Tal efeito se traduz em menores sobretensões nos condutores fase intermediário e inferior e, conseqüentemente, em maiores sobretensões nas referidas cadeias de isoladores. O menor efeito do

acoplamento eletromagnético prepondera sobre o efeito estocástico da tensão de fase, contribuindo para que as cadeias de isoladores intermediária e inferior sejam mais propensas à ruptura de isolamento e ocorrência de backflashover.

As simulações computacionais do trabalho consideraram a forma de onda de corrente de descarga com tempo de frente fixo e igual ao valor mediano das correntes medidas na estação de San Salvatore. Os autores poderiam comentar o impacto nos resultados de se considerar o tempo de frente da corrente variando de acordo com o valor de pico de corrente sorteado pelo método de Monte Carlo?

Os autores possuem alguns trabalhos na literatura que comparam as taxas de desligamentos por backflashover calculadas considerando ondas de corrente de descarga com o tempo de frente fixo e igual ao valor mediano e ondas de corrente que assumem a correlação entre tempo de frente e valor de pico de corrente. Os resultados obtidos mostram que a consideração da correlação entre esses dois parâmetros resultaria em valores de corrente crítica ligeiramente maiores quando são assumidas condições de impedância impulsiva de aterramento baixas, da ordem de 10 ohms. Essa condição resulta em valores de correntes críticas muito elevadas para linhas de transmissão de 500 kV, com uma probabilidade de ocorrência diminuta. Para valores de impedância de pé-de-torre acima de 20 ohms, os valores de corrente crítica obtidos pelas duas abordagens de representação do tempo de frente são praticamente idênticos. Sendo assim, a consideração do tempo de frente da corrente de descarga variando de acordo com o valor de seu pico de corrente sorteado pelo método de Monte Carlo não causaria impacto nas conclusões apresentadas no trabalho.

Qual seria o impacto nos resultados de se considerar os parâmetros de descarga e a distribuição de pico de corrente do Morro do Cachimbo nas simulações com o método de Monte Carlo?

A qualidade dos resultados e da conclusão não seria afetada. A distribuição dos picos de corrente do Morro do Cachimbo é caracterizada por um maior valor mediano de corrente e por um menor percentual de ocorrência de correntes com valor de pico acima de aproximadamente 100 kA, em relação à distribuição do CIGRE, assumida no trabalho.

Sendo assim, pode-se afirmar que a consideração dos parâmetros de descarga e a distribuição de pico de corrente do Morro do Cachimbo resultaria em menores probabilidades de ocorrência de backflashover para valores de impedância impulsiva de pé-de-torre de 10 e 20 ohms, caracterizadas por correntes críticas da ordem de 100 kA e superiores. Por outro lado, para valores de impedância impulsiva de pé-de-torre de 40 e 80 ohms, que resultam em valores de corrente crítica abaixo de 100 kA, a probabilidade de ocorrência de backflashover seria maior.

Título - Uma discussão relativa ao desempenho de linhas de transmissão HVDC frente a descargas atmosféricas no cenário brasileiro: Avaliação de desempenho e práticas para redução dos índices de desligamentos

Entidade(s) - Universidade Federal de Minas Gerais ,FranEnge Projeto, Consultoria e Treinamento Ltda.,UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Autor(es) - FERNANDO HENRIQUE SILVEIRA, Jorge Luiz De Franco, SILVERIO VISACRO FILHO, Amanda Andreatta Campolina Moraes

Resumo

O desempenho de linhas de transmissão (LTs) HVDC frente a descargas atmosféricas, considerando as características típicas do ambiente brasileiro é investigado. Com base em simulações computacionais com metodologia avançada de cálculo de desempenho, os resultados obtidos denotam valores de corrente crítica e de probabilidade de backflashover para a LT HVDC simulada variando de 149 kA a 88 kA e de 0,7% a 5,5%, na faixa de impedância impulsiva de pé-de-torre (Z_p) de 10 Ω a 100 Ω , denotando seu pior desempenho em relação àquele de LTs HVAC de mesmo nível de tensão. Além disso, valores limites de Z_p da ordem de 22 e 11 Ω para regiões com densidade de incidência de descarga de 5 e 8 descargas/km²/ano, são requeridos para se obter taxa de 1 desligamento/100 km/ano. Este resultado reforça a necessidade de adoção de alternativas complementares de melhoria de desempenho quando a técnica de extensão de cabos contrapeso para redução do valor de impedância impulsiva de pé-de-torre encontra dificuldades de aplicação. Uma discussão relativa à aplicação de dispositivos para-raios como alternativa para melhoria de desempenho de linhas HVDC é apresentada neste trabalho.

Perguntas e Respostas

O cálculo da taxa de desligamentos considerou a distribuição acumulada dos picos de corrente de primeira descarga do CIGRE.

Os autores poderiam comentar o impacto nos resultados ao se considerar outras distribuições de picos de corrente, como a do IEEE ou do Morro do Cachimbo?

Para as condições de aterramento de pé-de-torre que resultariam em valores de corrente crítica inferior a 100 kA, o uso da distribuição do IEEE não modificaria os resultados apresentados pela aplicação da distribuição do CIGRE, uma vez que as duas distribuições são praticamente idênticas nesta faixa de corrente. Já o uso da distribuição do Morro do Cachimbo, caracterizada por maiores probabilidade de ocorrência das correntes dessa faixa, resultaria taxas de desligamento superiores. Por outro lado, para as condições de aterramento de pé-de-torre que levam a valores de corrente crítica superior a 100 kA, o uso das distribuições de pico de corrente do IEEE e Morro do Cachimbo resultaria em taxas de desligamento superiores e inferiores, respectivamente, em relação à taxa calculada para a distribuição do CIGRE, seguindo o comportamento dessas distribuições nesta faixa de corrente.

O estudo apresentado no trabalho considerou a geometria de torre estaiada para simular a LT HVDC.

Os autores poderiam comentar sobre o impacto nos resultados ao se considerar torres autoportantes de mesma altura e semelhante geometria?

A consideração de torres autoportantes resultaria em desempenho um pouco inferior (taxa de desligamento um pouco maior), pela característica das torres autoportantes

que apresentam uma maior impedância de surto, o que causaria uma maior queda de potencial ao longo da torre.

Os autores poderiam explicar por que a probabilidade de ocorrência de backflashover das LTs HVAC e HVDC se aproximam com o aumento do valor da impedância impulsiva de pé-de-torre?

Com o aumento significativo do valor da impedância impulsiva de pé-de-torre, menos importante se torna o efeito da geometria da torre no estabelecimento da sobretensão na estrutura aterrada. Além disso, esta sobretensão se torna tão mais elevada que as tensões na fase, sendo o efeito destas últimas menos importante para o estabelecimento da tensão resultante nas cadeias de isoladores dos dois tipos de LTs. Assim, há uma tendência de aproximação dos valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para essa condição.

Título - ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES PELA TAXA DE CRESCIMENTO DA TRT EM FALTAS LIMITADAS POR TRANSFORMADOR

Entidade(s) - WEG TRANSFORMADORES LTDA, Buscando..., WEG EQUIPAMENTOS ELETRICOS S/A, TSE Consulting LTDA

Autor(es) - Felipe Mafioletti Schuartz, Vágner Mori Madeira, Rogério Regis da Silva, Luis Átila Ramos de Melo

Resumo

Este trabalho analisa a superação de disjuntores pela Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória (TCTRT) em faltas terminais limitadas por transformadores, com foco em sistemas de média tensão de subestações coletoras de geração renovável. A análise demonstra que, em situações de recomposição do sistema com alimentadores desenergizados, disjuntores podem ser submetidos a TCTRT superiores aos limites normativos. Essas superações foram explicadas através da análise do transitório eletromagnético da TRT, utilizando circuito equivalente representativo do sistema e estudo de caso com simulações no software EMTP-ATP, evidenciando o impacto da capacitância nos resultados.

Duas estratégias principais de mitigação e validação dos resultados são apresentadas: (i) o uso de capacitores de surto instalados próximos aos disjuntores, reduzindo a TCTRT a níveis compatíveis com os limites de norma; e (ii) a adoção de modelagens detalhadas entre o trecho do enrolamento secundário do transformador e o disjuntor, incluindo a representação dos cabos de conexão e das capacitâncias parasitas dos transformadores. Além disso, são apresentados valores reais de capacitância obtidos por meio de ensaios de fator de potência em diversos transformadores trifásicos aplicados em subestações coletoras, destacando-se a influência da tensão e da potência na magnitude das capacitâncias medidas. Esses dados foram incorporados ao modelo grey-box M3, conforme a Brochura CIGRÉ 902, fornecendo uma base técnica mais precisa para análises futuras.

Os resultados mostram que o uso adequado de modelagens pode reduzir a necessidade de novos ativos ou sobredimensionamento do disjuntor. As contribuições deste trabalho servem como referência prática para projetos de subestações e análise de transitórios em sistemas de geração renovável.

Perguntas e Respostas

Designar o aprimoramento da Modelagem como ação mitigadora, não parece correto.

Seria apenas uma forma de se alcançar melhores resultados de avaliação,, não envolvendo ações ou intervenções.

Comente!

De fato, o aprimoramento da modelagem, por si só, não altera fisicamente o circuito, bem como não garante resultados menos críticos. Portanto, terminologicamente, não é uma medida mitigatória de intervenção física, embora possa “mitigar/reduzir” o risco de ações desnecessárias, como a especificação de disjuntores superdimensionados ou de capacitores de surto (novos ativos).

Algumas referências, incluindo as [11], [17], [20] e [22] do trabalho, apresentam o aprimoramento da modelagem, como o uso de modelos adequados, como estratégia para mitigar erros de especificação.

Assim, propomos para revisão, utilizar o termo “MITIGAÇÃO E VALIDAÇÃO DA TCTRT”, de modo a englobar tanto a mitigação física no circuito quanto o refinamento da simulação.

Qual é a representatividade das avaliações do trabalho, em termos de se atribuir generalidade à conclusão

" o uso adequado de modelagens pode reduzir a necessidade de novos ativos ou sobredimensionamento do disjuntor. "

O estudo foca em mostrar que a superação dos limites de TCTRT do disjuntor, instalado no secundário do transformador de potência, está diretamente relacionada ao baixo valor da capacitância entre transformador e disjuntor. Em muitas simulações iniciais, esse valor utilizado aproxima-se de zero, resultando em TCTRT muito elevadas, tendo a necessidade de alterar o nível de tensão do disjuntor para uma classe maior e/ou acrescentar o capacitor de surto (um novo ativo). Em alguns casos, quando se utilizam os valores medidos de capacitância dos transformadores de potência ou se inserem os cabos isolados de conexão desse trecho (prática pouco comum nos estudos), os valores de TCTRT ficam abaixo dos limites normativos.

A simulação apresentada na Figura 4 do informe técnico evidencia o impacto da capacitância na TCTRT. Ao inserir valores maiores de capacitância dos transformadores de potência do modelo medido ou dos cabos isolados de conexão, conforme apresentado no trabalho, os resultados tendem a se aproximar daqueles obtidos para a TCTRT com capacitor de surto.

Com base na constatação "capacitâncias no nível de 34,5 kV foram superiores às da alta tensão." pode se inferir que a prática comum de aumento da classe de tensão do disjuntor poderia tornar o problema mais crítico, já que com isto espera-se o aumento das distâncias ?

Sobre a diminuição da capacitância do disjuntor com o aumento do nível de tensão: Não foram avaliadas no informe técnico, por meio de medições ou outras técnicas, as capacitâncias parasitas dos demais equipamentos. Nas simulações foram utilizados valores típicos de literatura para os demais equipamentos, e a maioria das referências não diferencia disjuntores de 36 kV e de 72,5 kV. No entanto, pelas maiores distâncias elétricas e pela mudança do meio de extinção do arco elétrico, vácuo para SF6, espera-se que o disjuntor de 72,5 kV tenha uma capacitância menor, conforme destacado na pergunta.

Impacto nos resultados do estudo de TCTRT:

De modo pragmático, as capacitâncias dos demais equipamentos, exceto a do transformador de potencial capacitivo de alta tensão, são muito menores que as do transformador de potência ou dos cabos isolados de média tensão (mais de 50 vezes menores). Assim, mesmo que o disjuntor de nível de tensão superior apresente uma capacitância menor, essa variação não deve impactar significativamente os resultados de taxa de crescimento da TRT.

Título - Evolução dos Critérios de Dimensionamento de Para-Raios de Linha: Da Classe de Energia ao Desempenho Específico

Entidade(s) - Cemig Distribuição S.A., FranEnge Projeto, Consultoria e Treinamento Ltda.

Autor(es) - SANDRO DE CASTRO ASSIS, Jorge Luiz De Franco

Resumo

Para interligar a geração de energia elétrica com os sistemas de distribuição e aos consumidores, necessita-se de extensas linhas de transmissão. Essas linhas estão sujeitas a transitórios de diversas naturezas, como surtos gerados por manobras no sistema elétrico ou por descargas atmosféricas. Segundo estatísticas nacionais e internacionais, aproximadamente 65% dos desligamentos não programados são oriundos da interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão. Em regiões com altas taxas de incidência de descargas atmosféricas e em solos com resistividades elétricas elevadas, as linhas apresentam desempenho insatisfatório, pois níveis elevados de sobretensões são estabelecidos, por exemplo, nas cadeias de isoladores. Para amenizar estes nefastos efeitos e, desta forma, melhorar o desempenho frente às descargas atmosféricas, uma alternativa tipicamente utilizada na melhoria do desempenho corresponde à colocação de para-raios ZnO em paralelo com cadeias de isoladores. Os para-raios devem suportar as energias provenientes das sobretensões transitórias que ocorrem nos sistemas. Para uma especificação adequada dos para-raios, estudos específicos envolvendo simulações computacionais devem ser realizados, de modo a se obter as máximas energias a serem absorvidas pelos para-raios. Neste informe técnico são avaliados e analisados os impactos da evolução no critério de dimensionamento de energia nos para-raios de ZnO em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, uma vez que esta alteração reflete a busca por maior precisão e eficiência, permitindo que os para-raios sejam projetados e especificados para atender exatamente às demandas específicas do sistema elétrico, resultando em uma proteção mais eficaz contra sobretensões e em maior confiabilidade operacional.

Perguntas e Respostas

O uso de para-raios de ZnO para melhoria de desempenho é um recurso valioso.

Contudo a afirmativa "Os estudos....para Lts de 138 kV ...230 kV indicaram que, na maioria dos casos, é a técnica mais eficiente para a redução do número de desligamentos por descargas." é certamente incorreta.

As modelagens para representação das alternativas na avaliação desenvolvida em [5], que levaram a esta conclusão, são grosseiras.

Comente.

Nas avaliações de falha de blindagem realizadas no item 2, foi considerado o efeito das tensões de fase na atratividade de descargas?

Explique a expressão "carga transferida ao para-raios" durante a sua operação .

Não há carga "carga transferida" para o para-raio.

Na realidade, o dispositivo é percorrido por uma corrente durante sua operação, a qual nele dissipa energia.

Uma forma indireta de traduzir o potencial destrutivo dessa energia é a carga associada a tal corrente, por envolver amplitude e tempo de duração da corrente.

Comente.

Título - Análise de reignições em disjuntores SF6 durante manobras de banco de reatores em subestações de alta e extra alta tensão

Entidade(s) - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica CEPEL, Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobras

Autor(es) - Rogério Magalhães de Azevedo, Clayton Duarte Pessoa, Mayara Cunha Cagido

Resumo

A desenergização de um reator envolve a interrupção de correntes de baixa intensidade, podendo provocar cortes antes de sua passagem por zero e reignições. As sobretensões que se seguem aos cortes são caracterizadas por oscilações com frequências na faixa de poucos kHz. Já as sobretensões associadas às reignições são caracterizadas por frequências muito superiores, da ordem de centenas de kHz, e elevadas taxas de variação, possíveis de causar solicitações dielétricas severas ao isolamento dos reatores. Este informe técnico tem como foco mostrar a modelagem detalhada de uma subestação e dos equipamentos no programa EMTP/ATP, em especial os reatores, representados a partir de medições de resposta em frequência. Além disso, as análises no domínio da frequência, como densidade espectral de energia das sobretensões, podem evidenciar efeitos não previstos em ensaios normatizados e que podem ser amplificados a partir da sua repetibilidade. Desta forma, foi possível simular, analisar e comparar a ocorrência desses fenômenos com sinais reais medidos durante as manobras e perturbações e seus reflexos nos reatores. Adicionalmente, a comparação entre simulações e medições também permite avaliar o comportamento do disjuntor durante a manobra de abertura do reator em duas subestações distintas, resultando em ações corretivas e preventivas a fim de evitar futuras falhas nesses equipamentos.

Perguntas e Respostas

Algumas análises e conclusões do texto são muito diretas e não óbvias para os leitores não especialistas.

Poderia explicar melhor o conteúdo e comparações da Fig. 6, à direita e à esquerda?

O gráfico à esquerda apresenta uma comparação da densidade espectral da sobretensão, em azul, e o envelope das densidades espectrais das tensões de ensaio normalizadas, em vermelho. O gráfico à direita apresenta o fator de severidade da mesma sobretensão, em azul, que é definido como a razão entre as densidades espectrais mostradas no gráfico à esquerda. Obviamente a referência para análise é o valor unitário, traçado em vermelho. A análise desses resultados é apresentada no texto após as figuras.

Idem Fig. 8.

A explicação acima é a mesma para a figura 8. Entretanto, há um erro! As curvas estão invertidas, ou seja, o Fator de severidade está À esquerda e a densidade espectral está À direita.

Com relação à afirmativa "surtos repetitivos podem ocasionar um decréscimo da suportabilidade da isolamento ao longo da vida útil dos equipamentos ".....

Presumidamente, esta refere-se à repetição no tempo.

Uma vez que os limites no tempo não são excedidos, esclareça qual seria o problema dos excessos na faixa de frequência.

A expressão "surtos repetitivos" refere-se a uma sequência de surtos (ou strikes) de alta frequência em um curto período de tempo, normalmente associado a uma manobra de chave seccionadora. Neste caso, a literatura apresenta avaliações no sentido de redução da suportabilidade ao longo da vida útil quando essas manobras são frequentes. No caso do trabalho apresentado, essa hipótese foi apresentada em função do número de manobras realizadas no reator de 500 kV com ocorrência de restriques no disjuntor, levando a surtos de alta frequência e amplitude nos terminais do reator.

Título - Avanços na Modelagem Eletromagnética de Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (VFTOs) em Buchas Capacitivas

Entidade(s) - Phasor,Genesis Pesquisa e Desenvolvimento LTDA

Autor(es) - Daniel Carrijo Polonio Araujo,Gabriel de Souza Pereira Gomes,Rafael Prux Fehlberg,IONY PATRIOTA DE SIQUEIRA

Resumo

Este estudo aprofunda a investigação dos efeitos das Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (VFTOs) em buchas capacitivas de subestações isoladas a gás (GIS), propondo avanços significativos no modelo eletromagnético utilizado para simulação desses fenômenos. O trabalho busca superar limitações dos modelos anteriores, como simplificações geométricas e ausência de elementos representativos do comportamento real das buchas, com o objetivo de fornecer uma representação mais fiel das condições operacionais e ampliar a compreensão de falhas observadas, mas ainda não explicadas pela literatura técnica.

As principais melhorias incluem o aumento do número de camadas capacitivas para maior precisão na distribuição de tensões e a incorporação da capacitância residual (C2). Tais avanços permitem a identificação de fenômenos eletromagnéticos

complexos, como ressonâncias locais e pontos críticos de dissipação de energia, contribuindo diretamente para o diagnóstico precoce de falhas e o desenvolvimento de estratégias de mitigação mais eficazes.

Com foco exclusivo no aperfeiçoamento do modelo eletromagnético, sem uso de métodos estatísticos como Monte Carlo, as simulações visam validar a eficácia do novo modelo frente às condições críticas de operação. Espera-se, assim, promover maior confiabilidade no diagnóstico e projeto de buchas capacitivas, oferecendo subsídios técnicos valiosos para engenheiros, pesquisadores e fabricantes atuantes em sistemas de alta tensão sujeitos a VFTOs.

Perguntas e Respostas

Na introdução consta "propondo avanços significativos no modelo eletromagnético utilizado para simulação desses fenômenos". No entanto, o artigo usa um modelo de parâmetros distribuídos, que nada tem a ver com um modelo eletromagnético. Por gentileza, explique esta questão.

Qual é a evidência de que a modelagem da bucha por uma sequência tridimensional de modelos Pi é uma representação física consistente para o fenômeno em análise?

Os autores propõem um conjunto de melhorias na representação da bucha por parâmetros de circuitos e constataam pelos resultados de simulação as modificações resultantes, como por exemplo A introdução da capacitância parasita (C2) aumentou tanto a amplitude quanto a persistência das oscilações, mantendo por mais tempo os efeitos de alta frequência no sistema".

A qualidade dos resultados de simulação está condicionada à capacidade da melhoria de representação (por exemplo, a introdução da capacitância parasita) reproduzir a física do problema.

Os autores têm referências experimentais que deram suporte à sua decisão quanto à forma das melhorias de representação introduzidas?

Qual é a evidência de que a modelagem da bucha por uma sequência tridimensional de modelos Pi é uma representação física consistente para o fenômeno em análise?

Na introdução consta "propondo avanços significativos no modelo eletromagnético utilizado para simulação desses fenômenos". No entanto, o artigo usa um modelo de parâmetros distribuídos, que nada tem a ver com um modelo eletromagnético. Por gentileza, explique esta questão.

4.0 – Constatações