

Utilização de Programa de Transitórios Eletromagnéticos como Ferramenta de Simulação e Análise da Operação de Filtros Harmônicos

Nelson Clodoaldo de Jesus
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
nelson@gsiconsultoria.com.br

Antonio Cesar Andrade
GRID ENERGY Sistemas e Equipamentos
Araraquara (SP), Brasil
cesar.andrade@gridse.com.br

Luiz Marlus Duarte
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
marlus@gsiconsultoria.com.br

Gustavo Rodrigues dos Santos
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
grsantosv1@gmail.com

Adriano Garufe Nogueira
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
adriano.nogueira@gsiconsultoria.com.br

Ahmad Muhammad Laurentino
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
ahmad.laurentino@gsiconsultoria.com.br

Resumo—Este trabalho apresenta uma análise do comportamento harmônico de sistemas elétricos, considerando a influência de bancos de capacitores e filtros harmônicos em sistemas de geração de energia eólica e fotovoltaica. Serão apresentados resultados a partir da modelagem trifásica dos sistemas elétricos no programa de Transitórios Eletromagnéticos ATPDraw, visando avaliar as respostas em frequência, transitórios e fluxo harmônico, fornecendo subsídios técnicos à análise da operação e dimensionamento dos filtros.

Palavras chave—Modelagem, Simulações, Transitórios Eletromagnéticos, Bancos de Capacitores, Filtros Harmônicos, ATPDraw.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com o que estabelecem os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) toda e qualquer conexão à rede elétrica no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), deve atender a uma série de critérios e requisitos técnicos em uma ampla avaliação, considerando os indicadores previstos e recomendados. Durante a fase de estudos e definições são utilizados diversas modelagens, análises com base nas simulações envolvendo os aspectos de fluxo de potência (ANAREDE), curtos-circuitos (ANAFAS), estabilidade eletromecânica (ANATEM), qualidade de energia (HarmZ) e transitórios eletromagnéticos (ATP), dentre outros [1], [2], [3], [4], [5]. De acordo com a sequência de entrada dos empreendimentos e evolução dos estudos e informações para acesso, são definidas as necessidades de atendimento ao fator de potência, gerando a necessidade de implementação de sistemas de compensação de reativos, notadamente, bancos de capacitores e bancos de reatores. Apesar do critério vigente utilizar como referência a rede básica, com tensões iguais ou superiores a 230 kV, por questões econômicas, os equipamentos são usualmente conectados no lado secundário de distribuição dos sistemas de geração de energias renováveis, que, em sua grande maioria, utilizam tensões de operação de 34,5 kV. Após várias etapas de desenvolvimento do sistema de geração, quer seja eólica ou fotovoltaica, surge a necessidade de estudo de desempenho harmônico, muitas vezes com a necessidade da instalação de filtros, quando indicado pelos estudos com base nos indicadores de harmônicos. Portanto, tanto no estudo a ser realizado, quanto em termos operacionais, existe a possibilidade de operação conjunta entre bancos de capacitores puros na mesma barra de filtros harmônicos, sendo a análise dessa condição a principal razão proposta

nesse trabalho. Sendo assim, a análise não deveria focar exclusivamente no lado de AT, pois os sistemas de compensação estão em sua grande maioria, no lado da MT.

Os filtros foram definidos anteriormente pelo método do Lugar Geométrico, mas esse trabalho utilizou o método de injeção de correntes para um cenário definido. A análise de possíveis ressonâncias deve ser investigada, assim como no caso dos eventos de manobras dos equipamentos. Nos casos de ressonâncias em circuitos RLC com indutâncias constantes (independente da corrente), a ressonância ocorre quando os efeitos indutivo e capacitivo se equivalem, fazendo com que as correntes e tensões assumam valores muito elevados. Diante dessa necessidade, propõe-se além de estudos no domínio da frequência, muitas vezes modelados de modo equivalente e monofásico, utilizar e aplicar a modelagem trifásica no programa ATPDraw [6], para análise do desempenho e especificação dos filtros harmônicos. Serão apresentados dois casos analisados, ambos sobre o prisma da verificação das respostas em frequência dos sistemas elétricos, transitórios eletromagnéticos e absorção de correntes pelos filtros harmônicos previstos na operação das instalações.

II. CASO 1: ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE GERAÇÃO EÓLICA

O sistema elétrico em análise equivale a um complexo de geração fotovoltaica cuja conexão é associada a rede básica do SIN em 230 kV, considerando a Linha de Transmissão, a SE Coletora, Transformadores, Rede de Média Tensão, Filtros Harmônicos e Bancos de Capacitores. A Fig. 1 ilustra o diagrama unifilar do sistema elétrico de geração eólica.

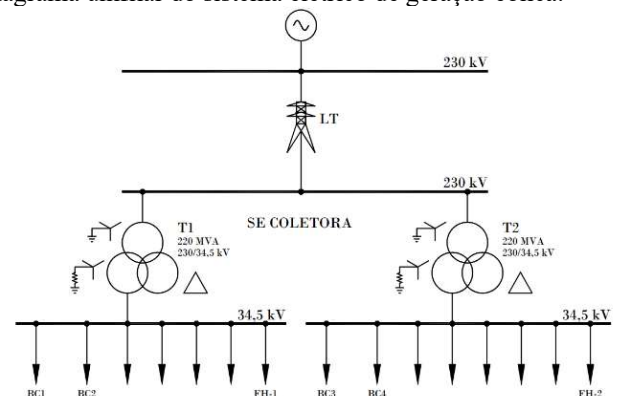


Fig. 1 Diagrama unifilar básico do sistema elétrico com dois transformadores.

A Fig. 2 mostra a configuração dos sistemas de filtragem, considerando um sintonizado de terceira ordem e um amortecido de quinta ordem. Esses equipamentos foram pré-definidos com base nas metodologias e estudos do parecer de acesso desse sistema de geração eólica, sendo utilizados, nessa análise, principalmente com foco no lado de 34,5 kV, onde serão instalados.

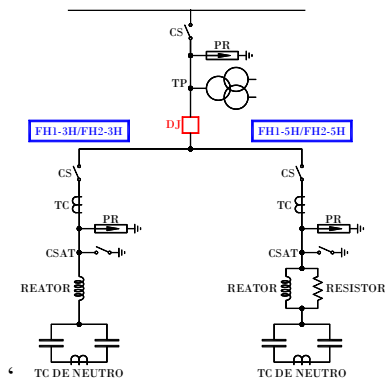


Fig. 2 Configuração prevista para o conjunto de filtros de harmônicos.

Para a verificação das respostas em frequência o sistema foi modelado no programa ATPDraw [6], sendo curto-circuitadas as fontes, bem como injetadas correntes eficazes de 1 [A], utilizando a rotina “Frequency Scan”, resultando nas impedâncias vistas do ponto de interesse para cada frequência avaliada [7], [8], [9]. Inicialmente serão verificadas as impedâncias harmônicas sem a influência do sistema e, posteriormente, com as impedâncias equivalentes, a título de comparação, com base na modelagem do sistema, conforme mostrado na Fig. 3.

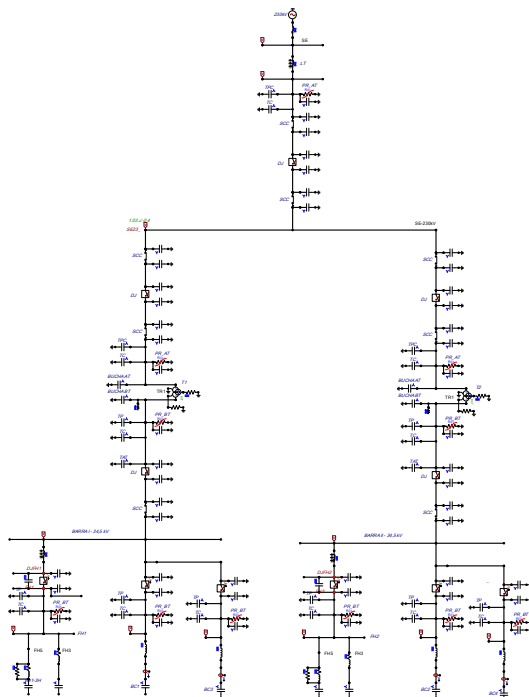


Fig. 3 Modelagem completa do sistema elétrico no programa ATPDraw.

A. Análise das Respostas em Frequência - Sistema Ideal

Nesse item, inicialmente, obtêm-se as respostas em frequência de uma barra ideal de 34,5 kV, considerando somente as características isoladas dos filtros, com base na Fig. 2. Destaca-se que nesse caso específico, os filtros

previstos equivalem ao conjunto de um filtro sintonizado de 3ª ordem e um filtro amortecido de 5ª ordem, os quais são manobrados por um único disjuntor e, sendo assim, devem operar constantemente em paralelo. A Fig. 4 mostra o comportamento da resposta em frequência com os dois filtros em operação na condição ideal.

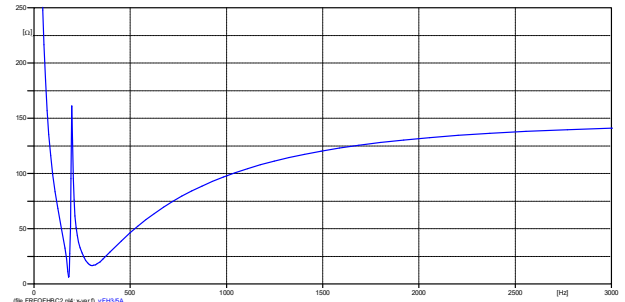


Fig. 4 Resposta em frequência com o conjunto dos filtros sintonizado de 3ª ordem e amortecido de 5ª ordem, sem a influência do sistema elétrico.

Ainda de modo ideal, ou seja, sem as impedâncias de conexão do sistemas de AT e MT, mas com a inclusão dos bancos de capacitores em paralelo ao conjunto de filtros, obtêm-se no caso ideal, as respostas apresentadas na Fig. 5, onde percebe-se a predominância e os efeitos dos bancos, especialmente para as altas frequências.

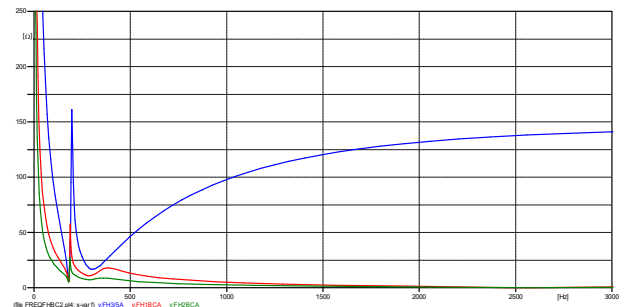


Fig. 5 Resposta em frequência com o conjunto dos filtros sintonizado de 3ª ordem e amortecido de 5ª ordem, sem a influência do sistema elétrico (azul) e com a inserção de um BC (verde) e dois BCs (vermelho).

B. Análise das Respostas em Frequência - Sistema Completo

A inclusão do sistema elétrico completo altera o comportamento das respostas em frequência, principalmente em termos das amplitudes das impedâncias equivalentes e pontos de ressonâncias. A Fig. 6 mostra o resultado da resposta em frequência da barra de 34,5 kV, considerando o sistema completo da Fig. 3, mas somente com o conjunto de filtros de 3ª ordem e 5ª ordem inseridos. A Fig. 7 mostra o resultado, com a inclusão de um banco de capacitores de 17 MVar, em conjunto com os dois filtros harmônicos.

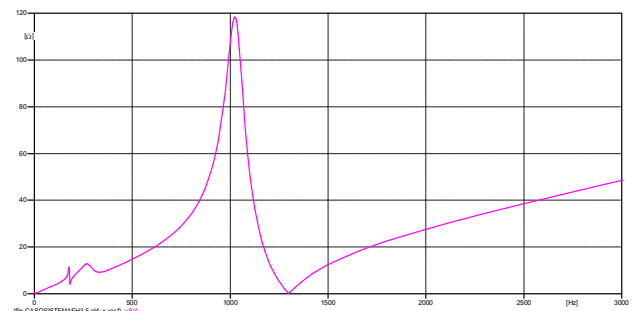


Fig. 6 Resposta em frequência com o conjunto dos filtros sintonizado de 3ª ordem e amortecido de 5ª ordem, com a influência do sistema elétrico.

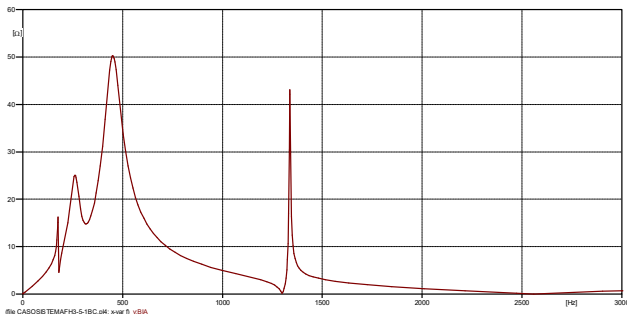


Fig. 7 Resposta em frequência com o conjunto dos filtros sintonizado de 3ª ordem e amortecido de 5ª ordem, com a influência do sistema elétrico e um banco de capacitores.

A Fig. 8 mostra o resultado comparativo para o caso com um transformador e os dois bancos de capacitores em conjunto com os dois filtros harmônicos, dada pela resposta da curva em vermelho, considerando somente um transformador e uma barra de 34,5 kV, enquanto que na operação completa do sistema, considerando os dois transformadores, os dois conjuntos de filtros harmônicos do sistema e os quatro bancos de capacitores conectados.

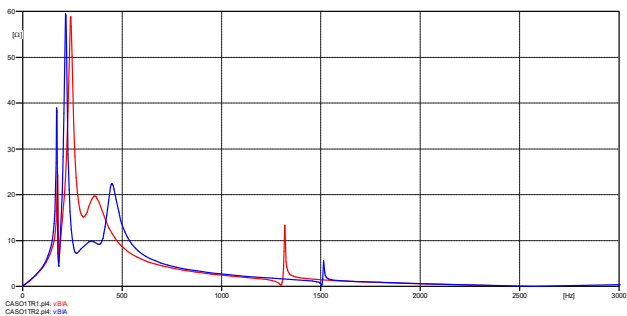


Fig. 8 Respostas em frequência com o conjunto dos filtros sintonizados de 3ª ordem e amortecidos de 5ª ordem, com a influência do sistema elétrico e dois bancos de capacitores (vermelha), bem como o sistema completo com todos os filtros e bancos de capacitores.

Diante dos resultados obtidos torna-se recomendável a análise de todas as condições possíveis de operação do sistema, ressaltando as diferenças significativas em relação a influência tanto do sistema elétrico de conexão, quanto dos equipamentos de compensação de reativos e os filtros harmônicos previstos para o sistema elétrico analisado, conforme pode ser observado ao se comparar os resultados apresentados nas Figs 5, 6, 7 e 8.

III. ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS DE MANOBRAS DO DISJUNTOR DOS FILTROS HARMÔNICOS

Como ilustrado na Fig. 2, foi previsto somente um equipamento de manobra (disjuntor) para o conjunto de dois filtros. Para a verificação do desempenho operacional em termos de dimensionamento do disjuntor de manobra simultânea dos dois filtros de harmônicos (3ª e 5ª ordem), os transitórios de manobras do sistema foram analisados, com base na modelagem ilustrada na Fig. 3.

A. Manobras de Energização e Desligamento

As correntes de energização do conjunto de filtros de harmônicos pode ser verificada na Fig. 9, enquanto as respectivas tensões no barramento de 34,5 kV estão ilustradas na Fig. 10.

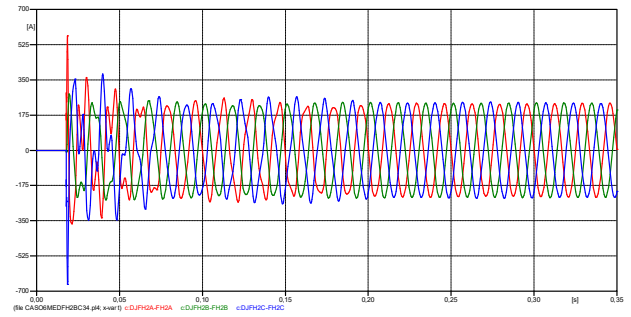


Fig. 9 Correntes de energização do conjunto de filtros harmônicos.

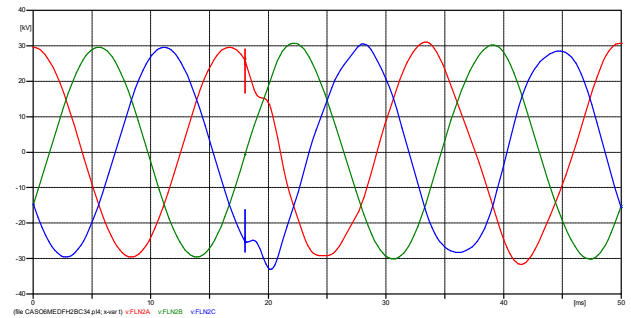


Fig. 10 Tensões resultantes no barramento de 34,5 kV com a manobra de energização do conjunto de filtros harmônicos.

Foram simuladas também manobras de desenergização, conforme as correntes do disjuntor do conjunto dos filtros de harmônicos, mostradas na Fig. 11. As tensões no barramento de conexão dos filtros estão apresentadas a seguir na Fig. 12, com valor máximo próximo a 50 kV, cujo valor deve ser utilizado para verificação da suportabilidade dos componentes dos filtros.

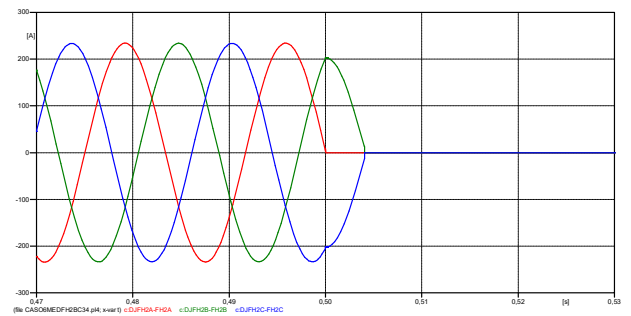


Fig. 11 Correntes durante manobra de desenergização do conjunto de filtros harmônicos.

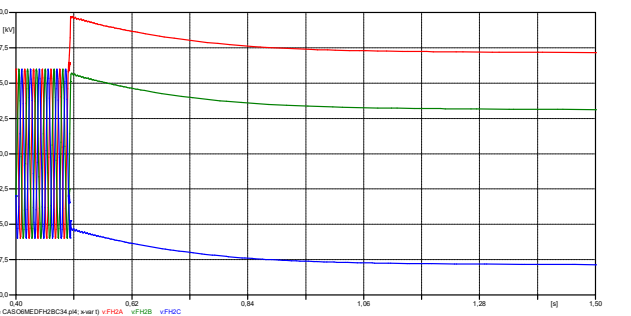


Fig. 12 Tensões na barra dos filtros de harmônicos durante manobra de desenergização.

B. Análise das Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRT)

Além dos itens apresentados anteriormente, para análise de desempenho do sistema, deve-se verificar as Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRT) impostas aos disjuntores do sistema.

Para tanto foram adotados os valores normalizados na norma IEC 62271-100 [10], considerando disjuntores com tensões nominais de 36 e 72,5 kV, em comparação com as TRTs impostas ao equipamento de manobra para diversas condições operacionais do sistema.

Para uma falta do tipo trifásica, obteve-se durante a interrupção das correntes de curto-circuito, os resultados apresentados na Fig. 13.

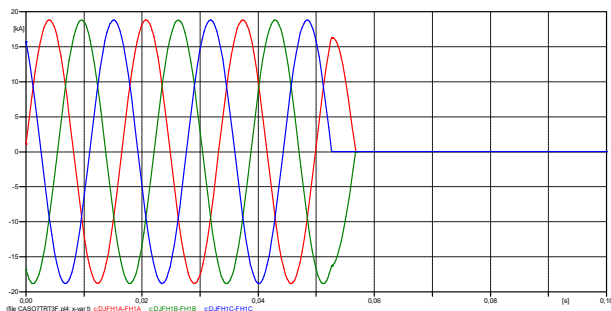


Fig. 13 Exemplo de simulação da interrupção de falta do tipo trifásica.

As TRTs resultantes para o primeiro polo a abrir do referido disjuntor podem ser verificadas na Fig. 14, sendo que nesse caso específico, não foram verificadas superações em relação as envoltórias normalizadas, considerando a relação entre as correntes de falta e os valores de especificação das correntes nominais suportáveis pelo equipamento de manobra.

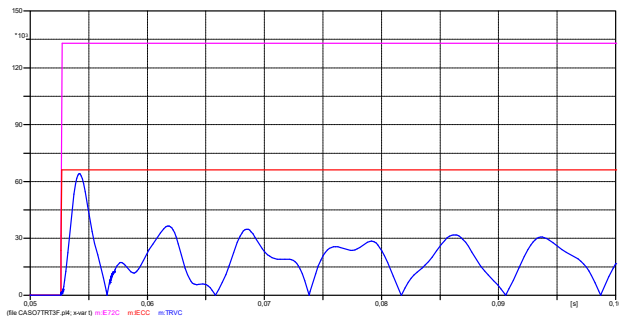


Fig. 14 TRT imposta para falta trifásica em comparação as envoltórias normalizadas para disjuntores com tensões nominais de 36 e 72,5 kV.

Os resultados obtidos para a simulação de uma falta bifásica nos terminais do disjuntor que alimenta os filtros foram também avaliados e, nesse caso específico, foi a que apresentou a maior solicitação em termos das amplitudes da TRT. A Fig. 15 mostra as correntes durante a simulação de uma falta bifásica.

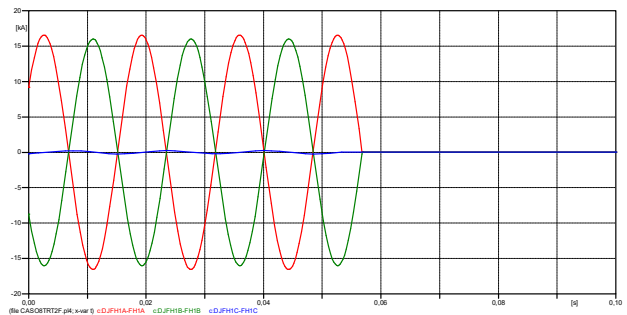


Fig. 15 Exemplo de simulação da interrupção de falta do tipo bifásica.

Observou-se que a comparação entre as TRTs impostas aos terminais dos disjuntores foi superior a envoltória normalizada para o disjuntor com tensão nominal de 36 kV, sendo recomendado nesse caso a utilização de disjuntor com tensão nominal de 72,5 kV, como verifica-se na Fig. 16.

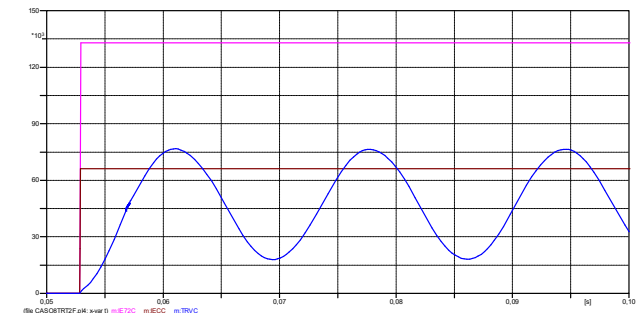


Fig. 16 TRT imposta para falta bifásica em comparação as envoltórias normalizadas para disjuntores com tensões nominais de 36 e 72,5 kV.

Para uma falta monofásica, a corrente é limitada em função do tipo de aterramento do sistema de 34,5 kV e, nesse caso específico, não apresentaram superações em relação aos valores normalizados para esta condição específica, mas que representa a maioria das ocorrências. Nesse sentido, é recomendável avaliar todas as possibilidades em termos de interrupção pelo disjuntor dos filtros harmônicos. Sendo assim, com base na condição de manobras de correntes capacitivas, a abertura operacional em condição normal de operação também deve ser realizada. Para tanto, recomenda-se que a tensão de operação seja a máxima, sendo nesse caso de 1,05 pu. A Fig. 17 apresenta a comparação entre as envoltórias adotadas como base e a TRT imposta ao disjuntor com o desligamento dos filtros. Para essa análise envolvendo a manobra de abertura operacional, verificou-se que para esse caso específico, ocorre um toque na envoltória da TRT para o disjuntor com tensão nominal de 36 kV, sem qualquer violação para o disjuntor com tensão nominal de 72,5 kV, a qual foi recomendada para a referida instalação [10],[11].

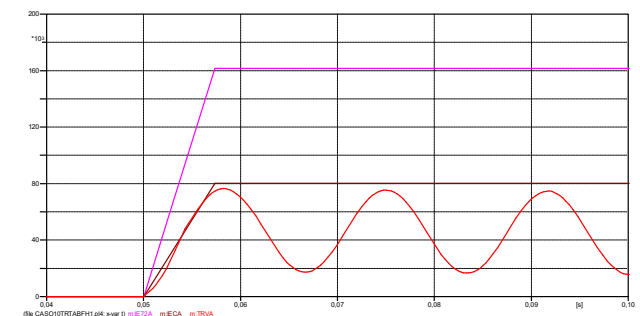


Fig. 17 TRT imposta para manobra de abertura operacional em comparação as envoltórias normalizadas para disjuntores com tensões nominais de 36 e 72,5 kV.

IV. CASO 2: SIMULAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES E FILTROS HARMÔNICOS

A. Representação para Estudo do Fluxo Harmônico

Apesar das dificuldades impostas na modelagem detalhada do sistema, a inclusão de fontes de componentes harmônicos no programa ATPDraw pode ser utilizada para estimar as correntes de operação e o desempenho dos filtros em determinadas condições operacionais.

A Fig. 18 apresenta a configuração adotada para a modelagem dessa análise, destacando o sistema com um transformador com potência nominal de 180 MVA, fontes harmônicas representativas da operação de inversores do sistema de geração fotovoltaico, banco de capacitores de 20 MVar e também um conjunto de filtros harmônicos formados por um filtro do tipo sintonizado de 3ª ordem e outro do tipo amortecido de 5ª ordem.

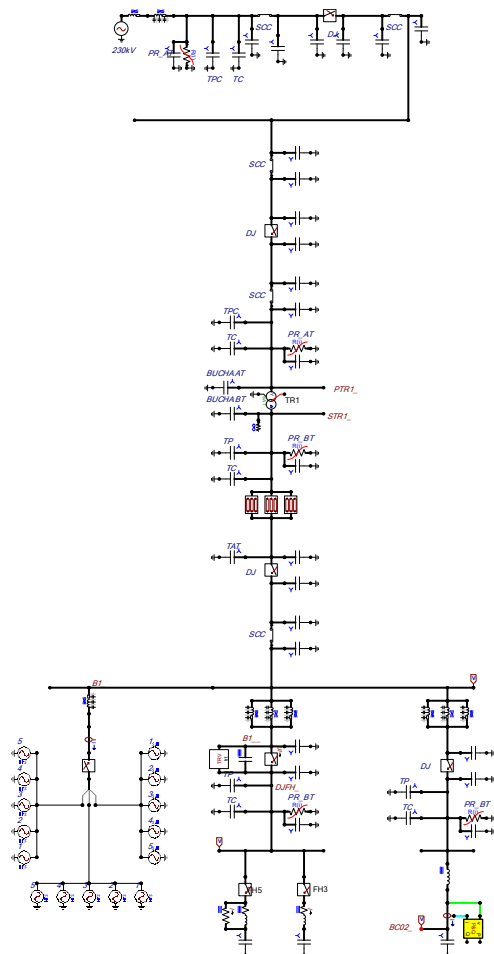


Fig. 18. Modelagem do sistema elétrico para análise da operação dos filtros e banco de capacitores.

Para esse caso, inicialmente também foram verificadas as respostas em frequência na barra de 34,5 kV, sendo que somente com a operação do BC, tem-se uma ressonância paralela próxima ao componente de 5ª ordem, dada na Fig. 19 pela curva em vermelho, com a amplitude da impedância equivalente no lado esquerdo do gráfico. A curva em azul representa a condição de operação somente com o conjunto dos filtros harmônicos e a curva em verde representa a resposta para o BC em conjunto com os filtros harmônicos, sendo a amplitude das impedâncias harmônicas nesse últimos dois casos dada pelo eixo do lado direito.

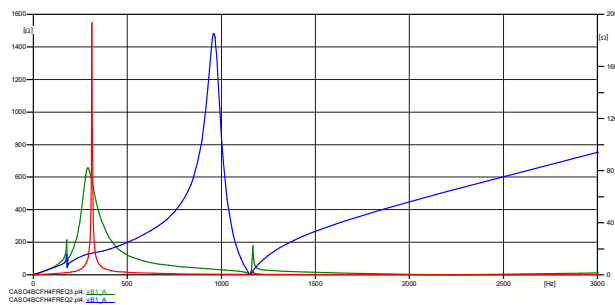


Fig. 19. Respostas em frequência para a impedância da barra de 34,5 kV.

O espectro adotado para as correntes em relação a máxima geração do sistema fotovoltaico está apresentado a seguir na Fig. 20.

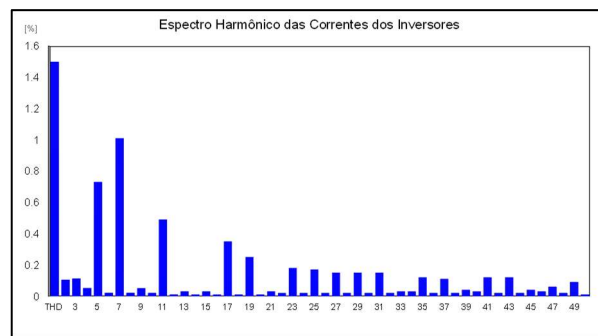


Fig. 20. Espectro harmônico das correntes do sistema de geração fotovoltaico.

B. CASO 1 - Manobra do Banco (BC) e do Conjunto de Filtros (FH)

Com o objetivo de verificar os efeitos dos equipamentos de compensação de reativos e filtragem, normalmente indicados nos estudos de fluxo de potência e qualidade de energia para o acesso e conexão ao SIN, torna-se imperativo não só avaliar o desempenho da rede de AT, mas a verificação do sistema de média tensão, onde normalmente os equipamentos são alocados.

A Fig. 21 apresenta as tensões na barra de 34,5 kV, sem a geração, com a geração fotovoltaica, com a inserção do BC e, posteriormente, com o conjunto de filtros harmônicos.

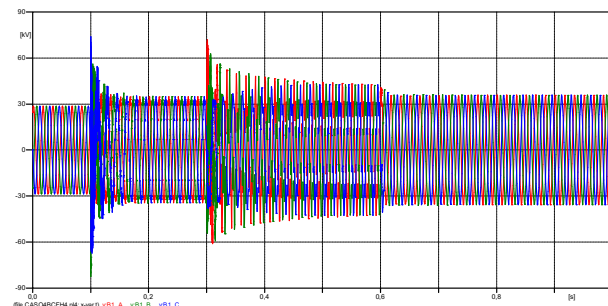


Fig. 21. Comportamento geral das tensões durante manobras do BC e FHs.

Destaca-se que a entrada em operação do BC após a injeção de harmônicos resulta em uma amplificação das distorções e sobretensões associadas.

A Fig. 22 mostra o efeito de entrada do BC, tendo grande impacto nas tensões de operação do sistema, sendo reduzidas após a conexão do conjunto de filtros, como pode ser verificado na Fig. 23.

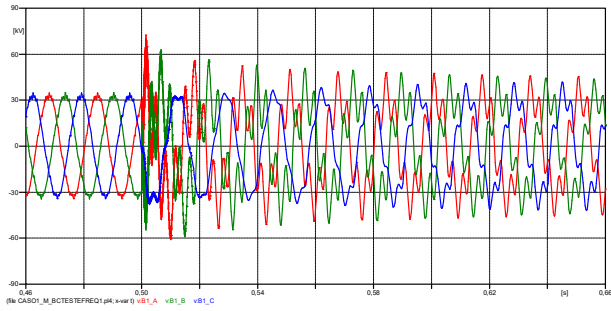


Fig. 22 Detalhe das tensões antes e após a entrada do BC.

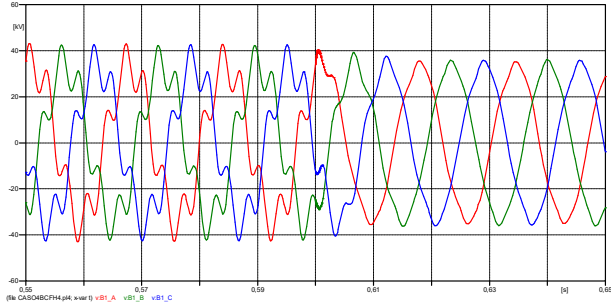


Fig.23 Detalhe das tensões antes e após a entrada dos FHs.

O espectro harmônico das tensões na barra de 34,5 kV para a condição com o banco de capacitores está apresentado na Fig. 24, com elevadas distorções devido a amplificação do componente de 5ª ordem, com uma distorção total de 30%.

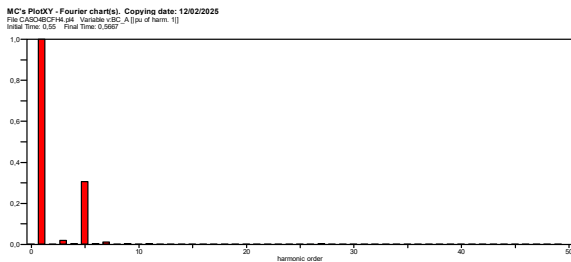


Fig.24 Espectro harmônico da tensão da fase A com o BC.

Com a entrada em operação dos filtros ocorre uma forte redução das distorções, conforme indica o espectro harmônico dado na Fig. 25, reduzindo a distorção total para 3,57%.

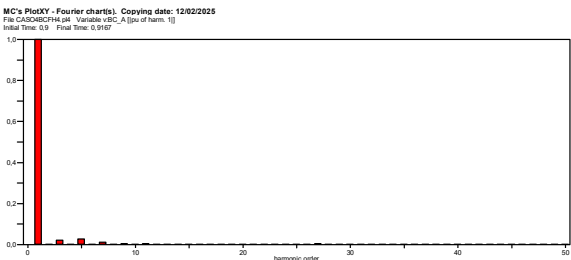


Fig.25 Espectro harmônico da tensão da fase A com o BC e FHs.

As formas de onda das correntes de operação do BC estão mostradas na Fig. 26, detalhando a sua redução após a entrada do conjunto de filtros harmônicos.

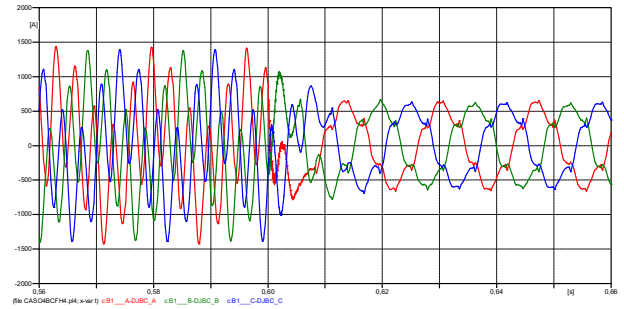


Fig. 26 Comportamento das correntes de operação do BC para o Caso 1, com a entrada em operação dos FHs após o BC.

C. CASO 2 - Manobra do Conjunto de Filtros (FH) e do Banco de Capacitores (BC)

De modo a confirmar a condição mais adequada da sequência de operação, com base nos resultados anteriores, subentende-se que apesar do conjunto de filtros ter atenuado as distorções, sobretensões e sobrecorrentes, deve-se, nesse caso, evitar a operação do sistema com somente o BC inserido, pois essa condição pode impactar severamente nas células capacitivas, além das elevadas distorções das tensões do sistema.

A Fig. 27 mostra porque, nesse caso específico, seria recomendado que a entrada do BC fosse somente realizada após a conexão e operação do conjunto de filtros harmônicos.

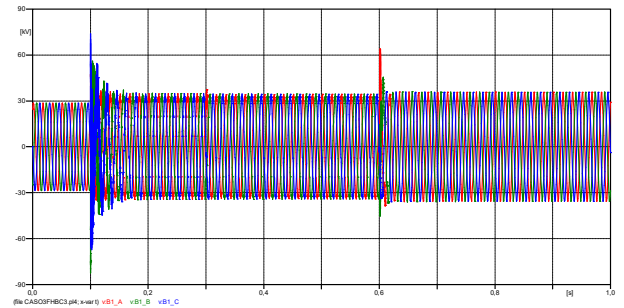


Fig.27 Comportamento geral das tensões durante manobras dos FHs e BC.

A Fig. 28 mostra o efeito de entrada dos FHs e a Fig. 29, também ilustra o comportamento das tensões, logo após a entrada em operação do BC.

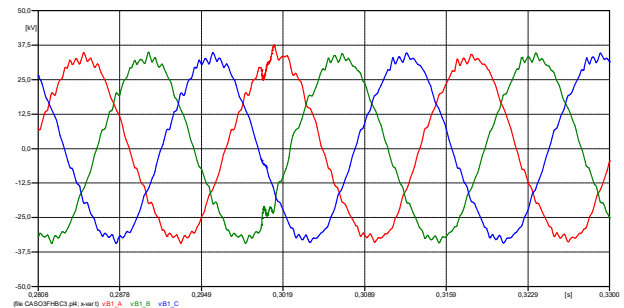


Fig. 28 Detalhe das tensões antes e após a entrada dos FHs.

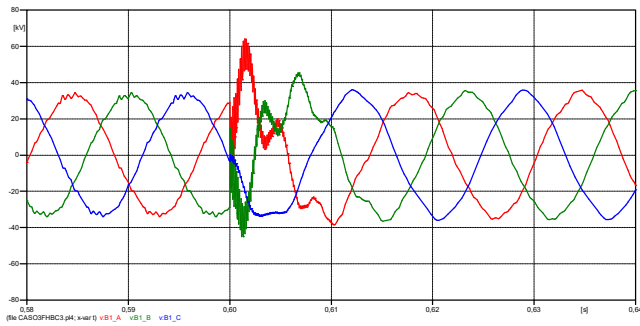


Fig. 29 Detalhe das tensões antes e após a entrada do BC.

O espectro harmônico das tensões na barra de 34,5 kV para a condição com os filtros de harmônicos de 3ª e 5ª ordens está apresentado na Fig. 30, com uma distorção total de 3,46%, enquanto que o resultado obtido após a entrada em operação do BC está apresentado na Fig. 31, com uma distorção total de 3,51%.

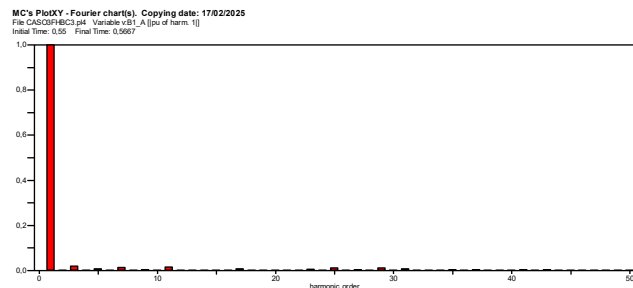


Fig. 30 Espectro harmônico da tensão da fase A com os FHs.

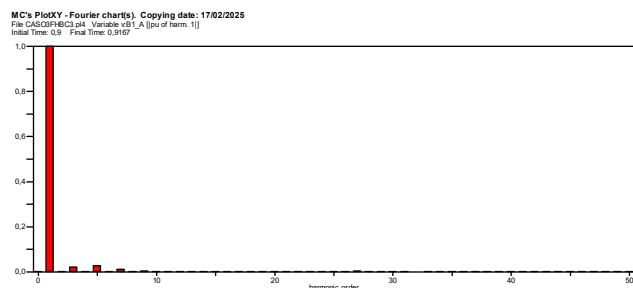


Fig. 31 Espectro harmônico da tensão da fase A com os FHs e BC.

As formas de onda das correntes de operação dos FHs estão mostradas na Fig. 32, detalhando a sua redução após a entrada do conjunto de filtros harmônicos.

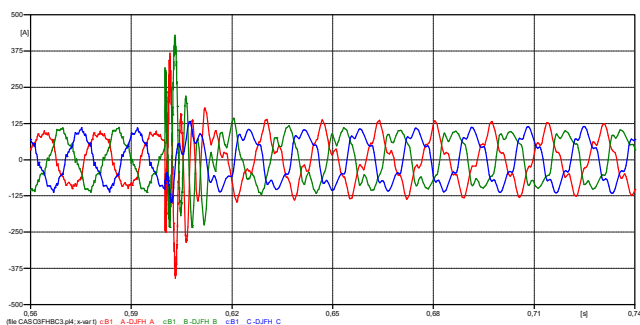


Fig. 32 Comportamento das correntes de operação dos FHs para o Caso 2, com a entrada em operação do BC após os FHs.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma abordagem técnica sobre a utilização do programa ATPDraw na análise da operação de sistemas com inversores utilizados em sistemas de geração de energia eólica e fotovoltaica, bem como os respectivos sistemas de compensação de reativos e filtros harmônicos.

Foi demonstrada a real importância de se realizar a análise trifásica envolvendo as respostas em frequência de dois sistemas, análises transitórias quanto as solicitações de manobras e a verificação das TRTs impostas aos equipamentos de manobra para diversas condições operacionais. Recomenda-se também realizar as possíveis condições de dessintonia dos componentes dos filtros harmônicos.

Finalmente, a análise da sequência da entrada em operação quando se tem bancos e capacitores foi fundamental para verificar que em determinados sistemas, é recomendável a entrada do BC somente após a conexão dos filtros, evitando condições de ressonâncias, amplificação de harmônicos, elevadas distorções, sobretensões e sobrecorrentes, evitando possíveis danos aos equipamentos e a operação de sistemas elétricos onde foram indicados bancos e filtros harmônicos, sendo fundamental a análise não só do sistema de acesso no sistema de transmissão quanto para o sistema interno de distribuição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS): Instruções para realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras - ONS NT 009/2016 - revisão 3 de abril de 2019.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Procedimento de Rede, Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos - Metodologia, Submódulo 2.3, revisão 2021.08, vigência 31/08/2021.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Procedimento de Rede, Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica - Indicadores, Submódulo 9.7, revisão 2020.12, vigência 08/12/2020.
- [4] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Comportamento Harmônico e Análise Modal, Programa HarmZs, versão 5.2.
- [5] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Procedimentos de Rede, Diretrizes e critérios para estudos elétricos, Submódulo 23.3.
- [6] Høidalen H.K.; Prikler L.; Peñaloza F.; ATPDraw version 7.6 for Windows Users' Manual, Release No. 1.0, August 2024.
- [7] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Anexo VIII da Resolução Normativa Nº 956, de 7 de dezembro 2021, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, vigência 01/01/2022.
- [8] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE STD 519, IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, 2014.
- [9] N.C. Jesus, E.L. Batista, "Monitoramento e Simulação da Qualidade da Energia: Procedimentos de Avaliação do Impacto de Harmônicos", XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, SENDI 2008, 06 a 10 de outubro, Olinda - Pernambuco - Brasil.
- [10] IEC International Electrotechnical Commission: High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers; IEC 62271-100.
- [11] IEC International Electrotechnical Commission: High-voltage switchgear and controlgear - Part 111: Automatic Circuit Recloser for Alternating Current Systems up to and including 38 kV, IEC 62271-111.
- [12] IEEE STD 141 (Red Book): IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants - New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., June 1993.