

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

ANÁLISE E PROPOSTAS DE MITIGAÇÃO DEVIDO A FALHAS DE COMUTAÇÃO NOS SISTEMAS CCAT DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

EDSON H. WATANABE(1); ROBSON DIAS(1); ANDRÉ GUILHERME PEIXOTO ALVES(1); LAÍS FERREIRA CRISPINO PROENÇA(1); TOMÁS DE REZENDE BELO PEREIRA(2); MATHEUS DANTAS DE PAIVA(2); CARLOS EDUARDO VIZEU PONTES(2); JOÃO AMIN MOOR NETO(3); BRAULIO CHUCO(3); ALQUINDAR PEDROSO(1); GLEYDSON DOS SANTOS NEVES(1); JOHN FRANCIS GRAHAM(4); PAULO ESMERALDO(4); AUGUSTO TIETZ (4)
COPPE/UFRJ(1); POWERCONSULT(2); CEFET/RJ(3); STATE GRID BRAZIL(4)

RESUMO

Múltiplas estações inversoras de elos CCAT do SIN eletricamente próximas caracteriza um sistema multi-infeed e este trabalho foca no problema da falha de comutação (FC) nessas estações. As soluções mitigadoras consideradas são: condicionador de tensão nos barramentos CA próximos às estações inversoras, compensadores síncronos ou STATCOMs com a tecnologia MMC, e o incremento dinâmico do ângulo de extinção durante contingências. Nenhuma solução é definitiva, mas individualmente ou em conjunto as soluções mitigadoras acima ajudam a diminuir a possibilidade de FC. Estudos simulados no PSCAD/EMTDC validam o estudo e mostram a possibilidade de se melhorar o desempenho dos elos CCAT no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE HVDC, *Multi-Infeed*, Falha de Comutação (FC), Compensador Síncrono, STATCOM MMC

1.0 INTRODUÇÃO

A presença de múltiplas estações inversoras de elos CCAT (Corrente Contínua Alta Tensão) baseados em LCC (*Line Commutated Converter* ou Conversores Comutados pela Linha) em regiões eletricamente próximas em um sistema elétrico de potência caracteriza um sistema *multi-infeed* desses elos (p. ex. [1]). Nesse caso, a operação de cada estação inversora pode ser impactada pela interação via rede CA com as demais ou um mesmo distúrbio elétrico na rede afetar mais de uma inversora simultaneamente. Por exemplo, esse problema pode levar a interrupção de transmissão de potência nos elos em face de falhas de comutação (FC) causadas por curtos-circuitos em regiões próximas das inversoras. Fenômeno este que pode ser observado no Sistema Interligado Nacional (SIN) com a presença, atualmente, de 6 elos CCAT, p.ex., Jardini et. al. (2018) [2]. Ressalta-se que a potência nominal total desses 6 elos é pouco superior a 20 GW, o que pode representar uma grande perturbação na rede se acontecer algum fenômeno de *multi-infeed* que cause a interrupção de transmissão de potência por um tempo elevado. A falha de comutação é um fenômeno elétrico rápido que ocorre quando um determinado par de válvulas não consegue completar o processo de comutação de correntes devido às condições elétricas do sistema, gerando um curto CC na ponte inversora que acarreta bloqueio de corrente do elo. Seu estudo é importante para que o operador do sistema possa ter conhecimento de cenários de despacho onde a perda de um ou mais elos CCAT, mesmo que por poucos décimos de segundos, possa acarretar condições de instabilidade para o sistema CA devido a uma determinada contingência. Dentre os fenômenos de *multi-infeed* há também os fenômenos mais lentos de interação de controles, sobretensão transitória, entre outros. Neste trabalho o foco está no problema da falha de comutação nas pontes inversoras.

Este trabalho é uma iniciativa associada ao P&D ANEEL junto à *State Grid Brazil Holding* (SGBH) objetivando analisar possíveis soluções mitigadoras da FC tais como: (i) condicionador de tensão nos barramentos CA próximos às estações inversoras, (ii) instalação de compensadores síncronos ou STATCOMs com a tecnologia MMC (Multilevel Modular Converter), e (iii) o incremento dinâmico do ângulo de extinção para garantir a margem de comutação durante contingências.

O condicionador de tensão é a proposta de um equipamento (fonte de tensão) para ser inserido em série, transitoriamente, entre o inversor e a rede de forma rápida para compensar afundamentos da tensão da rede devido a defeitos como curto-circuito. Este equipamento deve garantir tensão suficiente para a comutação de corrente entre as válvulas do inversor imediatamente após a ocorrência de defeitos evitando a FC. É mostrado o desempenho deste condicionador na mitigação de FC para diferentes tipos de faltas nos sistemas CA. É mostrado o desempenho de compensadores síncronos e STATCOMs próximo às estações inversoras como a primeira linha de defesa contra a FC. O controle dinâmico do ângulo de extinção tem o objetivo de avaliar e mostrar resultados com as técnicas existentes para também auxiliar na mitigação de falhas de comutação observadas para determinadas contingências na rede CA. É mostrada também que a instalação de compensadores no meio da rede, visando diminuir o *multi-infeed interaction factor* (MIIF), pode diminuir o número de barras onde ocorrendo curto-circuito são suscetíveis de

provocar falhas de comutação. Também é analisado o uso de ângulo de extinção aumentado como forma de tornar o inversor mais robusto sem alterar os limites de operacionalidade do equipamento.

Os estudos de transitórios foram efetuados em modelo equivalente do SIN no PSCAD, considerando o cenário ONS PAR-PEL horizonte 2025, onde foram simulados casos para análise detalhada, com modelo trifásico dos conversores e considerando fenômenos rápidos que causam distorção nas formas de onda de tensão e corrente. A análise eletromecânica foi realizada no ANATEM, considerando a mesma base de dados do ONS PAR-PEL horizonte 2025. Os resultados de simulação obtidos dão suporte na compreensão dos fenômenos associados às falhas de comutação e, principalmente, validam as propostas mitigadoras para FC apresentadas neste trabalho.

2.0 CONDICIONADOR DE TENSÃO (SeVC – *Series Voltage Conditioner*)

A principal causa da falha de comutação FC é o curto-circuito na rede CA, que ocasiona queda de tensão, distorção com deslocamento de fase, aumento da corrente CC ou a combinação desses fatores. O processo de comutação entre as válvulas do inversor pode ser caracterizado através do ângulo de comutação μ e do ângulo de extinção γ . O ângulo μ indica o tempo necessário para realizar a comutação entre duas válvulas. O ângulo de extinção γ está relacionado com o tempo em que a válvula está polarizada reversamente e permite que ela se recuperar antes de uma nova polarização direta. Caso o ângulo γ seja menor do que um valor mínimo γ_0 , ocorre a falha de comutação (FC). Como é bem conhecido, sempre que há um curto-circuito na rede CA, próximo a um LCC, ocorre um afundamento na tensão CA, o que implica no aumento do ângulo de comutação μ e consequentemente a diminuição do ângulo de extinção γ , podendo levar à ocorrência de FC. Para mitigar a FC é proposto um condicionador de tensão, que é um conversor conectado em série com a estação inversora do HVDC-LCC, aqui batizado como SeVC (*Series Voltage Conditioner*). Hou et al. [3] apresentaram uma abordagem similar de aplicação de um conversor série para mitigar FC.

O SeVC tem como objetivo aplicar pulsos de tensão, alocados em intervalos estratégicos da forma de onda de tensão, de modo a aumentar a tensão de comutação e, com isso, diminuir o ângulo μ ao mesmo tempo que aumenta o ângulo γ . A Figura 1 mostra o esquemático da instalação série do SeVC e as formas de ondas, que só atua quando há curto-circuito na rede CA. Essa figura mostra três formas de ondas. Na primeira (mais à direita), é mostrado o intervalo de comutação entre duas válvulas, ocorrendo normalmente com ângulo de comutação μ e tensão de polarização reversa, correspondente ao ângulo γ . Supondo que uma falta ocorreu na rede CA, a segunda forma de onda mostra pulsos de tensão sintetizados pelo SeVC e inseridos entre o LCC e a rede. Na terceira forma de onda, observa-se que, esse pulso é aplicado na fase que a válvula que está deixando de conduzir, com a função de acelerar o processo de comutação, diminuindo o ângulo μ e aumentando o ângulo γ .

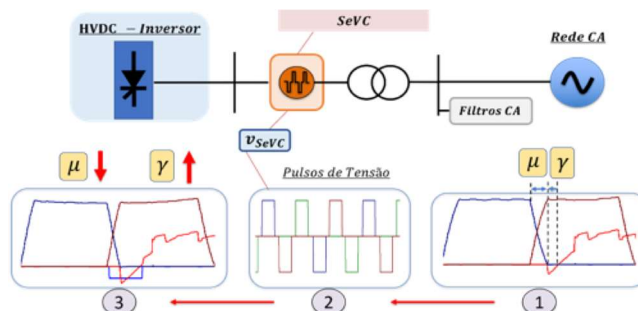


Figura 1 – Esquemático de instalação do SeVC.

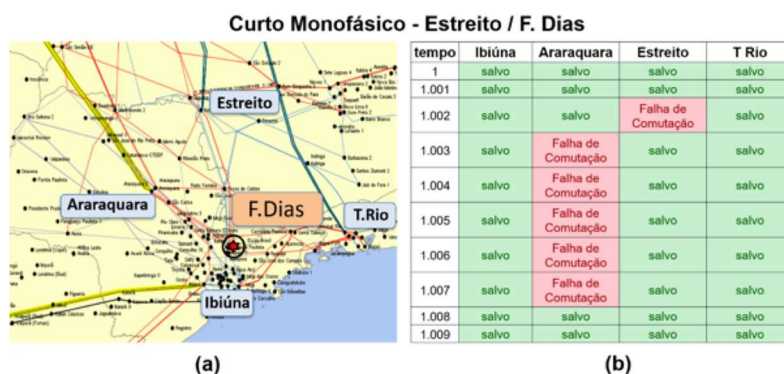


Figura 2 - (a) Localização do curto aplicado (b) Tabela com os resultados.

O SeVC foi inserido em série com as estações inversoras de Ibiúna, Araraquara, Estreito e Terminal Rio, utilizando um modelo equivalente do SIN, no cenário 2025, no *software* PSCAD. Por simplicidade, o SeVC foi

implementado como uma fonte de tensão CC a ser inserida em série com a rede para sintetizar os pulsos de tensão. Para avaliar a eficácia do método, um curto monofásico é aplicado na linha de Fernão Dias, que está localizada no meio da rede que envolve as quatro estações inversoras. Esse curto-circuito, em condições normais, causaria FC em todos os LCC. A Figura 2 (a) apresenta a localização geográfica da aplicação do curto, bem como as estações inversoras e a Figura 2 (b) mostra uma tabela com as 4 estações inversoras identificadas na linha horizontal superior e na vertical à esquerda está mostrado os instantes de ocorrência do curto-circuito. Esta figura mostra que apesar da FC ainda acontecer (ela aconteceria em todos os casos sem o SeVC) na maioria das situações a FC pode ser mitigada, dando maior segurança de operação ao sistema. Idealmente, o SeVC poderia ser uma fonte de tensão senoidal ou próxima disso que garantisse tensão de comutação nas barras das inversoras. No entanto, isso resultaria em conversores de potência relativamente alta, se comparado com a potência do LCC. Para esse SeVC operando com pulsos, a potência desse conversor é em torno de 14 % da potência das suas estações conversoras.

3.0 COMPENSADORES SÍNCRONOS E STATCOM-MMC

3.1 COMPARAÇÃO CS E MMC-STATCOM

A utilização de dispositivos de controle de tensão como compensador síncrono (CS) e Compensador Estático Síncrono - STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) são opções analisadas neste trabalho para o suporte de potência reativa visando a mitigação da FC. Considerando os níveis elevados de potência e tensão (centenas de MVA e centenas de kV), a utilização do Conversor Modular Multinível (MMC - Modular Multilevel Converter) torna-se a alternativa mandatória para viabilizar a utilização prática desses equipamentos. A topologia do STATCOM escolhida foi a do MMC na configuração dupla estrela com submódulos em meia ponte - Double Star Chopper-Cell (DSCC) [5, 6] ou ponte completa - Double Star Bridge-Cell (DSBC) [5], no entanto, ambas apresentam desempenhos similares nesta aplicação. A configuração DSCC se destaca em relação a topologia delta com submódulos em ponte completa - Single Delta Bridge-Cell (SDBC) [6], no que se refere a capacidade de compensar componentes de sequência negativa com um nível reduzido de corrente injetada [7]. O MMC-STATCOM na configuração DS, conforme Figura 3, apresenta características operacionais distintas em relação aos CS destacadas a seguir.

- A resposta do CS a uma falta na rede CA acontece instantaneamente devido à energia magnética armazenada no entreferro. Sendo que a corrente injetada pode ser da ordem de 5.5 pu e pode ser sustentada por um período de até alguns ciclos. Por outro lado, o controle de corrente do MMC-STATCOM possui um limitador para garantir que as correntes nominais das chaves não sejam ultrapassadas. Em geral, estas correntes de pico nos STATCOM são limitadas a 1,2 pu, mas já se fala em limites de até 2 pu, para casos especiais.
- MMC-STATCOM com capacitores convencionais no lado CC não contribuem para a inércia da rede e a estabilidade da frequência. Por outro lado, a resposta do CS às mudanças na frequência do sistema é determinada pelas interações entre os sistemas elétricos e mecânicos conectados a ele.
- Considerando as premissas técnicas desejadas para mitigação de FC, destaca-se que a capacidade do CS operar com alta corrente de falta é um fator importante e foi analisado neste estudo.
- A troca de potência ativa entre o CS e a rede durante a condição de falta está relacionada ao torque no eixo da máquina e, principalmente, à energia armazenada no momento de inércia do rotor. A constante de inércia mecânica (H_{CS}) de um CS é da ordem de 1 a 4 s. No MMC-STATCOM, a troca instantânea de potência ativa depende da quantidade de energia armazenada nos capacitores dos SM. No entanto, a constante de inércia eletrostática equivalente (H_{ST}) de um MMC-STATCOM é da ordem de poucos a dezenas de ms. Ou seja, da ordem de 100 vezes menor que no CS. No entanto, há estudos para se aumentar essa constante de inércia, seja com supercapacitores ou mesmo baterias [8].

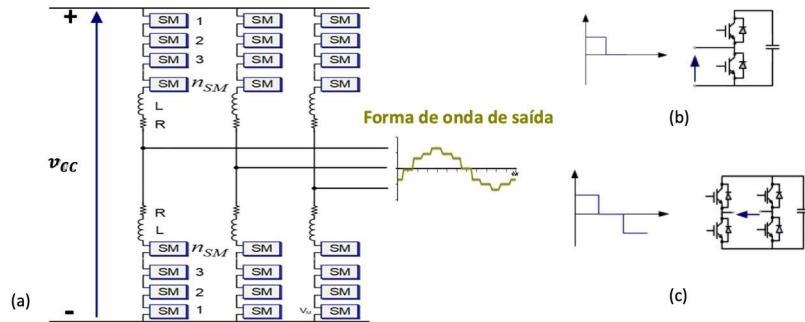


Figura 3: (a) Conversor MMC - dupla estrela em meia ponte (DSCC) e forma de onda de tensão de saída; (b) submódulos em meia ponte e sua tensão de saída; (c) submódulos em ponte completa e sua tensão de saída.

O MMC-STATCOM foi simulado considerando potência de 300 MVA com $n_{SM} = 60$ submódulos (SM) por braço. A tensão no capacitor de 1 mF no SM é 2 kV resultando em uma tensão CC total de 120 kV. O transformador de acoplamento do conversor é de 300 MVA, (D/Y), com 69/500kV, $X_{ps}=11,5\%$ na própria base. Nesse caso, a constante de inércia eletrostática é de 2,4 ms. O compensador síncrono simulado é de 300 MVA, 16 kV e transformador de acoplamento de $X = 10\%$, (D/Y) e 16/500kV. Este estudo foi feito considerando a estação inversora

de Araraquara com três condições de compensações: (i) um banco de reatores *shunt* de -390 Mvar; (ii) 3 CS de 300 MVA cada; e (iii) 3 MMC-STATCOM DE 300 MVA cada. Foi imposta uma falta monofásica com indutância de 0,084 mH e duração de 100 ms no barramento de Fernão Dias.

A Figura 4 ilustra o comportamento da potência transferida pelo polo1 da conversora de Araraquara e as correntes nos tiristores dos polos 1 e 2 deste bipolo quando um reator *shunt* é inserido nessa barra em substituição ao CS que opera indutivo. Nesse caso, ocorre a FC. A Figura 5 mostra os resultados para o caso em que 3 MMC-STATCOMs de 300 MVA são conectados à barra em substituição ao reator *shunt* e observa-se que novamente a FC ocorre devido à falta. Por fim, o caso de 3 CS de 300 MVA inseridos no barramento em substituição aos 3 STATCOMs é mostrado na Figura 6 e nesse caso não se verifica a ocorrência da FC.

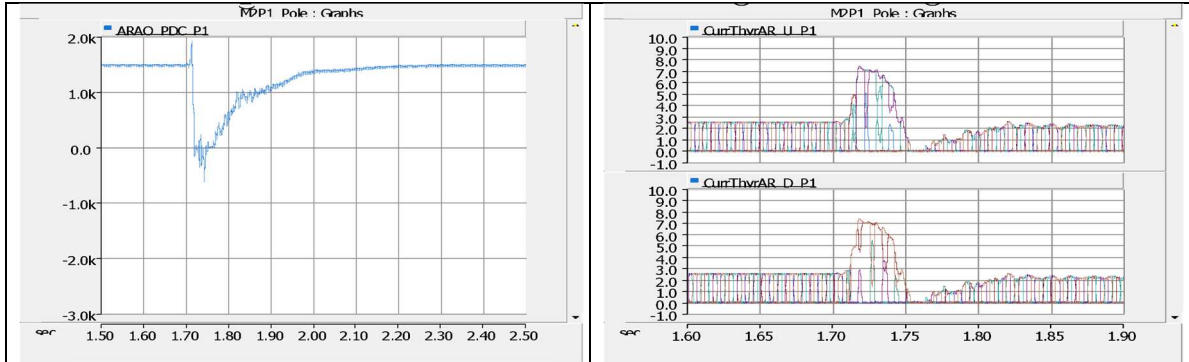


Figura 4: Conversora Araraquara com FC: Potência transferida pelo pólo1 e correntes nos tiristores dos polos 1 e 2, com compensação reativa por reator *shunt* em substituição ao CS previamente existente.

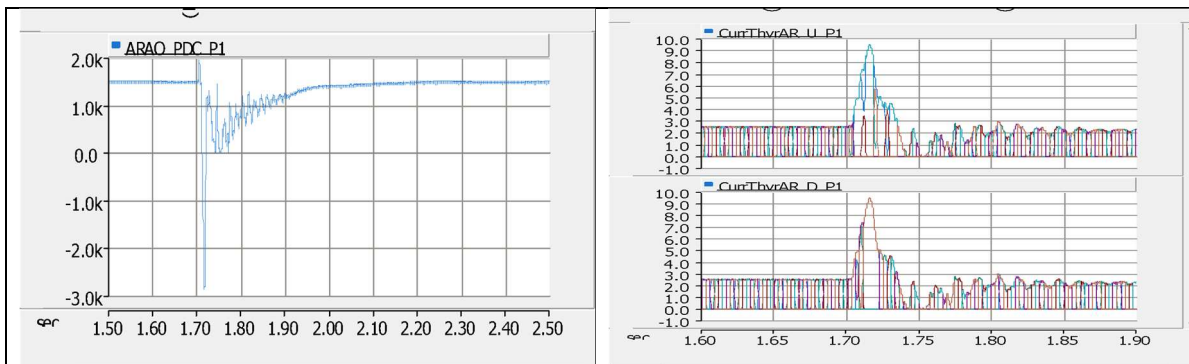


Figura 5: Conversora Araraquara com FC: Potência transferida pelo pólo1 e correntes nos tiristores dos polos 1 e 2 com compensação reativa por 3 MMC-STATCOM de 300 MVA.

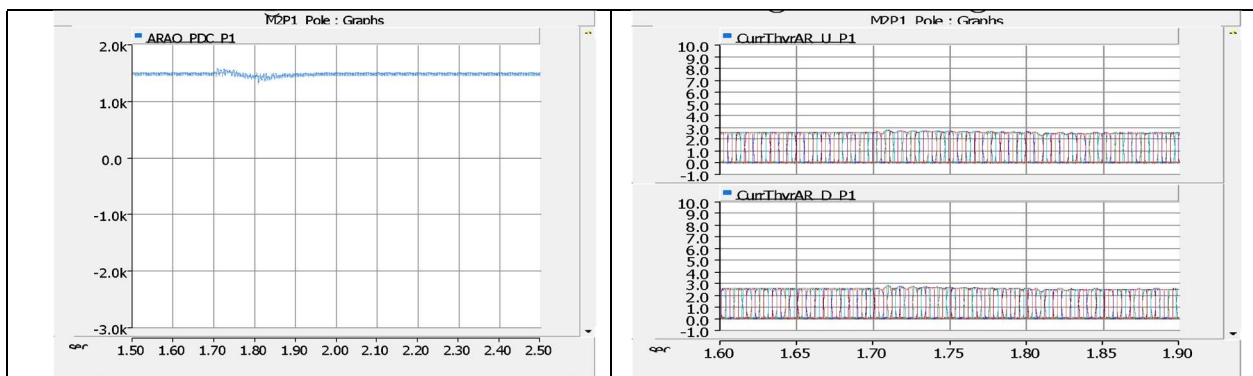


Figura 6: Conversora Araraquara sem FC: Potência transferida pelo pólo1 e correntes nos tiristores dos polos 1 e 2 com compensação reativa por 3 CS de 300 MVA.

3.2 ALOCAÇÃO DE CS NAS BARRAS DAS CONVERSORAS

Em uma outra análise, por meio do programa ANATEM [9], foi analisado o conceito de transformar os conversores LCC em “*Non-Interacting Inverters*” para o SIN. Para este fim, foram instalados CS nas barras das estações inversoras em quantidade indicadas na primeira coluna da Tabela 1. Feito isto, foi aplicada falta nessas

barras e é possível identificar a estrutura diagonal dos resultados obtidos nessa tabela levando a concluir que a FC ocorrida numa inversora e motivada pela falta na sua barra, não leva a ocorrência de FC nos demais LCC. Ou ainda que a distribuição de CS adotada nas estações conversoras anula possíveis efeitos multi-infeed associados à estrutura da Rede. É importante salientar que os resultados relatados dependem da severidade da falta adotada no estudo. Estes resultados recomendam uma consolidação dos estudos de aplicação de CS como primeira linha de defesa contra FC em sistema multi-infeed. Trata-se de uma solução de alto grau de maturidade tecnológica que acena para redução da reserva operativa e perturbação de operação, e uma maior utilização do sistema de transmissão. A Figura 7 ilustra os processos dinâmicos da tensão (V) e das potências ativa (P) e reativa (Q) trocadas entre a Rede e o conjunto de 4 CS (capacidade total de 1200 Mvar) em serviço por ocasião de um curto monofásico nos terminais.

Tabela 1 – Comportamento dinâmico das conversoras para falta monofásica na barra da inversora com CS de 300 MVA instalados nas barras inversoras. Número de CS instalados indicado entre parênteses.

	IBIUNA	ARARAQ2	ESTREITO	T.RIO
IBIUNA (4)	FC	ON	ON	ON
ARARAQ2 (2)	ON	FC	ON	ON
ESTREITO (2)	ON	ON	FC	ON
T.RIO (2)	ON	ON	ON	FC

FC: falta de comutação e ON: Operação Normal.

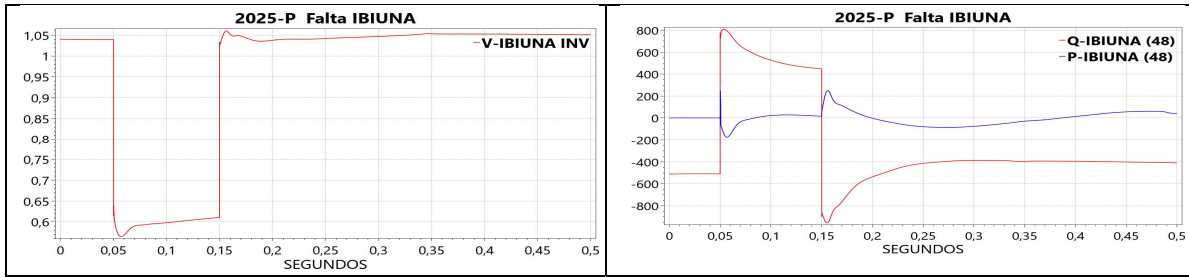


Figura 7: Conversora Ibiuna: tensão no barramento, potência ativa e potência reativa.

4.0 CONTROLE DINÂMICO DO ÂNGULO DE EXTINÇÃO

Uma das estratégias de proteção que busca evitar falhas de comutação após a ocorrência de um defeito na rede elétrica consiste na antecipação do disparo das válvulas das estações inversoras, conhecida como malha de controle para a prevenção de falha de comutação (em inglês, CFPREV – *Commutation Failure Prevention*) [10]. Tal estratégia pode ser vista na Figura 8, onde um circuito de detecção de defeito trifásico, através da variação na tensão de sequência positiva, assim como um circuito de detecção de defeito monofásico, através da mudança na tensão de sequência zero. Caso qualquer um destes circuitos detecte a ocorrência de defeito, devido à ultrapassagem dos limites $\Delta V_{1,lim}$ ou $V_{0,lim}$, adotados como 5% e 3%, respectivamente, do valor nominal de tensão, há o incremento do ângulo de avanço $\Delta\beta_{CFPREV}$, que corresponde a uma antecipação no ângulo de disparo e um consequente aumento no ângulo de extinção da próxima válvula a ser disparada. Ressalta-se que a literatura dispõe de poucos detalhes sobre o cálculo dos ganhos K_1 e K_2 , apenas utilizando valores iguais para ambos nestas aplicações [11]. Neste trabalho, foi adotado um modelo matemático para a obtenção de K_2 partindo da relação entre os ângulos de disparo α , comutação μ e extinção γ [12]:

$$\mu = \left(\cos\alpha - \frac{2X_s I_d}{\sqrt{2}V_{LL}} \right) - \alpha, \quad (4.1)$$

onde X_s é a reatância de comutação, dada principalmente pelo transformador existente entre a rede CA e a ponte a tiristor, I_d é a corrente de operação do elo CC, V_{LL} é a tensão de linha do lado CA. Verificando a variação do ângulo de comutação em função da tensão da rede:

$$\frac{\partial\mu}{\partial V_{LL}} = - \frac{\sqrt{2}X_s I_d}{V_{LL}^2 \sqrt{1 - \left(\cos\alpha - \frac{\sqrt{2}X_s I_d}{V_{LL}} \right)^2}}. \quad (4.2)$$

Considerando uma variação na tensão ΔV_{LL} , se tem, aproximadamente, uma variação $\Delta\mu$ dada por:

$$\Delta\mu \approx - \frac{\sqrt{2}X_s I_d}{V_{LL}^2 \sqrt{1 - \left(\cos\alpha - \frac{\sqrt{2}X_s I_d}{V_{LL}} \right)^2}} \Delta V_{LL}. \quad (4.3)$$

Desta forma, caso a tensão no lado CA diminua devido à uma falta, haverá um aumento no ângulo de comutação, que deve ser compensado através da diminuição do ângulo de disparo α , representando um aumento no ângulo de

avanço $\Delta\beta$ com o intuito de aumentar o ângulo de extinção para os tiristores durante a operação. A abordagem utilizada neste artigo considera então um ganho K_2 tal que o incremento $\Delta\beta_{CFPREV}$ fornecido pelo controle seja igual à variação no ângulo de comutação:

$$K_2 = \left| \frac{\Delta\beta_{CFPREV}}{\Delta V_{LL}} \right| = \left| \frac{\sqrt{2}X_s I_d}{V_{LL}^2 \sqrt{1 - \left(\cos\alpha - \frac{\sqrt{2}X_s I_d}{V_{LL}} \right)^2}} \right|, \quad (4.3)$$

e como mencionado anteriormente, foi adotado $K_1 = K_2$, conforme encontrado na literatura [9].

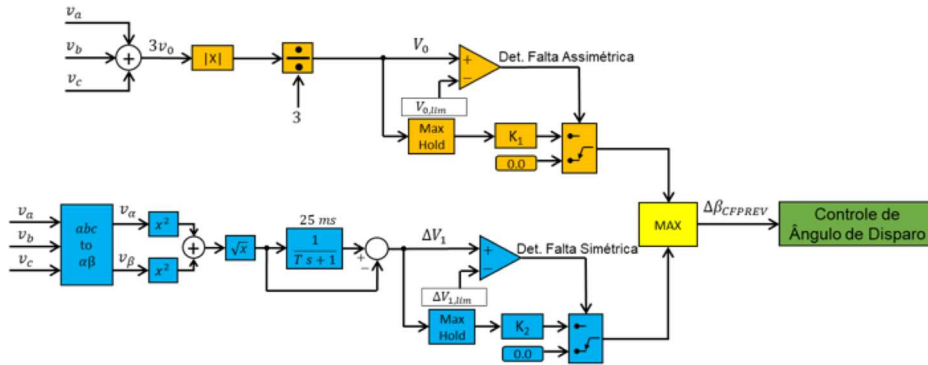


Figura 8 – Controle para prevenção de falha de comutação (CFPREV) utilizado no trabalho.

Para validar a eficácia do método de forma independente, ou seja, considerando apenas o desempenho em um elo CCAT sem a influência dos demais, foi obtido um equivalente de rede tanto para o lado retificador quanto para o lado inversor de Belo Monte 1 (Estreito) e de Belo Monte 2 (T. Rio), separadamente, através do modelo existente de carga leve do SIN PAR-PEL 2025 no ANAFAS, e então representados estes modelos no PSCAD junto do modelo de cada elo, sendo adotados os mesmos modelos de elo utilizados no estudo de Carvalho et al. [13], porém contendo também o CFPREV no controle das inversoras. Após a montagem do modelo no PSCAD, foram aplicadas faltas monofásicas no lado inversor com diferentes valores de indutância L, objetivando verificar o desempenho sobre diferentes afundamentos de tensão ΔV , bem como também a variação do instante de aplicação do defeito, que influencia no resultado obtido devido aos instantes de disparo dos tiristores da inversora. Tal resultado pode ser visto na Figura 9, onde as células em rosa claro indicam os casos em que se teve FC sem o CFPREV, e as células em laranja escuro indicam que houve falha de comutação mesmo com a atuação do CFPREV, de forma que o desempenho é identificado pela diferença entre estas quantidades, representando os casos em que a FC foi mitigada devido à atuação do controle.

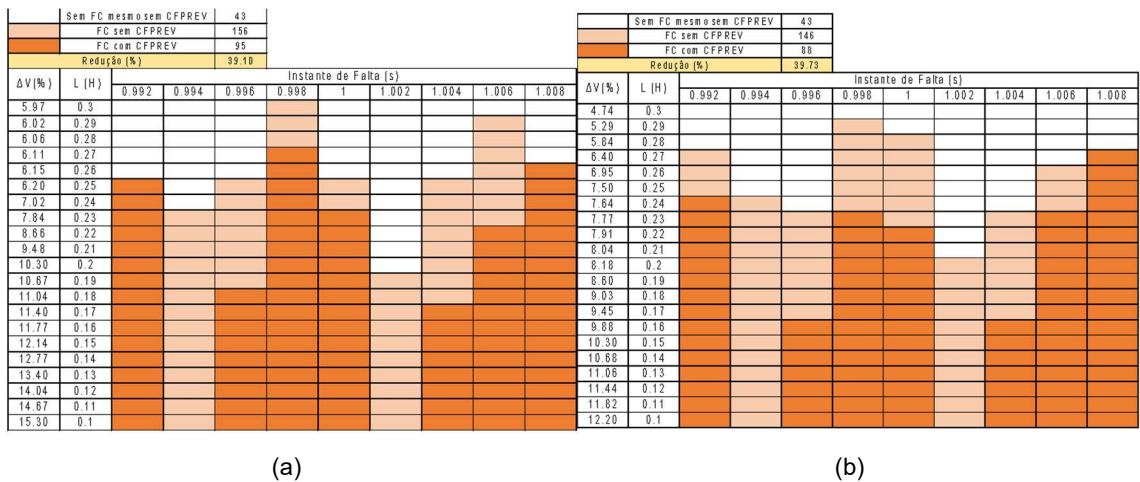


Figura 9 – Ocorrências e mitigações de FC em (a) Belo Monte 1 (Estreito) e em (b) Belo Monte 2 (T. Rio) devido à implementação do CFPREV, com as inversoras conectadas apenas aos equivalentes de curto-circuito.

Considerando o resultado mostrado, foi possível observar que houve uma redução de 39,10% na ocorrência de FC em Belo Monte 1 para afundamentos de tensão entre 5,97% e 15,3%, e uma redução de 39,73% dos casos em

Belo Monte 2 para afundamentos de tensão entre 4,74% e 12,2%. O procedimento foi também feito para os outros elos CCAT, apresentando uma redução de 23,24% na ocorrência de FC para afundamentos de tensão entre 4,73% e 29,1% na inversora de Ibiúna e uma redução de 52% para afundamentos de tensão entre 5,1% e 15,53% na inversora de Araraquara2, mostrando o potencial de mitigação da estratégia. A Tabela 2 resume os resultados obtidos e apresenta os valores adotados para os ganhos K_1 e K_2 nos controles de cada inversora.

Tabela 2 – Resumo dos resultados obtidos através da utilização do CFPREV com as inversoras conectadas apenas aos equivalentes de curto-circuito.

Inversora	$K_1 = K_2$ (%/pu)	Redução de FC (%)	ΔV (%)
Estreito	49,75	39,10	5,97 – 15,30
T. Rio	67,11	39,73	4,74 – 12,20
Ibiúna	28,75	23,24	4,73 – 29,10
Araraquara2	36,62	51,97	5,11 – 15,53

5.0 MULTI-INFEED INTERACTION FACTOR E OPERAÇÃO COM ÂNGULO DE EXTINÇÃO AUMENTADO

Dois outros estudos foram desenvolvidos com o objetivo de mitigar FC: *Multi-infeed Interaction Factor* (MIIF) e Operação com Ângulo de Extinção Aumentado.

A metodologia baseada no MIIF foi usada para mapear as barras do SIN onde a ocorrência de curto-circuito é suscetível de infligir FC em algum LCC. Ela se baseia em levantar as subestações onde resultam em MIIF maiores que 0,30, valor considerado indicador de alta probabilidade de FC. A Figura 10 mostra as estações inversoras e regiões cercadas em azul onde o MIIF é maior que 0,30 e as áreas em vermelho representam regiões muito críticas com MIIF maior que 0,45. Nestas subestações mais interativas, CS ou STATCOM podem ser alocados com o objetivo de diminuir o mútuo impacto, o que é refletido na obtenção de menores valores de MIIF. Quanto menores os valores de MIIF obtidos, melhor a alocação dos equipamentos de suporte de tensão. Por falta de espaço, mais resultados destes estudos não são apresentados aqui.

A operação dos inversores com ângulo de extinção aumentado consiste em propor novos valores para estes ângulos por um curto período, mas suficiente para garantir maior margem de comutação. Foram avaliadas a necessidade de potência reativa, o controle de tensão e as perdas nos *snubbers*, tendo por objetivo reduzir a vulnerabilidade do elo a curtos-circuitos na rede AC. A vulnerabilidade do elo é avaliada pela variação do módulo e ângulo da tensão provocada pelos curtos-circuitos na barra da conversora.



Figura 10 – Regiões críticas do SIN em função do MIIF.

6.0 CONCLUSÕES

Deste trabalho a primeira conclusão relativamente óbvia que se tira é que sendo o tiristor uma chave semicondutora que depende de tensão reversa aplicada em seus terminais para cortá-lo e que esta tensão depende das condições da rede no instante da comutação, não há como garantir a eliminação total do fenômeno de FC em conversores LCC. No entanto, várias soluções mitigadoras podem ser empregadas para diminuir em muito as possibilidades de FC. Nesse sentido, este trabalho avaliou várias possibilidades de mitigar a FC com o objetivo de garantir maior robustez na operação de elos CCAT com LCC. Vale notar que este trabalho relata as experiências obtidas com o desenvolvimento de projeto de P&D ANEEL junto à State Grid Brazil Holding, é possível que algumas conclusões venham ficar mais bem definidas ao final do projeto. Esta conclusão é válida no estágio atual dos trabalhos.

Uma proposta nova é a adição de um pequeno conversor de tensão em série com a rede (entre o LCC e a rede) para operar apenas durante o processo de comutação de corrente entre um tiristor e outro sempre que houver um curto-circuito na rede. Este novo equipamento foi batizado de SeVC e foi mostrado que curtos-circuitos na rede que

levariam a FC em todos os elos CC do SIN podem ser mitigados com o seu uso. Alguns testes mostraram resultados positivos com conversores série com potência da ordem de 14% dos LCC.

Os compensadores síncronos (CS) e STATCOM foram testados quando inseridos nas barras de tensão das inversoras. O CS desde que adicionados nas barras dos LCC podem ajudar a mitigar a FC. Por outro lado, o MMC-STATCOM tem menor efeito na mitigação da FC. A limitação de corrente no MMC-STATCOM nos instantes iniciais parece ser um fator importante nesse desempenho mais favorável ao CS. No entanto, é possível que com o desenvolvimento de MMC-STATCOM com maior capacidade de picos de corrente o seu desempenho fique mais próximo ao CS.

Os testes com o CFPREV (*Commutation Failure Prevention*) mostraram ser esta uma opção de baixo custo por se tratar apenas na adição de controle para ajudar a mitigar FC, mas como nos outros casos, não elimina totalmente esse problema.

Os estudos de delimitação de áreas críticas baseado no MIIF pode ser importante para determinação de áreas críticas e com isso alocar CS ou STATCOM de forma e melhorar a robustez da rede e diminuir a ocorrência de FC nas estações inversoras.

7.0 REFERÊNCIAS

- [1] Guoqing Li, Song Zhang, Tao Jiang, Houhe Chen, Xue Li. A Method of Detecting Commutation Failure in Multi-infeed HVDC Systems Based on Critical Failure Impedance Boundary. IEEE. 2017
- [2] J.A. Jardini, R. Biase, R.L.V. Arnez, J.F. Graham and L. Guijun. HVDC Multi-infeed Commutation Failure Analysis within the Brazilian System with the Insertion of Bipoles A and B. CIGRE. 2018.
- [3] Hou L., Zhang S., Wei Y., Zhao B. and Jiang Q., "A Dynamic Series Voltage Compensator for the Mitigation of LCC-HVDC Commutation Failure," in IEEE Transactions on Power Delivery, Feb. 2021.
- [4] KONTOS, E. et al. High order voltage and current harmonic mitigation using the modular multilevel converter STATCOM. IEEE Access, v. 5, p. 16684–16692, 2017. ISSN 2169-3536.
- [5] Pirouz, H.M.; Bina, T.M. A transformerless medium voltage STATCOM topology based on extended modular multilevel converters. IEEE Trans. Power Electron. 2011, 26, 1534–1545.
- [6] AKAGI, H. Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (mmcc). IEEE Transactions on Power Electronics, v. 26, n. 11, p. 3119–3130, Nov 2011. ISSN 0885-8993.
- [7] Tsolaridis, G.; Pereira, H.A.; Cupertino, A.F.; Teodorescu, R.; Bongiorno, M. Losses and cost comparison of DS-HB and SD-FB MMC based large utility grade STATCOM. In Proceedings of the 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy, 7–10 June 2016.
- [8] Chaudhary, S.K.; Cupertino, A.F.; Teodorescu, R.; Svensson, J.R. Benchmarking of Modular Multilevel Converter Topologies for ES-STATCOM Realization. Energies 2020, 13, 3384.
- [9] CEPEL, "Programa ANATEM - Análise de Transitórios Eletromecânicos - Manual do Usuário - V12.00.00," Rio de Janeiro, 2021.
- [10] Lidong Zhang and L. Dofnas, "A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems," Proceedings. International Conference on Power System Technology, 2002, pp. 51-56 vol.1.
- [11] L. Cheng et al., "A combined AC-DC control strategy for commutation failure mitigation," 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2017, pp. 1-6.
- [12] C-Ki Kim et al. HVDC Transmission - Power Conversion Applications in Power Systems. John Wiley & Sons, 2009.
- [13] A.R.C. Dias de Carvalho et al. Metodologia para Estudo de Sistemas HVDC Multi-Infeed. XXV SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2019.

DADOS BIOGRÁFICOS



Engenheiro Eletrônico e Mestre pela UFRJ, Doutor em Engenharia pelo Instituto de Tecnologia de Tóquio. Professor Titular da COPPE/UFRJ. Ex-diretor da COPPE/UFRJ. Membro da Academia Brasileira de Ciências, Academia Nacional de Engenharia, IEE-Japão, SBA, SOBRAEP, CIGRE e PES, IAS, IES e PESL do IEEE. Recebeu Prêmio IEEE PES Nari Hingorani de FACTS, é Fellow do IEEE. Admitido na Ordem Nacional do Mérito Científico, classe "Comendador", em 2005. Condecorado pelo governo japonês com "Ordem do Sol Nascente, Raios de Ouro com Laço". Em 2020, incluído na lista dos 2% dos cientistas mais citados no mundo, da PLOS Biology.

(2) ROBSON DIAS graduou-se como Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Pará (UFPA) em 2002. Em 2008, defendeu o Doutorado pela COPPE/UFRJ. De 2008 a 2009, permaneceu na UFRJ como pesquisador Recém-Doutor, em que participou do grupo de pesquisa Otimização de sistemas de transmissão utilizando metodologias não convencionais. No período de 2009 a 2010, fez parte do Centre for Applied Power Electronics na Universidade de Toronto, Canadá, como pesquisador pós-doutor. Atualmente, é professor da UFRJ. Suas áreas de interesse são aplicação de dispositivos FACTS, Transmissão e Distribuição de Energia, Energias Renováveis e Transitórios Eletromagnéticos.

(3) ANDRÉ GUILHERME PEIXOTO ALVES graduou-se em 2016 no curso de engenharia elétrica da UFRJ, onde recebeu o prêmio pelo maior rendimento acadêmico da turma. Ingressou no curso de mestrado da COPPE/UFRJ

pelo Programa de Engenharia Elétrica (PEE) no mesmo ano, onde focou no controle e operação de sistemas de Geração Distribuída (GD) e microrredes ilhadas, finalizando-o em 2018. Atualmente é professor substituto no Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFRJ, além de estar cursando o doutorado na COPPE/UFRJ pelo PEE. Sua pesquisa se baseia no controle de conversores eletrônicos aplicados em GD e também em elos de corrente contínua em alta tensão.

(4) LAÍS FERREIRA CRISPINO PROENÇA possui graduação (2014) em Engenharia Eletrônica e de Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e mestrado (2017) e doutorado (2021) em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ. Atuou em diversos projetos de P&D na COPPE/UFRJ na área de Eletrônica de Potência, e como Pesquisadora Bolsista de Doutorado no Fundo Verde da UFRJ nos projetos das áreas de Geração de Energia e Eficiência Energética (2017/2019). Em 2019/2020 foi Co-Fundadora e Chair do Capítulo Estudantil (SBC) da UFRJ do PELS/IEEE. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência e Sistemas de Energia.

(5) TOMÁS DE REZENDE BELO PEREIRA é graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência na instituição CEFET-RJ e cursando Mestrado na instituição PUC-RJ em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia. Experiência profissional com projetos e estudos elétricos de regime permanente utilizando pacote CEPEL e de regime de transitórios eletromagnéticos utilizando ATP/EMPT e PSCAD. Participações em projetos de pesquisas e desenvolvimento na área de transmissão de corrente contínua.

(6) MATHEUS DANTAS DE PAIVA é graduado em Engenharia Elétrica na instituição CEFET-RJ, cursando Mestrado na instituição UFRJ com ênfase em Sistemas de Potência. Experiência profissional com estudos elétricos de regime permanente utilizando pacote CEPEL e estudos elétricos de regime transitórios utilizando ATP/EMPT e PSCAD. Participações em projetos de pesquisas e desenvolvimento com ênfase na área de transmissão de corrente contínua.

(7) CARLOS EDUARDO VIZEU PONTES é graduado em Sistemas de Potência-UFF (1980). Pós-graduação Westinghouse/Penn State University (1989). Professor Departamento Matemática Aplicada-UFF (1980-83). MBA Gerência de Projetos-FGV (2008). Trabalhou na Light (1981-2016) no Planejamento da AT. Representante Light nos grupos de trabalho do ONS e EPE. Integrou grupos de trabalho da ANEEL e ONS na reestruturação do Setor participando da elaboração dos Procedimentos de Rede e dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Gerente de Projetos de P&D ANEEL 2002-2016. Assessor Geral Projeto Olimpíadas 2016 (Light), responsável pela entrega de energia aos Jogos. Engenheiro Consultor POWERCONSULT Engenharia Ltda.

(8) JOÃO AMIN MOOR NETO possui graduação em Engenharia Elétrica pela UCP-RJ (1991), Mestrado em Engenharia Elétrica pela UNIFEI (1991) e doutorado pela COPPE/UFRJ (2008). Atualmente é professor associado III no CEFET-RJ. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica atuando, principalmente, nos seguintes tópicos: eletrônica de potência aplicada em sistemas de potência, transitórios eletromagnéticos e qualidade de energia. Participações como pesquisador em projetos de P&D nos tópicos citados em estudos envolvendo o uso de programa de transitórios eletromagnéticos e no desenvolvimento de protótipos experimentais de dispositivos baseados em eletrônica de potência.

(9) BRAULIO CHUCO possui graduação em Engenharia Elétrica pela FIEE/UNAC - Perú, mestrado em Engenharia Elétrica pela DEL/UFMS e doutorado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica de Potência pela COPPE/UFRJ. Têm experiência em estudos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, Modelagem de sistemas HVDC-LCC, HVDC-VSC, HVDC-MMC, Compensadores Estáticos SVC, STATCOM, Aerogeradores com máquinas DFIG, Gaiola de Esquilo, Máquina Síncrona de Ímã Permanente e Parques Eólicos para análise de Transitórios Eletromagnéticos em EMTP/ATP, EMTDC/PSCAD. Atualmente é professor no DEPE/CEFET-RJ.

(10) ALQUINDAR PEDROSO é Professor Colaborador Voluntário na Escola Politécnica/UFRJ e Diretor da AP Sistemas Elétricos Ltda. Orienta suas atividades de Pesquisa e Desenvolvimento nas áreas de Dinâmica e Controle de Sistemas Elétricos, e Máquinas Elétricas. Por 40 anos esteve engajado no ensino e pesquisa nas áreas de análise, controle e operação de Sistemas Elétricos de Geração e Transmissão de Energia. Mais recentemente tem estendido sua atividade profissional a Análise de Interação entre dispositivos CA-CC, Armazenamento de Energia, Integração de Renováveis e Identificação dos Desafios Tecnológicos relacionados às mudanças no Setor Elétrico.

(11) GLEYDSON DOS SANTOS NEVES é doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Mestre em Engenharia Elétrica e Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense (UFF, 2018) e Graduado em Engenharia Elétrica/Eletrônica pela Faculdade de Engenharia de Resende (FER, 2013), experiência profissional em pesquisa e desenvolvimento em processos metalúrgicos e geração de energia através de aplicação de plasma térmico. Principais temas de atuação, eletrônica de potência, controle de processos, transmissão em corrente contínua HVDC-LCC e HVDC-VSC. Possui trabalhos nas áreas de eletrônica de potência, controle e qualidade de energia.

(12) JOHN FRANCIS GRAHAM - Engenheiro Eletricista desde 1965, atuando com transmissão de energia,

notadamente HVDC. Anos na ABB, e desde 2013 na SGBH. Trabalhos incluiu o estudo e contratação dos dois elos de UHVDC de Belo Monte, ± 800 kV, 4000 MW. Recentemente, o foco tem sido em projetos de P&D, incluindo de sistema de transmissão UHVAC (1000 kV) para integrar energia renovável ao sistema brasileiro. Membro ativo do Cigre SC B4 "HVDC e Eletrônica de Potência" incluindo secretário do TB 388 "Linhas HVDC na Economia de Projetos" e membro do TB 417 "Avaliação Tecnológica de HVDC em 800 kV".

(13) PAULO ESMERALDO é Engenheiro Eletricista pela UFRJ, especialista em Sistemas de Transmissão de Energia. MsC. UNIFEI, IEEE Fellow, CIGRE Technical Committee Award e Membro honorário do CIGRE. Atualmente é Consultor da State Grid Brazil Holding para projetos de P&D. De 2016 a 2020 foi Diretor-Presidente Adjunto da XRTE, responsável pela implantação do Bipolo II UHVDC do Sistema de Transmissão de Belo Monte. Foi Superintendente de Transmissão de Energia da EPE entre 2005 a 2013, envolvido no Planejamento de Transmissão do SIN. Trabalhou 26 anos em FURNAS, onde foi Chefe do Departamento de Planejamento da Transmissão. Autor de mais de cem artigos técnicos.

(14) AUGUSTO TIETZ é Engenheiro Eletricista com formação em sistemas elétricos de potência, possui 10 anos de experiência na realização de estudos elétricos para avaliação de impactos sistêmicos de ocorrências e novos empreendimentos. Sólida experiência também na realização e acompanhamento de projetos de pesquisa e desenvolvimento dentro do programa de P&D da ANEEL. Atualmente atua no setor de engenharia da State Grid Brazil Holding como responsável pelo acompanhamento e realização de estudos elétricos para projetos *greenfield* e *brownfield*.