

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA

Análise do benefício de desempenho nos sistemas elétricos Paraguaio e Argentino do uso de um controle suplementar de amortecimento no Bipolo 1 do HVDC Foz do Iguazu-Ibiúna

Jonas Pesente, Bruno Santos Oliveira

ITAIPU Binacional, UNIOESTE

Brasil

1.1 Resumen

A interligação de Itaipu 50Hz, dos sistemas elétricos paraguaio (sistema interligado nacional paraguaio – SIN-PY) e argentino (sistema argentino de interconexão – SADI) é uma obra de grande porte que permitirá escoar potência entre os países, possivelmente trazendo benefícios de confiabilidade e qualidade no atendimento à ambos os países.

Entretanto, esta interligação provoca um conjunto de desafios técnicos, dentre os quais neste trabalho se discute o controle das oscilações de potência associadas ao modo interárea envolvendo Itaipu e Yacyretá, criado da interligação dos sistemas elétricos Paraguaio e Argentino.

Tais oscilações de potência associadas ao modo interárea trazem riscos operacionais ao sistema interligado, e carecem de ser controladas para garantir a segurança do sistema e seus equipamentos. Este modo já foi identificado como instável e controlado pelo ajuste dos estabilizadores de sistema de potência dos geradores de Itaipu 50Hz. Não obstante, a previsão da atualização tecnológica do bipolo 1 do Elo de Corrente Contínua Foz do Iguazu-Ibiúna, com possibilidade da inclusão de um controle para amortecimento de oscilações eletromecânicas, combinada ao desempenho aceitável, porém inferior ao de regime normal para certas condições de alto carregamento do sistema interligado e de seus equipamentos de transmissão com PSS, demanda a avaliação da questão se o benefício obtido do uso do controle no HVDC justifica sua implantação e colocação em serviço.

Neste trabalho, a estrutura deste controle, seu ajuste e uma avaliação do impacto dinâmico são apresentados. São ilustrados análises e resultados de amortecimento sob a ótica de pequenas perturbações, e também sobre a excursão das grandezas elétricas do sistema elétrico interligado. Os resultados obtidos encorajam o uso deste controle e incentivam sua análise e descrição em detalhes.

1.2 Palabras clave

Interligação Paraguai-Argentina, controle e estabilidade do sistema interligado da ANDE, *Power Oscillation Damping*.

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente a carga do sistema elétrico paraguaio (SIN-PY) é assistida por dois subsistemas, um interligado à Itaipu (SS1) abastecendo as regiões da capital, do norte e parte do sul, correspondendo à cerca de 85% de sua demanda, e outro conectado à Yacyretá e ao sistema elétrico Argentino (SADI), alimentando parcialmente a região sul, e correspondente à cerca de 15% de sua carga (SS2).

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA

No intuito de fazer o aproveitamento dos recursos hidroenergéticos da usina de Yacyretá para alimentar as cargas da região metropolitana, fortalecer sua rede de transmissão e prover intercâmbio entre subsistemas, a *Administración Nacional de Electricidad (ANDE)* construiu a linha LT 500 kV AYO-VHA, com 347 km e capacidade de 2215 MVA [1], ilustrada na Figura 1 pela linha pontilhada¹.

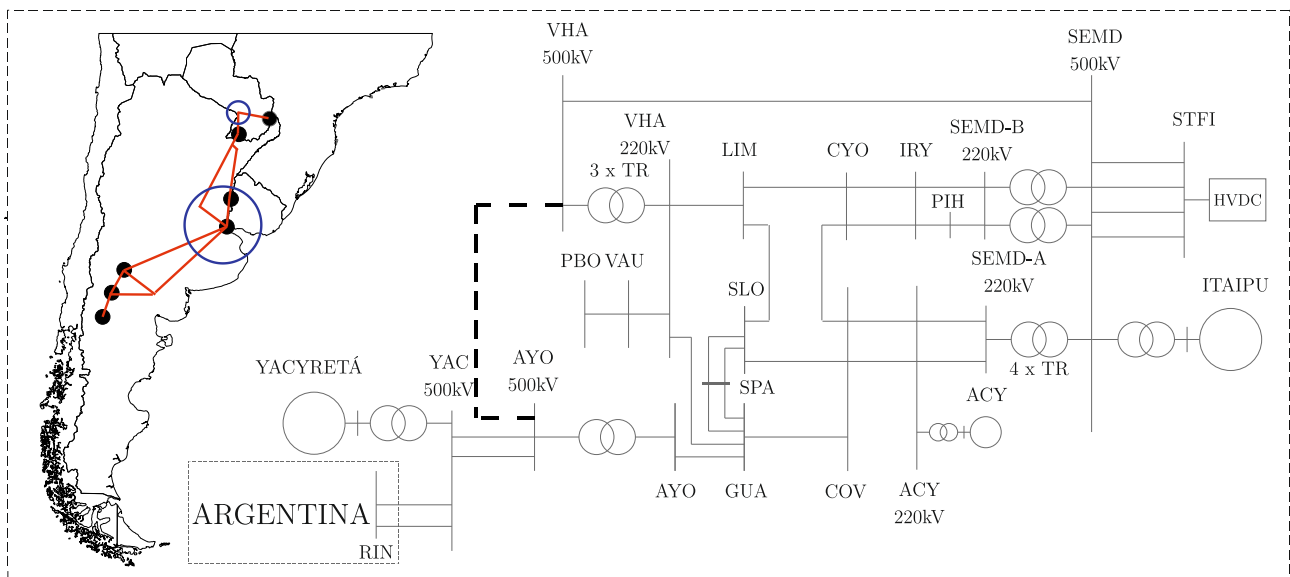


Figura 1 – Diagramas esquemático e geográfico dos elementos fundamentais da análise.

A Figura 1 ilustra também, de forma simplificada, a disposição geográfica dos geradores de Itaipu (7.000MW), Yacyretá (3.000MW), Salto Grande (1.890MW), Piedra del Águila (1.400MW), El Chocón (1.328MW), Atucha 1 e 2 (745MW e 362MW), Alicurá (1.050MW) e Embalse (683MW) nos pontos pretos, assim como os centros de carga do SIN-PY (máxima histórica de 3.632MW) e do SADI (máxima histórica de 26.500MW [2]) nos círculos azuis. O diagrama unifilar da Figura 1 apresenta, adicionalmente, as principais subestações do SIN-PY.

A configuração ilustrada de centros de carga eletricamente distantes dos centros geradores no SADI implica na existência de três modos interárea ([3]), e estudos realizados de estabilidade à pequenas perturbações indicam que a interligação do SADI com Itaipu 50 Hz origina um modo interárea adicional, fracamente amortecido.

Em adição às obras da interligação, está também sendo conduzido o projeto de modernização do bipolo 1 do elo de corrente contínua entre Foz do Iguaçu e Ibiúna, ilustrado na Figura 1 pelo acrônimo HVDC. Este elo de corrente contínua possui dois bipolos, cada um com capacidade de 3.150MW, totalizando 6.300MW. O sistema de transmissão em corrente contínua é formado por duas linhas de ± 600 kV, com extensão de aproximadamente 810 km, entre as subestações de Foz do Iguaçu (PR) e Ibiúna (SP), como ilustrado na Figura 2 (linha tracejada de Foz do Iguaçu até Ibiúna).

¹ Esses sistemas possuem também um ponto de conexão em duas linhas de 220kV entre as subestações de GUA e SPA, porém essa conexão não viabiliza a operação segura entre os sistemas devido à sua limitada capacidade de transmissão (2x238MVA) e elevada impedância (5 vezes superior à da linha de 500kV).

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA

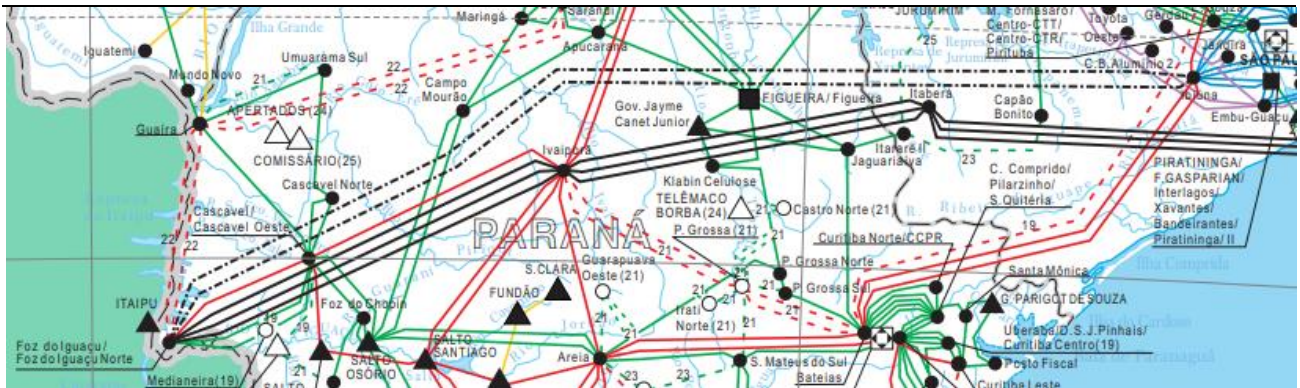


Figura 2 – Ilustração do sistema de corrente contínua entre Foz do Iguaçu e Ibiúna.

Devido ao montante de potência transmitido, o Elo de Corrente Contínua tem grande influência sobre o comportamento dinâmico do sistema elétrico paraguaio, e sua modernização permitirá a adição de controles que podem auxiliar o desempenho operacional do sistema elétrico paraguaio e argentino interligado. Neste trabalho, avalia-se o efeito da inclusão de um amortecedor de oscilações de potência (POD) no bipolo 1.

2.0 - NATUREZA DA DINÂMICA DE PEQUENAS PERTURBAÇÕES APÓS A INTERLIGAÇÃO DOS SISTEMAS PARAGUAIO E ARGENTINO-URUGUAIO

A segurança operativa dos sistemas interligados prevê minimamente considerar a combinação das condições de carga do SADI e do SIN-PY e intercâmbio entre si. Em Itaipu, os estudos consideraram adicionalmente a variação do número de geradores (de 5 a 10) e de seu carregamento (de 500 MW a 750 MW), totalizando 1.536 casos de regime permanente. Dentre eles, sete casos limítrofes serão utilizados neste trabalho para ilustrar as análises e resultados. Estes casos, assim como o modo interárea originado da interligação e o modo intraplanta de Itaipu, para a condição de geradores em Itaipu sem PSS (condição operativa para o sistema não interligado) são apresentados na Tabela 1.

Os modos apresentados na Tabela 1 mostram que a natureza do modo interárea é tal que sua frequência natural varia entre 0,33Hz e 0,41Hz (máximo de 15,1% de variação com relação à média), e com amortecimento entre -1,65% e 5,01%.

A análise a pequenas perturbações relativa ao modo interárea indica que os geradores de Itaipu são os únicos que efetivamente proveem amortecimento, o que pode ser verificado pela magnitude superior do resíduo da função de transferência $\Delta\omega(s)/V_{REF}(s)$ para Itaipu quando comparado aos resíduos dos demais geradores [3].

Esta conclusão é reforçada pela participação muito superior de Itaipu na composição do modo, e sobretudo porque os geradores das demais usinas principais apresentam pares de zeros complexo conjugados de fase não-mínima em seus laços de estabilização, indicando sua inabilidade em estabilizar adequadamente o modo interárea [3].

Baseado nesta constatação, o modo interárea foi estabilizado a partir do ajuste dos PSS dos geradores de Itaipu, como apresentado em [3]. A efetividade desta solução também é ilustrada na Tabela 1, pelos modos em negrito.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
 23 y 24 de Junio 2022

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA

Tabela 1 – Casos limítrofes de regime permanente e autovalor associado ao modo interárea originado da interligação, à malha aberta (sem PSS nos geradores de 50Hz de Itaipu), e com PSS em Itaipu (modos em **negrito**)

Caso	Acrônimo	Carga SADI	Carga SIN-PY	Intercâmbio	N. Ger. IPU	MW. Ger. Itaipu	Autovalor interárea
1	Baixo carregamento dos geradores	26.581MW (NOCHE)	3.825MW	1.350MW	5	500MW	$-0,128 \pm j2,553, 0,406\text{Hz}/5,01\%$ $-0,470 \pm j1,974, 0,314\text{Hz}/23,15\%$
2	Número mínimo de geradores	26.581MW	3.825MW	1.350MW	5	700MW	$-0,096 \pm j2,553, 0,406\text{Hz}/3,74\%$ $-0,470 \pm j1,973, 0,314\text{Hz}/23,06\%$
3	Base (máximo em todos)	26.581MW	3.825MW	1.350MW	10	700MW	$-0,046 \pm j2,163, 0,344\text{Hz}/2,14\%$ $-0,326 \pm j1,854, 0,290\text{Hz}/17,61\%$
4	Baixo intercâmbio PY-AR	26.581MW	3.825MW	540MW	10	700MW	$0,031 \pm j1,892, 0,301\text{Hz}/-1,65\%$ $-0,250 \pm j1,564, 0,250\text{Hz}/15,80\%$
5	Baixa carga SIN-PY	26.581MW	1.490MW	1.260MW	10	700MW	$-0,065 \pm j2,163, 0,344\text{Hz}/3,02\%$ $-0,228 \pm j1,978, 0,280\text{Hz}/10,75\%$
6	Carga SIN-PY e interc. baixos	26.581MW	3.825MW	0MW	10	700MW	$-0,018 \pm j2,095, 0,333\text{Hz}/0,87\%$ $-0,230 \pm j1,903, 0,301\text{Hz}/11,95\%$
7	Baixa carga SADI	16.964MW (VALLE)	3.825MW	1.350MW	10	700MW	$-0,081 \pm j2,373, 0,370\text{Hz}/3,49\%$ $-0,426 \pm j1,968, 0,313\text{Hz}/21,14\%$

3.0 - PROJETO DE CONTROLE DO POWER OSCILLATION DAMPING

A estrutura do POD é representada pela Figura 3, a qual mostra o diagrama de blocos e seus módulos de controle utilizado para a formação do POD, onde esses módulos serão abordados em sequência. Basicamente, o POD é composto por um módulo *wash-out*, que evita ações do controle em regime permanente, um módulo avanço-atraso (*lead-lag*), para compensação da fase da planta na frequência do modo pelo controle e um ganho para modular a intensidade do controle.

A saída do POD será adicionada no ponto de soma da malha de potência do retificador do bipolo 1 (o sinal modulador SM04 é adicionado à referência de potência do Elo de CC).

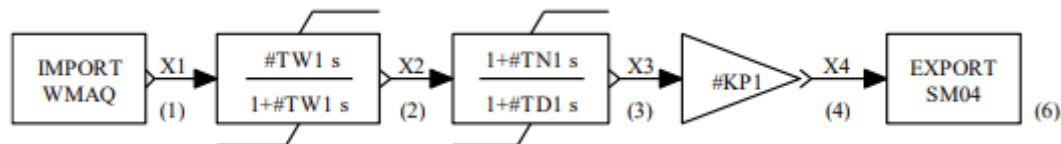


Figura 3 – Controlador POD

O Elo de CC opera, em condições normais, controlando a corrente no retificador por bipolo, tal como no diagrama da Figura 4 (o diagrama corresponde à malha de um bipolo). Na Figura 4 percebe-se que este controle tem arquitetura PI, e é limitado em 3 patamares: no integrador do PI, na saída do PI e na saída limitada do PI. A saída destes controles comandam o ângulo de disparo das válvulas do retificador (α_{REF}). E então, o sinal do POD projetado (SM04) é adicionado à referência de potência do Elo de CC.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA

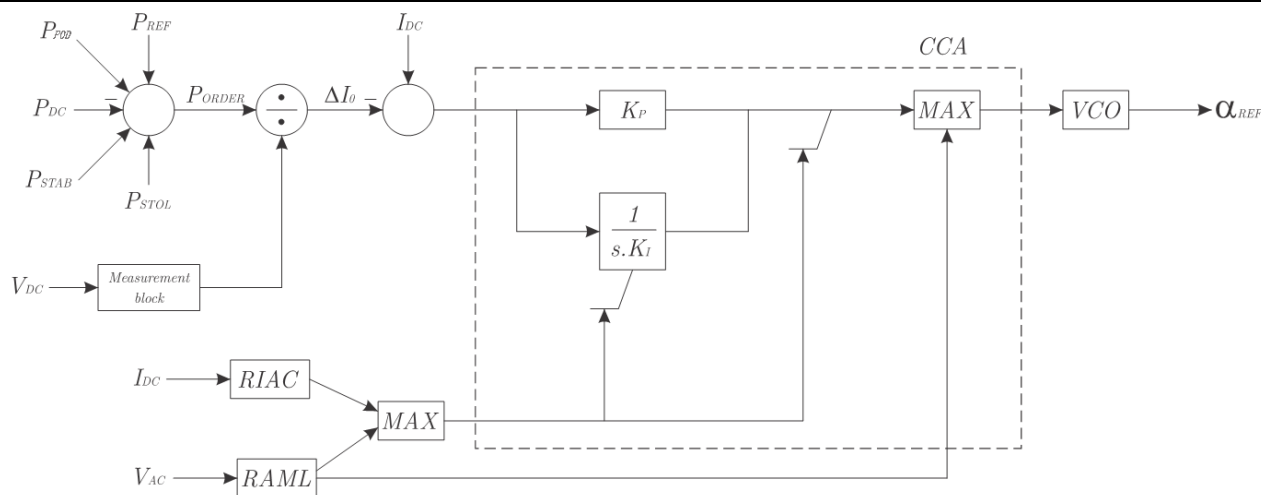


Figura 4 – Controle da corrente do retificador do Elo CC (CCA)

O ajuste do módulo avanço-atraso é efetuado de forma a compensar o atraso de fase da malha $P_{ORD}(s)/\text{Freq}(s)$, analisado pela teoria da estabilidade de Nyquist. Como ilustrado na Figura 5, para o caso crítico, se percebe que a fase é próxima à -180° , de modo que uma compensação de fase pequena é necessária pelo bloco *lead-lag*.

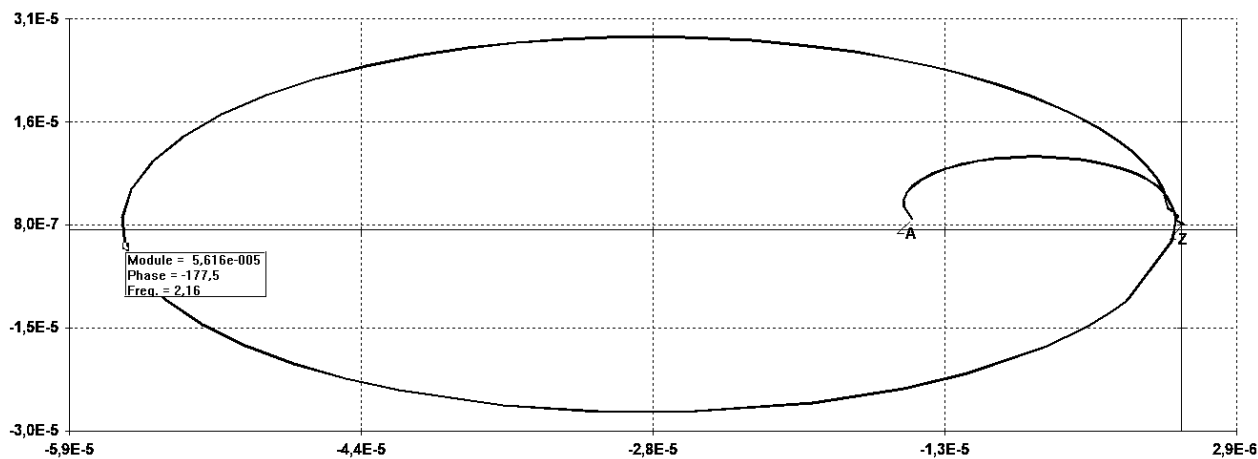


Figura 5 – Nyquist do sistema sem PSS

Assim, após o projeto da compensação de fase pelo critério de Nyquist, se pode determinar um valor de ganho favorável a partir do traçado do lugar das raízes relativo ao ganho do POD, como ilustrado na Figura 6, de onde se pode verificar um aumento significativo do amortecimento do modo interárea pela adoção de um POD no HVDC com ajuste adequado.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA

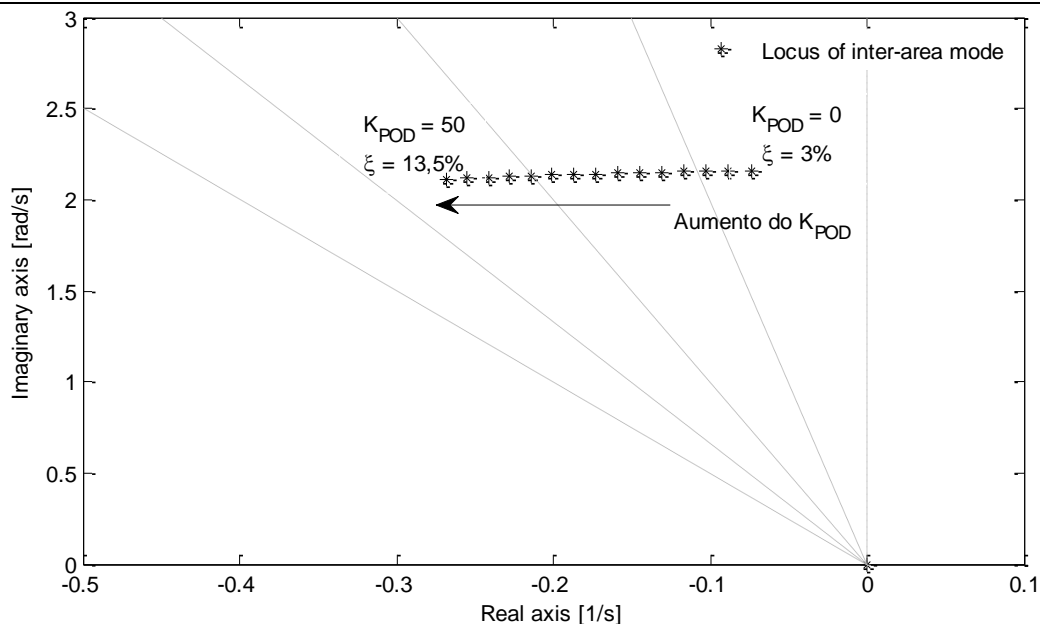


Figura 6 – Lugar das raízes do modo interárea para variações no ganho do POD do HVDC

4.0 - RESULTADOS – BENEFÍCIOS DA ADOÇÃO DO POD NO HVDC

O reflexo deste benefício é apresentado na Figura 7 de forma comparada com o sistema sem PSS e sem POD, com PSS e sem POD, com POD sem PSS e com ambos.

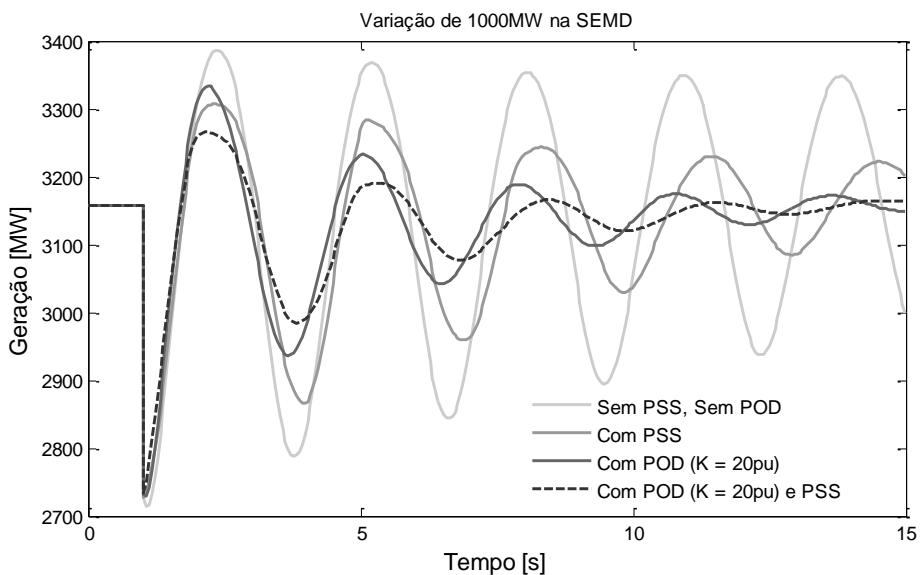


Figura 7 – Resposta do sistema interligado para uma variação súbita de 1000MW na SE-MD

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA

De acordo com a Figura 7 se pode inferir que o POD pode adicionar torque de amortecimento significativo ao modo interárea, fortalecendo a ideia de que esse é um controle importante, se disponível, contra oscilações de natureza eletromecânica.

A Figura 8 ilustra a ação do bipolo 1 para a simulação da Figura 7, de onde se percebe que a ação do POD efetua pequenas variações transitórias na potência transmitida pelo Elo de Corrente contínua, que porém resultam em uma dinâmica muito mais suave que os outros casos controlados.

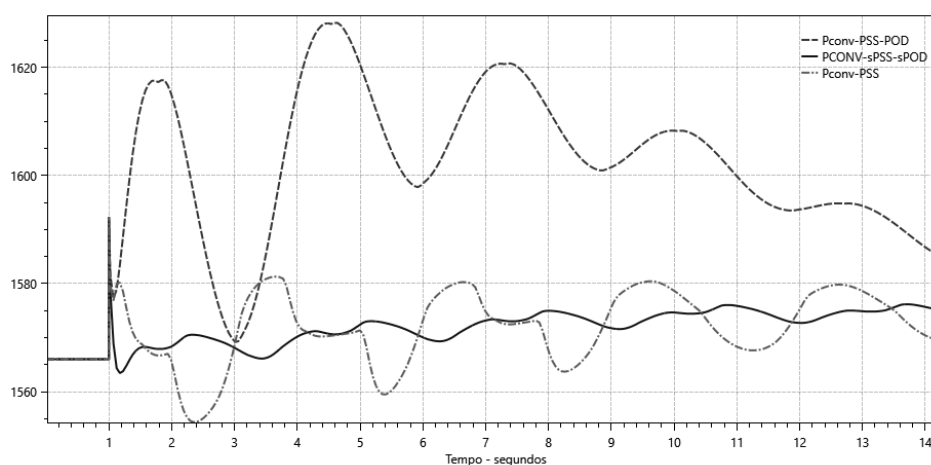


Figura 8 – Ações de controle no Elo de CC para uma variação súbita de 1000MW na SE-MD

Uma vez que o HVDC já possui uma malha de controle de frequência associada ao STAB50, se avaliou também o efeito do ganho dessa malha (K_1) sobre o amortecimento do modo eletromecânico.

Considerando-se um caso sem PSS, e variando K_1 de 20% do valor atual (6,4pu) para 500% do valor atual (160pu), a variação do amortecimento do modo foi de 2,65% para 5,09%, que não é considerado, à priori, um ganho expressivo de amortecimento a partir desse controle (à título de exemplo, considerando o ganho central do POD em 20pu/típico, a variação de amortecimento para K de 20% a 250% corresponde à alteração de amortecimento de 2,84% para 12,9%). Entretanto, ainda é possível afirmar que o aumento do K_1 afeta positivamente o amortecimento do modo eletromecânico, o que está ilustrado na Figura 9 pela comparação da resposta de Itaipu à desconexão de uma unidade geradora com diferentes ajustes de K_1 .

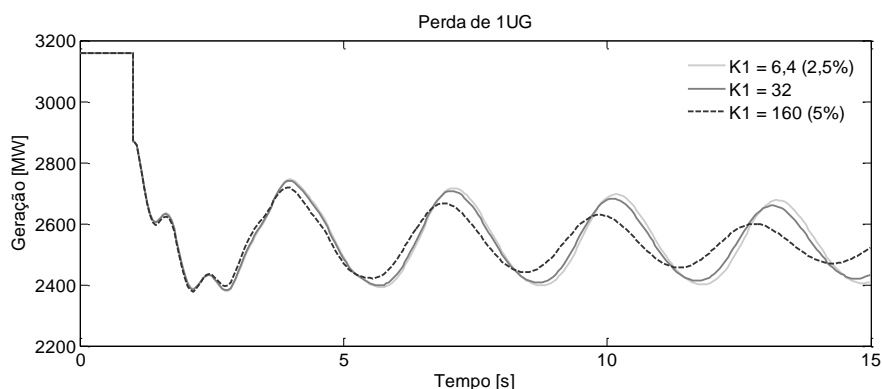


Figura 9 – Comparação da resposta de Itaipu à perda de uma unidade geradora com diferentes ajustes de K_1

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA

5.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um projeto de amortecedor de oscilações de potência pela modulação da potência transmitida no bipolo 1 do Elo de Corrente Contínua entre Foz do Iguaçu e Ibiúna/Brasil, e também seu efeito sobre a dinâmica do sistema paraguaio e argentino interligados.

Esta análise se inclui no contexto da modernização do bipolo 1 do Elo de Corrente Contínua, prevista para o horizonte operacional de curto prazo, no qual se pode adicionar este controlador, que atualmente não está disponível.

A análise efetuada revelou que o controlador melhora de forma significativa o desempenho dinâmico do sistema interligado e, portanto, o desempenho operacional do sistema, podendo ter efeito importante sobre limites de transmissão e ajustes de outros sistemas especiais.

Trabalhos futuros incluem a avaliação dinâmica dos demais parâmetros do controle assim como seu impacto para as principais perturbações que podem ocorrer no sistema paraguaio-argentino interligado.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. ANDE, *Plan Maestro de Expansion de la Transmisión 2014-2023*, 2014.
- [2]. Máximos Históricos de Energia Y Potencia Sazonales. Cammesa., acessado em 29/07/2021.
- [3]. J. Pesente, M. L. Sosa-Rios, M. Pienitz, R. Garcia, B. Alvarenga. *Utilização dos PSS das unidades de Itaipu 50Hz para estabilização e melhoria do desempenho dinâmico do sistema interligado Paraguai-Argentino-Uruguai*. XXVI SNPTEE, 2022.
- [4]. N. Martins, P. Quintão, H. Pinto, A. Castro, S. Gomes, J. Ferras. *A small-signal stability program incorporating advanced graphical user interface*, VII SEPOPE, 2000.
- [5]. R. Sadikovic, P. Korba, G. Andersson. *Application of FACTS devices for damping of power system oscillations*. Power Tech, 2005 IEEE San Petersburg, Russia.
- [6]. H. Liu, Z. Xu. *Parameters tuning of HVDC small-signal modulation controllers based on test signal*. Proc. 2003 IEEE-PES General Meeting, vol. 4, pp. 2527-2531.
- [7]. R. Creasp, W. Mittelstad. *Small signal modulation of the pacific intertie*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 2, March/April 1976.
- [8]. N. Martins. *Efficient eigenvalue and frequency response methods applied to power system small-signal stability studies*. IEEE TPWRS, v. 1, n. 1, p. 217-224, 1986.
- [9]. A. Carvalho, L. Almeida, L. Daniel, e J. Barros. *Princípios de Controle Aplicados a Elos HVDC*. XI SEPOPE, 2009.