



**GRUPO - IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMA DE POTÊNCIA- GAT**

**PROBLEMAS ASSOCIADOS À ESPECIFICAÇÃO E PROJETO INDEPENDENTES DE FILTROS AC DE ESTAÇÕES CONVERSoras HVDC OPERANDO ELETRICAMENTE PRÓXIMAS EM UM AMBIENTE “MULTI-VENDOR” E “MULTI-OWNER”**

**Fernando Cattan Jusan(\*)**  
**FURNAS**

**RESUMO**

Este trabalho discute aspectos técnicos e gerenciais relacionados à especificação e projeto de filtros AC para estações conversoras HVDC operando eletricamente próximas, particularmente em um ambiente com múltiplos agentes e fornecedores. Potenciais problemas decorrentes da realização de projetos independentes destes filtros (i.e. sem avaliar as possíveis interações harmônicas) são ilustrados por meio de exemplos numéricos simples. Em todos os casos, os filtros propostos atendem aos requisitos de desempenho de forma individual, mas apresentam problemas na operação conjunta.

**PALAVRAS-CHAVE**

HVDC, Filtros AC, Multi-Infeed, Multi-Vendor, Multi-Owner

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O projeto de filtros AC de uma estação conversora HVDC normalmente precisa atender requisitos de desempenho harmônico e de compensação de potência reativa em condições especificadas. Quando existem múltiplas conexões HVDC na rede (“multi-infeed”), uma avaliação cuidadosa das possíveis interações harmônicas entre estações conversoras deve ser feita (1). Se duas estações conversoras são consideravelmente desacopladas eletricamente, o projeto dos filtros AC de uma estação pode ser feito com o único objetivo de limitar os harmônicos produzidos nesta estação, sem muita preocupação com os harmônicos produzidos na outra estação. Se, no entanto, a distância elétrica entre as estações é relativamente pequena ou há uma condição de ressonância na rede elétrica conectando as mesmas, a impedância dos filtros de uma estação irá modificar a impedância harmônica vista pela outra, possivelmente afetando o desempenho harmônico de seus filtros. Além disso, as capacidades nominais (“rating”) dos componentes dos filtros de uma estação devem levar em consideração a contribuição dos harmônicos gerados na outra estação, que em condições de ressonância severa pode ser até maior que a contribuição dos harmônicos gerados localmente. Desprezar estas interações pode levar a um desempenho e rating inadequados dos filtros projetados.

O projeto dos filtros AC de estações conversoras em sistemas HVDC multi-infeed<sup>1</sup> envolve diversos aspectos particulares, tais como:

---

<sup>1</sup> Apesar de o termo “multi-infeed” ser normalmente empregado para designar um sistema com múltiplos inversores conectados eletricamente próximos e suas interações dinâmicas, interações harmônicas podem ocorrer também entre estações operando como retificador e situações mistas. O termo “multi-infeed” será usado indiscriminadamente neste trabalho para se referir a qualquer uma dessas situações.

- Compatibilização dos projetos de filtros das duas estações para obtenção de desempenho harmônico adequado em operação conjunta e divisão equilibrada do carregamento harmônico entre os mesmos;
- Identificação e prevenção de potenciais problemas de ressonância e amplificação harmônica, que poderia resultar em sobrecarga dos filtros de uma estação conversora pelos harmônicos produzidos na outra estação;
- Especificação de limites de harmônicos quando da implantação da primeira instalação, de forma a permitir a implantação da segunda instalação sem violar os limites regulatórios;
- Especificação de limites de harmônicos para a operação conjunta, que podem ser diferentes dos limites aplicados a cada estação individualmente;
- Estabelecimento de procedimentos para verificação do desempenho harmônico de cada instalação durante a realização de medições no campo.

Estas questões não são apenas de interesse puramente técnico. Elas podem ter impacto significativo no custo do projeto dos filtros, nos requisitos para estudos e no cronograma do projeto. Apesar do custo dos equipamentos associados aos filtros ser relativamente pequeno em comparação com o custo global de implantação de uma estação conversora HVDC, outras questões podem ter impacto econômico significativo no projeto.

A falta de clareza nos requisitos de projeto e a insuficiência de informação na Especificação Técnica em como lidar com estas questões podem acarretar longas discussões durante o projeto, retrabalho e possivelmente atrasos. Desprezar estes fatores no dimensionamento dos filtros pode resultar em desempenho inadequado, restrições operativas e, no pior cenário, soluções de filtros incompatíveis. Modificar os filtros após sua construção e instalação é extremamente difícil e demorado, com impacto no arranjo da subestação, fundações, proteção, fabricação de novos equipamentos, etc. Por outro lado, a adoção de premissas de projeto excessivamente conservativas e grandes margens de segurança sem realizar um estudo de coordenação detalhado pode resultar em filtros desnecessariamente caros e complexos. Portanto, recomenda-se que este assunto seja investigado o quanto antes e que todas as informações técnicas necessárias, métodos de cálculo e requisitos de desempenho estejam claramente definidos na Especificação Técnica.

Este artigo discute os aspectos técnicos e gerenciais relacionados à especificação e projeto de filtros AC para estações conversoras HVDC operando eletricamente próximas - em um ambiente possivelmente com múltiplos agentes (aqui também referidos como Transmissoras) e fornecedores - por meio de exemplos que ilustram possíveis problemas decorrentes da falta de coordenação e verificação das interações entre os diferentes projetos durante a operação conjunta.

## 2.0 - AMBIENTE "MULTI-VENDOR" E "MULTI-OWNER"

O termo "multi-vendor" é normalmente associado a sistemas HVDC compostos por estações conversoras fornecidas por diferentes fabricantes (por exemplo, um sistema multi-terminal, onde cada terminal é de um diferente fornecedor). Neste artigo, "multi-vendor" se refere a uma estação conversora cujos filtros AC são fornecidos por mais de um fabricante ou a estações conversoras independentes localizadas eletricamente próximas com filtros fornecidos por diferentes fabricantes.

Em um sistema "multi-vendor", um grau de complexidade adicional é introduzido na especificação e projeto dos filtros AC. A avaliação da operação conjunta de estações conversoras independentes requer a troca de informações entre os diferentes fabricantes, como dados do circuito principal dos conversores, correntes harmônicas e características dos filtros. Isto inclui não somente o arranjo básico e parâmetros nominais dos filtros, mas idealmente também os fatores de dessintonia, sequências de chaveamento e capacidades nominais dos componentes ("rating"). Se existe um longo intervalo entre os projetos, então todos os dados técnicos relevantes do primeiro projeto devem ser disponibilizados para os potenciais fornecedores durante a etapa de oferta do segundo projeto para que estes possam fazer uma avaliação realista do impacto sobre o custo dos filtros. Neste caso, os novos filtros devem ser projetados de forma a não comprometer o desempenho e o rating dos filtros existentes. Por outro lado, se os projetos são simultâneos ou existe um intervalo relativamente curto entre eles, os dados dos filtros de uma estação não estão disponíveis para o projetista dos filtros da outra estação durante a etapa de oferta. Assim sendo, algumas premissas deverão ser assumidas para uma avaliação dos custos e um grande esforço de colaboração será necessário durante a fase de execução do projeto para verificação da compatibilidade dos filtros e permitir obter uma solução otimizada. Em geral, em um sistema HVDC "multi-vendor", não há relação contratual direta entre as partes envolvidas, o que faz com que a coordenação dos projetos seja ainda mais complicada em virtude das restrições de confidencialidade normalmente impostas pelos fabricantes na transferência de informação proprietária.

A coordenação dos projetos de filtros pode ser ainda mais difícil se as estações conversoras pertencerem a diferentes proprietários. Nos anos 1990 e início dos anos 2000, muitos países reestruturaram os seus setores

elétricos com o objetivo de atrair mais investimentos privados para garantir a expansão do suprimento de energia e do sistema de transmissão. Em um mercado de transmissão aberto, as instalações de transmissão podem ser compartilhadas por diversos agentes e operadas por um operador independente. Em um sistema puramente AC, esta multiplicidade de agentes e fornecedores apresenta alguns desafios, mas a integração de sistemas HVDC neste ambiente é obviamente muito mais complexa devido às características intrínsecas a esta tecnologia.

Com a proliferação de projetos HVDC e o avanço da desregulamentação e liberalização dos mercados de eletricidade em muitas partes do mundo, um cenário com múltiplos agentes (“multi-owner”) e fornecedores (“multi-vendor”) vem se tornando cada vez mais comum.

No Brasil, os novos projetos de HVDC consistem basicamente de grandes blocos de potência (na faixa de aproximadamente 3GW a 10GW), com transmissão a longa distância em tensões de  $\pm 600\text{kV}$  e  $\pm 800\text{kV}$ . Estes grandes troncos de transmissão são concedidos através de leilões de transmissão, nos quais o sistema completo é dividido em várias partes menores (lotes) e estas partes são leiloadas como concessões individuais para estimular competição e reduzir o custo total de implantação. Concessionárias estatais, investidores privados e entidades mistas podem fazer parte do processo. Como resultado, o sistema completo passa a ser administrado por vários agentes, cada qual com seus próprios fornecedores para os equipamentos e serviços. Isto resulta em uma interface complexa entre as partes envolvidas, tendo grande influência nas soluções de engenharia adotadas, particularmente na área de harmônicos e filtros.

### 3.0 - PROBLEMAS RELACIONADOS AO PROJETO INDEPENDENTE DE FILTROS AC EM SISTEMAS HVDC MULTI-INFEED

No Brasil, cada concessão de transmissão é tratada de forma independente do ponto de vista regulatório. Limites individuais de distorção harmônica são definidos de forma independente para os diferentes acessantes, mesmo quando conectados ao mesmo ponto elétrico do sistema (2). O efeito combinado de todas as fontes harmônicas em uma determinada barra é submetido aos chamados limites globais de distorção harmônica. O monitoramento e gerenciamento destes limites é feito pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) através de campanhas de medição específicas e pontuais durante e após o comissionamento, quando os filtros já estão em operação. No entanto, o atendimento aos limites globais não é exigido na etapa de execução do projeto, uma vez que dependem do efeito de uma multiplicidade de fontes espalhadas pelo sistema interligado, muitas vezes de origem desconhecida.

Pelas regras atuais, portanto, não há uma exigência formal de estudos ou critérios específicos para a operação conjunta de diferentes concessões de transmissão. Da mesma forma, os Editais de Licitação de projetos de HVDC recentes não fornecem os dados necessários, não definem métodos e nem estabelecem requisitos para avaliação das possíveis interações harmônicas entre sistemas HVDC de diferentes concessões. Este é o caso, por exemplo, de dois bipolos licitados de forma independente e conectados na mesma subestação terminal (e.g. Madeira, Belo Monte).

Os próximos subitens apresentam um conjunto de exemplos numéricos simples para ilustrar potenciais problemas que podem ocorrer durante a operação conjunta quando a especificação e o projeto dos filtros AC de dois esquemas HVDC localizados eletricamente próximos são realizados de forma independente, i.e. sem considerar as possíveis interações harmônicas entre eles. Em todos os casos, os filtros propostos atendem aos requisitos individuais de desempenho, mas apresentam problemas na operação conjunta.

#### 3.1 Ressonância entre filtros em harmônicos característicos

Considere dois conversores HVDC conectados na mesma barra de um sistema AC em 50 Hz, 400 kV. A potência de curto-circuito no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) varia entre 6.5 GVA e 25 GVA. Ambos os conversores são projetados para transmitir 600 MW com tensão DC nominal de  $\pm 125\text{kV}$  e, neste exemplo, operam como retificadores com ângulo de disparo entre  $10^\circ$  e  $15^\circ$ .

A impedância harmônica da rede AC é representada por setores circulares determinados conforme procedimento simplificado apresentado em (3), no qual os parâmetros são calculados com base nas potências de curto-circuito mínima e máxima da rede elétrica.

Os conversores HVDC são modelados como fontes de corrente ideais. Para cada harmônico  $h$ , o pior caso de impedância da rede AC no contorno do envelope de impedância é selecionado de forma a minimizar a soma vetorial das admitâncias dos filtros ( $Y_F$ ) e da rede ( $Y_N$ ). Este procedimento é adotado para obter o pior caso de distorção harmônica no PAC -  $V_h = h / (Y_F + Y_N)$ .

As correntes harmônicas geradas pelos conversores são mostradas na Tabela 1. Apenas harmônicos característicos são considerados neste exemplo. Por simplicidade, é assumido que os dois sistemas HVDC produzem as mesmas correntes harmônicas e que estas correntes se somam de forma linear quando os dois esquemas estão em operação conjunta.

Neste exemplo, os filtros AC dos dois sistemas HVDC são projetados de forma independente por diferentes projetistas. Este pode ser o caso de projetos simultâneos realizados sem coordenação ou o caso da instalação

escalonada de um sistema HVDC, onde os dados do projeto de filtros do primeiro esquema não estão disponíveis para o concorrente (durante a etapa de oferta) ou fornecedor (durante a etapa de execução do projeto) do segundo esquema.

Tabela 1 – Correntes harmônicas geradas pelos conversores (em A)

Configuração	Harmônicos					
	11	13	23	25	35	37
HVDC 1	47.58	31.91	8.92	8.88	4.34	3.73
HVDC 2	47.58	31.91	8.92	8.88	4.34	3.73
HVDC 1 + HVDC 2	95.16	63.82	17.84	17.76	8.68	7.46

Cada esquema deve cumprir requisitos individuais de desempenho harmônico. A distorção harmônica individual de tensão não deve exceder 0.6% para harmônicos ímpares e 0.4% para harmônicos pares.

O projetista dos filtros do primeiro esquema optou por usar filtros de sintonia simples sintonizados no 11<sup>o</sup> e 13<sup>o</sup> harmônicos e um filtro amortecido para os harmônicos 23<sup>o</sup>/25<sup>o</sup> e de mais alta ordem. Um capacitor shunt de 170 Mvar é usado para fins de compensação de potência reativa. Por outro lado, a solução de filtragem do segundo esquema é composta por um filtro amortecido de dupla sintonia 12<sup>o</sup>/24<sup>o</sup> e um capacitor shunt. Os Mvar totais usados para filtragem (180 Mvar) e puramente para compensação reativa (170 Mvar) são os mesmos nos dois esquemas. Os diagramas unifilares dos dois arranjos de filtros são mostrados na FIGURA 1.

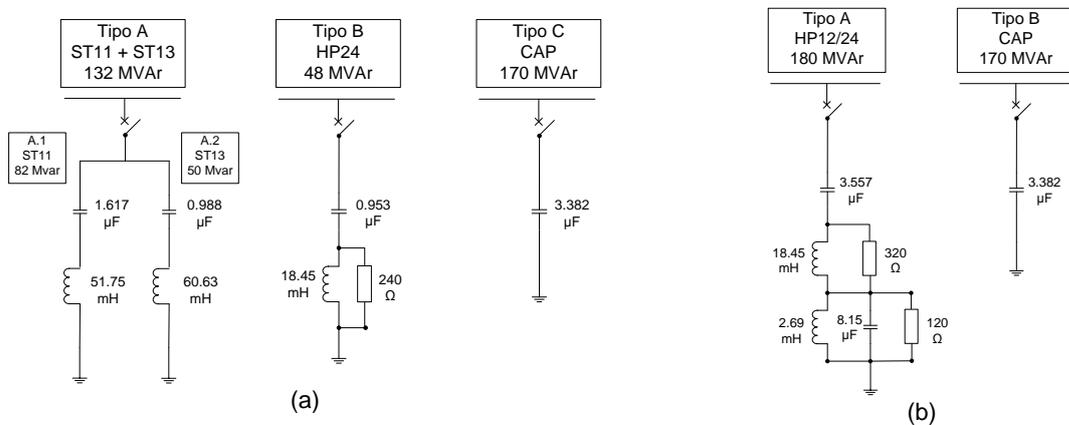


FIGURA 1 – Filtros AC: (a) HVDC 1; (b) HVDC 2

A dessintonia dos filtros é considerada através de variações explícitas na frequência do sistema ( $50 \pm 0.5$  Hz) e tolerância dos componentes. Tolerâncias de fabricação são consideradas para capacitores, reatores e resistores. Para capacitores, consideram-se ainda as dessintonias devido à variação da temperatura ambiente ( $-5^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$ ) e à perda de elementos capacitivos ( $-0.3\%$ ). As piores combinações dos fatores de dessintonia são consideradas no cálculo do desempenho harmônico. Deve-se ressaltar, no entanto, que os mesmos desvios devido à variação de frequência e temperatura são aplicados a todos os filtros simultaneamente, uma vez que eles estão instalados eletricamente e fisicamente no mesmo local.

Os valores máximos calculados de distorção harmônica para cada esquema operando individualmente e para operação conjunta são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Desempenho harmônico (em % da tensão nominal do sistema) – harmônicos característicos

Harmônico	HVDC 1 (operação individual)	HVDC 2 (operação individual)	HVDC 1 + HVDC 2 (operação conjunta)	HVDC 1 (2x)	HVDC 2 (2x)
11	0.60	0.59	<b>1.14</b>	0.39	0.54
13	0.41	0.39	0.47	0.27	0.39
23	0.22	0.26	0.22	0.21	0.26
25	0.19	0.21	0.19	0.18	0.21
35	0.10	0.12	0.09	0.08	0.09
37	0.08	0.10	0.07	0.07	0.07

A tabela acima mostra que os projetos de filtros dos dois esquemas atendem aos requisitos especificados individualmente. Por outro lado, verifica-se um nível de distorção consideravelmente mais elevado no 11<sup>o</sup> harmônico em condições específicas de dessintonia devido a uma ressonância não prevista entre os dois conjuntos

de filtros, conforme pode ser observado graficamente no diagrama vetorial apresentado na FIGURA 2.

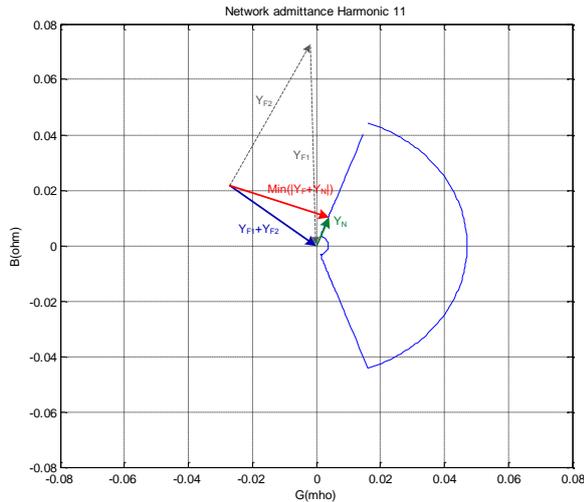


FIGURA 2 – Ressonância entre os filtros dos sistemas HVDC 1 e 2 no 11º harmônico

A ressonância entre os filtros dos dois esquemas também leva a um aumento no rating de alguns elementos dos filtros, podendo levar a sobrecarga. A Tabela 3 mostra as correntes harmônicas máximas que fluem pelos componentes dos filtros em operação individual e conjunta. Observa-se que as correntes harmônicas em alguns componentes durante a operação conjunta são superiores a duas vezes àquelas verificadas em operação individual.

Para fins de comparação, os níveis máximos de distorção obtidos assumindo-se que os dois esquemas empregam soluções de filtragem idênticas são apresentados nas duas últimas colunas da Tabela 2. Verifica-se que o desempenho conjunto com filtros idênticos é em geral igual ou melhor que o desempenho individual, apesar desta solução não necessariamente garantir uma solução global ótima em todas as situações.

Tabela 3 – Correntes harmônicas máximas em componentes dos filtros

HVDC	Ramo do filtro	Componente	HVDC 1 (operação individual)	HVDC 2 (operação individual)	HVDC 1 + HVDC 2 (operação conjunta)
HVDC 1	A.1	C1 e L1	11° / 143.7 A	-	11° / 274.8 A
	A.2	C1 e L1	13° / 71.2 A	-	13° / 94.4 A
HVDC 2	A	C1	-	11° / 57.3 A	11° / 131.9 A
	A	L1	-	11° / 56.3A	11° / 129.6 A
	A	R1	-	11° / 10.4 A	11° / 24.4 A
	A	C2	-	23° / 26.0 A	11° / 45.8 A
	A	L2	-	11° / 75.4 A	11° / 176.8 A
	A	R2	-	11° / 6.3 A	11° / 15.1 A

### 3.2 Ressonância de baixa ordem

Filtros AC sintonizados nos harmônicos característicos e harmônicos de mais alta ordem são tipicamente capacitivos na faixa de frequência dos harmônicos de baixa ordem. Assim, uma ressonância paralela é naturalmente criada entre a capacitância dos filtros e a impedância indutiva da rede elétrica. Se esta ressonância for mal amortecida e sintonizada em uma frequência entre o 2º e 4º harmônicos, então um oneroso filtro de baixa ordem pode ser necessário. Isto é particularmente importante para o 3º harmônico, uma vez que o nível de 3º harmônico gerado pelos conversores é geralmente maior que outros harmônicos de baixa ordem devido à presença de sequência negativa na tensão AC de frequência fundamental (4).

Deve-se ressaltar, entretanto, que para harmônicos de baixa ordem, é incorreto assumir que os conversores possuem impedância interna infinita e podem ser representados como fontes de corrente ideais (i.e. desprezar o efeito da interação harmônica AC/DC) (5). Contudo, esta hipótese simplifica grandemente a análise, sendo útil para o propósito deste exemplo. Uma abordagem mais detalhada requereria a utilização de um modelo AC-DC-AC completo, o que está claramente fora do escopo deste trabalho. Considerando então esta simplificação, a frequência de ressonância pode ser aproximada por  $f_{res} = f_0 \cdot \sqrt{SCL_{min}/Q_f}$ , onde  $f_0$  é a frequência nominal do sistema (Hz),  $SCL_{min}$  é a potência de curto-circuito mínima da rede AC (MVA) e  $Q_f$  é a potência reativa shunt total conectada na barra do conversor (Mvar).

Considere os mesmos sistemas HVDC do exemplo anterior. Cada esquema possui uma compensação reativa total de 350 Mvar. Desta forma, a ressonância paralela para qualquer um destes esquemas operando individualmente é 230 Hz, i.e. relativamente longe do 3º harmônico e, portanto, não devem ocorrer amplificações harmônicas significativas. Por outro lado, para a operação conjunta, a frequência da ressonância paralela é 150 Hz. Ou seja, a ressonância está perfeitamente sintonizada no 3º harmônico, indicando que há um risco potencial de produzir níveis elevados de distorção harmônica.

A corrente de 3º harmônico produzida por cada esquema neste exemplo é 5.7 A, totalizando 11.4 A na operação conjunta. As máximas distorções de tensão de 3º harmônico para operação individual e operação conjunta são apresentadas na Tabela 4, onde verifica-se o efeito da ressonância sobre a distorção harmônica.

Tabela 4 – Desempenho harmônico (em % da tensão nominal do sistema) – 3º harmônico

Harmônico	HVDC 1 (operação individual)	HVDC 2 (operação individual)	HVDC 1 + HVDC 2 (operação conjunta)
3	0.36	0.36	<b>2.09</b>

O impacto de considerar o montante total de capacitância conectado na barra em comparação com o cálculo do desempenho individual de cada esquema é ilustrado no diagrama vetorial da FIGURA 3. Vale notar que, apesar de as soluções de filtragem dos dois esquemas HVDC serem muito diferentes, as suas impedâncias são praticamente idênticas no 3º harmônico (uma capacitância pura determinada pelo Mvar dos filtros). Desta forma, os filtros dos dois esquemas contribuem igualmente para a condição de ressonância.

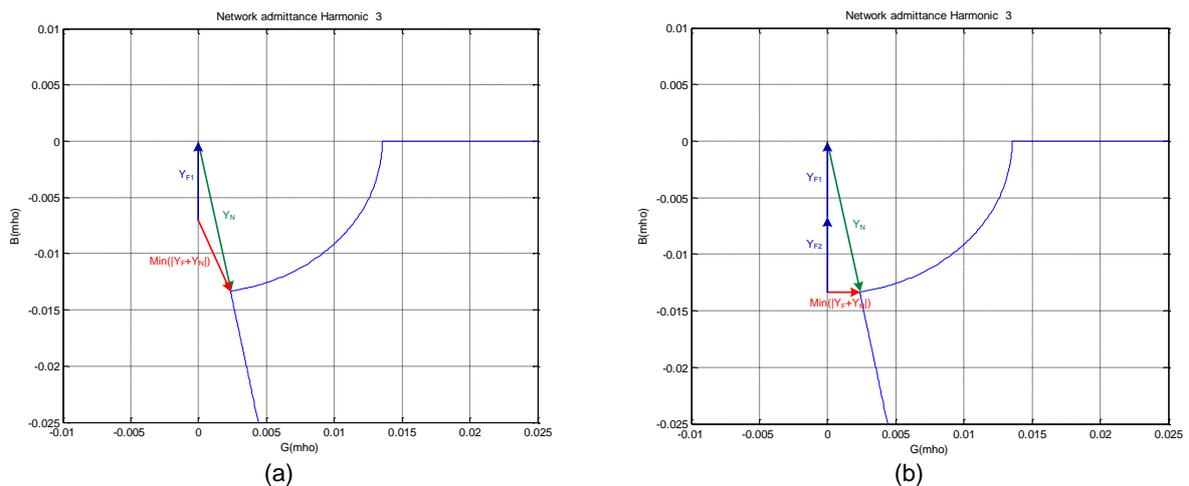


FIGURA 3 – Diagrama vetorial de admitâncias para o 3º harmônico em operação: (a) individual; (b) conjunta

### 3.2 Excesso de potência reativa em condições de baixa potência transmitida

Neste exemplo, dois bipolos HVDC idênticos são conectados radialmente a uma usina hidrelétrica para transmitir 2 x 3150 MW a um centro de carga distante dos geradores. Os dois bipolos são conectados na mesma barra AC no terminal retificador e operam com tensão DC nominal de  $\pm 600$  kV e ângulo de disparo entre  $12.5^\circ$  e  $17.5^\circ$ .

A rede AC no terminal retificador consiste em um sistema de 500 kV, 60 Hz, isolado, formado por somente geradores e linhas de transmissão. O número de geradores na usina pode variar consideravelmente, resultando em variações significativas na potência de curto-circuito (2.5 GVA a 12.8 GVA) e na impedância harmônica vista do PAC. Além disso, por se tratar de um sistema radial, sem cargas, os ângulos de impedância podem alcançar valores bastante elevados (amortecimento reduzido).

A impedância da rede AC é representada por diagramas circulares definidos pelos parâmetros  $R_{\min}$ , Raio,  $\theta_{\min}$  e  $\theta_{\max}$ . A Tabela 5 apresenta um sumário dos parâmetros utilizados neste exemplo.

Por simplicidade, assume-se que a mesma configuração de filtros é empregada nos bipolos 1 e 2, conforme ilustrado na FIGURA 4. Filtros amortecidos de tripla sintonia foram escolhidos para filtrar os harmônicos característicos e prevenir ressonâncias de baixa ordem com um número reduzido de sub-bancos.

Em potência mínima, a potência reativa consumida pelos conversores é muito baixa, ao passo que um número mínimo de filtros é necessário para atender requisitos de desempenho harmônico. Isto leva a um excesso de potência reativa sendo injetado na rede elétrica (4).

Tabela 5 – Parâmetros dos diagramas circulares

Harm	R <sub>min</sub> (Ω)	Raio (Ω)	θ <sub>min</sub> (deg)	θ <sub>max</sub> (deg)
3	2.0	5000	-88	87
5	1.5	6100	-89	87
11	0.9	4000	-89	-25
13	0.9	2900	-88	85
23	4.5	5700	-88	87
25	2.8	5700	-88	86
35	1.2	2900	-89	-80
37	1.0	1900	-88	74
47	1.1	2850	-89	85
49	0.9	3050	-89	85

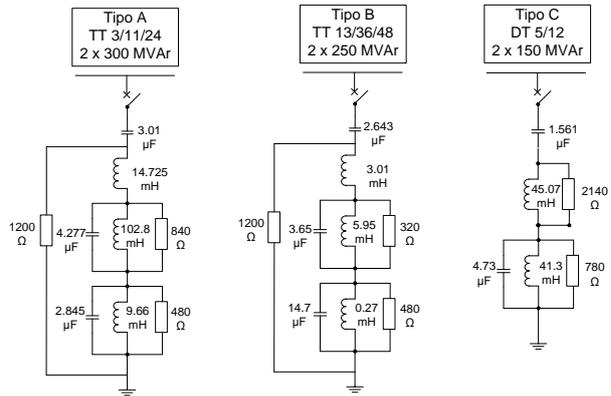


FIGURA 4 – Configuração de filtros dos bipolos 1 e 2

As correntes harmônicas geradas pelos conversores à potência mínima operando de forma individual e conjunta são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Correntes harmônicas geradas pelos conversores à potência mínima (em A)

Configuração	Harmônicos									
	3	5	11	13	23	25	35	37	47	49
Bipolo 1	4.1	0.2	34.2	28.6	16.2	15.2	9.3	8.7	6.0	5.6
Bipolo 2	4.1	0.2	34.2	28.6	16.2	15.2	9.3	8.7	6.0	5.6
Bipolo 1 + Bipolo 2	8.2	0.4	68.4	57.2	32.4	30.4	18.6	17.4	12	11.2

A Tabela 7 mostra que um sub-banco tipo A e um tipo B são necessários para atender aos limites de desempenho harmônico à potência mínima. Em condições desfavoráveis (mínimo consumo dos conversores e máxima tensão/frequência do sistema), a potência reativa injetada na rede AC pode alcançar 592 Mvar, conforme mostrado na FIGURA 5.

Se os critérios de desempenho individuais precisarem ser atendidos de forma independente durante a operação conjunta, então cada bipolo iria requerer dois filtros conectados em potência mínima, resultando em uma injeção de potência reativa na rede AC de até 1184 Mvar, conforme mostrado na FIGURA 6(a). Isto impõe uma restrição severa na rede, que pode não ser capaz de absorver este excedente de potência reativa. Uma vez que em geral um número reduzido de geradores está conectado durante a transmissão em potência mínima, a capacidade de absorção dos geradores pode ser excedida, levando à operação dos limitadores de sub-excitação (até em regime permanente), e conseqüente perda do controle de tensão. Esta condição também aumenta o risco de auto-excitação dos geradores no caso de trip de conversores ou de geradores, o que iria requerer a implantação de sistemas especiais de proteção e de restrições operativas.

Tabela 7 – Desempenho harmônico em potência mínima - operação individual (em %)

Harm	Filtros conectados		
	1A	1B	1A+1B
3	0.26	<b>8.95</b>	0.25
5	0.07	0.23	0.05
11	0.38	0.54	0.23
13	<b>1.70</b>	0.22	0.18
23	0.31	<b>1.86</b>	0.25
25	0.32	<b>1.47</b>	0.31
35	<b>2.21</b>	0.04	0.04
37	<b>2.09</b>	0.13	0.12
47	<b>1.81</b>	0.12	0.11
49	<b>1.74</b>	0.07	0.06
THD	<b>4.33</b>	<b>9.27</b>	0.50

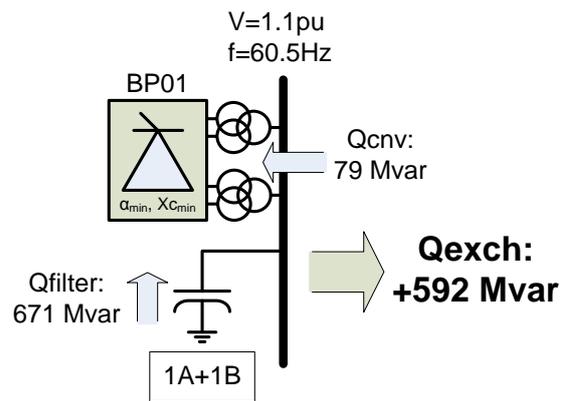


FIGURA 5 – Intercâmbio de potência reativa em potência mínima – operação individual

Do ponto de vista da operação, uma solução óbvia seria desligar um dos bipolos e aumentar a potência transmitida pelo outro bipolo. No entanto, isto reduz a confiabilidade do sistema de transmissão. Além disso, esta medida modificaria os fluxos de potência na rede AC nos terminais receptores se os conversores remotos estiverem localizados em diferentes pontos elétricos, o que pode ser indesejável.

Outra opção consiste em operar os conversores com ângulos de disparo elevados com o objetivo de aumentar o consumo de potência reativa do sistema HVDC. No entanto, esta estratégia aumenta as perdas nos conversores, a geração de harmônicos e as solicitações elétricas nas válvulas. Além disso, não resolve as questões relacionadas à auto-excitação dos geradores.

A Especificação Técnica poderia restringir mais os limites de intercâmbio de potência reativa de cada bipolo individualmente. No entanto, isto poderia requerer a instalação de reatores shunt para compensar a quantidade mínima de filtros para filtragem harmônica ou levar a uma solução de filtragem global não otimizada e mais cara, com um número mais elevado de sub-bancos menores e regimes de chaveamento mais complexos.

Por outro lado, assumindo que os dois projetos de filtros são compatíveis (i.e. apresentam um perfil de impedância semelhante em frequências harmônicas importantes), talvez não seja necessário que cada bipolo atenda individualmente os seus requisitos de desempenho para que o desempenho conjunto seja satisfatório, particularmente a potências reduzidas. Em outras palavras, o número mínimo de filtros para satisfazer os requisitos de desempenho durante a operação conjunta pode ser menor que a soma do número mínimo de filtros para a operação individual.

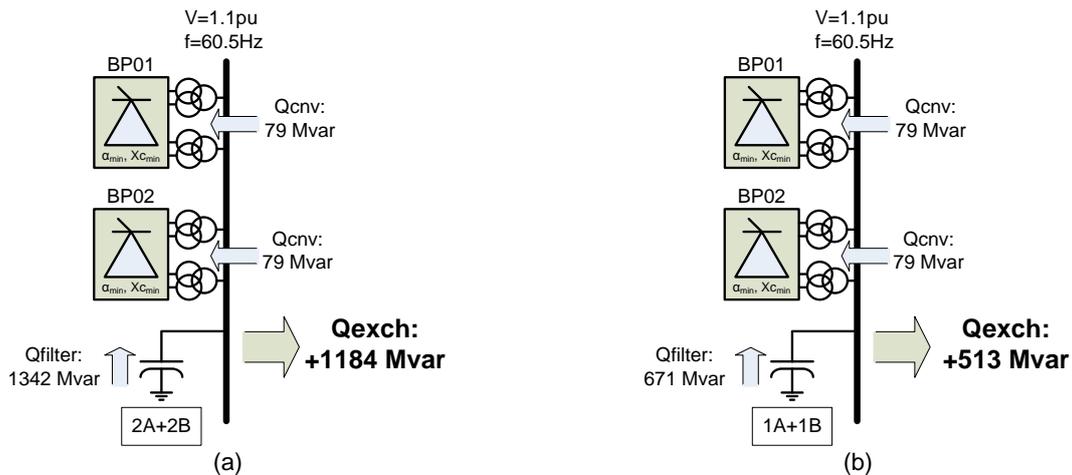


FIGURA 6 – Intercâmbio de potência reativa à potência mínima – operação conjunta: (a) Filtros 2A+2B; (b) Filtros 1A+1B

A Tabela 8 apresenta o desempenho conjunto para diferentes combinações de filtros dos bipolos 1 e 2. Para este exemplo, no qual filtros idênticos foram usados pelos dois bipolos, os limites de distorção individual podem ser atendidos para operação conjunta mesmo com apenas um filtro do tipo A e um filtro do tipo B conectados. A potência reativa máxima injetada na rede AC nesta condição é 513 Mvar, conforme mostrado na FIGURA 6(b). Ressalta-se que os limites de distorção especificados para operação conjunta podem ser maiores que os limites individuais, possibilitando uma melhor otimização no caso geral.

Tabela 8 – Desempenho harmônico em potência mínima - operação conjunta (em %)

Harm	Limite (individual)	Filtros conectados			
		2A+2B	2A+1B	1A + 2B	1A+1B
3	0.6	0.25	0.25	0.49	0.50
5	0.6	0.05	0.06	0.09	0.11
11	0.6	0.23	0.29	0.33	0.46
13	0.6	0.18	0.33	0.20	0.37
23	0.6	0.22	0.25	0.40	0.50
25	0.6	0.30	0.29	0.55	0.60
35	0.6	0.04	0.09	0.04	0.08
37	0.6	0.10	0.21	0.10	0.23
47	0.6	0.11	0.22	0.11	0.23
49	0.6	0.05	0.12	0.05	0.13
THD	1.5	0.49	0.62	0.81	1.00

Para obter uma solução de filtragem global otimizada e mais econômica e prevenir restrições, é importante que um estudo conjunto abrangente e detalhado seja realizado na etapa de execução do projeto e que o chaveamento de filtros por desempenho harmônico seja implementado no sistema de controle (RPC – “Reactive Power Control”) em nível de estação, não em nível de bipolo.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou, através de simples exemplos numéricos, possíveis problemas decorrentes da especificação e projetos independentes de filtros AC de estações conversoras HVDC operando eletricamente próximas. Discutiu ainda as complicações adicionais introduzidas quando o sistema HVDC possui múltiplos fabricantes e proprietários, cenário que vem se tornando cada vez mais comum no Brasil e em diversos países.

Foi mostrado que a estratégia de adotar unicamente requisitos de desempenho individual irá conduzir a uma solução em geral não otimizada, podendo resultar em desempenho conjunto inadequado, restrições operativas e, no pior cenário, filtros incompatíveis. O impacto econômico pode ser significativo.

É, portanto, fortemente recomendado que o efeito das interações harmônicas seja investigado o quanto antes. Um estudo conjunto abrangente e detalhado deve ser feito na etapa de execução do projeto, de forma a se obter uma solução de filtragem global otimizada e mais econômica. Para isso, todas as informações técnicas necessárias, os métodos de cálculo e os requisitos de desempenho específicos para esta avaliação devem estar claramente definidos na Especificação Técnica.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRÉ Technical Brochure 364, "Systems with Multiple DC Infeed", WG B4.41, 2008.
- (2) Procedimentos de Rede, "Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica", ONS, 2017.
- (3) EPRI Report EL-2583, "HVDC-AC System Interaction from AC harmonics, Volume 1: Harmonic Impedance Calculations", 1982.
- (4) CIGRÉ Technical Brochure 139, "Guide to the Specification and Evaluation of AC Filters for HVDC Systemas", WG 14.30, 1999.
- (5) CIGRÉ Technical Brochure 553, "Special Aspects of AC Filter Design for HVDC Systems", WG B4.47, 2013.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Fernando Cattan Jusan** graduou-se em Engenharia Elétrica em 2003 pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CEFET-RJ). Obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica na COPPE/UFRJ em 2007 na área de oscilações subsíncronas e interação torcional com sistemas de controle de geradores, FACTS e HVDC. Ingressou em Furnas em 2004, onde trabalha na Gerência de Estudos Eletroenergéticos e Planejamento da Operação. Trabalha no projeto das estações conversoras do Bipólo 2 do sistema de transmissão HVDC do Rio Madeira desde 2008 e do Bipólo 1 de Belo Monte desde 2013. As principais áreas de atuação são: projeto e verificação de desempenho de filtros AC e DC, especificação do circuito principal, especificação, estudos e testes de desempenho dos sistemas de controle e proteção DC e suas interações com os sistemas AC. É membro do Cigré desde 2008, onde atua como coordenador do Working Group internacional WG B4.66, na área de harmônicos e filtros para sistemas HVDC.