

2 O Problema da Alocação de Custos do Suporte de Potência Reativa

2.1 Introdução

No novo modelo econômico dos sistemas de potência, como foi dito no capítulo anterior, os serviços ancilares passam a exercer grande importância. Em se tratando de suporte de potência reativa, o quadro não é diferente.

Sob o ponto de vista técnico, uma coerente identificação das contribuições das fontes de potência reativa para as cargas proporciona uma grande informação da localização do consumo de potência reativa no sistema. Tal informação pode ser importante para o planejamento de expansão e implantação de novas fontes. Em contrapartida, visto que o suporte de potência reativa atua diretamente na manutenção da segurança de tensão, o conhecimento destas contribuições pode ser fundamental também nas tomadas de decisões sobre o controle de tensão no sistema.

Sob o ponto de vista econômico, a identificação das contribuições das fontes deve implicar em uma partição de custos justa entre os beneficiários do serviço, e também uma justa remuneração das fontes, podendo incentivar a competitividade.

Neste capítulo, é detalhado o problema de alocação de potência reativa entre as fontes e sua relação com os custos do suporte. De forma complementar, é mostrado a composição destes custos para os equipamentos que provém o serviço. Por fim, são apresentadas estruturas de remuneração para alguns países que já possuem mecanismos implantados.

2.2 Descrição do Problema

Um sistema de potência real normalmente opera com vários geradores injetando potência simultaneamente em determinados pontos da rede. A partir dos valores de carga das barras consumidoras, são estabelecidos o perfil de tensões no sistema e os fluxos de potência nos ramos de transmissão. Estas grandezas estão intrinsecamente acopladas e

evoluem dinamicamente durante a operação. Em se tratando de potência reativa, entretanto, não só os geradores e compensadores injetam potência no sistema, como também os ramos de transmissão, dependendo das condições das tensões terminais.

Neste contexto, existe a complexidade de uma rede altamente ramificada, com um grande número de possíveis caminhos de a potência fluir das fontes para as cargas. Surge então uma grande dificuldade de identificar analiticamente as participações de cada fonte para o atendimento das cargas e para os fluxos de potência nos ramos. A respeito do suporte de potência reativa, este problema implica em determinar a justa remuneração que cada fonte deve receber por atender as cargas do sistema. A figura 2.1 ilustra em um diagrama unifilar de um sistema hipotético o problema descrito:

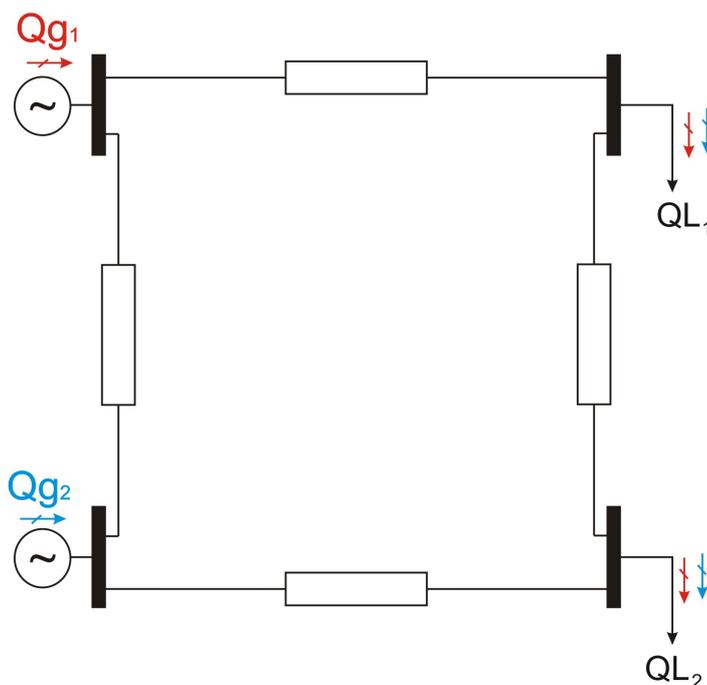


Figura 2.1 – Exemplo de Contribuição de Potência Reativa de Geradores para Cargas

Na Figura 2.1, são apresentadas as injeções de potência reativa das fontes Qg_1 e Qg_2 no sistema, e os consumos equivalentes nas cargas QL_1 e QL_2 , de forma que a soma das contribuições de cada fonte é a demanda total de cada barra de carga. Descontadas as perdas reativas nos ramos de transmissão, caso seja conhecido o custo associado para fornecimento de potência reativa para cada tipo de fonte, a alocação das demandas proporciona diretamente uma partição deste custo entre os beneficiários do serviço, que no caso são as cargas.

Outra característica desta forma de alocação de custos é a natureza local do consumo de potência reativa, inerente às características de projeto dos sistemas de potência (Gil et al., 2000). Isto significa que a potência reativa gerada em determinada fonte é predominantemente consumida por cargas próximas a esta planta. Portanto, é de interesse que fontes provedoras não recebam remuneração por prover potência reativa para consumidores distantes eletricamente.

2.3 Custo pelo Fornecimento de Suporte de Potência Reativa

Os diversos tipos de equipamentos que provêm potência reativa possuem custos associados característicos. Entretanto, na maioria dos sistemas, apenas os geradores e compensadores síncronos são considerados como provedores de serviços ancilares (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002a) e, portanto são remunerados como tal. Independentemente, os equipamentos de compensação de responsabilidade dos serviços de transmissão usualmente apresentam custos de capital (Lamont, Jian Fu, 1999). Em contrapartida, bancos de capacitores e LTC's apresentam também custos de depreciação devido às operações de chaveamento durante a compensação.

Os compensadores síncronos usualmente recebem remuneração pelos MVar's produzidos, sendo os valores calculados de acordo com regulamentações próprias dos sistemas. No Brasil, a remuneração é regida pela Tarifa de Serviços Ancilares (TSA) (ANEEL, 2005) e destina-se aos geradores operando como compensador síncrono.

Os geradores possuem uma composição de custos mais complexa devido a sua importância no mercado de potência ativa, o que também determina seu papel para o suporte de potência reativa. A seguir é apresentada uma breve descrição das características de capacidade de geração das fontes, que irá auxiliar a compreensão dos seus custos para produção de potência reativa.

2.3.1 Capacidade de Geração de Potência Reativa em Geradores Síncronos

Para o caso de um gerador de pólos salientes e em regime permanente, existem basicamente cinco limitações que restringem a geração de potências ativa e reativa.

Estas limitações podem ser representadas como curvas no plano Q-P, de forma que fica estabelecida a região de operação do gerador. A seguir, cada limite é sucintamente apresentado (Huatuco, 2006), dado um gerador com tensão terminal V , corrente de armadura I_a , potência gerada $S_G = P_G + jQ_G = V I_a^*$ e reatâncias de eixo direto X_d e em quadratura X_q :

- Limite de corrente de campo: Este limite é determinado pela corrente máxima que os enrolamentos do rotor podem suportar sem deterioração. Sua definição baseia-se no lugar geométrico da tensão induzida máxima (a corrente de campo é proporcional à tensão induzida). A partir de manipulações da expressão de potência complexa em função da tensão terminal, e das reatâncias de eixo direto e quadratura, chega-se, no plano Q-P, à equação de uma curva denominada Limaçon de Pascal.
- Limite da potência mecânica da máquina primária: A máxima capacidade da máquina primária fica representada no plano P-Q como uma reta paralela ao eixo Q e passando pelo valor de máxima potência mecânica;
- Limite térmico do enrolamento da armadura: É determinado pela máxima corrente que pode suportar o enrolamento da armadura. Na literatura, este limite é considerado como o lugar geométrico para a corrente de armadura máxima constante, o qual corresponde à circunferência com centro na origem de coordenadas no plano Q-P $(V_{aMAX}^*)^2 = P_G^2 + Q_G^2$;
- Limite de estabilidade teórico e prático: Os limites descritos anteriormente referem-se à condição de sobre-excitação (geração de potência reativa), que é a região mais comum de operação. Entretanto, em alguns casos pode-se se operar em sub-excitação, logo deve ser definido o limite de estabilidade teórico e prático. A condição teórica em regime estável é que o deslocamento angular não ultrapasse o máximo ângulo imposto para a máxima potência ativa. Esta condição é formulada a partir da equação potência – ângulo dos geradores, de forma que utilizando de equivalências trigonométricas, é encontrada uma expressão da potência ativa máxima em função da potência reativa. Para o caso de uma máquina de pólos salientes, esta expressão determina uma curva no plano Q-P assintótica em relação ao limite superior de Q. Na prática não é aceito o limite teórico e para determinar o limite prático é necessário deixar uma margem de estabilidade disponível igual a 10% ou 20% da potência ativa nominal.

- Limite mínimo de corrente de excitação: Teoricamente, o lugar geométrico no plano Q-P corresponde à corrente de excitação zero que pode ser construído diretamente quando o Limaçon de Pascal possui uma excitação zero. Pode-se demonstrar que este lugar geométrico é igual à circunferência com raio igual a $s = \frac{V^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right)$, e traçada entre as ordenadas $-V^2/X_q$ e $-V^2/X_d$. O raio s é zero para uma máquina síncrona de rotor cilíndrico, onde as reatâncias de eixo direto e eixo em quadratura são iguais.

No plano Q-P, intersecção das curvas descritas pelos limites citados compõe a curva de capacidade da máquina síncrona. Para um gerador típico, a região de operação tem as características apresentadas na Figura 2.2:

- Limite máximo de corrente de campo (Limaçon de Pascal)
- Limite máximo de potência mecânica (reta)
- Limite de corrente de armadura (circunferência)
- Limite de estabilidade prático (parábola)
- Limite de mínima corrente de excitação (circunferência)

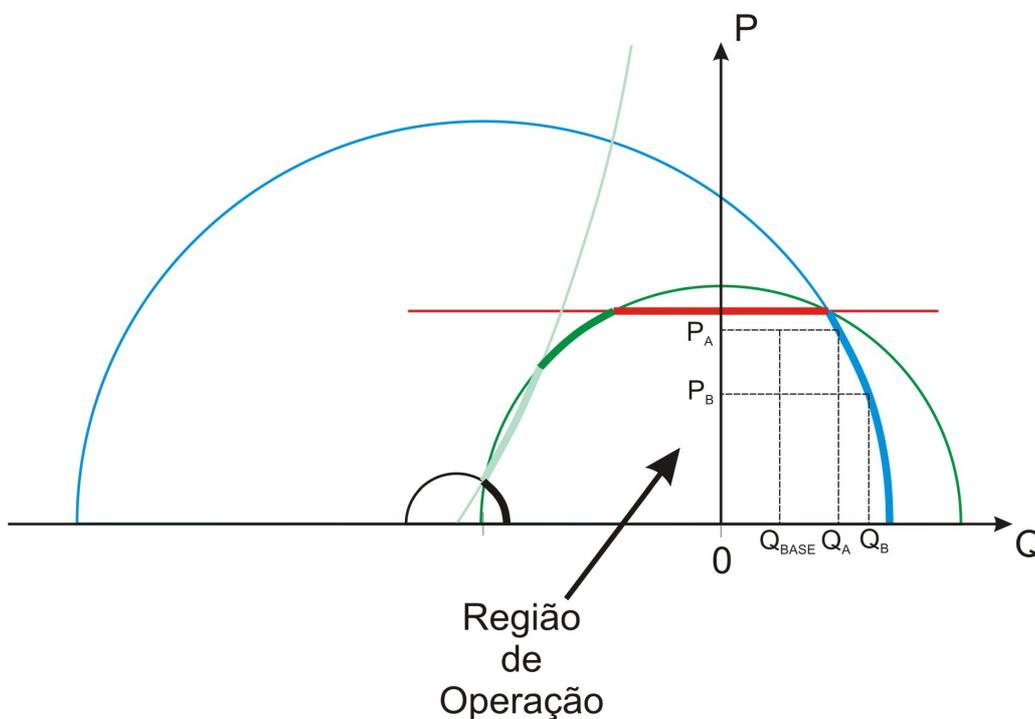


Figura 2.2 – Curva de Capacidade de um Gerador Síncrono

Também na Figura 2.2, nota-se que para o ponto de operação (P_A, Q_A) , um aumento na geração de potência reativa para Q_B implicaria em uma redução de potência ativa para P_B ocasionada pelo limite máximo de corrente de campo. Esta consideração é extremamente relevante na composição do custo de suporte de potência reativa dos geradores e será discutida a seguir.

2.3.2 Custo da Produção de Potência Reativa (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002a)

Os geradores, assim como os demais equipamentos de suporte de potência reativa, possuem custos diretos associados à soma dos insumos para produção de energia, do combustível consumido e da manutenção. A menos que esta componente dos custos seja indicada pelos fabricantes, sua valoração é de difícil quantificação.

Os custos indiretos, por sua vez, estão associados à perda de oportunidade dos geradores de fornecer potência ativa quando é requerido que eles aumentem sua produção de potência reativa. De acordo com a Figura 2.2, assumindo que uma unidade geradora está operando em (P_A, Q_{base}) , caso seja necessário um aumento de geração de potência reativa de Q_{base} para Q_A , haverá um aumento nas perdas dos enrolamentos acarretando em um aumento em seus custos. Este custo pode ser chamado de componente de *custos por perdas* e é incorrido para geradores com produção de potência reativa (gerando ou absorvendo).

Para uma produção de potência reativa maior que Q_A , será necessária a redução na geração de potência ativa de forma a se manterem as restrições impostas pelos limites de aquecimento da excitatriz e da armadura. Isto irá incorrer então no *custo de oportunidade* (Cop), que pode ser resumido pela seguinte fórmula:

$$Cop = \mu \cdot (P_A - P_B) - [C(P_A) - C(P_B)] \quad (2.1)$$

Onde μ é o preço por cada MW da potência ativa produzida, e $C(.)$ é o custo de geração como função da produção.

A composição dos custos por perdas e de oportunidade não se dá de forma linear e possui determinação analítica complexa. De forma ilustrativa, a Figura 2.3 apresenta estes custos como função do fornecimento de potência reativa.

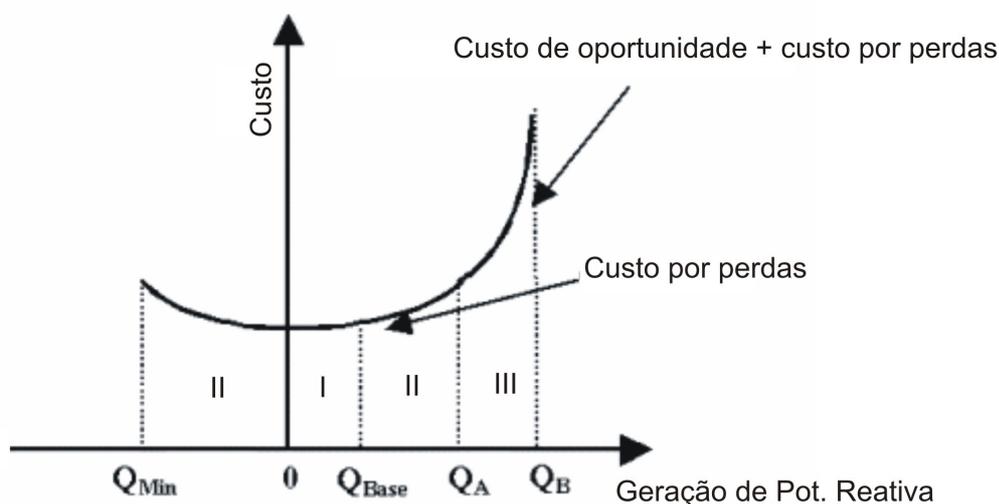


Figura 2.3 – Produção de potência reativa versus custos incorridos para um gerador síncrono

Podem-se definir neste contexto, três regiões de operação da máquina síncrona (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002a):

- Região I → 0 até Q_{Base} : A produção de potência reativa não é classificada como serviço ancilar, pois trata-se apenas das necessidades do gerador de manter seus equipamentos auxiliares;
- Região II → (Q_{Base} até Q_A) e (0 até Q_{Min}): Nesta região, a produção ou absorção de potência reativa pelo gerador irá incorrer custos por perdas, e espera-se que isto seja compensado de alguma forma.
- Região III → Q_A até Q_B : Nesta região, o gerador irá receber uma remuneração mensurada por seus custos de oportunidade pela redução da produção de potência ativa.

Estas componentes de custo usualmente são apresentadas pelos equipamentos de compensação de potência reativa, embora existam diferenças quanto à remuneração entre os países. Na seção seguinte, alguns exemplos de mecanismos de remuneração são apresentados em países da América do Norte, Europa, Oceania e o Brasil.

2.4 Estratégias de Remuneração – Exemplos

Nesta seção, são apresentadas algumas estruturas de remuneração para os provedores de suporte de potência reativa nos Estados Unidos, Reino Unido e Austrália e o Brasil. O objetivo é a análise do cenário mundial das características econômicas deste serviço ancilar.

2.4.1 Estados Unidos (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002b)

O Conselho Norte-Americano de Confiabilidade Elétrica (NERC) propõe que apenas geradores sejam considerados fontes provedoras de potência reativa e, portanto provedor de um serviço ancilar. As demais entidades que também produzem potência reativa, não são consideradas como tal e, portanto não são elegíveis para compensação financeira. A depender do sub-sistema, existem regras de remuneração específicas. Tais particularidades serão descritas a seguir:

O OIS de Nova York (NYISO) é a instituição encarregada de gerenciar o suporte de potência reativa, e também se responsabiliza pelo estabelecimento dos preços para produção. Para tal, os custos são computados pela soma de todos os pagamentos para as fontes que mantêm o suporte. Estão inclusos neste montante os custos agregados anuais totais, algum custo de oportunidade aplicável e algum componente referente a acordos para ajustes de balanço do ano precedente. Especialmente os custos agregados anuais são compostos pelos custos de capital de investimento e custos de operação e manutenção.

No sistema da Califórnia, o OIS obtém o serviço de suporte de potência reativa por contratos de longo prazo com as unidades geradoras mais confiáveis. As necessidades de curto prazo são determinadas em uma base diária após o estabelecimento do despacho de potência ativa e o conhecimento das demandas de energia. Após isto, o OIS determina a alocação das gerações de potência reativa a partir de análises de fluxo de potência. Concomitantemente, os geradores são orientados a operar com fator de potência entre 0,9 indutivo e 0,95 capacitivo. Para geração / absorção de potência reativa além destes limites, as unidades geradoras são financeiramente compensadas, incluindo um pagamento adicional caso seja requerida uma redução na geração de potência ativa.

2.4.2 Reino Unido (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002b)

No mercado de eletricidade do Reino Unido, as unidades geradores com capacidade superior a 50 MW são obrigadas a prover uma quantidade básica de potência reativa, este é chamado Serviço Obrigatório de Potência Reativa (ORPS). Para receber compensações financeiras sobre este serviço, os geradores devem submeter-se a um Mecanismo Padrão de Pagamento (DPM), que remunera segundo potência reativa utilizada. Alternativamente, os geradores podem submeter seu suporte básico a um mercado de oferta, donde os recebimentos de cada gerador são definidos de acordo com as relativas necessidades e número de geradores capazes de prover o serviço.

Geradores com capacidade de geração superior ao estabelecido como mandatário, podem oferecer um Serviço de Potência Reativa Excedente (ERPS), que também pode ser ofertado no mercado.

2.4.3 Austrália (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002b)

O órgão que desempenha as funções do OIS na Austrália, Companhia Nacional de Gerenciamento de Mercado de Eletricidade (NEMCO), reconhece apenas os geradores e compensadores síncronos como serviços ancilares de suporte de potência reativa. Estes provedores de potência reativa são remunerados pela componente de pagamento por disponibilidade – quando estiverem aptos a prover o serviço caso solicitado. Adicionalmente, os compensadores síncronos recebem a componente de pagamento por permissão – quando estiverem sido ativados pela NEMCO. Os geradores síncronos recebem ainda uma componente de pagamento de compensação – baseada nos custos de oportunidade.

O fornecimento de potência reativa por parte dos geradores ainda se divide em mandatário e serviço ancilar. Operando entre 0,9 indutivo e 0,93 capacitivo, o provimento é mandatário, e fora desta faixa, trata-se de provimento de serviço ancilar.

O controle de tensão segundo o esquema adotado pela NEMCO obedece as seguintes ações:

- São determinadas as necessidades de potência reativa segundo diversas funções de gerenciamento de energia, tal como análise de fluxo de potência;
- Equipamentos de suporte de potência reativa, tais como reatores, capacitores e SVC's entram em operação quando requerido;
- Os geradores que estão operando e não são contratados para serviços ancilares são obrigados a gerar a quantidade mandatária de potência reativa. Aqueles que são contratados podem ser solicitados a fornecer uma quantidade superior ao que é mandatário, sujeito a compensação financeira;
- Caso seja necessária mais potência reativa, podem haver restrições na geração de potência ativa de forma a compensar o excedente;
- Se após todos estes artifícios, o suporte disponível seja insuficiente para prover a segurança do sistema, os contratos bilaterais podem ser anulados.

2.4.4 Brasil (ONS, 2003)

No Brasil, o suporte de potência reativa (fornecimento ou absorção) destinada ao controle de tensão na rede é considerado como serviço ancilar. Desta forma, as seguintes fontes são tratadas como provedoras do serviço:

- Unidades geradoras fornecendo potência ativa;
- Unidades geradoras operando como compensadores síncronos;
- Equipamentos para controle de tensão dos Concessionários de Transmissão.

Entretanto, apenas os geradores operando sob a condição de compensador síncrono (sem gerar potência ativa) recebem remuneração pelo suporte de potência reativa. A valoração desta remuneração é regulamentada através da Tarifa de Serviços Ancilares (TSA) em reais por MVArh produzido. Os demais equipamentos que provêm este serviço ancilar não possuem remuneração específica.

2.5 Conclusões do Capítulo

O serviço de suporte de potência reativa tem sido tratado com mais aprofundamento após a separação dos serviços ancilares dos serviços de geração e transmissão de energia, e com a desverticalização do setor elétrico. Em decorrência disto, torna-se

necessária a correta mensuração dos custos para produção da energia reativa e as devidas parcelas de responsabilidades de todos os agentes na composição destes.

Pode-se concluir desta revisão, que a definição dos custos do suporte de potência reativa é variável de acordo com a regulamentação de cada país, onde cada um possui características peculiares. Entretanto, existem políticas comuns a estes sistemas, como a remuneração de geradores que reduzem sua produção de potência ativa para prover o suporte de potência reativa.

No próximo capítulo, são apresentados alguns métodos que identificam as contribuições de potência dos geradores para o atendimento das cargas, e para as perdas no sistema. Estas ferramentas podem, dentre outras utilidades, caracterizarem uma eficiente alocação de custos entre os usuários do suporte de potência reativa.