

5

Controle de Tensão em Redes Elétricas

5.1

Introdução

O objetivo principal de um sistema elétrico de potência é transmitir potência dos geradores para as cargas e esta responsabilidade é dos agentes que atuam em três divisões: geração, transmissão e distribuição. As empresas que atuam em cada segmento necessitam de um agente independente chamado de Operador Nacional do Sistema que é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

Para a operação normal do sistema necessita-se manter frequência e tensão da rede dentro de limites em torno de seus valores nominais. A frequência de grandes redes elétricas em países industrializados é mantida em um intervalo menor que $\pm 0,1\%$ do valor nominal. A tensão pode variar em uma faixa que vai de $\pm 5\%$ até $\pm 7\%$ do valor nominal nos pontos de distribuição, dependendo do país [11]. Neste trabalho, o objetivo principal é analisar o comportamento da tensão frente a variações no carregamento do sistema bem como as estratégias de controle de tensão utilizadas por geradores, dado o problema de estabilidade de tensão.

Inicialmente, deve-se ter em mente que o controle de tensão é realizado de forma diferente para redes de transmissão e redes de distribuição [12]. Em redes de transmissão as usinas geradoras são responsáveis por manter a tensão dentro dos limites permitidos e os aparelhos dedicados ao controle de tensão estão em número reduzido. Estas usinas geram energia elétrica em larga escala e usam geradores síncronos acoplados a turbinas movidas por diferentes fontes como, por exemplo, hidráulica, gás natural ou carvão.

Em sistemas de distribuição o controle de tensão é realizado por equipamentos especializados e raramente os geradores conectados fazem parte do controle de

tensão. Os equipamentos mais utilizados em redes de distribuição são o transformador de tap variável, que realiza o controle através da mudança na relação de transformação, bancos de capacitores e reatores [12].

Este modelo do setor elétrico, tradicionalmente conhecido, vem recebendo alterações recentemente como o aumento da inserção de geração distribuída conectada em redes de distribuição. Estes geradores afetam os fluxos de potência e as correntes na rede e, conseqüentemente, o perfil de tensão da área em que estão conectadas. O mesmo problema ocorre para grandes fazendas eólicas conectadas em redes de transmissão, pois afetam os fluxos e as tensões na rede. Caso a rede não possua equipamentos capazes de controlar a tensão na presença desses geradores, sua conexão se tornará um problema para a operação. Além da variação da tensão em regime permanente, há outros problemas relacionados com a conexão de geração distribuída à rede como: variação nas perdas, qualidade da energia (i.e. flicker e harmônicos), nível de curto circuito, estabilidade transitória, proteção e aterramento [13] [14].

Neste capítulo será discutido o impacto da conexão de geradores eólicos em redes de distribuição para a tensão em regime permanente e o uso de diferentes configurações de geradores e suas respectivas capacidades de controlar a tensão.

5.2

Motivações para o Controle de Tensão

A variação na tensão é devida, primeiramente, às impedâncias presentes nas linhas e transformadores do sistema. A corrente que flui causa uma diferença de potencial entre os nós que conectam cada ramo. Logicamente, se não houvesse impedância, a tensão em todos os nós seria idêntica a dos geradores. Esta variação deve ser mantida dentro de um limite em torno do seu valor nominal em cada nó do sistema. No Brasil, segundo a Aneel, através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, a variação máxima permitida na tensão nominal em regime permanente é de $\pm 5\%$ na distribuição.

Controle de tensão se refere às medidas tomadas para manter as tensões nos nós dentro dos limites. Como a tensão é uma característica local, os equipamentos utilizados para exercer tal tarefa devem estar presentes na vizinhança do nó que se deseja controlar. Há diversas maneiras de executar esta tarefa. Em redes de transmissão, controla-se a tensão pela variação da tensão de excitação dos enrolamentos de campo dos geradores síncronos. Estes geradores são flexíveis, pois permitem o controle de potência reativa gerada ou consumida em uma grande faixa de variação. Além dos geradores, alguns equipamentos são dedicados para o controle de tensão como bancos de capacitores, reatores e FACTS (Flexible AC Transmission Systems) [15]. A variação do fluxo de potência reativa em linhas de transmissão afeta a tensão devido à característica indutiva de tais circuitos tendo uma relação X/R elevada. Desta forma, a componente indutiva da corrente exerce mais influência na queda de tensão do que a corrente que está em fase com a tensão.

O controle de tensão em redes de distribuição é feito de forma um pouco diferente, pois não se dispõe do número de geradores como um sistema de transmissão e os que existem raramente são equipados para exercer tal tarefa, pois implica em aumento dos equipamentos e do custo de investimento por parte do agente gerador. Desta forma, utilizam-se transformadores de tap variável - LTC - que atuam no controle de tensão através do controle da relação de transformação do lado de alta tensão para lado de média tensão dos alimentadores da distribuição. Podem-se utilizar capacitores e reatores em paralelo que representam uma solução mais localizada por afetar a tensão nas vizinhanças do nó que são inseridos, em contrapartida ao LTC que modifica todo o perfil de tensão da rede. Outro ponto que é peculiar das redes de distribuição é a relação X/R dos circuitos ser menor que para os sistemas de transmissão impactando no aumento da potência nominal dos equipamentos utilizados para controle de tensão.

5.3

Variação na Tensão pela Conexão de Geradores Eólicos

Na Figura 5.1, tem-se um gerador distribuído conectado em uma rede que é vista como uma fonte de tensão em série com uma impedância que representa as linhas de transmissão e transformadores do sistema. Portanto, V_0 e V_1 são as

tensões nos dois lados da impedância Z , P_{GD} e Q_{GD} são as potências ativa e reativa geradas pelo gerador distribuído conectado à rede. Tem-se uma carga no ponto de conexão do gerador distribuído representada pela potência $P_1 + jQ_1$.

O problema básico da conexão de geradores distribuídos em redes de distribuição está na modificação das correntes e fluxos de potência pela impedância Z . Além disso, a queda de tensão sobre a impedância dependerá de seu próprio valor. Se o valor de Z for grande o valor de V_1 será muito afetado com as variações na corrente que passa por Z devido à injeção de potência pelo gerador local.

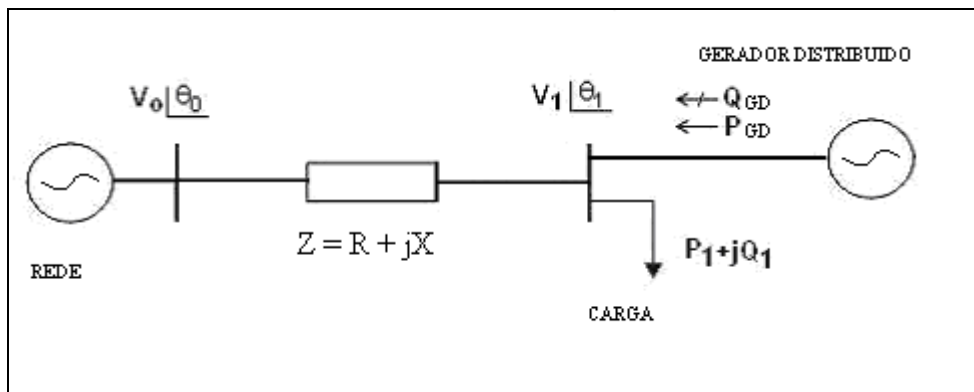


Figura 5.1 - Sistema de 2 Barras com Geração Distribuída

A tensão V_1 pode ser calculada como:

$$V_1 = \left\{ -\frac{2a_1 - V_0^2}{2} + \left[\left(\frac{2a_1 - V_0^2}{3} \right)^2 - (a_1^2 + a_2^2) \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (5.1)$$

onde,

$$a_1 = -R(P_{GD} - P_1) - X(Q_{GD} - Q_1),$$

$$a_2 = -X(P_{GD} - P_1) + R(Q_{GD} - Q_1).$$

Em (5.1) demonstra-se que a potência gerada pelo gerador distribuído tem impacto na tensão V_1 e que a intensidade deste impacto é dependente da carga local e da impedância da rede.

Quanto mais fraca a rede, maiores serão as flutuações na tensão. O conceito de uma rede forte ou fraca está relacionado com o nível de curto circuito do sistema de distribuição. O nível de curto circuito em um ponto da rede é definido como o produto da tensão pela corrente que fluiria caso houvesse um curto circuito sólido na área em questão. Usando o circuito da Figura 5.1, se houvesse um curto circuito no ponto de conexão da turbina eólica a corrente de curto circuito seria:

$$I_F = \frac{V_0}{(R^2 + X^2)^{1/2}} \quad (5.2)$$

e o nível de curto circuito, M , seria:

$$M = I_F V_0 \quad (5.3)$$

Pode-se dizer que a rede é fraca quando potência instalada do parque eólico ou turbina eólica representa uma fração significativa de M . Estudos revelam que problemas na flutuação da tensão são improváveis quando a potência nominal da turbina for de até 4% de M . A Alemanha limita a potência injetada a 2% e Espanha a 5% do nível de curto circuito [11].

5.4

Impactos da Integração de Turbinas Eólicas

Em redes de distribuição, a inserção de geração eólica modifica o conceito e estrutura da rede radial onde o fluxo teria um único sentido, da subestação para as cargas. A modificação dos fluxos modifica o perfil de tensão, como demonstrado. Usualmente, estes geradores não possuem capacidade de variar a potência reativa gerada, pois se torna muito dispendioso equipá-los com esta funcionalidade.

Outro problema é o ilhamento de áreas que podem continuar energizadas após serem desconectadas do resto da rede. Há outros problemas relacionados com a inserção de geração distribuída no que diz respeito à qualidade de energia (harmônicos e flicker), modificação dos níveis de curto circuito, modificação da coordenação de proteção, e inúmeros outros impactos que desestimulam este

tipo de fonte. Por tudo isto, é essencial que geradores distribuídos participem da estratégia do controle de tensão.

Em um mercado onde os agentes responsáveis pela geração, transmissão e distribuição são empresas diferentes, a conexão de um gerador que impacta negativamente a rede deve receber um encargo alto para assegurar o lucro da empresa responsável pela rede na qual será inserido. Uma alternativa é o gerador se responsabilizar por parte dos investimentos necessários para mitigar tais impactos negativos, como a instalação de equipamentos para controle de tensão.

5.5

Topologias de Turbinas Eólicas e Controle de Tensão [11] [12]

Nesta seção, serão discutidos os tipos de turbinas eólicas mais utilizadas no mercado e suas possibilidades de controle de tensão. Assim como foi descrito, o controle de tensão depende da capacidade de variar a geração/consumo de potência reativa e da eficácia do controle automático do gerador acoplado à rede em questão. Os tipos de geradores mais comuns são os geradores de indução (assíncronos) do tipo gaiola de esquilo ou rotor bobinado duplamente alimentado, e os geradores síncronos com rotor bobinado ou com ímãs permanentes. As turbinas eólicas podem ser diferenciadas pela velocidade do rotor, havendo operação em velocidade constante e com velocidade variável. Além disso, todas as turbinas têm algum tipo de controle de potência onde os tipos mais utilizados são o “stall control”, “pitch control” e “active stall control”. Serão discutidas as configurações de geradores e tipos de controle mais utilizados no mercado atualmente.

5.5.1

Controle de Potência da Turbina

Outra característica básica do projeto de turbinas eólicas é o controle da potência para que as forças aerodinâmicas que atuam na turbina não excedam certos limites em regimes de vento muito fortes.

O controle “*stall*”, que também é conhecido como controle passivo, é o mais barato, simples e robusto. As hélices da turbina são acopladas ao cone central em um ângulo fixo e através da sua característica aerodinâmica perdem potência quando a velocidade dos ventos ultrapassa determinado valor. Este sistema é normalmente utilizado em turbinas de velocidade constante.

No controle do tipo “*pitch*” (controle ativo) pode-se variar o ângulo de inclinação da hélice em relação ao vento e, assim, ajustar a potência de saída em ventos mais fortes ou mais fracos. Desta forma, pode-se manter a potência próxima ao valor nominal do gerador, aumentando-se a eficiência para uma faixa maior de variação de ventos. Além disso, pode-se controlar a potência na partida do gerador ou reduzir em uma situação de emergência. A desvantagem é a adição de mais equipamentos para o mecanismo de controle do ângulo de inclinação da hélice e o tempo de atuação deste controle que em ventos fortes, com rajadas, causa altas flutuações na potência de saída.

O controle “*active stall*” é uma combinação dos dois primeiros. Quando a velocidade do vento é baixa ele funciona como o controle “*pitch*”, ajustando a inclinação das hélices para atingir maior eficiência, e quando a velocidade do vento é alta ele coloca as lâminas em posição de maneira que sua própria aerodinâmica causa a perda de potência.

5.5.2

Turbina Eólica Com Velocidade Constante e Gerador de Indução

As turbinas com velocidade constante foram implantadas no início da década de 90 e funcionam com velocidade determinada pela frequência da rede, construção do gerador e relação de transformação da caixa de marcha, que é responsável pela transformação de velocidade, necessária neste tipo de projeto. O gerador de indução (assíncrono) com rotor gaiola de esquilo é utilizado neste tipo de turbina e é conectado diretamente a rede com bancos de capacitores e “*soft-starters*”, como pode ser observado na Figura 5.2 [12]. Quase sempre esta configuração é utilizada em conjunto com o controle de potência aerodinâmica do tipo “*stall*” que tem a característica de não permitir uma partida com controle da potência.

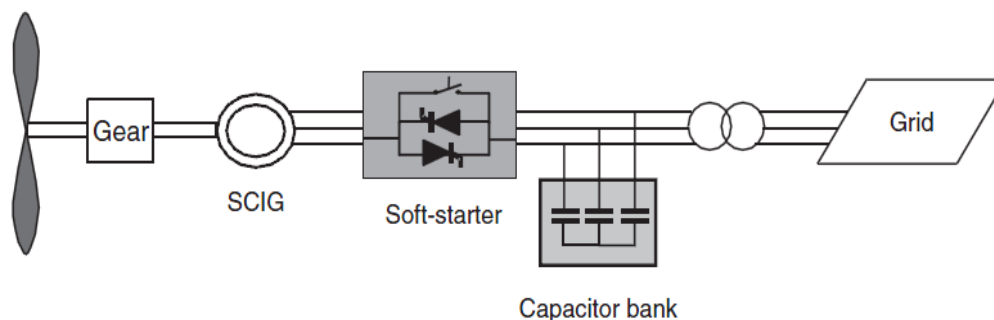


Figura 5.2 [12] - Configuração do Tipo Gerador de Indução com Rotor Gaiola de Esquilo

Este sistema tem a vantagem de ser simples, robusto, confiável e de baixo custo. Suas desvantagens são um incontável consumo de potência reativa, desgaste mecânico e controle limitado da qualidade da energia gerada. Além disso, a potência gerada varia constantemente com a velocidade do vento, pois sua velocidade, na verdade, é aproximadamente constante. Essas variações, que são da ordem de 1%, são transmitidas na forma de variações no torque mecânico e consequentemente em variações da potência elétrica injetada na rede e desta forma a tensão na rede pode sofrer variações consideráveis dependendo de suas características.

O controle de tensão não é possível com este tipo de configuração, haja visto que geradores de indução com rotor gaiola de esquilo sempre consomem potência reativa, por construção. Na Figura 5.3 [12], exibe-se a relação de dependência entre a potência reativa consumida e as grandezas: tensão terminal, potência ativa gerada, e a velocidade do rotor. Portanto, não há como controlar a potência reativa consumida dada a sua dependência das outras grandezas.

O controle de tensão neste tipo de turbina depende da adição de equipamentos adequados para o controle de tensão como fontes variáveis de potência reativa. Pode-se citar, como exemplo, o uso de bancos de capacitores, static condensor (Statcon) e static Var compensator (SVC).

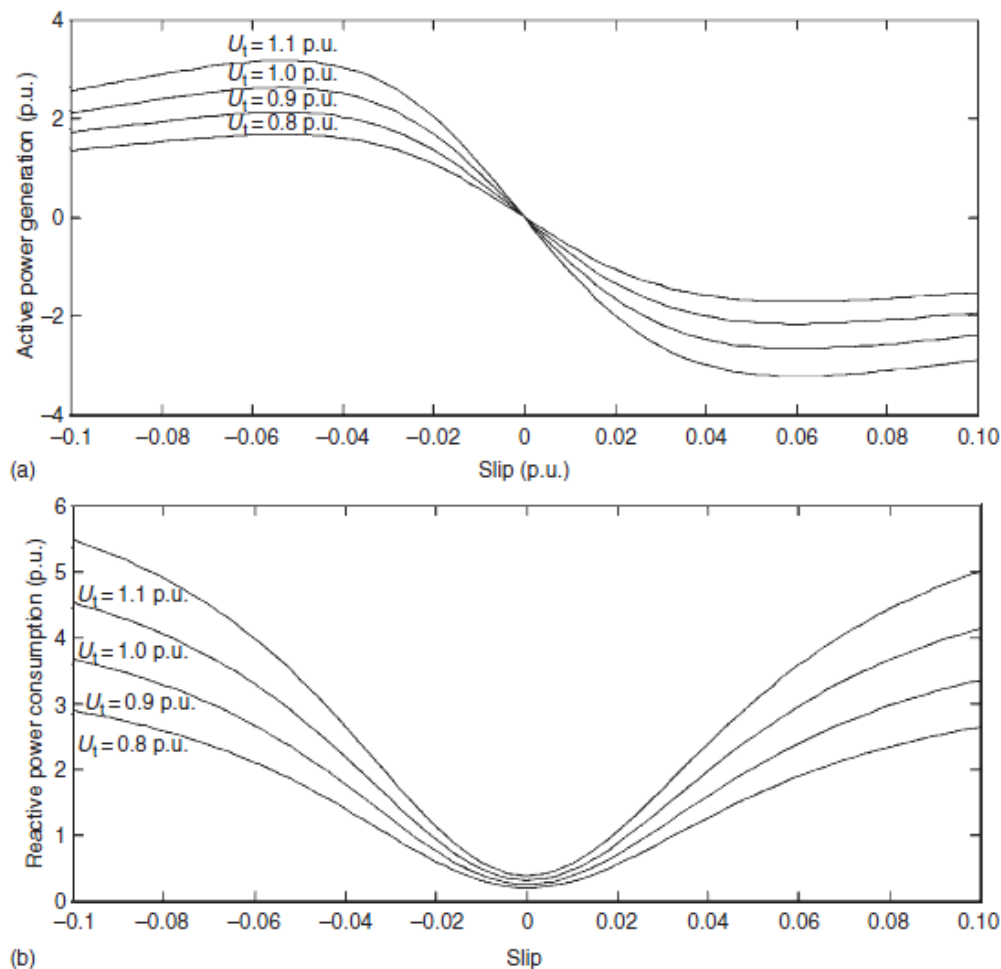


Figura 5.3 [12] - Dependência da (a) Potência Ativa e (b) Reativa da Velocidade do Rotor Representada pelo Escorregamento dada uma Certa Tensão Terminal.

5.5.3

Turbinas com Velocidade Variável

As turbinas que funcionam com velocidade variável se tornaram dominantes nos últimos anos, pois são construídas para atingir uma maior eficiência aerodinâmica em uma faixa considerável de velocidades de vento ao contrário da tecnologia com velocidade constante que atinge sua maior eficiência em uma velocidade de vento em particular. Este sistema tem a vantagem de ter um aumento na eficiência de captura da energia dos ventos, aumento da qualidade da energia gerada e redução do desgaste mecânico na turbina. Suas desvantagens são o aumento dos componentes, aumento de perdas devido à eletrônica de potência, e aumento nos custos totais.

Consegue-se adaptar a velocidade de rotação da turbina, ω , à velocidade do vento, v , podendo-se acelerar ou desacelerar para obter a melhor relação entre velocidades, $\omega R/v$, em um valor correspondente a maior potência gerada. Neste esquema mantém-se o torque do gerador aproximadamente constante, pois as variações do vento são absorvidas por variações na velocidade do gerador. O controle da velocidade é realizado pelo conversor de potência que controla a velocidade do rotor. As mudanças na velocidade do vento são absorvidas por variações na velocidade do rotor do gerador que está acoplado no rotor da turbina eólica. O tipo de controle de potência aerodinâmica mais utilizado é o “pitch control”.

Para utilização com o esquema de velocidade variável pode-se utilizar diversos tipos de geradores associados com diferentes configurações de conversores eletrônicos de potência. Os tipos de geradores mais utilizados são o gerador de indução duplamente alimentado e o gerador síncrono multipolo em forma de anel.

Devido à eletrônica de potência, estas configurações podem atuar no controle de tensão, pois há a possibilidade de fornecer potência à rede em uma faixa variável de fatores de potência.

5.5.3.1

Gerador de Indução Duplamente Alimentado

Este tipo de configuração utiliza-se de um gerador de indução com rotor bobinado que é duplamente alimentado ao contrário da configuração com velocidade fixa com gerador de indução rotor gaiola de esquilo. Este caso também se utiliza de uma caixa de marcha para transformar as velocidades entre o rotor da turbina e do gerador. O enrolamento do estator é acoplado à rede e o enrolamento do rotor é acoplado a um conversor eletrônico de potência que controla a diferença entre frequência mecânica e elétrica através da injeção de uma corrente de frequência variável no rotor. Portanto, a frequência mecânica do rotor é desacoplada da frequência elétrica, tornando possível a operação com velocidade variável. Na Figura 5.4 [12], exibe-se um esquema deste tipo de configuração.

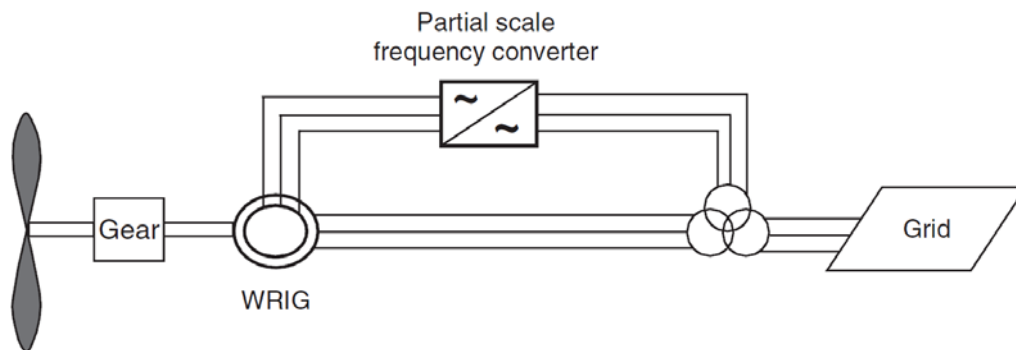


Figura 5.4 [12] – Gerador de Indução Duplamente Alimentado

A velocidade mecânica do rotor é controlada através da corrente injetada no rotor, segundo uma função-objetivo, como maximização da energia gerada ou minimização de ruído. Portanto, controla-se o torque do rotor a partir valor desejado conforme a sua velocidade instantânea e o valor da função-objetivo. A velocidade é alterada mudando-se a potência gerada pelo gerador de forma que o desvio do valor da função-objetivo seja mínimo.

A potência reativa gerada também é dependente da corrente de excitação injetada no rotor. Desta forma, não há uma única relação entre potência reativa e a geração de potência ativa & velocidade do rotor, como no gerador de indução com rotor gaiola de esquilo. Para certa velocidade do rotor & potência ativa pode-se ter uma faixa de variação da potência reativa gerada/absorvida como pode ser observado na Figura 5.5 [12].

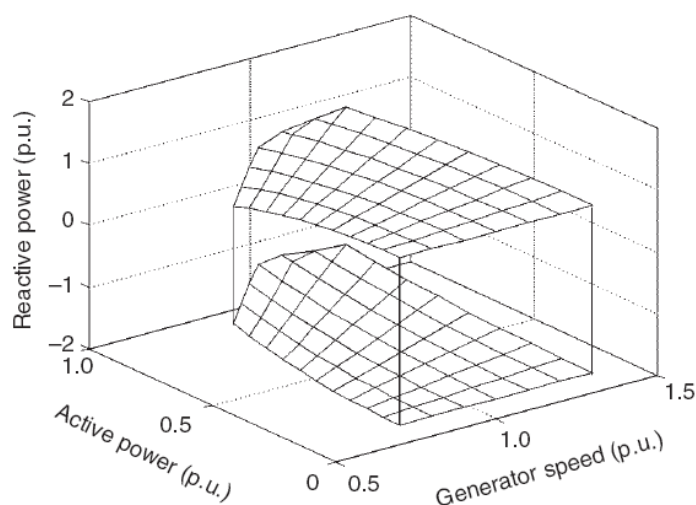


Figura 5.5 [12] - Faixa de Operação do Gerador de Indução Duplamente Alimentado

Como o controle de torque e de potência reativa é realizado através da variação das características da corrente injetada no rotor, pelo inversor eletrônico de potência, tem-se que a faixa de variação da potência reativa é limitada. A parte da corrente que gera torque depende do “set-point” do torque, que é derivado da velocidade do rotor. A parte desta corrente, que é usada para gerar o torque necessário, é que vai definir a parte da corrente que sobra para o controle da potência reativa gerada/absorvida pelo gerador.

5.5.3.2

Gerador Síncrono

O gerador síncrono é utilizado em uma configuração que não necessita de uma caixa de marcha e por isso recebe a atribuição de turbina “direct-drive”. Desta forma, o gerador possui muitos pólos e tem forma de anel para operar com velocidade da turbina eólica baixa. O gerador pode ter rotor bobinado ou rotor com ímãs permanentes.

O estator não é acoplado diretamente à rede, mas sim através de um conversor eletrônico de potência. Esta eletrônica permite a operação em velocidade variável. Assim como o caso anterior o controle da potência mecânica de entrada é do tipo “pitch control”.

Neste tipo de configuração, a potência reativa trocada com a rede não depende das características do gerador, mas sim da característica do lado do conversor eletrônico de potência correspondente à rede. O gerador é totalmente desacoplado da rede, isto quer dizer que o fator de potência do gerador e o fator de potência do lado da rede são controlados de maneira independente.

Na Figura 5.6 [12], exibe-se a curva de capacidade para este tipo de configuração de turbina eólica, tendo a tensão terminal como parâmetro. Em potência e tensão nominais a turbina eólica pode operar com fator de potência entre 0,9 adiantado e 0,9 atrasado. Assim, pode-se controlar a potência reativa ou a tensão terminal. A velocidade do rotor não é levada em consideração, pois como gerador e a rede são desacoplados a velocidade não influencia na conexão com a rede.

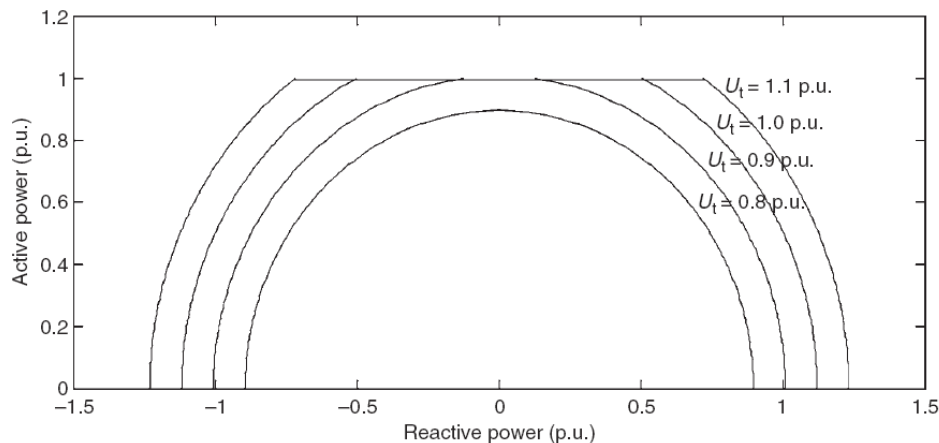


Figura 5.6 [12] - Curva de Capabilidade do Gerador Síncrono

5.6

Conclusões

Neste capítulo foi apresentado um resumo sobre os tipos de geradores e eletrônica de potência utilizados na indústria de turbinas eólicas. Foi discutido cada topologia, sua capacidade de controle de tensão e o impacto da inserção de geradores distribuídos em redes de transmissão e distribuição.

O gerador assíncrono conectado diretamente a rede não possui capacidade de controle da tensão terminal, enquanto que o gerador de indução duplamente alimentado e o gerador síncrono possuem capacidade de controle, mas sua utilização depende da instalação de conversores de potência. Esta é uma desvantagem que torna o projeto mais elaborado e custoso quando comparada com a operação com fator de potência unitário.

Foi verificado que a tendência na construção de turbinas evoluiu para o uso da topologia com velocidade variável, pois aumenta a eficiência e a flexibilidade quanto ao número de configurações de geradores e tipos de eletrônica de potência utilizados. Desta forma, a partir de soluções de engenharia que se utilizam da eletrônica de potência, monitoramento e controle do sistema, podem-se reduzir os impactos da integração de parques eólicos à rede.

Para um sistema de duas barras obteve-se analiticamente a equação que relaciona a tensão terminal com as características do sistema: potência gerada

pelo gerador distribuído, impedância da rede e carregamento da área. Chegou-se a conclusão que seria adequado o controle de tensão por parte das turbinas eólicas.