

Sistemas Geradores em Aproveitamentos Eólicos



Resumo

No presente artigo pretende-se focar as características mais relevantes dos principais sistemas de conversão de energia eólica, fundamentalmente, no que se refere aos geradores e conversores estáticos de potência. Começa-se por referir os princípios de base associados à conversão eólica. Em seguida, faz-se uma abordagem aos sistemas de velocidade constante (baseados no gerador de indução com rotor em gaiola) e velocidade variável (gerador de indução duplamente alimentado e sistemas sem caixa de velocidades, baseados em geradores síncronos com enrolamento de excitação e de imanes permanentes). Referem-se as principais vantagens e inconvenientes dos diferentes sistemas e, no final, uma breve abordagem acerca das tendências futuras.

1. Introdução

As crises petrolíferas mundiais, desde a década de 70 do século XX e o aumento da consciência ambiental das opiniões públicas têm motivado o interesse e crescimento da exploração das energias renováveis. Em particular, a energia eólica é aquela onde se tem verificado o maior crescimento em termos de aproveitamentos. Actualmente, a sua tecnologia encontra-se num elevado nível de desenvolvimento, principalmente na Europa e nos EUA. [1]

Neste artigo, começa-se por referir alguns dos princípios básicos da captação da energia eólica. Pretende-se focar as características eléctricas dos principais sistemas eólicos

actualmente em uso, fundamentalmente, ao nível dos geradores, incluindo algumas referências aos conversores de potência. Também são mencionadas as principais vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas e, por último, uma breve referência a algumas tendências na sua evolução.

2. Potência Eólica

A expressão seguinte traduz a potência mecânica disponível no veio de uma turbina eólica: [1], [2]

$$P = \frac{1}{2} \rho_{\text{ar}} C_p A_r V_{\text{vento}}^3 \quad (1)$$

sendo:

ρ_{ar} – massa específica do ar [kg/m³];

C_p – rendimento aerodinâmico;

A_r – secção de varrimento das pás da turbina (transversal ao eixo rotórico) [m²];

V_{vento} – velocidade do vento no centro do rotor da turbina [m/s].

$$A_r = \pi R^2 \quad (2)$$

em que R corresponde ao raio do rotor, igual ao comprimento de uma pá da turbina.

C_p , associado às características aerodinâmicas das pás da turbina, traduz a relação entre a potência eólica efectivamente convertida pela turbina e a potência contida na massa de ar que atravessa a turbina – *potência disponível no vento*.

O rendimento aerodinâmico (C_p) é função de 2 parâmetros:

- razão de velocidades na pá (λ), definida como o quociente entre a velocidade de rotação da extremidade das pás e a velocidade do vento no centro do rotor (V_{vento}):

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{\text{vento}}} \quad (3)$$

ω_r - velocidade angular rotórica;

- ângulo de passo (θ): ângulo entre o plano de rotação das pás do rotor e da respectiva linha de corda do seu perfil alar.

As turbinas eólicas são projectadas para gerarem a máxima potência para uma determinada velocidade do vento. Os valores desta potência e da velocidade do vento são designados, respectivamente, potência nominal (P_{nominal}) e velocidade nominal do vento (ω_r) – figura 1. [1]

Existem turbinas eólicas que funcionam a velocidade constante e velocidade variável; as primeiras estão associadas às tecnologias iniciais de aproveitamentos eólicos, sendo as turbinas de velocidade variável o resultado de tecnologias mais recentes. Neste último caso, verifica-se que o valor máximo de C_p está associado a uma razão constante entre a velocidade angular do rotor (ω_r) e a velocidade do vento (V_{vento}), com λ constante. Deste modo, nas turbinas eólicas de velocidade variável o valor de λ é constante – expressão 3.

3. Regulação da Potência da Turbina

A figura 1 ilustra a característica mecânica típica de uma turbina eólica, estando evidenciadas 4 zonas distintas de condições de vento:

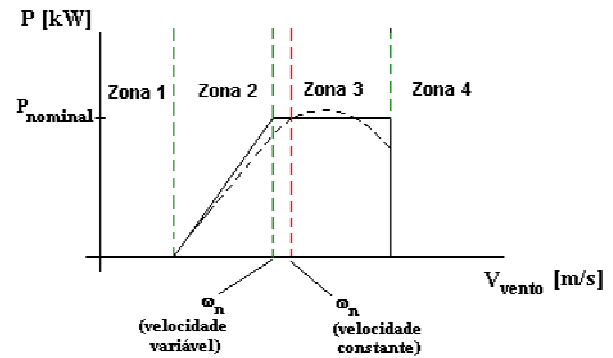


Figura 1 – Característica Mecânica Turbina Eólica (linha a cheio: velocidade variável; linha a tracejado: velocidade constante) [2]

- Zona 1: valores baixos da energia cinética do vento, não permite a conversão de energia;
- Zona 2: os valores das potências convertidas são inferiores à potência nominal; é aqui fundamental garantir que o valor de C_p é máximo, o que só é possível nos sistemas de velocidade variável (λ constante);
- Zona 3: a potência convertida corresponde ao valor nominal da turbina; o conteúdo energético do vento é agora superior à potência nominal pelo que, o valor de C_p deverá ser reduzido, sob pena do sistema entrar em sobrecarga;
- Zona 4: cenário oposto ao da zona 1, isto é, o valor elevado da velocidade do vento poderá danificar a turbina, sendo esta normalmente desligada.



A regulação da potência convertida na zona 3 é efectuada de dois modos distintos, consoante se tratem de turbinas com velocidade constante ou variável.

No primeiro caso, a regulação é feita de forma passiva: as características aerodinâmicas das pás são fundamentais neste modo de controlo da potência convertida – a partir de um valor pré-definido da velocidade do vento, o rendimento da turbina decresce – “*stall effect*” –, mantendo-se aproximadamente constante a potência fornecida pela turbina ao gerador eléctrico. [2]

Nas turbinas com velocidade variável, a regulação da potência convertida é feita de forma activa. A posição das pás relativamente ao seu plano de rotação é ajustável – ângulo de passo (θ) regulável (“*pitch angle*”). Deste modo, é também possível reduzir o valor de C_p . Normalmente, para velocidades do vento superiores ao valor nominal, as turbinas passam a funcionar com velocidade constante (nestas situações, a regulação de θ actua directamente no valor do binário). [2]

4. Geradores Eléctricos em Sistemas Eólicos

Na figura 2 estão indicadas diferentes configurações de sistemas geradores. No que se refere ao tipo de gerador eléctrico, são sistemas baseados em máquinas de indução trifásicas (rotor em gaiola de esquilo nas primeiras gerações; posteriormente, geradores de rotor bobinado) e em máquinas síncronas trifásicas (c/ enrolamento de excitação e, posteriormente, de imanes permanentes).

Os sistemas 1,2,3 e 4 são actualmente os mais relevantes, pelo que serão descritos apenas estes.

4.1. Gerador de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo (sistema 1)

Este sistema, para turbinas com velocidade constante, pertence às primeiras gerações de aproveitamentos eólicos – em Portugal, o seu aparecimento remonta aos finais da

década de 80 e inícios da década de 90 do século passado. [4]

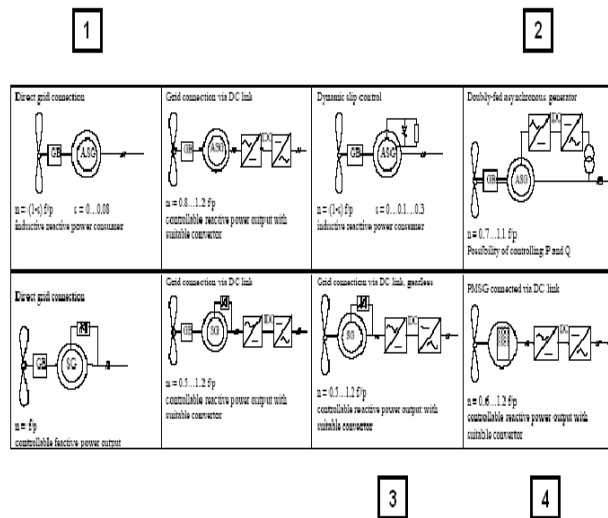


Figura 2 – Tipos de Geradores Eólicos [3]

O estator do gerador de indução (gaiola de esquilo) é directamente ligado à rede; A ligação mecânica do veio do rotor da turbina e do veio rotor do gerador é efectuada através de uma caixa de velocidades, devido à necessidade da velocidade deste último ter de ser superior à velocidade de sincronismo imposta pela frequência da rede (50 ou 60 Hz). O controlo da potência na turbina é normalmente efectuado com base no comportamento aerodinâmico das suas pás (“*stall effect*”) [2].

O funcionamento da máquina de indução com rotor em gaiola como gerador está associado a deslizamentos (s) negativos, isto é, velocidades de rotação rotóricas superiores à velocidade de sincronismo – figura 3.

A gama de funcionamento do gerador está compreendida entre $s=0$ ($n=n_s$) e o deslizamento nominal, $s=s_n$ ($n=n_n$), uma vez que correspondem a regimes de funcionamento nos quais a corrente no estator não excede o valor nominal. Os baixos valores dos deslizamentos nominais – característicos das máquinas de indução – explicam a utilização destes sistemas em turbinas com velocidade praticamente constante. Não obstante, é de referir a possibilidade de alguma capacidade de adaptação às flutuações do vento, decorrente da natureza assíncrona do gerador.

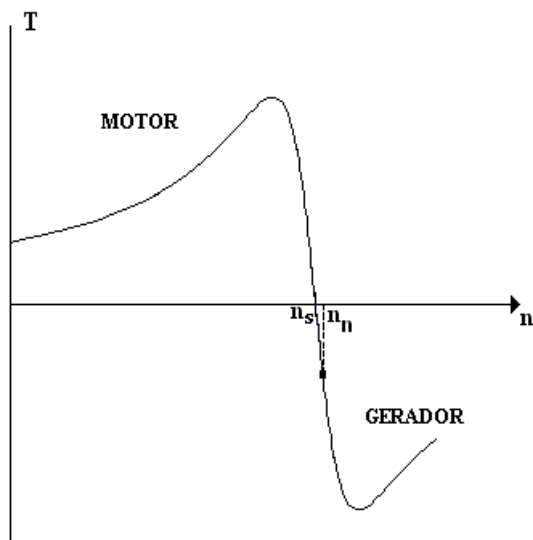


Figura 3 – Característica Mecânica da Máquina de Indução Trifásica (U,f constantes)

Um dos inconvenientes bem conhecidos das máquinas de indução é o de não serem capazes de desenvolver o campo magnético necessário ao seu funcionamento, fundamental no processo de conversão electromecânica de energia (neste caso, mecânica - eléctrica). A máquina necessita de absorver energia reactiva para criar o campo magnético referido, sendo aquela fornecida pela rede. Assim, estes sistemas exigem a inclusão de baterias de condensadores de modo a compensarem o factor de potência da máquina.

Normalmente, os fabricantes permitem a compensação para valores unitários, através de baterias de condensadores com 2 escalões. [4]

Este sistema possui algumas variantes que permitem uma melhor adaptação às inevitáveis flutuações do vento, sendo de destacar: [2]

- geradores equipados com dois enrolamentos estatóricos com números de pólos distintos – possibilidade de funcionamento em duas velocidades distintas.
- geradores equipados com sistema de variação electrónica da resistência rotórica, permitindo maiores variações de velocidade – turbinas de velocidade semi-variável.

De notar neste último algumas semelhanças, apenas em termos de princípio, com os dos sistemas baseados em geradores de indução duplamente alimentados.

Posteriormente, em finais da década de 90, surgiram novos sistemas, dos quais se destacam os referidos como 2, 3 e 4.

4.2. Gerador de Indução Duplamente Alimentado (sistema 2)

O estator do gerador é também directamente ligado à rede. O rotor é ligado à rede (naturalmente, máquinas de rotor bobinado) através de um conversor estático de potência. O princípio deste sistema é o de aproveitamento da energia de deslizamento, associada à dissipação de energia na resistência do rotor (R_r). Tal como ilustrado na figura 4, o valor desta resistência condiciona o deslizamento da máquina, isto é, a velocidade do rotor.

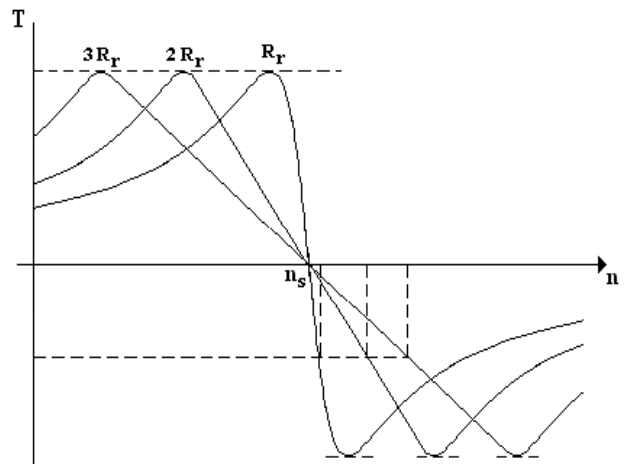


Figura 4 – Influência da Resistência Rotórica na Velocidade da Máquina de Indução Trifásica (U,f constantes)

No entanto, a regulação da velocidade da máquina através da alteração da resistência rotórica, implica um aumento da energia aí dissipada. A inclusão do conversor de potência mencionado permite a regulação do deslizamento, sendo que, uma parte da energia que seria dissipada no rotor passa a ser injectada na rede. (De notar que o controlo da velocidade de um motor de indução trifásico por regulação do deslizamento assenta neste mesmo conceito).

Deste modo, é possível ter o gerador a funcionar com diferentes velocidades rotóricas, melhorando também o seu rendimento, uma vez que a injeção da energia na rede se faz através do estator e do rotor. Naturalmente, este sistema está associado a turbinas com velocidade variável.

O controlo da potência na turbina é realizado através da regulação do ângulo de passo (“*pitch angle*”), anteriormente referido. A manutenção de C_p no valor máximo é efectuada até ser atingido o valor nominal da corrente do gerador.

É também necessária a inclusão de uma caixa de velocidades de modo a adaptar as velocidades dos eixos rotóricos da turbina e do gerador.

4.2.1. Conversor Estático de Potência

A figura 5 ilustra a estrutura do conversor de potência usado nestes sistemas – andar de rectificação, andar DC e andar inversor –, bem como os módulos de controlo.

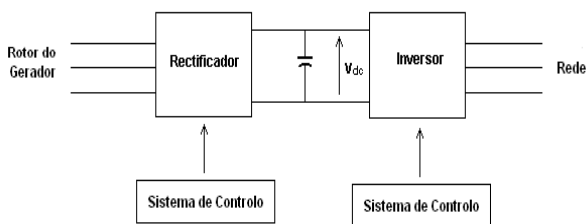


Figura 5 – Conversor de Potência

O rectificador (controlado) e o inversor apresentam estruturas semelhantes (figura 6):

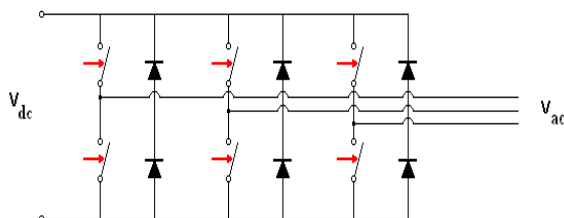


Figura 6 – Estrutura do Rectificador e Inversor

Basicamente, são constituídos por pontes de 6 elementos semicondutores de potência (interruptores controlados, indicado pelas setas a vermelho), tipicamente IGBT's

(Insulated Gate Bipolar Transistor). Os sistemas de controlo dos dois conversores baseiam-se na modulação da largura de impulso (Pulse Width Modulation – PWM).

O conversor ligado aos terminais do rotor (AC/DC) regula a corrente rotórica (módulo e argumento). Significa que o conversor pode fornecer energia reactiva à máquina, permitindo a sua magnetização.

O conversor do lado da rede (DC/AC) regula a tensão do andar DC, podendo também injectar energia reactiva na rede. Deste modo, estes sistemas podem contribuir para a estabilidade da tensão da própria rede.

A capacidade de regulação dos valores da potência activa e reactiva trocadas com a rede é conseguida através do controlo vectorial no gerador, permitindo ajustar o módulo e argumento das correntes alternadas (AC) dos conversores. [2], [4]

Os sistemas baseados em geradores de indução necessitam de caixa de velocidades para o acoplamento do veio da turbina e do veio do gerador. Com efeito, são comuns valores de velocidade no veio da turbina entre 30 a 60 rpm; dependendo da frequência da rede (50 ou 60 Hz) e do número de pólos magnéticos do gerador (usualmente, 4 ou 6 pólos), são frequentes valores da sua velocidade rotórica entre 1000 e 1800 rpm. Nos sistemas de geração eólica mais recentes tem-se procurado a eliminação da caixa de velocidades, pois a sua inclusão acarreta um aumento substancial do custo total do sistema, bem como operações de manutenção mais frequentes.

4.3. Máquina Síncrona de Velocidade Variável (sem caixa de velocidades) (sistemas 3 e 4)

Estes sistemas referem-se a aproveitamentos eólicos equipados com máquinas síncronas. As respectivas turbinas são de velocidade variável e, contrariamente aos sistemas anteriormente referidos, não existe caixa de velocidades. Assim, o gerador síncrono (com enrolamento de excitação convencional – sistema 3 – e, mais recentemente, de imanes permanentes – sistema 4) é ligado à rede através de um

conversor de potência, de modo a converter o valor da frequência aos terminais do gerador na frequência da rede (figura 7).

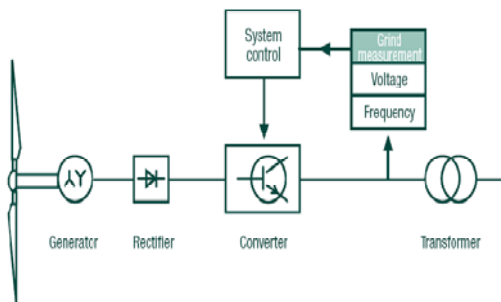


Figura 7 – Estrutura dos Sistemas Baseados na Máquina Síncrona de Velocidade Variável [Enercon]

O controlo da potência na turbina é realizado através da regulação do ângulo de passo (“pitch angle”). [2], [4]

4.3.1. Conversor Estático de Potência

O conversor de potência apresenta uma estrutura semelhante à descrita na secção anterior; apenas o andar de rectificação controlada é usualmente constituído por uma ponte de tiristores.

A tensão na entrada do andar inversor (DC/AC) – figura 5 – é regulada para um valor constante. É de referir que para baixos valores da velocidade de rotação, a excitação do gerador não consegue manter o valor de tensão DC referido. Nessas situações, torna-se necessário recorrer a um conversor DC/DC (“chopper”) instalado entre a saída do andar rectificador e o andar DC, de modo a garantir que a tensão DC se mantém no valor pretendido; para velocidades de rotação mais elevadas o “chopper” é desligado.

O inversor (lado da rede) é constituído por uma ponte de 6 IGBT (figura 6), controlada por modulação da largura de impulso (PWM), tornando também possível regular a injeção de potência activa, bem como a potência reactiva trocada com a rede (controlo vectorial). [4]

5. Comparação Entre os Sistemas [2]

As considerações aqui apresentadas baseiam-se nos seguintes critérios:

5.1. Custo, dimensão e peso

Em termos médios, o custo dos geradores de indução com rotor em gaiola é cerca de 25% inferior aos geradores de rotor bobinado usados nos sistemas duplamente alimentados.

Os conversores de potência dos sistemas com gerador de indução duplamente alimentado têm menores dimensões e são mais baratos do que nos sistemas com geradores síncronos.

O custo dos geradores síncronos (convencionais e de imanes permanentes) é superior ao dos geradores de indução (aqueles têm maiores dimensões e são mais pesados, para além de se tratarem de máquinas com particularidades próprias para aproveitamentos eólicos, tais como, elevado número de pólos, estatores hexafásicos,...). No entanto, é de referir a ausência de caixa de velocidades, o que atenua de forma significativa as diferenças anteriores.

5.2. Rendimentos da Captação Eólica

Obtém-se melhores rendimentos na captação de potência eólica nos sistemas de velocidade variável, uma vez que, garantido a proporcionalidade entre a velocidade do rotor da turbina e a velocidade do vento, o rendimento aerodinâmico mantém-se no valor máximo em toda a gama de velocidades da zona 2 da figura 1. Nos sistemas de velocidade constante, o rendimento máximo ocorre apenas para uma velocidade do vento fixa. De notar ainda a diminuição do rendimento das caixas de velocidades e dos conversores de potência para regimes de carga inferiores ao nominal.

No que se refere aos geradores, nos sistemas com máquinas síncronas, a ausência de caixa de velocidades (acoplamento directo) implica naturalmente velocidades rotóricas mais baixas (na ordem das dezenas de rpm) do que nos geradores

de indução pelo que os binários desenvolvidos são muito superiores. Por este motivo, o rendimento nos geradores síncronos eólicos é inferior ao dos geradores de indução. [2]

5.3. Fiabilidade e manutenção

Os geradores de indução de rotor bobinado e os geradores síncronos com enrolamento de excitação (clássicos) são dotados de anéis e escovas. Deste modo, as acções de manutenção e inspecções periódicas são mais frequentes, relativamente aos geradores de indução com rotor em gaiola e geradores síncronos de imanes permanentes.

A inclusão da caixa de velocidades diminui significativamente a fiabilidade do sistema, fazendo aumentar as operações de manutenção.

Nos sistemas de velocidade constante, variações bruscas da velocidade do vento implicam variações do binário desenvolvido, bastante menores nos sistemas de velocidade variável. Assim, as turbinas de velocidade constante sofrem solicitações mecânicas mais intensas, conduzindo a aumentos de fadiga e manutenção.

6. Tendências Futuras dos 3 Sistemas [2]

Nos últimos anos, os sistemas de velocidade variável têm vindo a substituir os sistemas de velocidade constante. As razões encontram-se descritas nas secções anteriores.

Relativamente aos sistemas de velocidade variável baseados no gerador de indução duplamente alimentado, há a referir, como vantagens, tratem-se de máquinas convencionais e o facto destes sistemas (últimas gerações) terem maior capacidade de se manterem em funcionamento quando ocorrem falhas na rede. É igualmente de realçar a capacidade de contribuição para a estabilidade da tensão e frequência da rede, através do controlo, respectivamente, das potências reactiva e activa.

Como referido, a grande desvantagem reside na necessidade da caixa de velocidades.

Quanto aos sistemas de velocidade variável baseados em geradores síncronos, o interesse pelas máquinas de imanes permanentes tem aumentado nos últimos 10 anos, essencialmente, pela diminuição do preço dos materiais magnéticos, tornando-as mais competitivas do ponto de vista económico. Em relação aos geradores com enrolamento de excitação, apresentam melhor rendimento – eliminação das perdas rotóricas – e são mais leves. No entanto, a capacidade de controlo é menor, uma vez que a excitação é fixa.

Como referido anteriormente, os geradores síncronos aplicado a aproveitamentos eólicos apresentam características próprias. Como tal, o desenvolvimento de novas configurações de máquinas para acoplamentos directos (por ex., geradores de fluxo axial e transversal) reveste-se de elevado interesse, quer na actualidade, quer no futuro próximo.

Fontes de Informação Relevantes

- [1] Castro, Rui M. G., “Introdução à Energia Eólica”, Instituto Superior Técnico, edição 2, Janeiro de 2004.
- [2] Polinder, Henk et al., “Basic Operation Principles and Electrical Conversion Systems of Wind Turbines”, EPE Journal, Vol. 15, nº4, December 2005.
- [3] CIGRE, TF 38.0110
- [4] Ferreira de Jesus, J.M., Castro, Rui M. G., “Equipamento Eléctrico dos Geradores Eólicos”, Instituto Superior Técnico, edição 1.0, Abril de 2008.