

Geradores Eólicos Caraterísticas Elétricas

Introdução

A produção de eletricidade a partir de energia eólica tem vindo a crescer de forma rápida e sustentada desde 1985. Atualmente, existem geradores eólicos localizados em todo o mundo cuja potência já atinge valores superiores a 3000 MW.

As principais tecnologias utilizadas na conversão eletromecânica de energia eólica em energia elétrica são baseadas principalmente em três tipos de máquinas elétricas:

- A máquina de Corrente Contínua (Máquina DC)
- A máquina Síncrona de Corrente Alternada
- A máquina Assíncrona de Indução

Estas máquinas apresentam um princípio de funcionamento baseado nas leis da indução eletromagnética, assente no princípio das ações e reações eletromagnéticas, devidamente justificadas pelas leis de Faraday, Lenz e Laplace.

A conversão eletromecânica de energia resultante é sempre reversível. A mesma máquina pode ser usada como motor para a conversão da energia elétrica em energia mecânica, ou como o gerador convertendo a energia mecânica em energia elétrica. Normalmente, há um elemento externo estacionário (estator) e um elemento interno rotativo (rotor). O rotor é montado sobre rolamentos fixos ao estator. Tanto o estator como o rotor são núcleos de ferro cilíndrico, que estão separados por um espaço denominado entre ferro. Os núcleos são feitos de material ferro magnético de alta permeabilidade, e os condutores embutidos em ranhuras apresentam-se distribuídos na superfície do núcleo. Noutro tipo de bobinagem, normalmente apenas com funções de excitação magnética, os condutores envolvem os principais pólos magnéticos. Na Figura 1 é possível ter uma visão transversal da máquina elétrica rotativa, em que o estator apresenta-se com pólos salientes, e cuja bobinagem se destina a circuito indutor, ou

de excitação, e o rotor com bobinagem distribuída cujo circuito se destina a induzido ou armadura. O fluxo magnético criado pela corrente de excitação atravessa o núcleo ferro magnético rotórico, “cortando” a bobinagem do induzido e fechando-se pela carcaça da máquina, formando assim um circuito fechado. A conversão eletromecânica de energia é realizada através da interação entre o fluxo magnético produzido pelo circuito indutor, com o campo magnético de reação produzido pela corrente elétrica que circula no circuito induzido [8].

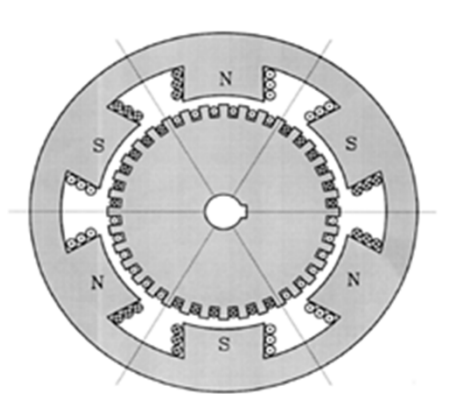


Figura 1 – Secção transversal do estator e rotor da máquina elétrica rotativa

1 Máquina DC

A máquina de DC convencional pode ser de excitação independente ou auto excitada. Na máquina de excitação independente existe uma fonte de corrente contínua que alimenta o circuito indutor ou de excitação de forma separada do induzido. Por outro lado, na máquina auto excitada, o circuito indutor será constituído por bobinas em série ou paralelo com o circuito induzido, e cuja corrente contínua que as vai percorrer produzirá o campo magnético necessário ao funcionamento da máquina. Atualmente, a máquina DC é muitas vezes concebida com ímanes permanentes para eliminar a necessidade do sistema de coletor e escovas da máquina convencional. Os ímanes permanentes ficam localizados no rotor e, a bobinagem do induzido, ou armadura, ficará alojada no núcleo ferro

magnético estático. A corrente que vai circular na armadura será alternada, sendo retificada por conversores de estado sólido. Estas máquinas não precisam do sistema de anel coletor seccionado e escovas, daí, a elevada fiabilidade e bom desempenho destas máquinas. A máquina DC de ímanes permanentes é usada em turbinas eólicas de pequeno porte, devido à limitação da capacidade magnética dos ímanes permanentes. Esta máquina de corrente contínua sem escovas tem uma utilização limitada a potências inferiores a 100 kW.

2 Máquina síncrona de corrente alternada

A maior parte da energia elétrica consumida no mundo é produzida pelo gerador síncrono de corrente alternada. Por esta razão, a máquina síncrona é uma máquina muito utilizada. A máquina síncrona funciona a uma velocidade fixa e constante relacionada com a frequência. Portanto, não é adequada para a operação de centrais eólicas de velocidade variável. Além disso, a máquina síncrona necessita de corrente contínua para excitar o campo indutor localizado no rotor, o que impõe a necessidade do sistema de anéis e escovas de carbono para se aceder a um circuito que fica localizado numa peça em movimento. Isto representa uma limitação à sua utilização. A necessidade de excitação em corrente contínua e das escovas pode ser eliminada pelo binário de relutância. O desempenho e a fiabilidade da máquina são muito beneficiados, reduzindo também o seu custo. A utilização da máquina, porém, é limitada a dezenas de kW. O gerador de relutância síncrono é efetivamente utilizado para pequenos geradores eólicos. Na Figura 2 é possível ver o esquema das ligações de geradores eólicos equipados com máquinas síncronas de velocidade variável.

No sistema representado na Figura 2, a máquina síncrona é ligada através de um sistema de conversão CA/CC/CA, pois a frequência da tensão e corrente estática é diferente da frequência da rede elétrica.

Estes geradores não costumam ter caixa de velocidades, e a velocidade mecânica de rotação do rotor é idêntica à da velocidade de rotação da turbina. Normalmente a velocidade de rotação da turbina (e do rotor da máquina síncrona) varia

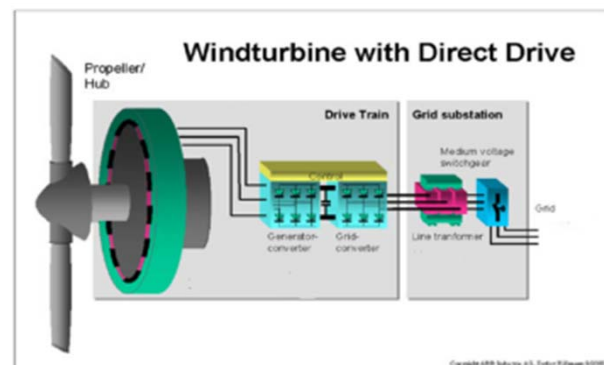


Figura 2 – Diagrama de ligações de um gerador síncrono funcionando a velocidade variável [1]

entre 17 rpm e 36 rpm, possuindo a máquina um elevado número de pólos.

O estator da máquina síncrona tem seis fases e está ligado a dois sistemas independentes de conversão CA/CC/CA. O paralelo entre os dois sistemas de conversão é feito na saída dos conversores CC/CA (conversores de rede) que é ligado ao transformador elevador.

Cada um dos conversores CA/CC ligado ao gerador (conversores de gerador) é constituído por um conversor em ponte paralelo duplo equipado com 6 tirístores. Estes tirístores funcionam com um ângulo de disparo constante.

A tensão contínua aos terminais do condensador, colocado em paralelo com os conversores, deve ser definida para um valor constante. No entanto, para valores baixos da velocidade do rotor, o sistema de excitação da máquina síncrona é incapaz de garantir esse valor, sendo necessário o uso de um "chopper" (conversor CC/CC). Este conversor instalado entre o gerador e o condensador é desligado sempre que a velocidade do rotor ultrapassa um determinado valor.

O conversor de rede é um conversor em ponte paralelo duplo equipado com IGBTs, com um sistema de controlo baseado na modulação por largura de pulso (PWM). Este conversor controla a potência ativa injetada na rede e o fator de potência. O controlo de potência ativa na rede pelo conversor permite a imposição ao gerador do binário eletromagnético, tornando assim possível controlar a velocidade de rotação do grupo gerador e da turbina eólica, a fim de se obter a velocidade específica ótima da ponta da lâmina, para cada valor da velocidade do vento [2].

A figura 3 ilustra a potência ativa e reativa fornecida pelo conversor de rede do gerador de energia eólica de acordo com a velocidade de rotação do rotor.

Ao contrário da máquina de indução, a máquina síncrona, quando utilizada no sistema de ligação à rede, tem algumas vantagens. Não exige potência reativa da rede, resultando isso numa melhoria da qualidade da energia no interface com a rede. Esta vantagem é tanto mais importante quando o parque eólico é ligado a uma rede de pequena capacidade, de alta e baixa tensão. Na verdade, as centrais eólicas geralmente encontram-se ligadas a redes de grande potência, usando linhas de menor distância, e na maioria dos casos utilizam o gerador de indução [3].

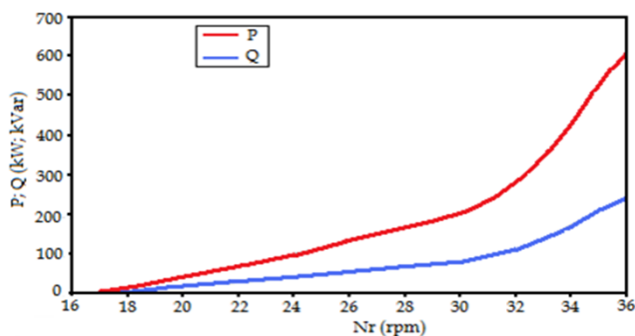


Figura 3 – Potência ativa e reativa fornecida por um gerador de energia eólica equipado com gerador síncrono funcionando a velocidade variável

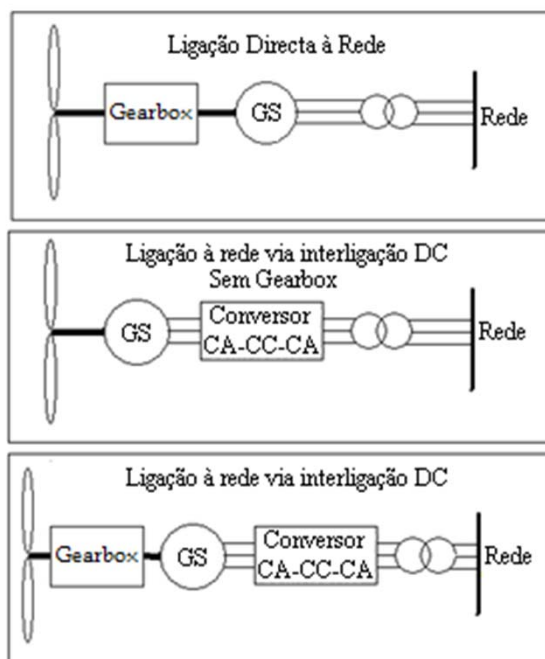


Figura 4 – Configurações da máquina síncrona utilizada como um gerador de energia eólica

3 Máquina de indução

A principal vantagem da máquina de indução é a sua construção robusta, sem necessidade de coletor e escovas e sem necessidade de excitação independente em corrente contínua. As principais desvantagens da máquina DC e da máquina Síncrona são eliminadas na máquina de indução, resultando em melhor desempenho em regime transitório, manutenção reduzida e, obviamente, menor custo. Por estas razões, o gerador de indução é amplamente utilizado em parques eólicos e em pequenas e grandes centrais hidroeléctricas.

A máquina de indução encontra-se disponível em vários níveis de potência, desde reduzidos valores de potência até dezenas de megawatts, ou até mais.

A máquina de indução necessita de excitação em corrente alternada. A máquina pode ser auto excitada ou excitada externamente. Uma vez que a corrente de excitação é apenas reativa, uma máquina isolada é auto excitada com condensadores colocados em paralelo. O gerador de indução ligado à rede é excitado através desta. Os geradores síncronos em paralelo com a rede devem ser capazes de fornecer esta potência reativa, necessária para a excitação das máquinas de indução. Por razões económicas e de fiabilidade, muitos sistemas de energia eólica utilizam como gerador a máquina de indução.

a. Funcionamento do gerador de indução em regime isolado

A máquina de indução para funcionar como um gerador deve ser operada a uma velocidade acima da velocidade síncrona e, ser-lhe fornecida energia reativa para produzir e manter constante o campo magnético da máquina. Esta energia reativa pode ser produzida por condensadores, ligados à máquina da forma que se apresenta na Figura 5.

Assim, é possível obter a necessária auto excitação da máquina, de forma a ser possível alimentar isoladamente uma carga.

Os condensadores são normalmente ligados em triângulo, porque assim têm a vantagem de poderem ter menor capacidade para obter o mesmo efeito que condensadores ligados em estrela. Deste modo, a tensão “V1” e frequência “f1” dos geradores de indução em vazio e em carga depende principalmente dos parâmetros da máquina, da capacidade dos condensadores e da velocidade $n > f1/p$, onde “p” é o número pares de pólos.

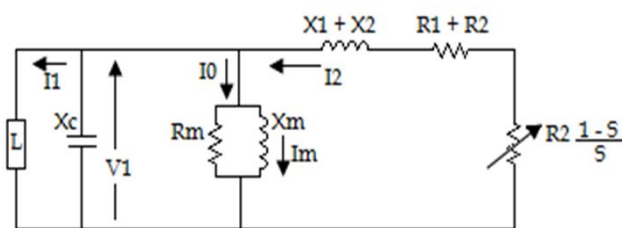


Figura 5 – Esquema equivalente aproximado de um gerador de indução em regime isolado de carga

A existência de magnetismo residual na máquina, com esta a girar, vai resultar na existência de um circuito de oscilação entre as bobinas do estator e os condensadores. Na verdade, as bobinas de indutância “L” e os condensadores de capacidade “C” formam um circuito oscilante e, portanto, vão manifestar-se flutuações de energia entre ambos, que podem ser atenuadas ou amplificadas.

Se o rotor girar com velocidade angular ω_r , cuja frequência é maior do que a frequência das oscilações próprias (obtidas por $\frac{1}{\sqrt{LC}}$), a energia resultante será dissipada no rotor em potência de perdas no cobre. Se, no entanto não houver magnetismo residual, ou se este não for suficiente, não ocorrem oscilações ou são amortecidas rapidamente.

A tensão e a frequência de funcionamento são definidas nos termos do circuito equivalente aproximado da figura 5. Em nenhum regime de carga, a corrente no condensador $I_c = V1/Xc$ deve ser igual à corrente de magnetização $I_m = V1/Xm$. A tensão V1 é uma função linear de Im até ser atingido ponto de saturação do núcleo ferro magnético (figura 5). O funcionamento estável requer que a linha ImXc possa cruzar a curva V1 versus Im. O ponto de operação é fixado onde V1/Xc e V1/Xm são iguais, isto é, quando $1/Xc = 1/Xm$, em que $Xc = 1/\omega C$. Isto impõe a frequência da tensão de funcionamento. Para o valor do condensador C, a frequência de saída do gerador auto excitado é:

$$f = \frac{1}{2\pi X_m} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C.L_m}} \quad (1)$$

Em regime de carga, a potência gerada $V_1 I_2 \cos \phi_2$ providencia a dissipação de potência na resistência de carga e na resistência de perdas no ferro Rm. A soma da corrente reativa deve ser zero:

$$\frac{V_1}{X} + \frac{V_1}{X_{...}} + I_2 \cdot \sin \phi_2 = \frac{V_1}{X_c} \quad (2)$$

Esta equação determina a tensão de saída da máquina em regime de carga.

Como é possível ver na Figura 6, o processo de auto excitação requer a existência de magnetismo residual e de saturação magnética na curva de magnetização da máquina, para que seja possível ter uma intersecção clara entre as duas características (de magnetização e tensão nos condensadores).

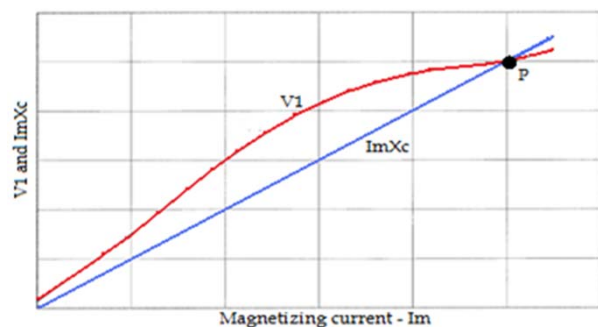


Figura 6 – Características de funcionamento do gerador de indução com auto excitação capacitiva

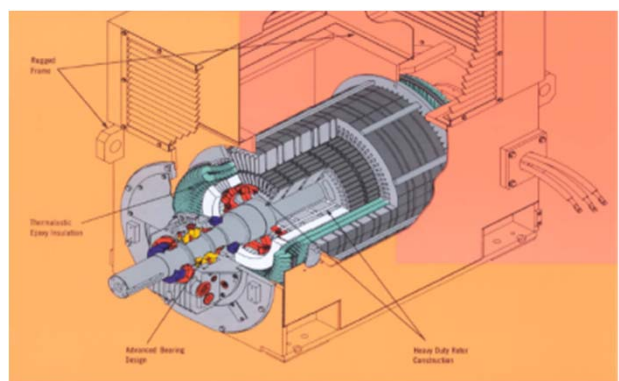


Figura 7 – Máquina de indução de 2 MW [7]

b. Funcionamento do gerador de indução ligado à rede de potência infinita

A energia eletromagnética transferida através do entre ferro é dada por:

$$P_{em} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \quad (3)$$

que é positiva para $s > 0$ e negativa para $s < 0$, onde "s" é o deslizamento da máquina. Ou seja, para $s < 0$, o fluxo de energia eletromagnética flui do rotor para o estator. Parte dessa energia é dissipada (por efeito Joule) no enrolamento de cobre estatórico e a restante é fornecido para a rede. Isto corresponde ao funcionamento da máquina como um gerador (figura 8). Neste caso, a máquina deve funcionar a uma velocidade $n > f1/p$ e tanto a potência como o binário eletromagnético são negativos.

Ao analisar o desempenho do gerador de indução, pode-se usar o esquema equivalente aproximado da figura 5, com $s < 0$. A resistência $((1-s) / s) R_2$, que traduz a energia eletromagnética, depende do deslizamento, mas a reactância X não depende do deslizamento, ou seja, será sempre positiva. Por conseguinte, a máquina de indução absorve sempre energia reativa em qualquer regime de funcionamento.

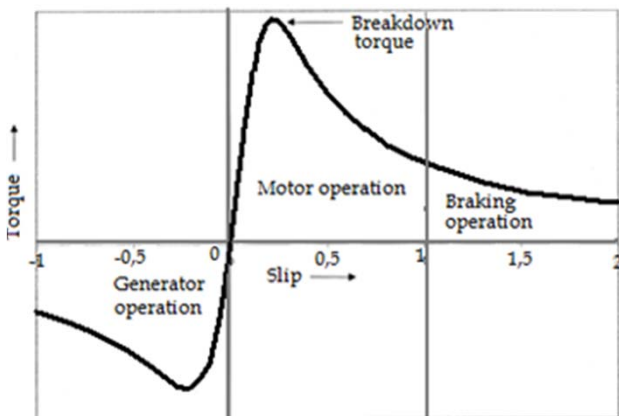


Figura 8 – Característica binário versus velocidade da máquina de indução em três modos de funcionamento

Como é possível ver na figura 9, se o gerador é colocado em regime de binário constante, ele tem dois pontos de funcionamento possíveis, P1 e P2. Apenas um destes dois pontos, P1, é estável. Qualquer variação na velocidade em torno do ponto P1 vai produzir um binário de estabilização para trazê-lo de volta ao ponto P1. A figura mostra também o limite de carga que o gerador pode aceitar. O binário máximo que pode suportar é chamado limite de sobrecarga, e é apresentado como T_{max} . Se o gerador em regime de binário constante é sobrecarregado acima de T_{max} , torna-se instável e irá parar, absorvendo corrente em excesso, podendo mesmo destruir-se termicamente se não for devidamente protegido [4].

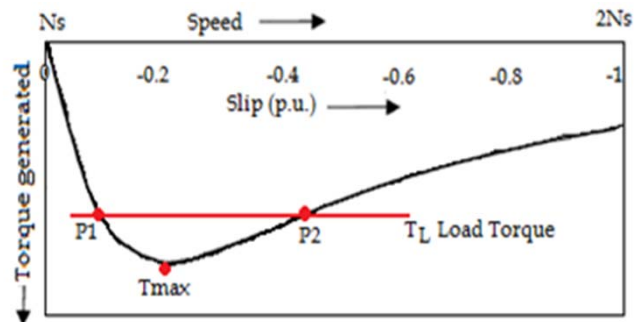


Figura 9 – Característica de binário versus velocidade do gerador de indução em carga

c. Configuração usual do gerador de indução

Os geradores de indução ligados à rede ou em modo isolado são usados principalmente, para situações de velocidade constante ou variável e uma relação tensão / frequência constante ou variável, em mini-hídricas e sistemas de energia eólica. As possibilidades de utilização de geradores de indução duplamente alimentados ou de rotor gaiola de esquilho são resumidas na seguinte Tabela I.

O princípio de funcionamento da máquina de indução duplamente alimentada baseia-se na capacidade de controlar a sua velocidade por variação da resistência do circuito rotórico.

Tabela I – Configuração usual e utilização dos geradores de indução.

Gerador de indução	Velocidade		Ligação à Rede	Isolada	Frequência		Tensão	
	Constante	Variável			Constante	Variável	Constante	Variável
Duplamente alimentado		X	X		X		X	
Gaiola de esquilo	X	X	X	X	X	X	X	X

A figura 10 ilustra a variação das curvas de binário / deslizamento da máquina de indução em função da variação da resistência ligada em série com a bobinagem rotórica.

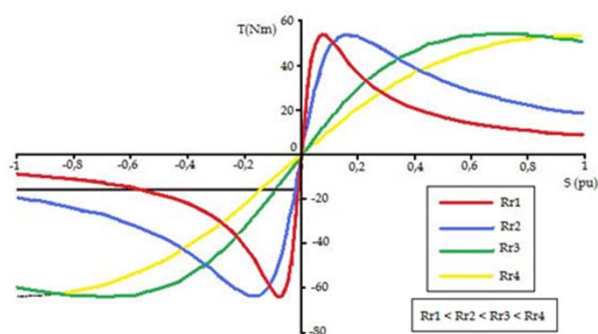


Figura 10 – Curvas características binário-velocidade para diferentes valores da resistência do rotor

Como se apresenta na figura 10, para um determinado binário mecânico T , pode-se variar a velocidade da máquina de indução pela variação da resistência do rotor. Se ao invés de uma resistência variável, se instalar um sistema de conversão eletrónico CA/CC/CA ligado ao rotor, é possível extrair a potência ativa pelo rotor da máquina e, assim, controlar a velocidade. Este é o método de obter energia da máquina de indução pelo enrolamento do rotor.

No modo de funcionamento do gerador de indução duplamente alimentado com base no princípio descrito acima: com deslizamento negativo, até se atingir a intensidade da corrente nominal do estator da máquina, a potência extraída pelo rotor da máquina é controlada de forma a otimizar a velocidade especificada o tipo de lâmina do rotor e, assim, maximizar o valor do coeficiente de potência da turbina.

Para deslizamentos negativos, o mais elevado (em módulo) para o qual a intensidade da corrente do estator atinge o valor nominal, a potência ativa no estator e rotor permanece constante, como se pode ver na linha a preto da figura 10 [4].

Este princípio de controlo de velocidade através do uso da energia de deslizamento significa que esta máquina pode funcionar como gerador com deslizamento positivo. Para garantir este modo de funcionamento, é necessário fornecer potência ativa ao rotor. Na figura 11 estão representadas as diferentes maneiras de utilizar a máquina de indução como gerador de energia eólica [3].

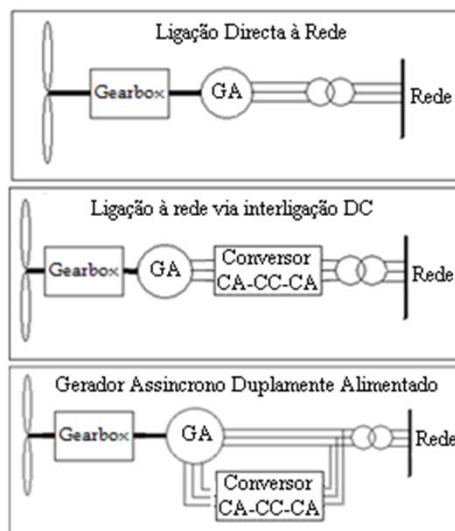


Figura 11 – Diferentes configurações da máquina de indução utilizada como gerador de energia eólica

As ligações da máquina de indução duplamente alimentada são apresentadas na figura seguinte.

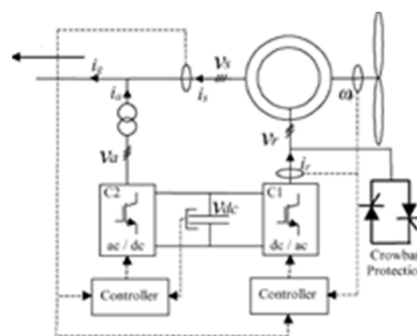


Figura 12 – Esquema de ligações da máquina de indução duplamente alimentada [5]

O estator da máquina de indução está diretamente ligado à rede de energia elétrica. O rotor é ligado à rede através de um sistema eletrónico de conversão CA/CC/CA e um transformador.

Os conversores AC/DC/AC que interligam o rotor da máquina à rede através do transformador, são conversores tipo ponte-PD3 a seis impulsos equipados com transístores bipolares porta isolada (IGBTs), controlados por modulação de largura de impulso.

Normalmente, na máquina de indução duplamente alimentada, o conversor ligado ao transformador controla a tensão nos terminais do condensador, e controla o fator de potência no ponto comum para os circuitos do rotor e do estator. O conversor ligado diretamente ao rotor do motor de indução, controla o módulo e o argumento da intensidade da corrente injetada ou extraída através do rotor [6].

O princípio de funcionamento do sistema de controlo por modulação de largura de impulso pode impor uma forma de onda aproximadamente sinusoidal, com frequência, amplitude e fase ajustável aos terminais AC dos conversores. Na figura 12, o conversor CA/CC/CA ligado ao rotor da máquina de indução, permite o controlo da frequência da forma de onda aplicada ao rotor, que é igual à frequência de escorregamento da máquina para um determinado ponto de funcionamento. Simultaneamente, também controla o módulo e o argumento da intensidade da corrente no rotor.

O conversor CA/CC ligado aos terminais do transformador controla a magnitude da tensão nos terminais do condensador. A frequência da corrente alternada é igual à frequência da rede com a qual o conversor está interligado, e o controlo da fase impõe o fator de potência da máquina. Esta característica do sistema de controlo por modulação de largura de impulso para ajustar a fase da onda de tensão e intensidade da onda de corrente, pode dispensar o uso de baterias de condensadores na maioria dos casos. Normalmente, os fabricantes fornecem um controlo do fator de potência entre 0,9 indutivo e 0,9 capacitivo aos terminais da máquina [2].

O objetivo do sistema de controlo dos conversores eletrónicos CA/CC/CA é garantir a maximização do coeficiente de potência da turbina, principalmente na região característica da potência em função do vento e onde a potência não é controlada. Além disso, os sistemas de controlo dos conversores permitem manter um determinado valor do fator de potência no ponto de interligação da máquina de indução duplamente alimentada com a rede de energia elétrica. Na região característica em que a potência da turbina é controlada, o sistema de controlo dos conversores CA/CC/CA mantém constante a potência total, extraída pelo estator e rotor da máquina, complementada pelo sistema de controlo do ângulo de passo das pás do rotor. Pode-se portanto concluir que o sistema de controlo dos geradores eólicos do tipo máquinas de indução duplamente alimentadas pode maximizar a energia elétrica entregue à rede numa ampla gama de variação da velocidade do vento [6].

Referências

- [1] www.abb.com
- [2] Akhmatov, Variable-Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators –Part I ; Modelling in Dynamic Simulation Tools. Wind Engineering, (2002) Vol 26, nº2, pp 85-108.
- [3] Cigrè, Task Force 38.01.10, 2001.
- [4] Manwell, J. ; McGowan, J. G. & Rogers, A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, 2002, ISBN 047 1499722.
- [5] Almeida, R. G.; Peças Lopes, J. A. & Barreiros, J. A. L. (2004). Improving Power System Dynamic Behaviour Through Doubly Fed Induction Machines Controlled by Static Converter Using Fuzzy Control. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, No.4, November 2004, pp. 1942-1950.
- [6] Ekanayake, J. B.; Holdsworth, L.; Wu, X. & Jenkins, N. (2003). Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, No.2, (May 2003) pp. 803-809.
- [7] Teco Westinghouse Motor Company, World Series Motors Brochure.
- [8] José Bezeza Carvalho, Roque Filipe Brandão, Fernando Maciel Barbosa. "Wind Energy Technology", capítulo do livro "Renewable Energy", ISBN 978-953-7619-52-7.". Editado por T.J. Hammons. Publicado por In-Tech. Dezembro de 2009.
- [9] Roque Filipe Mesquita Brandão, "Assinatura Digital de Geradores Eólicos", dissertação de doutoramento, FEUP, 2012.