

NEUTRO À TERRA

Revista Técnico-Científica [Nº9] Junho de 2012

<http://www.neutroaterra.blogspot.com>

A revista “Neutro à Terra” volta novamente à vossa presença, com novos e interessantes assuntos na área da Engenharia Eletrotécnica em que nos propomos intervir. Nesta edição da revista merecem particular destaque os temas relacionados com as instalações elétricas, as máquinas elétricas, a eficiência energética e as energias renováveis.

Nesta publicação dá-se também destaque à quarta edição das Jornadas Eletrotécnicas de Máquinas e Instalações Elétricas, que devem ocorrer nos dias 5 e 6 de Dezembro de 2012 no Centro de Congressos do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Professor Doutor José Beleza Carvalho



Instalações
Elétricas
Pág.5



Máquinas
Elétricas
Pág. 19



Telecomunicações
Pág. 27



Segurança
Pág. 31



Energias
Renováveis
Pág. 39



Eficiência
Energética
Pág.55



Domótica
Pág. 61

Índice

03| Editorial

05| Instalações Elétricas

Electromagnetic Forces of Short-Circuits
in Symmetric Three-phase Circuits
Rui Manuel de Moraes Sarmento

19| Máquinas Elétricas

Geradores Eólicos Características Elétricas
José António Beleza carvalho
Roque Filipe Mesquita Brandão

27| Telecomunicações

ZAP – Muito mais que um acesso privilegiado
Sérgio Filipe Carvalho Ramos
António Silva

31| Segurança

Segurança Contra Incêndio em Edifícios
Regime Jurídico, Normas e Notas Técnicas
António Augusto Araújo Gomes
Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva

39| Energias Renováveis

Inovar na produção de energia elétrica a partir do vento
O recurso a postes de eletricidade existentes
Miguel Leichenring Franco

Cogeração e Trigeração. Um caso prático
Alfredo Silva
Pedro Costa

55| Eficiência Energética

Veículos Elétricos
Impactos, Barreiras e Oportunidades da Integração nos Sistemas de Energia
Vera Silva

61| Domótica

Servidor de Automação e Automação LEAN
Para uma GTC mais otimizada
Infocontrol – Eletrónica e Automatismo, Lda

65| Autores

FICHA TÉCNICA

DIRETOR:

Doutor José António Beleza Carvalho

SUBDIRETORES:

Eng.º António Augusto Araújo Gomes
Doutor Roque Filipe Mesquita Brandão
Eng.º Sérgio Filipe Carvalho Ramos

PROPRIEDADE:

Área de Máquinas e Instalações Elétricas
Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto

CONTATOS:

jbc@isep.ipp.pt ; aag@isep.ipp.pt

PUBLICAÇÃO SEMESTRAL:

ISSN: 1647-5496

Estimados leitores

A revista “Neutro à Terra” volta novamente à vossa presença, com novos e interessantes assuntos na área da Engenharia Eletrotécnica em que nos propomos intervir. Nesta edição da revista merecem particular destaque os temas relacionados com as instalações elétricas, as máquinas elétricas, a eficiência energética e as energias renováveis.

As forças eletromagnéticas que se manifestam nas situações de curto-circuito são de extrema complexidade, sendo o seu conhecimento determinante para um correto dimensionamento das instalações elétricas, quer ao nível dos esforços que condutores e barramentos ficam sujeitos, quer ao nível do dimensionamento de equipamentos de proteção. Nesta edição, apresenta-se um artigo de elevado nível científico, que descreve uma nova metodologia de cálculo das forças que se estabelecem entre condutores na situação mais desfavorável de um curto-circuito, particularmente no período transitório da ocorrência do defeito. Os resultados obtidos com diversas simulações, que são aqui apresentadas, permitem uma reflexão aberta sobre o que está estabelecido e é atualmente aceite, no âmbito dos valores máximos das forças eletromagnéticas resultantes de um curto-circuito simétrico trifásico.

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. A necessária conversão eletromecânica de energia baseia-se em máquinas que 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. Nesta edição, apresenta-se um artigo que analisa as principais características elétricas das máquinas mais utilizadas como geradores eólicos.

A necessidade de reduzir a dependência Europeia dos combustíveis fósseis e de reduzir o nível de emissões de dióxido de carbono oriundos do sector dos transportes deu origem a uma necessidade de desenvolver novas tecnologias e soluções de mobilidade. Uma das soluções que se apresenta como promissora é a substituição de veículos movidos por motores de combustão térmica por veículos elétricos e veículos híbridos recarregáveis. Nesta edição da revista apresenta-se um importante artigo, que analisa o impacto desta nova carga elétrica ao nível do planeamento, gestão e exploração dos atuais sistemas elétricos de energia.

O forte desenvolvimento que se tem verificado na produção de energia elétrica com recurso a fontes de energia renováveis, especialmente de natureza eólica, levou na última década a uma grande proliferação de parques eólicos. Como resultado de pesados investimentos em grandes geradores eólicos, o vento passou de um pequeno fornecedor de energia para um dos principais componentes do mix energético dos países industrializados. A eletricidade gerada a partir do vento aumentou mundialmente a uma taxa média de 21% entre 2006 e 2010, representando hoje cerca de 2% do fornecimento total de energia. Nesta edição da revista, publica-se um artigo que aborda uma forma inovadora de produção de energia eólica, baseado na utilização dos postes das redes de transporte e distribuição de energia elétrica para colocação dos aerogeradores.

Nesta edição da revista “Neutro à Terra” pode-se ainda encontrar outros assuntos reconhecidamente importantes e atuais, como um artigo sobre infraestruturas de telecomunicações em edifícios, um artigo sobre segurança contra incêndios em edifícios e um artigo que analisa as tecnologias adotadas na cogeração e trigeração, apresentando-se um caso prático de cogeração e trigeração em funcionamento num centro comercial da cidade do Porto.

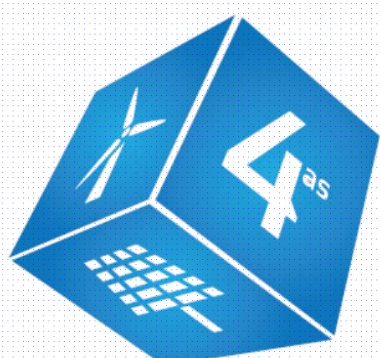
No âmbito do tema “Divulgação”, que pretende divulgar os laboratórios do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, onde são realizados alguns dos trabalhos correspondentes a artigos publicados nesta revista, nesta edição apresenta-se o Laboratório de Sistemas Digitais.

Nesta publicação dá-se também destaque à quarta edição das Jornadas Eletrotécnicas de Máquinas e Instalações Elétricas, que devem ocorrer nos dias 5 e 6 de Dezembro de 2012 no Centro de Congressos do ISEP. Este evento contará com a participação de diversas empresas ligadas às áreas das máquinas elétricas, sistemas eletromecânicos, energias renováveis, veículos elétricos, segurança, domótica, luminotecnia e infraestruturas de telecomunicações. O evento é organizado pelo Departamento de Engenharia Eletrotécnica do ISEP, com os habituais colaboradores desta revista a terem um papel preponderante.

Esperando que esta nova edição da revista “Neutro à Terra” possa voltar a satisfazer as expectativas dos nossos leitores, apresento os meus cordiais cumprimentos.

Porto, Junho de 2012

José António Beleza Carvalho



JORNADAS
ELETROTÉCNICAS
MÁQUINAS E INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

4^{as} JORNADAS ELETROTÉCNICAS DE MÁQUINAS E INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

5 e 6 de Dezembro de 2012

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Informações
www.dee.isep.ipp.pt
jbc@isep.ipp.pt

Objetivo

Promover a divulgação e discussão de temas relacionados com as Máquinas e Instalações Elétricas, devidamente enquadrados com a problemática atual das energias renováveis e a utilização racional de energia, envolvendo o ensino, a investigação, profissionais e empresários do sector eletrotécnico, através da apresentação de comunicações e exposição de equipamentos.

Destinatários

Licenciados, bacharéis, alunos de cursos de Engenharia Eletrotécnica e, de uma forma geral, todos os profissionais do sector eletrotécnico, que exerçam funções relacionadas com as áreas das máquinas e instalações elétricas.

Temas

Investigação/Ensino; Política Energética; Energias Renováveis; Máquinas Elétricas; Veículos Elétricos; Sistemas Eletromecânicos; Instalações Elétricas; Sistemas de Segurança; Telecomunicações.

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].

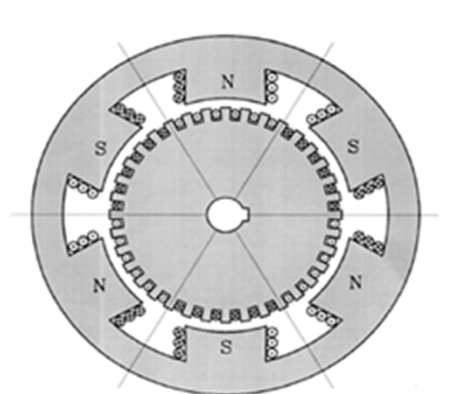


Figura 1 – Secção transversal do estator e rotor da máquina elétrica rotativa

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 estatórico. 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 estatórica 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

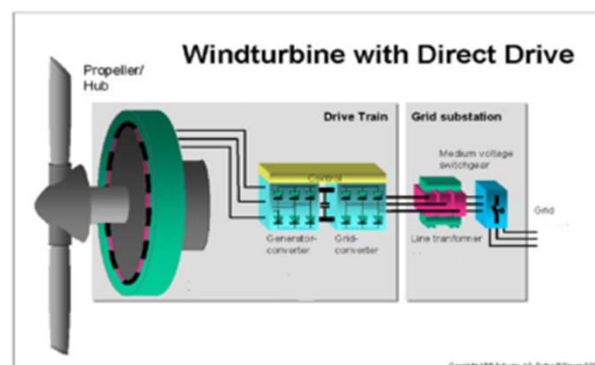


Figura 2 – Diagrama de ligações de um gerador síncrono funcionando a velocidade variável [1]

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].

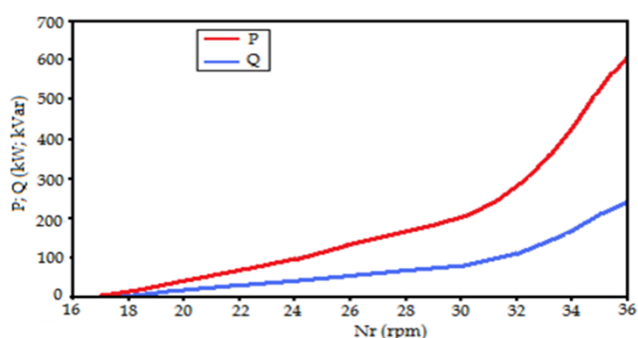


Figura 3 – Potência ativa e reativa fornecida por um gerador de energia eólica equipado com gerador síncrono funcionando a velocidade variável

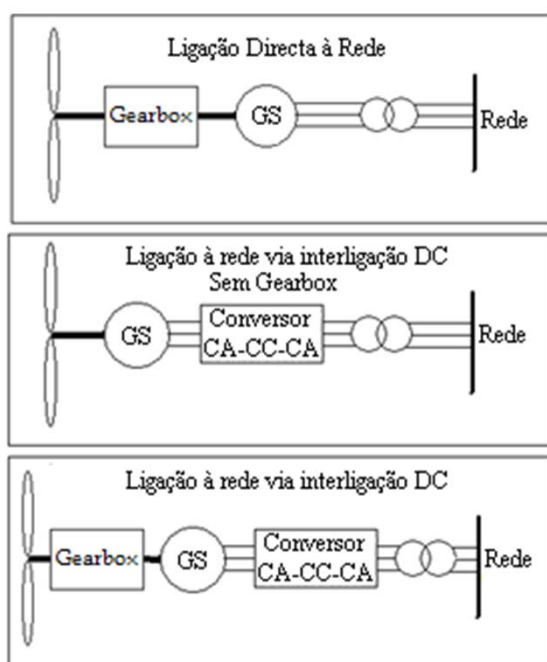


Figura 4 – Configurações da máquina síncrona utilizada como um gerador de energia eólica

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 hidroelétricas.

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.

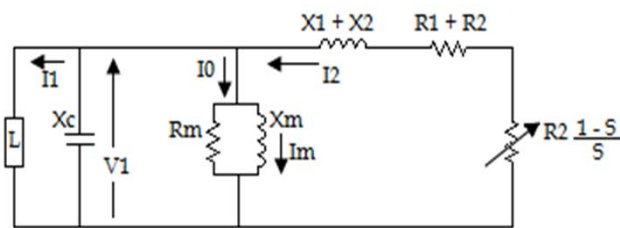


Figura 5 – Esquema equivalente aproximado de um gerador de indução em regime isolado de carga

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 , 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 capacitor $I_c = V1/X_c$ deve ser igual à corrente de magnetização $I_m = V1/X_m$. A tensão V1 é uma função linear de I_m até ser atingido ponto de saturação do núcleo ferro magnético (figura 5). O funcionamento estável requer que a linha $I_m X_c$ possa cruzar a curva V1 versus I_m . O ponto de operação é fixado onde $V1/X_c$ e $V1/X_m$ são iguais, isto é, quando $1/X_c = 1/X_m$, em que $X_c = 1/\omega C$. 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 R_m . A soma da corrente reativa deve ser zero:

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

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).

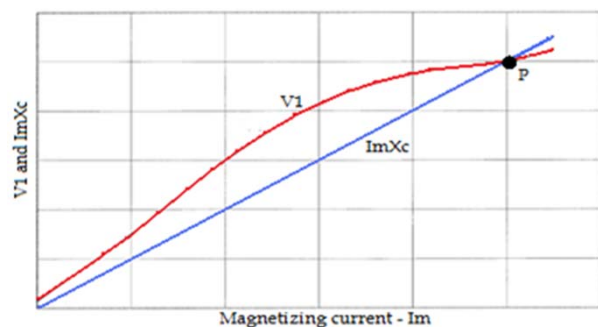


Figura 6 – Características de funcionamento do gerador de indução com auto excitação capacitiva

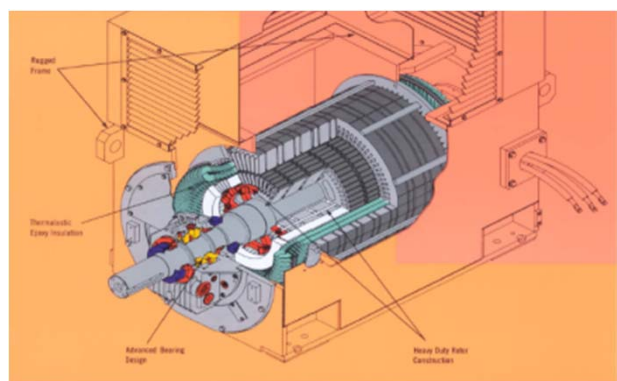


Figura 7 – Máquina de indução de 2 MW [7]

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 $n > f_1/p$ 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.

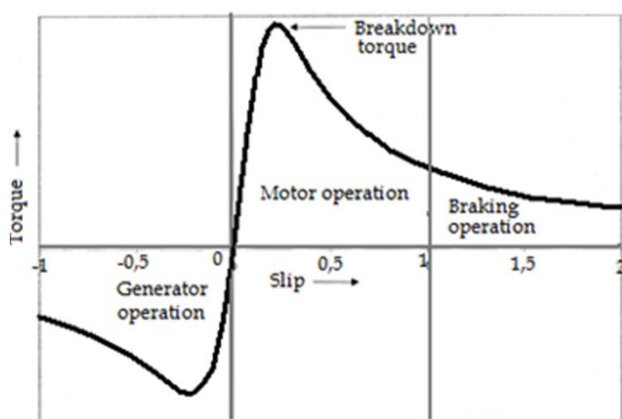


Figura 8 – Característica binário versus velocidade da máquina de indução em três modos de funcionamento

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].

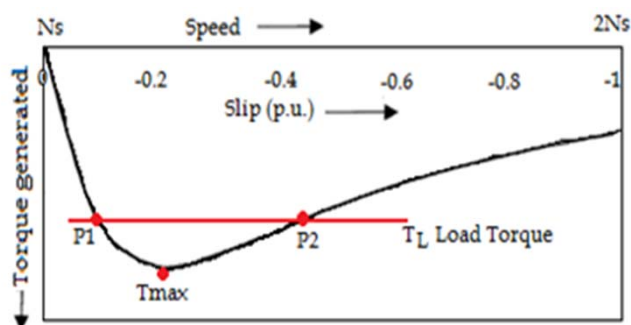


Figura 9 – Característica de binário versus velocidade do gerador de indução em carga

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 esquilão 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.

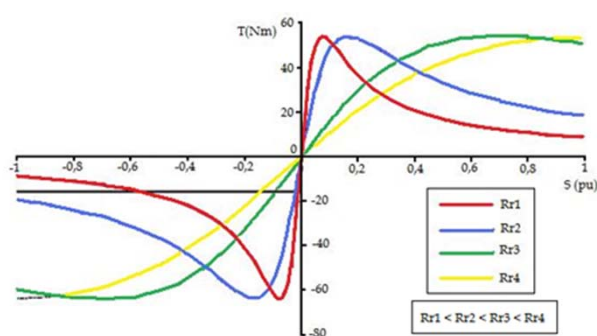


Figura 10 – Curvas características binário-velocidade para diferentes valores da resistência do rotor

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].

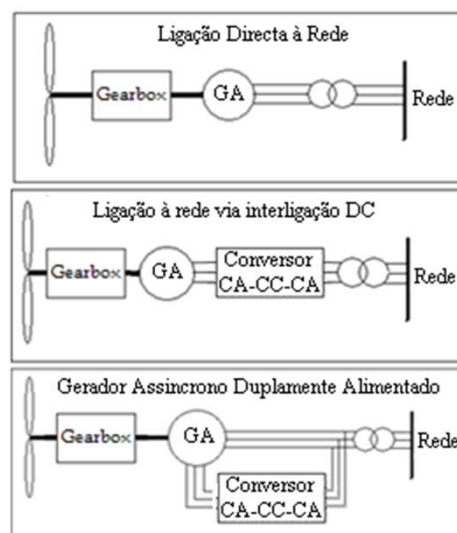


Figura 11 – Diferentes configurações da máquina de indução utilizada como gerador de energia eólica

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

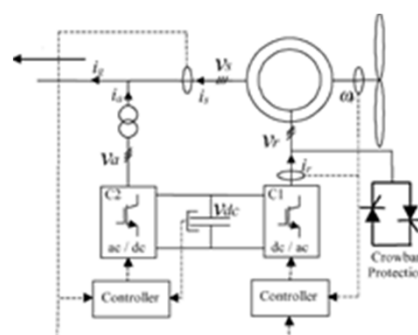


Figura 12 – Esquema de ligações da máquina de indução duplamente alimentada [5]

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.

LABORATÓRIO DE SISTEMAS DIGITAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

O Laboratório de Sistemas Digitais teve a sua origem, no início dos anos 90, numa sala do piso 4 do edifício I. Foi criado com o objetivo de apoiar as unidades curriculares de Sistemas Digitais I e II, nomeadamente no ensino da programação do microprocessador Z80 utilizando kits didáticos montados pelos professores e encarregados de trabalho deste mesmo Laboratório. Criava-se assim um espaço onde era possível o exercício prático, por parte dos alunos, dos conhecimentos teóricos adquiridos.

Na altura da passagem de parte do Departamento de Engenharia Eletrotécnica para o recém-construído edifício B, o Laboratório de Sistemas Digitais também teve novas instalações, continuando a servir de apoio à área de Sistemas Digitais – as unidades curriculares de Eletrónica Digital I e Eletrónica Digital II.

Desde o ano de 2002 até à atualidade, o Laboratório ocupa um espaço no piso 4 do Edifício F. Está equipado com dez bancadas de trabalho compostas por computadores onde, semestre a semestre e de acordo com as necessidades letivas, vão sendo instaladas as várias aplicações (software) que dão suporte à simulação e à implementação prática dos trabalhos aí realizados. Em termos de hardware, está também equipado com PLC – Programmable Logic Controllers da OMRON, painéis destinados ao controlo e automação com Autómatos Programáveis da SIEMENS e placas eletrónicas baseadas no microcontrolador ATMEGA128 da ATMEL.

Destacam-se os trabalhos de simulação de circuitos combinatórios e circuitos sequenciais, de programação de Controladores Lógicos Programáveis usando o CX-Programmer e de programação do microcontrolador ATMEGA128, assim como de controlo de Inputs/Outputs, controlo de motores DC e motores Passo-a-Passo, conversão Analógico/Digital e comunicação de dados.



COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:



Alfredo Verónico da Silva

alfredo@sgotf.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto
Aluno de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica -Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto
Responsável pedagógico na entidade formadora SGO-Tecnologia e Formação, Lda.



António Augusto Araújo Gomes

aag@isep.ipp.pt

Mestre (pré-bolonha) em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
Doutorando na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia (UTAD).
Docente do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 1999.
Coordenador de Obras na CERBERUS - Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999.
Prestação, para diversas empresas, de serviços de projeto de instalações elétricas, telecomunicações e segurança, formação, assessoria e consultoria técnica.
Investigador do GECAD (Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão), do ISEP, desde 1999.



António Silva

antonio.silva@efapel.pt

Engenheiro Eletrotécnico licenciado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
Responsável pelo Serviço de Apoio Técnico da EFAPEL- Empresa Fabril de Produtos Elétricos, S.A."



Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva

hjs@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica, em 1979, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, opção de Produção, Transporte e Distribuição de Energia.
Diploma de Estudos Avançados em Informática e Eletrónica Industrial pela Universidade do Minho.
Mestre em Ciências na área da Eletrónica Industrial.
Professor Adjunto Equiparado do ISEP, lecionando na área da Teoria da Eletricidade e Instalações Elétricas.



Infocontrol – Eletrónica e Autómato, Lda

www.infocontrol.pt

O Grupo Infocontrol é formado por um conjunto de empresas comerciais especializadas em engenharia, que operam nas áreas da Indústria, Edifícios e Segurança. A sua atividade baseia-se na inovação, precisão técnica e no apoio que presta a todos os clientes. As empresas do Grupo (Infocontrol, QEnergia e Novalec) cooperam particularmente com projetistas e empresas de engenharia nas seguintes áreas: Medida, Gestão, Informação, Segurança.



José António Beleza Carvalho

jbc@isep.ipp.pt

Nasceu no Porto em 1959. Obteve o grau de B.Sc em engenharia eletrotécnica no Instituto Superior de Engenharia do Porto, em 1986, e o grau de M.Sc e Ph.D. em engenharia eletrotécnica na especialidade de sistemas de energia na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em 1993 e 1999, respetivamente.
Atualmente, é Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, desempenhando as funções de Director do Departamento.

COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:



Miguel Leichsenring Franco

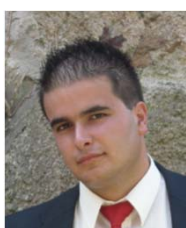
m.franco@schmitt-elevadores.com

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Master in Business Administration (MBA) com especialização em Marketing pela Universidade Católica Portuguesa – Lisboa.

Licenciado em Administração e Gestão de Empresas pela Universidade Católica Portuguesa – Porto.

Administrador da Schmitt-Elevadores, Lda.



Pedro Manuel Pereira Costa

1070173@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto

Aluno de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica -Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto

Formador Profissional na área de Eletrónica e Energia na SGO-Tecnologia e Formação, Lda



Roque Filipe Mesquita Brandão

rfb@isep.ipp.pt

Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Professor Adjunto no Instituto Superior de Engenharia do Porto, departamento de Engenharia Eletrotécnica.

Consultor técnico de alguns organismos públicos na área da eletrotecnia.



Rui Manuel de Moraes Sarmiento

rms@isep.ipp.pt

Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica, pela FEUP. Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, pela FEUP.

Diretor de planeamento e produção na empresa FERSEQU, entre 1982 e 1987

Diretor e coordenador de Cursos de Ação de Formação em Controlo da Qualidade, ISEP entre 1989 e 2001

Assistente das disciplinas Física Atómica e Termodinâmica dos Cursos de Eng^a Química e Eng^a Civil, da FEUP em 1975.

Professor Adjunto do Quadro do Instituto Superior de Engenharia do Porto, em 1993



Sérgio Filipe Carvalho Ramos

scr@isep.ipp.pt

Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Aluno de doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do curso de Sistemas Elétricos de Energia do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 2001.

Prestação, para diversas empresas, de serviços de projeto de instalações elétricas, telecomunicações e segurança, formação, assessoria e consultoria técnica.

Investigador do GECAD (Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão), do ISEP, desde 2002.



Vera Lúcia Paiva da Silva

Licenciatura e Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e Eletrónica no Imperial College London.

Ocupa atualmente a posição de "Expert Research Engineer" no Departamento de Funcionamento e Economia dos Sistemas de Energia na Unidade de Investigação e Desenvolvimento (EDF R&D) da Eletricidade de França (EDF SA) tendo exercido anteriormente (2009-2011) o cargo de Gestora de Projetos na mesma empresa.

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO PÓS-GRADUADA EM Projeto de Instalações Elétricas

OBJETIVOS

Promover competências aos pós-graduados no âmbito do projeto, execução, exploração e utilização de instalações elétricas de serviço público e serviço particular e, de uma forma integrada, abordar todos os assuntos relacionados com a conceção de instalações elétricas de média e baixa tensão.

DESTINATÁRIOS

O curso destina-se a bacharéis, licenciados e mestres recém formados na área da Engenharia Eletrotécnica e/ou Engenharia Eletrónica, assim como quadros no activo que pretendam atualizar conhecimentos ou adquirir competências no âmbito da conceção e utilização de instalações elétricas.

PLANO CURRICULAR

- Equipamentos e Sistemas de Proteção
- Instalações Elétricas
- Técnicas e Tecnologias de Eficiência Energética
- Projeto Integrador

LOCAL

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Tel. 228 340 500 – Fax: 228 321 159

Info: jbc@isep.ipp.pt

