



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 1009707-4 B1



(22) Data do Depósito: 25/06/2010

(45) Data de Concessão: 29/06/2021

(54) Título: TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL, CONTROLADOR DA OPERAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL E MÉTODO PARA CONTROLAR UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL

(51) Int.Cl.: F03D 7/04; F03D 9/00.

(30) Prioridade Unionista: 29/06/2009 US 61/221,134; 29/06/2009 EP 09163969.0.

(73) Titular(es): VESTAS WIND SYSTEMS A/S.

(72) Inventor(es): GERMÁN CLAUDIO TARNOWSKI.

(86) Pedido PCT: PCT EP2010003903 de 25/06/2010

(87) Publicação PCT: WO 2011/000531 de 06/01/2011

(85) Data do Início da Fase Nacional: 15/12/2011

(57) Resumo: TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL, CONTROLADOR DA OPERAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL E MÉTODO PARA CONTROLAR UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL, por tratar a invenção de uma turbina eólica de velocidade variável projetada para fornecer energia elétrica adicional e neutralizar perturbações não periódicas em uma rede elétrica. Um controlador monitora eventos sinalizando a necessidade de um aumento da potência elétrica de saída da turbina eólica para rede elétrica. O controlador é projetado para controlar a turbina eólica da seguinte forma: depois que um evento sinalizador foi detectado, a turbina eólica entra em um período de sobreprodução no qual a potência elétrica de saída é aumentada, sendo que a energia elétrica adicional de saída é retirada de energia cinética armazenada no rotor e sem alterar a operação da turbina eólica para um ponto mais eficiente de trabalho. Quando a velocidade de rotação do rotor atinge um valor mínimo, a turbina eólica entra em um período de recuperação para reacelerar o rotor à velocidade de rotação nominal enquanto continua a contribuir para a estabilidade da rede elétrica com o fornecimento de pelo menos um mínimo predeterminado de energia elétrica.

**“TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL, CONTROLADOR DA
OPERAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL E
MÉTODO PARA CONTROLAR UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE
VARIÁVEL”**

Campo Técnico

[001] A presente invenção se refere a uma turbina eólica de velocidade variável a ser conectada a uma rede elétrica, projetada para gerar energia elétrica adicional de saída na ocorrência de distúrbios na rede elétrica. Mais especificamente, a invenção é dirigida a uma turbina eólica que possa continuar a suportar a estabilidade da rede elétrica depois que o fornecimento da energia elétrica adicional foi encerrado.

Fundamentos da Invenção

[002] Desequilíbrios entre a energia elétrica fornecida a uma rede elétrica e a energia elétrica retirada da mesma levam a flutuações na frequência da rede. Se a geração da energia elétrica cair abaixo do consumo de energia de uma rede elétrica, por exemplo, em função de uma falha na usina de geração ou de uma desconexão, a frequência da rede diminui. Inversamente, se o consumo de energia cair abaixo da quantidade de energia elétrica gerada, a frequência da rede aumenta. Com o propósito de compensar flutuações de frequência deste tipo, existem usinas geradoras de energia adaptadas para variar continuamente a sua energia elétrica ativa de saída até que o desequilíbrio seja eliminado. Esta variação na energia elétrica de saída é denominada "controle da energia primária". Operadores de redes elétricas especificam os requerimentos de controle da energia primária nos assim denominados Códigos de Redes Elétricas como, por exemplo, o Código de Rede Elétrica 2006 da E.ON Netz GmbH, versão Inglesa, publicada pela E.ON Netz GmbH, e disponível para transferência de arquivo em http://www.eon-netz.com/pages/ene_de/Veroeffentlichungen/Netzanschluss/Netzanschlussregeln/ENENARHS2006eng.pdf.

[003] Atualmente as turbinas eólicas, de modo geral, não

contribuem para o controle da energia primária por que a fonte de energia "vento" não é controlável. No entanto, com o aumento da proporção de plantas de energia eólica na produção total da energia elétrica, uma contribuição das turbinas eólicas para o controle da energia primária é desejável.

[004] Além disso, as partes mecânicas rotativas do sistema de conversão de energia das modernas turbinas eólicas de velocidade variável não são eletricamente acopladas à rede elétrica, e consequentemente a turbina eólica é mecanicamente desacoplada da rede elétrica, diferentemente dos geradores síncronos convencionais de velocidade fixa. Desta maneira, as turbinas eólicas modernas não apresentam uma contribuição inerente à estabilidade da rede elétrica durante a ocorrência de eventos na rede, tais como desequilíbrios súbitos entre a geração total e o consumo da rede (em função de um desarme do gerador ou o de um desarme da carga), diferentemente dos geradores síncronos convencionais de velocidade fixa. Turbinas eólicas deste tipo não contribuem, portanto, para a inércia rotativa da rede elétrica. Com o aumento da proporção de plantas de energia eólica na produção total da energia elétrica, o número de geradores síncronos de velocidade fixa está diminuindo, perdendo-se desta maneira a capacidade inerente da mistura de geração de energias para suportar a estabilidade de uma rede elétrica durante a ocorrência de eventos na rede, tais como desequilíbrios súbitos entre a geração total e consumo da rede elétrica. A inércia total da rede elétrica é diminuída, com isto deteriorando a estabilidade de frequência da rede. Uma contribuição de turbinas eólicas com modulação rápida e controlada da energia ativa para a estabilidade da rede elétrica é, portanto, desejável.

[005] Sabe-se, por exemplo, do documento DE 100 22 974 A1, que as turbinas eólicas podem reagir a aumentos de frequência da rede elétrica (ou seja, menos energia é consumida da rede elétrica do que é fornecida a ela), diminuindo a sua energia de saída. No entanto, é difícil responder a diminuições de frequência (ou seja, mais energia é consumida da rede elétrica do que é fornecida a ela), porque isto significa aumentar a produção de energia

elétrica ativa sem que exista maior quantidade de energia eólica disponível. Duas abordagens diferentes são conhecidas para resolver este problema:

[006] Em primeiro lugar, dois documentos de Harald Weber et al. da Universidade de Rostock ("Netzregelverhalten von Windkraftanlagen", publicado na 6ª conferência GMA/ETG-Fachtagung "Sichere und zuverlässige Systemführung von Kraftwerk und Netz im Zeichen der Deregulierung", realizada de 21 a 22 de maio de 2003 em Munique, disponível para transferência de arquivo em www.e-technik.uni-rostock.de/ee/download/publications_EEV/uni_hro_publ35_WKA_2003.pdf; e "Primärregelung mit Windkraftanlagen", publicado no ETG-Workshop "Neue dezentrale Versorgungsstrukturen", realizada de 19 a 20 de fevereiro de 2003 em Frankfurt/Main, disponível para transferência de arquivo em www.e-technik.uni-rostock.de/ee/download/publications_EEV/uni_hro_publ33_etg_frankfurt_2003.pdf; ambos os documentos doravante referenciados como "documentos Rostock") recomendam a operação de uma turbina eólica em um ponto subotimizado de trabalho (por exemplo, com uma velocidade de rotação do rotor maior do que a velocidade otimizada, para uma dada velocidade do vento) com o propósito de manter uma reserva de energia que pode ser adicionalmente fornecida no caso de uma queda de frequência (por exemplo, então diminuindo a velocidade de rotação do rotor para a velocidade otimizada, para uma dada velocidade do vento). Deste modo, a energia elétrica adicional de saída pode ser introduzida na rede elétrica por um tempo indefinido.

[007] De acordo com a segunda abordagem que é delineada, por exemplo, no documento WO 2005/025026 A1, a energia cinética armazenada em um rotor de uma turbina eólica é identificada como sendo uma reserva de energia que pode ser transformada em energia elétrica e adicionalmente injetada na rede elétrica, no entanto, apenas por um curto período de tempo. Com a utilização da energia cinética também é possível compensar oscilações periódicas de frequência, desacelerando e acelerando periodicamente o rotor, em sincronismo com a oscilação da frequência.

[008] Um conceito semelhante de fornecimento de energia por um curto período de tempo com a utilização da energia cinética do rotor é descrito no artigo "Temporary Primary Frequency Control Support by Variable Speed Wind Turbines – Potential and Applications" de Ullah et al. (publicado pelo IEEE em "IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2" em maio de 2008, páginas 601 a 612, disponível para transferência de arquivo em ieeexplore.ieee.org/iel5/59/4494587/04480153.pdf; o mencionado artigo doravante referenciado como "ULLAH").

[009] Estas propostas da utilização da energia cinética do rotor para fornecer temporariamente energia elétrica adicional de saída, no entanto, ainda não amadureceram, pois os mencionados documentos não abordam o controle da turbina eólica depois que o fornecimento não periódico de energia elétrica adicional de saída foi concluído. A presente invenção proporciona uma abordagem refinada sobre uma rápida variação da energia ativa para a estabilidade da rede elétrica e sobre a contribuição das turbinas eólicas no controle da energia primária.

Resumo da Invenção

[010] De acordo com uma primeira modalidade de execução, a presente invenção revela uma turbina eólica de velocidade variável a ser conectada a uma rede elétrica. A turbina eólica é projetada para fornecer energia elétrica adicional para contrabalancear ou neutralizar distúrbios não periódicos na rede elétrica. A mencionada turbina eólica compreende um rotor com lâminas acoplado a um gerador elétrico, e um controlador que monitora eventos que sinalizam a necessidade de aumentar a energia elétrica de saída da turbina eólica para a rede elétrica para suportar a estabilidade da rede elétrica. O controlador é projetado para controlar a turbina eólica para que esta execute atividades de suporte à estabilidade da rede elétrica, de uma maneira não periódica, como segue: Depois que um evento sinalizador foi detectado, a turbina eólica entra em um período de sobreprodução no qual a energia elétrica de saída é aumentada

além da energia elétrica normal de operação, sendo que a energia elétrica adicional de saída é retirada da energia cinética armazenada no rotor e sem modificar a operação da turbina eólica, trabalhando em um modo pelo menos parcial de carga, em um ponto de trabalho mais eficiente. Quando a velocidade de rotação do rotor atinge um valor mínimo, a turbina eólica entra em um período de recuperação para reacelerar o rotor à velocidade nominal de rotação, ao mesmo tempo contribuindo para a estabilidade da rede elétrica com o fornecimento de pelos menos um mínimo predeterminado de energia elétrica para a rede elétrica.

[011] De acordo com uma segunda modalidade de execução, a presente invenção revela um controlador projetado para controlar adequadamente uma turbina eólica de velocidade variável.

[012] De acordo com uma terceira modalidade de execução, a presente invenção revela um método correspondente para controlar uma turbina eólica para o fornecimento de energia elétrica adicional.

[013] Outros aspectos encontram-se definidos nas reivindicações dependentes, na descrição a seguir e nos desenhos.

Breve Descrição dos Desenhos

[014] As modalidades preferidas de execução serão explicadas através de exemplos relacionados aos desenhos anexos, nos quais:

- a Figura 1 ilustra esquematicamente um conjunto de uma turbina eólica de velocidade variável;
- a Figura 2 ilustra um diagrama simplificado de um fluxo de controle da turbina eólica;
- a Figura 3 ilustra exemplificativamente a curva de produção de uma turbina eólica;
- a Figura 4 ilustra um diagrama mostrando a correlação entre a velocidade de rotação do rotor e a energia elétrica de saída de acordo com uma primeira modalidade de execução;

- a Figura 5 ilustra o desenvolvimento da energia elétrica de saída, a energia mecânica disponível na lâmina e a velocidade do rotor de acordo com a primeira modalidade de execução;

- a Figura 5a mostra uma ilustração esquemática da primeira modalidade de execução de acordo com a Figura 5, na qual a energia elétrica de saída é modulada durante o período de sobreprodução e de recuperação;

- a Figura 6 ilustra a correlação existente entre a velocidade de rotação do rotor e a energia elétrica de saída de acordo com uma segunda modalidade de execução;

- a Figura 7 ilustra um diagrama mostrando as características da energia elétrica de saída, da energia mecânica disponível na lâmina e da velocidade do rotor de acordo com a segunda modalidade de execução;

- a Figura 8 mostra as curvas das energias elétrica e mecânica, bem como, a velocidade do rotor de acordo com uma terceira modalidade de execução;

- a Figura 9 ilustra a correlação existente entre a velocidade de rotação do rotor e a energia elétrica de saída em uma situação na qual a energia eólica disponível é maior do que a energia elétrica nominal da turbina eólica (operação à carga plena);

- a Figura 10 ilustra esquematicamente os componentes elétricos e mecânicos de uma turbina eólica com um gerador síncrono e um conversor de larga escala;

- a Figura 11 ilustra esquematicamente os componentes elétricos e mecânicos de uma turbina eólica com um Gerador de Indução de Dupla Alimentação (DFIG);

- a Figura 12 ilustra exemplificativamente a duração do período de recuperação para diferentes níveis de energia elétrica de saída na

dependência da velocidade do vento;

- a Figura 13 ilustra o método de suporte à estrutura da rede elétrica de acordo com uma modalidade preferida de execução da presente invenção.

Nomenclatura

[015] Os seguintes termos e abreviações são utilizados no decorrer desta especificação:

- P_{nom} : representa a potência elétrica (nominal) de operação da turbina eólica de acordo com a invenção (quando nos referimos à "potência", queremos dizer a unidade física com a dimensão energia/tempo ou trabalho/tempo);
- P_e : representa a potência elétrica atual de operação (de saída) em um determinado momento de tempo;
- P_{e0} : representa a potência (normal) elétrica de operação da turbina eólica no momento da mesma entrar no modo de controle de potência de acordo com a presente invenção;
- ΔP_{op} : representa a potência de sobreprodução que é fornecida adicionalmente à potência elétrica normal de operação da turbina eólica durante o período de sobreprodução;
- P_{emin} : representa a potência elétrica predeterminada e mínima de saída durante o período de recuperação;
- P_{acc} : representa a potência utilizada para reacelerar o rotor durante o período de recuperação de acordo com a presente invenção;

- P_w : representa a potência eólica disponível em um determinado momento de tempo;
- P_m : representa a potência mecânica do rotor da turbina eólica em um determinado momento de tempo;
- ω_0 : designa a velocidade de rotação do rotor da turbina eólica no momento do mesmo entrar no modo de controle de potência de acordo com a presente invenção;
- ω_{min} : representa a velocidade de rotação mínima do rotor da turbina eólica na qual a turbina eólica entra no período de recuperação.

Descrição Detalhada da Invenção

[016] Antes de passar à descrição detalhada das modalidades preferidas de execução, alguns itens gerais serão primeiramente abordados.

[017] Os componentes principais de uma turbina eólica de acordo com a presente invenção consistem de um rotor com lâminas, que é acoplado a um gerador elétrico, e de um controlador projetado para controlar a turbina eólica para que a mesma execute a atividade de suporte à estabilidade da rede de energia elétrica. A turbina eólica consiste de uma turbina eólica de velocidade variável, ou seja, a velocidade do rotor pode ser variada durante a operação em andamento com o propósito de permitir uma exploração eficiente da energia eólica disponível, ao mesmo tempo minimizando a carga à turbina eólica e a abrasão. A turbina eólica é também projetada para ser conectada a uma rede de energia elétrica que consiste, por exemplo, de uma rede de energia elétrica pública trifásica ou, se a turbina eólica pertencer a um parque eólico, à rede de tensão elétrica interna do parque (que pode, por sua vez, ser conectada a uma rede pública de energia elétrica). Para possibilitar que a turbina eólica seja operada com velocidades variáveis no rotor, a turbina eólica é mecanicamente

desacoplada da frequência fixa da rede de energia elétrica, por exemplo, através de um conversor elétrico ou de uma caixa de engrenagens de velocidade variável localizada entre o rotor e o gerador.

[018] Durante a operação em modo de carga parcial (ou seja, a energia eólica disponível se encontra abaixo da potência eólica nominal da turbina eólica), a turbina eólica geralmente opera em um ponto de trabalho ideal. Dependendo da velocidade e da direção do vento, a velocidade do rotor, bem como o passo e os ângulos de inclinação (assumindo-se que a turbina eólica é equipada com sistemas de controle de passo e de inclinação das pás) são continuamente ajustados de tal maneira que a máxima eficiência aerodinâmica seja mantida (por exemplo, a relação da velocidade da ponta da turbina eólica é mantida em um valor ideal) e o máximo de energia elétrica possa ser captado a partir das condições existentes de vento (esta prática é geralmente denominada de "rastreamento de potência máxima"). Se a energia eólica disponível atingir ou ultrapassar a potência eólica nominal da turbina eólica, a velocidade de rotação do rotor e a potência elétrica operacional são limitadas a seus valores nominais, por exemplo, controlando os ângulos de ataque das lâminas com a utilização de um sistema de controle de passo das lâminas. A turbina eólica encontra-se desta maneira protegida contra sobrecargas, enquanto a energia elétrica gerada é mantida constante em seu valor nominal ($P_{nom} = P_e$). Consequentemente, apenas neste modo denominado de carga plena, a energia eólica disponível não é explorada da melhor forma possível, porém a potência elétrica de saída é limitada girando-se as lâminas para fora da direção do vento, até certo ponto.

[019] Os "documentos Rostock", no entanto, propõem a operação de uma turbina eólica que se desvia deste princípio. Com o propósito de manter uma reserva de potência disponível para o controle da energia primária, uma turbina eólica deve ser geralmente operada de uma maneira não otimizada. Isto pode ser realizado com a ativação do rotor em uma velocidade de rotação mais alta ou mais baixa, ou girando as lâminas em um ângulo de passo subotimizado (cf. "Netzregelverhalten von Windkraftanlagen", p. 6). Uma operação tão sistemática

utilizando a curva característica e otimizada de trabalho provoca, no entanto, um desperdício significativo da energia eólica disponível. De um ponto de vista puramente econômico isto é problemático porque – ao contrário das usinas de energia baseadas em fontes de energia controláveis, tais como plantas de água ou gás, onde a quantidade não gasta – e, portanto, economizada – do transportador da energia pode ser convertida posteriormente em energia elétrica – a energia eólica não explorada é simplesmente perdida. Portanto, a abordagem sugerida pelos "documentos Rostock" não é seguida aqui, no entanto a turbina eólica de acordo com a presente invenção opera em sua curva característica normal de torque-velocidade, pelo menos enquanto a mesma trabalha no modo de carga parcial.

[020] Conforme descrito por ULLAH e no documento WO 2005/025026 A1, é possível fornecer potência adicional de saída – mesmo que a turbina eólica seja operada em seu ponto otimizado de trabalho – com a extração da energia cinética do rotor. De acordo com ULLAH é possível, por exemplo, fornecer um nível adicional de energia elétrica – que é adequado para contribuir para a manutenção da frequência da rede elétrica – por aproximadamente 10 segundos (contrastando com o controle clássico da energia primária, no qual a energia elétrica adicional é gerada a partir da energia de reserva disponível e que pode, portanto, ser geralmente mantida por um longo período). Este aumento transitório e ocasional de potência também é denominado de "resposta inercial da rede elétrica". A extração da energia cinética leva a uma desaceleração do rotor e, portanto, geralmente provoca um desvio do ponto de operação ideal durante o tempo de contribuição para a estabilidade da frequência (ULLAH, p. 608, r. col.). Após o período de produção da energia elétrica adicional (que é doravante denominado "período de sobreprodução") a energia elétrica de saída diminui rapidamente e pode inclusive ser consumida da rede elétrica para que o rotor possa ser novamente acelerado (p. 609, l. col.). No entanto, esta rápida diminuição da energia provoca uma segunda queda na frequência da rede elétrica (cf. Figura 17 (a), 18 e 19) de tal maneira que – após a resposta inercial inicial de curto prazo – a estabilização subsequente da frequência não é realizada.

[021] A presente invenção se concentra no controle de turbinas eólicas, na fase depois que o período de sobreprodução foi encerrado e até que o rotor tenha sido reacelerado para a sua velocidade normal de rotação (este período é doravante denominado "período de recuperação"). A presente invenção revela uma turbina eólica projetada para contribuir para o controle da energia primária, de uma maneira que a estabilidade da rede elétrica também seja suportada durante o período de recuperação.

[022] O documento WO 2005/025026 A1 segue a mesma abordagem descrita por ULLAH e menciona, adicionalmente, a utilização da energia cinética do rotor para o amortecimento de oscilações periódicas na frequência da rede elétrica (as assim denominadas "Oscilações Inter Área", WO 2005/025026 A1, p. 14). Em um dado exemplo, a frequência da rede oscila com uma frequência característica de 0,22 Hz (igual à duração de um ciclo de 4,5 s), o que significa que para o amortecimento desta oscilação a turbina eólica injeta energia adicional por 2,25 s e reduz a saída da energia por outros 2,25 s de uma maneira alternativa (p. 14 e Figura 3). Neste cenário, a redução significativa da potência elétrica de saída seguindo o aumento além da potência operacional normal é intencional (por que a frequência da rede elétrica está acima do valor nominal para a metade específica do ciclo), de tal maneira que não exista a necessidade de neutralizar um vale de frequência em curso.

[023] Contrastando com este método, a presente invenção foi concebida para neutralizar perturbações não periódicas na rede elétrica. Especificamente, se a frequência da rede diminuir por períodos mais longos em função do aumento do consumo de energia de longo prazo da rede elétrica ou em função de um desligamento/falha de outra planta geradora, a turbina eólica operando de acordo com a presente invenção é capaz de fornecer a energia elétrica adicional de uma maneira transitória e ainda assim contribuir para a estabilidade da rede elétrica depois que a geração da energia elétrica adicional foi encerrada.

[024] Especificamente, a turbina eólica de acordo com a presente invenção foi concebida para executar um modo de controle auxiliar de duas fases, a primeira fase sendo um período de sobreprodução no qual a energia elétrica fornecida pela turbina eólica à rede elétrica é aumentada além da potência elétrica normal de operação, e a segunda fase sendo um período de recuperação no qual a turbina eólica contribui adicionalmente para a estabilidade da rede elétrica. Esta contribuição adicional é obtida através do fornecimento de uma quantidade de energia elétrica que é igual ou superior a um limiar inferior predeterminado. Desta maneira, uma (segunda) diminuição significativa da frequência de rede, como ocorre em ULLAH, pode ser realizada.

[025] A turbina eólica de acordo com a presente invenção compreende um controlador, que é responsável por controlar a entrada da turbina eólica no modo de controle de duas fases. Para este propósito, o controlador monitora (continuamente ou periodicamente) os eventos que sinalizam que o fornecimento da energia elétrica para a rede elétrica deve ser aumentado além do normal, ou seja, além da potência elétrica operacional presente P_e . Um evento sinalizador deste tipo pode ser, por exemplo, um sinal de controle gerado por uma entidade externa à turbina eólica, tal como um operador de rede elétrica ou um controlador de um parque eólico. Alternativamente, o evento sinalizador pode consistir de um alarme acionado pela medição dos parâmetros operacionais internos de uma turbina eólica, tais como mudanças na frequência da rede elétrica ou alterações no ângulo da voltagem e, especificamente, pela determinação de um desvio de um parâmetro operacional de seu valor normal por uma extensão predefinida. O evento sinalizador pode incluir não somente a indicação de que um aumento da potência elétrica de saída é necessário, mas também informações adicionais sobre a natureza do necessário aumento de potência. Por exemplo, o evento sinalizador pode conter informações sobre a magnitude do aumento de potência (como um valor relativo ou absoluto), a magnitude da respectiva queda de frequência, a duração desejada ou a variação do aumento da potência elétrica ou outros dados adicionais de gerenciamento ou

metadados. O controlador pode ser arranjado para avaliar e processar estas informações e iniciar as atividades correspondentes de controle.

[026] Especificamente, após a detecção de um evento sinalizador, o controlador inicia a atividade de suporte à estabilidade da rede elétrica, iniciando com um período de sobreprodução. Durante este tempo, a estabilidade da rede é suportada pelo fornecimento de potência elétrica sobreproduzida (ΔP_{op}) no topo da potência elétrica normal de operação que estava sendo produzida no momento do início do período de sobreprodução (P_{e0}). Consequentemente, a potência elétrica de saída durante o período de sobreprodução P_e pode ser especificada por $P_e = P_{e0} + \Delta P_{op}$ (assumindo que as condições do vento não mudem durante o período de sobreprodução, e, consequentemente, o ponto hipotético de trabalho em que a turbina eólica teria sido operada se não tivesse entrado no período de sobreprodução foi mantido, ou seja, $P_e = P_{e0}$ durante este intervalo de tempo). A energia adicional ΔP_{op} sobreproduzida pode ter um valor predeterminado e fixo (o mesmo valor para qualquer período de sobreprodução e mantido inalterado durante um período completo de sobreprodução), ou um valor variável caso a caso, mas ainda constante ao longo de cada período de sobreprodução, ou o valor pode ser variado durante um ciclo de sobreprodução, por exemplo, em resposta a eventos adicionais monitorados pelo controlador ou em resposta a outros dados de gerenciamento (que poderiam ter sido, por exemplo, fornecidos em conjunto com o evento sinalizador), de tal maneira que a modulação da potência elétrica de saída da turbina eólica seja capaz de contribuir para a estabilidade da rede elétrica, dependendo da natureza e das características da instabilidade da rede elétrica.

[027] A energia sobreproduzida ΔP_{op} não é gerada, pelo menos quando a turbina eólica opera em modo de carga parcial, pela mudança da operação da turbina eólica para um ponto de trabalho mais favorável, mas sim, extraída da energia cinética armazenada nas massas rotativas da turbina eólica, ou seja, em seu rotor. Correspondentemente, a diminuição da velocidade de

rotação do rotor durante o período de sobreprodução é dependente da quantidade de energia extraída.

[028] As considerações aqui abordadas são baseadas no pressuposto de que a energia eólica disponível (P_w) permanece constante durante o modo de controle auxiliar de duas fases. Partindo deste pressuposto, a diminuição da velocidade de rotação do rotor durante a sobreprodução faz com que a turbina eólica se desvie do ponto otimizado de trabalho, aceitando uma perda (relativamente pequena) de eficiência (o que significa, de fato, que a operação da turbina eólica é justamente o contrário do que consta nos "documentos Rostock": operação normal em um ponto de trabalho com a máxima eficiência, um desvio (negativo) do ponto normal de trabalho somente ocorre durante a execução do suporte à estabilidade da rede elétrica durante o modo de controle auxiliar de duas fases). Se a turbina eólica for equipada com um sistema de controle de passo nas lâminas, o declínio da eficiência pode ser parcialmente compensado pelo ajuste do ângulo de passo das lâminas do rotor, enquanto muda a velocidade de rotação do rotor.

[029] A velocidade de rotação do rotor, no entanto, não deve diminuir abaixo de um determinado valor mínimo. Este limiar pode estar relacionado a parâmetros de construção da turbina eólica, por exemplo, à faixa de operação do gerador ou conversor da turbina eólica, ou a considerações relativas à eficiência, particularmente com relação ao mínimo de energia elétrica que deve ser fornecido para a rede elétrica durante a operação subsequente. Finalmente, quando a velocidade de rotação do rotor atingir este valor mínimo, o controlador encerra o período de sobreprodução e inicia o período de recuperação.

[030] O período de recuperação é caracterizado por duas tarefas que são, basicamente, contrárias uma em relação à outra. Por um lado, a rede elétrica pode ainda não estar estável (ou seja, existe um consumo da rede elétrica maior do que a energia fornecida a ela) fazendo com que a necessidade de uma determinada potência elétrica de saída continue presente. Por outro lado,

em função da velocidade de rotação diminuída do rotor, a turbina eólica opera em um ponto subotimizado de trabalho e não pode, portanto, gerar tanta energia elétrica como antes do período de sobreprodução. Consequentemente, existe um conflito entre a estabilidade de médio prazo da rede elétrica e a reaceleração do rotor para uma produção eficiente de energia em longo prazo.

[031] De acordo com a presente invenção, nesta segunda fase do modo de controle auxiliar, a turbina eólica fornece pelo menos um mínimo predeterminado de energia elétrica (P_{emin}) à rede elétrica. Isto significa que a potência elétrica de saída P_e não cai abaixo deste limiar predeterminado P_{emin} ao longo da duração total do período de recuperação (logo, a qualquer momento durante o período de recuperação, a potência elétrica de saída é igual ou superior ao valor mínimo predeterminado). Deste modo, a turbina eólica continua a contribuir para a estabilidade da rede elétrica. Ao mesmo tempo, o rotor é reacelerado novamente com a utilização da energia mecânica remanescente no rotor (P_{acc}). Isso significa, de modo geral, que nem toda a energia mecânica do rotor (P_m) é convertida em energia elétrica (P_e), durante o período de recuperação. Dependendo da divisão da energia mecânica disponível no rotor (P_m), na parte utilizada para a geração da energia elétrica de saída (P_e) e na parte utilizada para a reaceleração do rotor (P_{acc}), a reaceleração pode levar uma quantidade significativa de tempo. Por exemplo, é possível – por um determinado período de tempo – que toda a energia mecânica disponível no rotor (P_m) seja convertida em potência elétrica (P_e) e o rotor não seja acelerado, de tal maneira que o período de recuperação possa ser adicionalmente prolongado.

[032] Os períodos de sobreprodução e de recuperação constituem um modo de controle não periódico. Como o foco aqui é a estabilidade da rede elétrica (ao contrário de uma rápida reaceleração do rotor), o período de recuperação é geralmente mais longo do que o período de sobreprodução. Além disso, após o término do período de recuperação, geralmente acontece uma fase de controle normal de uma turbina eólica e uma operação por um tempo indefinido. Somente quando o controlador detecta outro evento sinalizador (que

pode, do ponto de vista da turbina eólica, ocorrer em qualquer ponto arbitrário no tempo), o controlador inicia outra fase de sobreprodução. Consequentemente, não existem processos contínuos, tais como períodos alternados de sobreprodução e recuperação, ou a reentrada em uma fase de sobreprodução após um intervalo predeterminado seguindo o período prévio de recuperação.

[033] O valor mínimo da potência elétrica de saída (P_{emin}) durante o período de recuperação poderia ser teoricamente determinado como um valor absoluto de potência. No entanto, como as turbinas eólicas operam sob condições variáveis de vento e, como a turbina eólica de acordo com a invenção também realiza a atividade de suporte à estabilidade da rede elétrica em condições variáveis de vento, este fato pode não ser útil na prática. Por esta razão, em algumas configurações opcionais e adicionais da invenção, o valor de P_{emin} é definido como sendo uma porcentagem fixa da energia elétrica operacional que estava sendo fornecida à rede elétrica no momento em que a turbina eólica entrou no período de sobreprodução (P_{e0}). Em outras variantes, outros valores de referência são escolhidos, por exemplo, um valor médio da potência de operação dentro de uma janela determinada de tempo antes do início do período de sobreprodução, a potência nominal operacional da turbina eólica (P_{nom}) ou a potência elétrica normal correspondendo com a energia eólica correntemente disponível (no período de recuperação).

[034] Em algumas opções adicionais de configuração, a potência elétrica mínima de saída (P_{emin}) durante o período de recuperação atinge 80% da potência elétrica operacional que foi fornecida à rede elétrica antes do período de sobreprodução (P_{e0}). Em outras modalidades preferidas de execução, o limiar é definido em 85% ou 90% do P_{e0} . É possível escolher um valor ainda maior, por exemplo, de 95% do P_{e0} . A rede elétrica é então suportada em um nível mais elevado durante o período de recuperação. No entanto, a energia restante disponível para a reaceleração do rotor é então proporcionalmente menor, de tal maneira que a recuperação acaba sendo prolongada e a turbina eólica opera em um ponto subotimizado de trabalho por um período mais longo de

tempo.

[035] Em algumas configurações adicionais, o controlador é programado não apenas para garantir que a potência elétrica de saída não caia abaixo do valor mínimo predeterminado durante o período de recuperação, mas também para controlar a energia utilizada na reaceleração do rotor (P_{acc}). Como resultado, o controlador pode assegurar que a aceleração do rotor não caia abaixo de um determinado valor mínimo. Além disso, com isto é possível estimar (continuamente ou periodicamente) a duração restante do período de recuperação.

[036] Para ser capaz de controlar a energia de aceleração do rotor (P_{acc}), a turbina eólica compreende um equipamento sensor para medir a velocidade de rotação do rotor e a velocidade do vento, o momento nas bases das lâminas e/ou o torque no eixo do rotor em algumas configurações opcionais da presente invenção. A aceleração do rotor pode então ser controlada (continuamente ou periodicamente) pelo controlador através da medição destes parâmetros e através do cálculo da energia mecânica disponível no rotor (P_m) a partir de pelo menos estes parâmetros medidos. Portanto, o controlador sempre "sabe" a potência mecânica disponível e é capaz de segmentá-la em duas partes durante o período de recuperação, ou seja, na primeira parte que é utilizada para conversão em energia elétrica de saída e que assegura que a potência de saída não caia abaixo do limiar inferior programado, e na segunda parte que é utilizada para a reaceleração do rotor à sua velocidade de rotação nominal. Como resultado, prognósticos mais específicos sobre a duração remanescente do período de recuperação são possíveis de serem realizados.

[037] O período de sobreprodução não necessita se estender até que a velocidade de rotação mínima predeterminada do rotor (ω_{min}) tenha sido de fato alcançada. Por exemplo, quando a rede elétrica recupera rapidamente a sua estabilidade, o período de recuperação pode ser iniciado mais cedo, pois não existe mais a necessidade da injeção de energia elétrica adicional

na rede elétrica. Além disso, pode haver um limite de tempo predeterminado para a duração do período de sobreprodução, para proteger a turbina eólica de uma produção de energia elétrica muito prolongada (por exemplo, para evitar o superaquecimento dos componentes de conversão de energia). Consequentemente, quando este limite de tempo para a produção da energia elétrica adicional for atingido, o período de recuperação também pode ser iniciado antes que a velocidade mínima de rotação do rotor ($\omega_{\min}$) seja alcançada. Outra condição (adicional) para a entrada no período de recuperação poderia ser um limite superior da quantidade de energia adicional fornecida à rede elétrica durante o período de sobreprodução. Finalmente, a turbina eólica pode ser programada para abortar a produção da energia elétrica adicional e entrar no período de recuperação, em resposta a sinais de controle ou a eventos externos, por exemplo, determinações recebidas do operador da rede elétrica ou de uma entidade de controle superordenada.

[038] Além disso, em algumas variantes, um período de tempo é definido no qual a velocidade de rotação do rotor recupera a sua velocidade nominal (e que marca o fim do período de recuperação). O controlador pode então variar ambos, tanto a aceleração do rotor como a potência elétrica de saída (P_{acc} e P_e), de tal maneira que a potência elétrica de saída não só possa ser modulada durante o período de sobreprodução (como mencionado acima) mas também durante o período de recuperação, para permitir que a turbina eólica contribua para a estabilidade da rede elétrica em alinhamento com as características da instabilidade (por exemplo, em resposta aos sinais de controle fornecidos pelas medições na rede elétrica ou pelo operador da rede elétrica), desde que ambos os prerequisites (o valor mínimo da potência elétrica P_{emin} e o tempo limite para atingir a velocidade normal de rotação do rotor) sejam atendidos. A velocidade de rotação do rotor e a velocidade do vento acima mencionada, as medições de momento e torque e os cálculos da potência mecânica do rotor podem ser utilizados para assegurar que essas restrições sejam atendidas.

[039] Em algumas opções adicionais de configuração, o mencionado controlador é arranjado para controlar a velocidade de rotação do rotor e/ou a potência elétrica de saída de acordo com uma função (matemática) predeterminada ou um algoritmo de controle adequado para a estabilidade da rede. Preferencialmente, ambos os parâmetros são aumentados de acordo com um gradiente predeterminado. O mencionado gradiente não necessita ser constante ou uniforme durante o período total de recuperação. É possível, por exemplo, que durante uma primeira seção do período de recuperação, a potência elétrica de saída (P_e) não é aumentada de todo (mas ela é, por exemplo, igual ao valor mínimo predeterminado) e apenas a potência de aceleração (P_{acc}) é aumentada. A potência adicional que é obtida como resultado do aumento da eficiência durante o aumento da velocidade de rotação do rotor é, neste exemplo, completamente investida na aceleração do rotor, de tal maneira que (assumindo que a velocidade do vento é constante) a aceleração do rotor aumenta mais e mais. Somente em uma segunda seção do período de recuperação, o valor de P_e é aumentado de tal maneira que a aceleração do rotor não possa aumentar ainda mais (e possa mesmo diminuir novamente). Desta maneira, o período de recuperação pode ser mantido relativamente curto. Também é possível que ambos os parâmetros sejam controlados e aumentados de maneira não linear, por exemplo, dependendo da curva de eficiência da turbina eólica. Além disso, o controlador pode ser programado para controlar a potência elétrica de saída, para proporcionar uma transição suave entre o período de sobreprodução e o período de recuperação. Isto significa que no término do período de sobreprodução, a potência elétrica de saída não é reduzida abruptamente, mas a redução leva um determinado período de tempo. Com uma transição "suave" deste tipo, impactos negativos sobre a rede elétrica e/ou a turbina eólica podem ser evitados.

[040] Geralmente, o período de recuperação tem uma duração maior do que o período de sobreprodução. No período de sobreprodução, a potência elétrica de saída é aumentada, por exemplo, em resposta a informações contidas no evento sinalizador, tais como a magnitude de

uma queda de frequência, o gradiente de frequência ou o ângulo da voltagem terminal, ou ainda em resposta aos sinais de controle recebidos pelo controlador durante o período de sobreprodução em curso. A mais longa duração possível do período de sobreprodução depende geralmente da energia cinética armazenada no rotor e da velocidade de rotação mínima do rotor. Uma duração viável poderia ser, por exemplo, de 10 segundos. Com o propósito de continuar a contribuir para a estabilidade da rede elétrica durante o período de recuperação, geralmente não é praticável reacelerar o rotor à sua velocidade de rotação normal dentro do mesmo período (relativamente curto) de tempo. Por outro lado, o período de recuperação também não deve ser muito prolongado, pois a turbina eólica opera com uma eficiência subotimizada durante este período de tempo. Consequentemente, em algumas opções adicionais de configuração, o período de recuperação é preferencialmente cinco vezes mais longo do que o período de sobreprodução. Em outras variantes, o fator é de apenas três, e ainda em outras configurações, o período de recuperação tem o dobro do tempo do período de sobreprodução.

[041] Em algumas configurações opcionais adicionais, a turbina eólica compreende um sistema de controle de passo. O controlador é então programado para ajustar o ângulo de passo das lâminas do rotor durante todo o modo auxiliar de suporte à estabilidade da rede elétrica, para compensar a redução da eficiência na geração da potência elétrica de saída causada pelo desvio do ponto normal de operação. Especificamente, as lâminas do rotor podem ser ajustadas durante o período de sobreprodução, de tal maneira que o ângulo subotimizado de ataque do vento (que é causado pela desaceleração do rotor) seja compensado. Como um efeito, a desaceleração do rotor pode ser reduzida até certo ponto. Correspondentemente, durante o período de recuperação, os mencionados ângulos de passo podem ser ajustados enquanto o rotor reacelera, de tal maneira que, novamente, o ângulo de ataque do vento seja ajustado para a velocidade de rotação aumentada do rotor. Obviamente, o sistema de controle de passo também pode responder a outros fatores de mudança não relacionados ao

modo específico de suporte à estabilidade da rede elétrica, tais como mudanças na velocidade e/ou na direção do vento.

[042] Ao contrário do modo de operação com carga parcial, no qual a turbina eólica geralmente opera em um ponto otimizado de trabalho, no modo de carga plena (ou seja, quando a potência eólica disponível P_w se correlaciona com uma potência elétrica operacional P_e acima da potência nominal operacional P_{nom} da turbina eólica) o controlador da turbina eólica limita a potência de operação da turbina. Isto é realizado, por exemplo, girando-se as lâminas do rotor na direção do vento, ou seja, na direção da posição embandeirada para que as lâminas estejam pelo menos parcialmente em uma posição embandeirada (A "posição embandeirada" é a posição da lâmina na qual o ângulo de ataque do vento é igual a zero. Uma "posição embandeirada parcial" significa que as lâminas se encontram em uma posição entre o ângulo ideal de ataque do vento e a posição embandeirada, o que faz com que o ângulo de ataque do vento seja menor do que o normal. O termo "embandeiramento" designa o grau em que as lâminas são giradas da direção da posição embandeirada). Isto significa que o ângulo de ataque do vento e, como consequência, as forças de elevação são reduzidas (em comparação com o posicionamento da lâmina no modo de carga parcial), o que resulta na limitação desejada da potência elétrica de saída. Em algumas configurações adicionais da presente invenção, quando a turbina eólica está operando no modo de carga plena, o sistema de mudança de passo é utilizado durante o período de sobreprodução para reduzir a quantidade de embandeiramento das lâminas (isto é, para reaumentar o ângulo de ataque do vento). Com esta medida adicional, as forças de elevação nas lâminas são aumentadas para que a potência eólica adicional disponível seja utilizada para o modo de controle auxiliar. Este suporte adicional poderá ser utilizado, por exemplo, para aumentar a potência de sobreprodução (ΔP_{op}) e/ou para diminuir a desaceleração do rotor e com isto prolongar o período de sobreprodução. Correspondentemente, durante o período de recuperação, a mesma condição pode ser aplicada para aumentar a potência elétrica de saída e/ou para aumentar

a reaceleração do rotor, ou seja, para aumentar a potência de aceleração (P_{acc}) e encurtar o período de recuperação.

[043] Para a conexão da turbina eólica de velocidade variável a uma rede elétrica, as frequências do subsistema elétrico da turbina eólica e da rede elétrica são desacopladas. De modo geral existem duas maneiras de atingir este objetivo. Em primeiro lugar, o gerador da turbina eólica pode ser completamente desacoplado da rede elétrica através da utilização de um conversor de frequências de larga escala. O mencionado gerador então produz uma voltagem de CA de frequência variável, que é retificada por um retificador, e a voltagem de CC resultante é então convertida em CA com a frequência geralmente constante da rede elétrica (de 50 Hz na Europa). A segunda alternativa consiste de um Gerador de Indução de Dupla Alimentação (DFIG). Nesta modalidade de execução, o enrolamento do estator do gerador (assíncrono) é conectado diretamente à rede, ou seja, um conversor não é utilizado nesta conexão. O campo de excitação produzido pelo rotor do gerador gira em relação ao rotor do gerador com velocidade de rotação variável. A velocidade de rotação (variável) do rotor é compensada ajustando-se correspondentemente a velocidade de rotação do campo de excitação em relação ao rotor. Como resultado, a soma das duas velocidades, ou seja, a velocidade de rotação do campo de excitação em relação ao estator é sempre um valor constante adaptado à frequência fixa da rede elétrica. Um conversor é aqui apenas necessário para produzir as correntes de excitação de campo (= as correntes do rotor) com frequências variáveis.

[044] Correspondentemente, em algumas configurações adicionais da presente invenção, o gerador elétrico da turbina eólica consiste de um gerador que possui um conversor de larga escala. Nesta solução, um gerador síncrono é frequentemente utilizado. Em função do desacoplamento total proporcionado pelo mencionado conversor de larga escala, a velocidade mínima de rotação do rotor da turbina eólica (ω_{min}) na qual o controlador inicia o período de recuperação não é limitada pela conexão da turbina eólica à rede elétrica. Ao

invés disso, a limitação é (apenas) estabelecida pela potência mínima de saída elétrica que a turbina eólica (pelo menos) mantém durante o período de recuperação e pela potência mecânica adicional (P_{acc}) que é necessária para a reaceleração do rotor.

[045] Em outras configurações da turbina eólica, um DFIG é utilizado. Neste caso, a faixa de operação do conversor pode ser limitada pela velocidade de rotação do gerador, de tal maneira que a velocidade de rotação do rotor do gerador (e, portanto, a velocidade de rotação do rotor da turbina eólica) não possa ser reduzida indefinidamente enquanto se espera que a turbina eólica gere uma determinada quantidade de energia elétrica. Consequentemente, nestas configurações, este limiar inferior da faixa de velocidade, dependente da construção do DFIG, pode ser aplicado como um limiar adicional para o valor mínimo da velocidade de rotação do rotor (ω_{min}) no qual o período de recuperação é iniciado (adicionalmente ao critério da potência mecânica (P_m) que é necessária para fornecer tanto a potência elétrica mínima de saída que a turbina eólica mantém durante o período de recuperação, como a reaceleração desejada do rotor. O critério no qual a operação da turbina eólica chega primeiramente durante o período de sobreprodução (ou seja, o maior dos dois valores) define em última instância a potência elétrica adicional de saída.

[046] As considerações acima mencionadas foram baseadas de modo geral no pressuposto da existência de uma energia eólica constante durante os períodos de sobreprodução e recuperação. Mudanças na velocidade do vento trarão impactos adicionais na operação da turbina eólica durante o modo de suporte auxiliar à estabilidade da rede elétrica, de acordo com a presente invenção. Por exemplo, uma diminuição na velocidade do vento durante a fase de sobreprodução pode provocar uma chegada antecipada à velocidade mínima predeterminada de rotação do rotor, de tal maneira que uma produção elétrica menor será fornecida à rede elétrica (em comparação com o modo de operação com uma velocidade constante do vento), enquanto que um aumento na velocidade do vento pode ter o efeito contrário. O valor da velocidade mínima de

rotação do rotor ($\omega_{\min}$) também pode ser determinado na dependência da velocidade do vento, por exemplo, dependendo da velocidade média do vento durante o período de sobreprodução ou de outra janela determinada de tempo. Além disso, uma diminuição da potência eólica durante o período de recuperação pode levar a um atraso na reaceleração do rotor, enquanto que um aumento permite que a turbina eólica volte a acelerar o rotor mais rapidamente em comparação com a operação padrão no período de recuperação. As variações na velocidade do vento também podem trazer impactos sobre a modulação desejada da saída elétrica durante a sobreprodução e o período de recuperação.

[047] A presente invenção permite que turbinas eólicas contribuam mais eficientemente para a estabilidade de redes elétricas. Especificamente, como as turbinas eólicas podem reagir relativamente rápido a quedas na frequência da rede elétrica (em comparação, por exemplo, com o controle da energia primária de plantas hídricas, a gás ou vapor), elas podem ser utilizadas para preencher a lacuna até que as plantas geradoras mais lentas entrem em cena.

[048] Finalmente, a presente invenção permite que operadores de redes elétricas calculem ou estimem o suporte à estabilidade da rede elétrica que pode ser esperado de turbinas eólicas, para diferentes condições de redes elétricas e de velocidades do vento.

Descrição Detalhada das Modalidades Preferidas de Execução

[049] A Figura 1 ilustra esquematicamente a montagem de uma turbina eólica de velocidade variável. A turbina eólica compreende um rotor 2 que aciona um gerador elétrico 9 através de uma caixa de engrenagens de velocidade variável (caixa de velocidades) 7. O gerador 9 produz a energia elétrica que é fornecida a uma rede elétrica 17 (não mostrada na Figura 1) através de uma linha elétrica 16. Um controlador 10 é responsável pelo controle dos subsistemas da turbina eólica 1 que dependem de condições ambientais, tais como da velocidade e direção do vento e da demanda de energia elétrica.

[050] O rotor 2 compreende um cubo de rotor 4 e as lâminas 3. Em algumas modalidades de execução, a turbina eólica 1 possui um sistema de controle de passo 6, com o qual as lâminas 3 podem ser giradas em torno de seu eixo longitudinal. Desta maneira é possível, por exemplo, diminuir o efeito da força do vento sobre as lâminas 3 (torque) girando-as na direção do vento. A velocidade de rotação do rotor ω é ajustada dependendo da velocidade predominante do vento (isto é, a turbina eólica é uma turbina eólica de velocidade variável, geralmente abreviado de: VSWT). As velocidades de rotação do rotor se situam, por exemplo, na faixa entre 10 e 20 rotações por minuto. Conectado ao rotor 2 se encontra uma caixa de engrenagens 7, que tem o propósito de converter a velocidade de rotação ω relativamente lenta do rotor em uma velocidade de rotação maior do rotor do gerador 9 (em outras modalidades de execução, a turbina eólica 1 não possui uma caixa de engrenagens, mas evidentemente ela também é projetada para realizar a atividade de suporte à estabilidade da rede elétrica). O freio 8 possibilita que a velocidade de rotação do rotor seja diminuída, por exemplo, para desligar a turbina eólica 1. Os subsistemas internos mecânicos, elétricos e de controle encontram-se alojados no interior de uma nacele 5, que é montada em uma torre 15.

[051] Ainda outro componente da turbina eólica 1 consiste, em algumas modalidades de execução, do equipamento sensor e de medição 11. Por exemplo, um anemômetro 12 serve para determinar a velocidade corrente do vento, enquanto que um sensor de direção 13 fornece medições sobre a direção do vento. Além disso, um dispositivo de medição de 36 pode ser fornecido para medir o momento de força na base das lâminas 3 do rotor, e um dispositivo de medição 37 pode ser fornecido para medir a velocidade de rotação do eixo do rotor e/ou o torque. Finalmente, em algumas modalidades de execução, um acionador de mudança de direção 14 permite que a nacele 5 com o rotor 2 seja ajustada em torno do eixo vertical (da torre) de acordo com a direção predominante do vento.

[052] O controlador 10 consiste, por exemplo, de um

microprocessador com memória associada que executa um *software* de controle. Em algumas modalidades de execução, o mesmo é organizado como um único componente, enquanto que em outras modalidades de execução o mesmo é composto de subsistemas distribuídos, por exemplo, na forma de vários microprocessadores conectados uns aos outros. O mencionado microprocessador é acoplado através de um barramento aos subsistemas da turbina eólica, particularmente ao gerador 9, ao rotor 2, ao sistema de controle de passo 6, ao equipamento sensor 11, ou seja, ao anemômetro 12, ao sensor de direção 13, aos dispositivos de medição 36 e 37 e ao acionador de mudança de direção 14. Além disso, o microprocessador é conectado ao sistema de gerenciamento 18 (não mostrado na Figura 1).

[053] A Figura 2 mostra de modo exemplificativo o fluxo de controle da turbina eólica 1 com mais detalhes. O mencionado controlador 10 recebe os resultados das medições fornecidas pelo equipamento sensor 11 (anemômetro 12, sensor de direção 13 e os dispositivos de medição de 36 e 37), e parâmetros operacionais da rede elétrica 17 e do gerador 9. O mencionado controlador processa estes dados de entrada e gera sinais de controle que são transmitidos aos atuadores dos vários subsistemas da turbina eólica 1. Os mencionados atuadores executam os comandos de controle recebidos do controlador 10 e efetuam uma mudança no estado do subsistema respectivo. Por exemplo, o controlador de 10 manipula a velocidade ω de rotação do rotor, através da alteração da frequência do gerador ou através da variação da relação de transmissão (o controle de fluxo da manipulação não é mostrado na Figura 2).

[054] Além disso, o controlador 10 também recebe comandos do sistema de gerenciamento 18, que pode estar localizado no lado interno ou externo da turbina eólica 1. Um equipamento de monitoramento remoto da operação 19, tal como um sistema de Supervisão de Controle e Aquisição de Dados (SCADA) é providenciado para supervisionar o funcionamento da turbina eólica 1. Para este propósito, o mencionado sistema solicita dados sobre o estado da turbina eólica 1 ao sistema de gerenciamento 18, e realiza a parametrização

remota (isto é, os comandos relativos a definições de parâmetros são transmitidos ao sistema de gerenciamento 18).

[055] Duas tarefas executadas pelo controlador 10 são de especial interesse em relação às várias modalidades de execução: Em primeiro lugar, o mencionado controlador é arranjado para monitorar eventos indicando a necessidade de aumentar a potência elétrica de saída além da potência normal de operação. Um evento sinalizador deste tipo pode, por exemplo, ser recebido pelo equipamento de monitoramento remoto da operação 19 (através do sistema de gerenciamento 18) ou, alternativamente, ser gerado pelo próprio controlador 10, tanto em resposta a medições de parâmetros da rede elétrica tais como a frequência da rede elétrica (por exemplo, fornecida por um analisador de frequência de rede, não mostrado na Figura 2), como a mudanças no ângulo da voltagem. Em segundo lugar, o mencionado controlador 10 é arranjado para iniciar o modo de controle auxiliar de duas fases de acordo com a presente invenção.

[056] A turbina eólica 1 gera energia elétrica quando a velocidade do vento se situa dentro da faixa operacional da turbina. Sua curva de produção (estática), que é exemplificativamente ilustrada na Figura 3 (através de uma linha preta espessa) como uma função da velocidade ω de rotação rotor e da potência elétrica P_e (e considerando diferentes velocidades de vento), não é linear. Abaixo do limiar inferior de velocidade ω_{thresh} de rotação do rotor, nenhuma energia elétrica é produzida. Começando com o limiar inferior de velocidade ω_{thresh} de rotação do rotor, a P_e aumenta verticalmente com ventos de baixa velocidade. Com velocidades crescentes do vento, a velocidade ω de rotação do rotor aumenta de acordo com as curvas de eficiência para as diferentes velocidades do vento, até que a velocidade nominal ω_{nom} de rotação do rotor seja alcançada. Embora o rotor 2 não seja adicionalmente acelerado, a P_e ainda pode ser aumentada (novamente com a velocidade do vento aumentando ainda mais), até que a potência elétrica nominal de saída da turbina eólica tenha sido alcançada ($P_{\text{nom}} = 1,0$ pu (isto é, unidade de potência) na Figura 3). Como pode

ser observado na Figura 3, a linha de produção característica se desvia da curva ideal teoricamente possível (a linha preta fina) até certo ponto. No entanto, como esta curva teórica não é viável na prática, a operação de turbinas eólicas na linha (espessa) de produção é considerada a ideal. No entanto, dependendo do tipo do gerador da turbina eólica 1, a sua faixa de operação é dinâmica até certo ponto (o que é marcado através da área listrada na Figura 3), ou seja, a potência atual de saída P_e e a velocidade ω de rotação do rotor podem se desviar até certo ponto da linha (ideal) de produção estática.

[057] Três modalidades de execução que ilustram diferentes operações da turbina eólica durante a fase de recuperação serão agora descritas. De acordo com a primeira modalidade de execução (Figuras 4 e 5), o rotor é reacelerado com a utilização de uma quantidade fixa da energia mecânica P_m disponível no rotor, o que resulta em um aumento da potência elétrica de saída P_e a partir do início do período de recuperação. A segunda modalidade de execução (Figuras 6 e 7) segue uma abordagem diferente. Aqui, a P_e é primeiramente mantida no nível mínimo que é necessário durante o período de recuperação (P_{emin}). Como consequência, a potência disponível para a reaceleração do rotor aumenta com o aumento da eficiência, resultando em um período de recuperação mais curto em comparação com a primeira modalidade de execução. A terceira modalidade de execução (Figura 8 em combinação com a Figura 4) consiste de uma modificação específica da primeira modalidade de execução. Na primeira fase do período de recuperação, toda a energia mecânica P_m disponível no rotor é utilizada para a geração da P_e de tal maneira que, nesta fase, o rotor não é acelerado. Somente na segunda fase a P_e é ligeiramente diminuída, e o rotor é reacelerado com a utilização da parte agora disponível da P_m , de acordo com o esquema apresentado na primeira modalidade de execução. Em todas as modalidades de execução apresentadas assume-se uma velocidade constante do vento durante os períodos de sobreprodução e recuperação.

[058] Os valores da P_e , P_m e ω durante os períodos de sobreprodução e recuperação da primeira modalidade de execução podem ser

visualizados na Figura 4 (P_e é a linha sólida, P_{e0} a linha traço-ponto, P_m a curva pontilhada e P_{emin} a linha traço-ponto-ponto). Durante a operação normal, a turbina eólica opera no ponto de trabalho com eficiência otimizada, ou seja, a potência operacional P_e e a velocidade ω de rotação do rotor são definidas de acordo com sua curva de produção (cf. Figura 3). Quando o controlador 10 detecta um evento sinalizador, o mesmo inicia a atividade auxiliar de suporte à estabilidade da rede elétrica de acordo com a presente invenção. No momento em que a turbina eólica 1 entra na primeira fase, ou seja, no período de sobreprodução, a potência elétrica de saída e a velocidade de rotação do rotor correspondem ao ponto A na Figura 4 (P_{e0} e ω_0 sendo $P_{e0} = 0,8$ pu no exemplo da primeira modalidade de execução). Com o início do período de sobreprodução, a P_e é aumentada além do seu valor normal, deslocando o ponto de trabalho da turbina eólica ao ponto B na Figura 4. Esta potência adicional é denominada ΔP_{op} . Nas modalidades de execução, assume-se que ΔP_{op} é constante durante a duração do período de sobreprodução (como descrito acima, poderia, no entanto, também ser variado ao longo do tempo). Como ΔP_{op} é retirado da energia cinética armazenada no rotor 2, o valor de ω diminui com a saída continuada da potência elétrica adicional, de tal maneira que o ponto de trabalho da turbina eólica mude do ponto B para o ponto C na Figura 4. Como também indicado na Figura 4, a potência mecânica P_m do rotor diminui em função da piora da eficiência que acompanha a velocidade decrescente de rotação do rotor (cf. curvas de eficiência na Figura 3).

[059] O controlador 10 anteriormente mencionado mede continuamente o valor de ω e monitora a operação do gerador 9. O mesmo interrompe a saída da potência elétrica adicional (no mais tardar) no momento em que o valor mínimo ω_{min} respectivo é atingido (ponto C na Figura 4). A seta do ponto C ao ponto D marca o término do período de sobreprodução e o início do período de recuperação. Com a velocidade de rotação do rotor sendo ω_{min} , a potência mecânica P_m disponível no rotor é de aproximadamente 0,7 pu (em oposição a 0,8 pu no modo normal de operação da turbina eólica no ponto A).

Esta diminuição da quantidade disponível de P_m é agora a base para a reaceleração do rotor 2, enquanto continua o fornecimento da energia elétrica de saída para a rede elétrica 17, e para a mudança gradual do ponto de trabalho da turbina eólica 1, do ponto D de volta ao ponto A. Na primeira modalidade de execução, uma quantidade de energia constante (P_{acc}) é utilizada para a reaceleração do rotor, ou seja, aproximadamente 0,025 pu. A parte remanescente da P_m disponível é utilizada para a produção de energia elétrica (se aplica: $P_m - P_e = P_{acc}$, negligenciando-se a redução de eficiência). Com o aumento da velocidade de rotação do rotor, a eficiência aumenta novamente e, conseqüentemente, a energia elétrica de saída também aumenta (enquanto o rotor 2 é ainda acelerado utilizando o P_{acc} constante). Durante o período de recuperação, a P_e nunca cai abaixo do mínimo predeterminado de potência elétrica de saída, que é exemplificativamente definido para 0,65 pu na primeira modalidade de execução (ou seja, 81,25% de P_{e0}). O período de recuperação acaba quando a velocidade de rotação do rotor atinge novamente a velocidade nominal ω_0 , e a turbina eólica 1 continua a operar em seu ponto de operação normal (ponto A na Figura. 4).

[060] A primeira modalidade preferida de execução de acordo com a presente invenção também pode ser visualizada na Figura 5 (período de sobreprodução: pontos de A a D, período de recuperação: D a A'). O diagrama superior mostra a P_e (linha sólida) e a P_m (linha pontilhada) ao longo do tempo, enquanto que o diagrama inferior mostra a velocidade ω de rotação rotor. Como apenas uma quantidade relativamente pequena de energia é investida na reaceleração do rotor, o período de recuperação é aproximadamente quatro vezes mais longo do que o período de sobreprodução. Em função do valor constante de P_{acc} , a velocidade de rotação do rotor é aumentada constantemente durante o mencionado período de recuperação.

[061] Uma variação da primeira modalidade preferida de execução é mostrada na Figura 5, na qual a potência elétrica de saída é modulada tanto durante o período de sobreprodução como durante o período de recuperação. Esta modulação é realizada, por exemplo, em resposta às medidas

em curso na rede elétrica, cujos resultados são transmitidos através do gerenciador de sistema 18 para o controlador 10, baseado nas determinações do operador da rede (que são, por exemplo, incluídas no evento sinalizador) ou nas variações na velocidade do vento. Através da realização de uma modulação de potência de saída deste tipo, a contribuição melhorada da turbina eólica 1 para a estabilidade da rede elétrica é assegurada. A velocidade ω de rotação do rotor varia correspondentemente. Além disso, a transição do período de sobreprodução para o período de recuperação não necessita ser uma redução abrupta da potência elétrica de saída (como mostrado na Figura 5) e sim, ela pode ser suave, por exemplo, de acordo com uma função matemática (a transição pode ser significativamente "mais suave" do que o indicado na Figura. 5a).

[062] A segunda modalidade preferida de execução (Figuras 6 e 7) é caracterizada principalmente por uma utilização diferente da P_m durante o período de recuperação. Novamente, o modo auxiliar de duas fases de suporte à estabilidade da rede elétrica é iniciado pelo controlador 10 depois do mesmo ter detectado um evento sinalizador. A potência elétrica de saída P_e é aumentada para 0,9 pu (P_{e0} sendo 0,8 pu como também na primeira modalidade preferida de execução) para que o ponto de trabalho da turbina eólica mude do ponto A para o ponto B, e – enquanto a velocidade de rotação do rotor diminui – posteriormente ao ponto C. Na segunda modalidade de execução, a velocidade ω_{min} de rotação mínima do rotor é ligeiramente menor do que na primeira modalidade de execução (por exemplo, porque a turbina eólica de acordo com a segunda modalidade de execução possui um conversor de larga escala ao invés de um DFIG, o que permite um maior desvio na velocidade de rotação do gerador e na frequência da rede elétrica). Correspondentemente, o período de sobreprodução é ligeiramente mais longo (com o mesmo ΔP_{op} da primeira encarnação). Quando o ω_{mi} é atingido, o controlador inicia novamente a fase de recuperação. Na segunda modalidade preferida de execução, a energia elétrica mínima de saída P_{emin} durante o período de recuperação é definida para 0,64 pu (o que equivale a 80% de $P_{e0} = 0,8$ pu). A potência mecânica P_m disponível no rotor no ponto D é

apenas um pouco superior a este limiar mais baixo P_{emin} . O controlador 10 agora controla a turbina eólica 1 de uma maneira tal, que para a primeira parte do período de recuperação apenas a potência elétrica mínima de saída é realmente produzida (ou seja, $P_e = P_{emin}$ durante este período de tempo). Deste modo, a potência utilizada para a reaceleração do rotor 2 aumenta com o aumento da eficiência (ou, em outras palavras: o "espaço" entre P_m e P_e aumenta sobre esta primeira parte do período de recuperação, pois P_m aumenta com um ω maior e P_e permanece constante). Apenas em uma segunda parte do período de recuperação – quando ω já quase atingiu ω_0 – o P_e é aumentado (relativamente rápido) e, conseqüentemente, o P_{acc} é diminuído.

[063] O efeito deste procedimento é um período de recuperação mais curto, porque o ω_0 – em comparação com a primeira modalidade preferida de execução – é atingido de modo significativamente mais rápido (Figura 7). Conseqüentemente, o período de recuperação é aqui apenas aproximadamente duas vezes mais longo do que o período de sobreprodução. No entanto, esta vantagem só é obtida em função de um menor P_e durante a parte principal do período de recuperação.

[064] A terceira modalidade preferida de execução (Figura 8) segue basicamente o diagrama da Figura 4, apresentado em conexão com a primeira modalidade preferida de execução. No entanto, contrastando com a primeira modalidade preferida de execução, o período de recuperação é agora realizado em duas fases. Em uma primeira fase (do ponto D' para D na Figura 8), toda a potência mecânica do rotor é convertida em potência elétrica (ou seja, $P_m = P_e$). Como resultado, nenhuma energia é deixada para a reaceleração do rotor ($P_{acc} = 0$ e a velocidade ω de rotação do rotor permanece constante em ω_{min}). O ponto de trabalho da turbina eólica é igual ao ponto de intersecção entre a seta C-D e a curva P_m na Figura 4. Em uma segunda fase (de D para A' na Figura 8), a potência elétrica de saída é ligeiramente reduzida (mas ainda é igual ou superior ao mínimo P_{emin}), de tal modo que uma parte da P_m seja liberada para a reaceleração do rotor. A reaceleração é então realizada de maneira semelhante à

primeira modalidade preferida de execução.

[065] A terceira modalidade preferida de execução possibilita uma contribuição um pouco mais significativa para a estabilidade da rede elétrica 17 na primeira fase do período de recuperação. Obviamente, o período de recuperação é estendido pela duração da reaceleração zero do rotor para que, no exemplo da Figura 8, ele seja aproximadamente 6,5 vezes mais longo do que o período de sobreprodução.

[066] As modalidades preferidas de execução um a três foram descritas até o momento com o pressuposto de que a turbina eólica 1 opera em modo de carga parcial quando um evento sinalizador é detectado pelo controlador 1 e o modo de controle auxiliar é iniciado. Evidentemente a turbina eólica 1 também pode executar atividades de suporte à estabilidade da rede elétrica durante o modo de operação com plena carga (isto é, $P_{e0} = P_{nom}$, com a potência eólica disponível P_w correspondendo a uma potência maior do que a potência elétrica nominal da turbina eólica, cf. Figura 9). Neste caso o mencionado período de sobreprodução, de modo geral, não difere da operação com carga parcial (além do fato de que, como a turbina eólica 1 estará operando com sua potência nominal de operação antes do período de sobreprodução, o aumento da potência de saída durante o período de sobreprodução levará a uma potência temporária de saída que ultrapassa temporariamente a potência nominal, mas que ainda se situa dentro da faixa de tolerância da turbina eólica). A potência elétrica adicional de saída é mantida até que a velocidade mínima ω_{min} de rotação do rotor seja atingida. O período de sobreprodução pode ser mais longo do que no modo de carga parcial em função do aumento da energia cinética armazenada no rotor 2 e do suporte adicional proporcionado pela inclinação da lâminas, dependendo respectivamente da P_{emin} e das restrições de operação do gerador 9, ou seja, da faixa dinâmica de operação da turbina eólica 1 (cf. Figura 3). Na modalidade de execução de acordo com a Figura 9, as lâminas são desembandeiradas durante o mencionado período de sobreprodução, ganhando desta maneira força adicional de levantamento que pode ser convertida em

energia eléctrica adicional ou utilizada para reduzir a desaceleração do rotor. Da mesma forma, o período de recuperação pode ser reduzido utilizando-se a energia eólica em excesso para a reaceleração de rotor de uma maneira similar. No exemplo da Figura 9, o período de sobreprodução é, portanto, mais longo (em comparação com as modalidades de execução anteriores que se referem ao modo de operação de carga parcial, cf., por exemplo, a Figura 5), e o período de recuperação é apenas duas vezes mais longo do que o período de sobreprodução.

[067] Em todas as modalidades de execução descritas, a turbina eólica 1 pode, por exemplo, ser equipada com um gerador síncrono dotado de um conversor de larga escala (Figura 10) ou, alternativamente, com Gerador de Indução de Dupla Alimentação (DFIG) (Figura 11). No primeiro caso, 100% da energia eléctrica gerada P_e passa através do conversor 20 que possui um retificador 21 e um retificador invertido 22. Neste último caso, o enrolamento do estator 23 é conectado diretamente à rede eléctrica 17 e a conexão rotor-rede eléctrica é realizada com a utilização de um conversor 20 que pode ser, por exemplo, um conversor em cascata com ligação CC (cf. Figura 11). Deste modo, apenas aproximadamente 30% da potência eléctrica produzida P_e passa através do conversor 20, enquanto que a parte principal é alimentada diretamente na rede eléctrica 17.

[068] A duração do período de recuperação não depende apenas da energia utilizada para a reaceleração do rotor (P_{acc}), mas também da velocidade predominante do vento. A Figura 12 ilustra as durações do período de recuperação para os modos de controle de acordo com a primeira modalidade de execução (quantidade fixa de potência de reaceleração P_{acc} durante o período de recuperação) na dependência da velocidade do vento. Em uma primeira variante, a P_{acc} é escolhida com um valor relativamente pequeno (0,02 pu) para que o período de recuperação seja relativamente longo. Se a P_{acc} for definida com valores superiores (0,06 pu e 0,1 pu na Figura 12), a duração do período de recuperação geralmente decresce. Uma maior velocidade do vento tende

geralmente a resultar em uma maior duração. Especificamente, se a P_{acc} for definida com um valor relativamente pequeno (0,02 pu na Figura 12), a duração do período de recuperação aumenta significativamente com velocidades maiores de vento. Entretanto, com velocidades de vento superiores ao valor nominal (operação a plena carga), o período de recuperação diminui drasticamente (se, diferente da Figura 9, a mesma quantidade de P_m for utilizada para a aceleração do rotor como no modo de carga parcial).

[069] De acordo com uma modalidade preferida de execução da presente invenção, é revelado um método de controle de uma turbina eólica para suportar a estabilidade de uma rede elétrica (Figura 13). Geralmente, a turbina eólica 1 opera de acordo com sua diretriz padrão 30 (por exemplo, com rastreamento máximo de energia como também ilustrado pela curva de produção na Figura 3). Eventos que sinalizam a necessidade do fornecimento de P_e adicional são monitorados em 30. O monitoramento também pode incluir a medição de parâmetros da rede elétrica (tais como variações de frequência ou mudanças do ângulo de voltagem), a determinação da extensão do suporte à rede elétrica e instruções (detalhadas) para a turbina eólica 1. Quando um evento deste tipo é detectado (seta 31), a turbina eólica 1 executa o período de sobreprodução em 32. Como descrito com detalhes acima, a energia cinética é extraída de rotor 2 e convertida em energia elétrica adicional ΔP_{op} enquanto a velocidade ω de rotação do rotor diminui mais e mais. A potência elétrica de saída pode ser variada ou modulada. O mencionado período de recuperação pode ser iniciado antes de o rotor atingir a sua velocidade mínima ω_{min} de rotação, por exemplo, quando a rede elétrica parece estar estável novamente, depois de um tempo decorrido ou das condições operacionais internas da turbina eólica, como o superaquecimento dos componentes ou a carga da turbina eólica. No entanto, ele é iniciado, no mais tardar, quando a velocidade mínima ω_{min} de rotação do rotor é alcançada (seta 33). No período de recuperação, o rotor 2 é novamente reacelerado e pelo menos uma determinada quantidade de P_e é ainda fornecida à rede elétrica 17. Outras atividades dependentes do suporte prévio à estabilidade

da rede elétrica também podem ser executadas durante o período de recuperação, com o propósito de restaurar as condições normais de operação da turbina eólica, tais como o resfriamento de componentes aquecidos, o amortecimento de oscilações mecânicas, etc. Quando o rotor 2 atinge a sua velocidade de rotação normal (por exemplo, ω_0 , assumindo-se uma velocidade inalterada do vento a partir do início do período de sobreprodução em 32), a turbina eólica 1 retorna à sua operação normal (seta 35).

[070] A funcionalidade da turbina eólica e o método de controle aqui descrito e reivindicado não são exclusivos. A turbina eólica descrita neste documento pode ser projetada para realizar atividades adicionais de suporte à estabilidade de redes elétricas além das atividades descritas, tais como reduzir a geração de energia de uma maneira transitória no caso de um excesso súbito de oferta de energia na rede elétrica (por exemplo, quando um consumidor significativo de energia é desligado da rede) ou neutralizar distúrbios periódicos (por exemplo, oscilações na frequência da rede), etc.

REIVINDICAÇÕES

1. TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL (1) a ser conectada a uma rede elétrica (17), projetada para fornecer energia elétrica adicional e neutralizar perturbações não periódicas na rede elétrica, compreendendo:

- um rotor (2) com lâminas (3) acoplado a um gerador elétrico (9),

- um controlador (10) disposto como um microprocessador com memória associada, disposto para executar o software de controle,

- um controlador (10) sendo projetado para monitorar eventos sinalizando a necessidade de um aumento da potência elétrica de saída (P_e) da turbina eólica (1) para a rede elétrica (17) para suportar a estabilidade da rede elétrica,

- o controlador (10) sendo projetado para controlar a turbina eólica (1) para que esta execute atividades de suporte à rede elétrica de forma não periódica, como segue:

- o controlador (10) é projetado para, quando a turbina eólica (1) operar em modo de carga parcial, ou seja, com potência abaixo da potência nominal da turbina eólica, e depois que um evento sinalizador foi detectado, a turbina eólica (1) entra em um período de sobreprodução no qual a potência elétrica de saída (P_e) é aumentada além da potência elétrica normal de operação (P_{e0}), sendo que a potência elétrica adicional de saída é retirada da energia cinética armazenada no rotor (2) e sem alterar a operação da turbina eólica (1) para um ponto mais eficiente de trabalho,

caracterizado pelo fato de que:

- o controlador (10) é projetado para, no mais tardar, quando a velocidade de rotação do rotor (2) atinge um valor mínimo (ω_{min}), controlar a turbina eólica (1) para entrar em um período de recuperação para reacelerar o

rotor (2) à velocidade de rotação normal (ω_0) no ponto de trabalho, enquanto continua a contribuir para a estabilidade da rede elétrica com o fornecimento de pelo menos um mínimo predeterminado de energia elétrica (P_{emin}) à rede elétrica (17).

2. TURBINA (1) de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é projetado para controlar a turbina eólica (1) de tal maneira que a menor potência predeterminada de saída (P_{emin}) durante o período de recuperação seja uma porcentagem fixa da potência elétrica de operação que foi fornecida à rede elétrica antes do período de sobreprodução (P_{eo}).

3. TURBINA (1) de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é arranjado para controlar a turbina eólica (1) de tal maneira que durante o período de recuperação, pelo menos 80%, mais preferencialmente pelo menos 85%, e mais preferencialmente pelo menos 90% da potência elétrica de operação que foi fornecida à rede elétrica antes do período de sobreprodução (P_{eo}) seja fornecida para a rede elétrica (17).

4. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é projetado para controlar a energia utilizada para acelerar o rotor (P_{acc}), de tal maneira que uma aceleração mínima predeterminada do rotor seja assegurada.

5. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de também compreender o equipamento (11) para medir a velocidade de rotação do rotor (2), a velocidade do vento, o momento nas bases das lâminas e/ou o torque no eixo do rotor, e na qual o controlador (10) é arranjado para controlar, durante o período de recuperação, a energia utilizada para acelerar o rotor (P_{acc}) medindo continuamente a velocidade de rotação do rotor (2), a velocidade do vento, o momento nas bases das lâminas e/ou o torque no eixo do rotor, e calculando a energia mecânica disponível no rotor (P_m) a partir de pelo menos um destes parâmetros.

6. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é arranjado para iniciar o período de recuperação antes que a velocidade de rotação mínima do rotor ($\omega_{\min}$) seja alcançada, quando a rede elétrica (17) está estabilizada, quando a duração do período de sobreprodução chega a um limite de tempo ou quando a quantidade de energia adicional fornecida à rede elétrica (17) durante o período de sobreprodução atinge um limite.

7. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é arranjado para controlar a velocidade de rotação do rotor (2) e/ou a potência elétrica de saída (P_e) durante o período de recuperação, de tal maneira que a velocidade de rotação normal do rotor (ω_0) seja atingida dentro de um período de tempo predeterminado.

8. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é arranjado para controlar a velocidade de rotação do rotor (2) e/ou a potência elétrica operacional (P_e) durante o período de recuperação, de tal maneira que a mesma seja variada durante o período de recuperação de acordo com uma função predeterminada, e preferencialmente aumentada durante o período de recuperação de acordo com um gradiente predeterminado.

9. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é arranjado para controlar a turbina eólica (1) de tal maneira que o período de recuperação seja mais longo do que o período de sobreprodução, preferencialmente cinco vezes mais longo, mais preferencialmente três vezes mais longo, e ainda mais preferencialmente duas vezes mais longo do que o período de sobreprodução.

10. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de também compreender um

sistema de controle de passo das lâminas (6), sendo que o controlador (10) é projetado para ajustar o ângulo de passo das lâminas durante o período de sobreprodução e/ou recuperação para compensar a mudança do ângulo de ataque do vento em função da mudança da velocidade de rotação do rotor, de tal maneira que a diminuição da eficiência da conversão da energia seja reduzida durante o período de sobreprodução e/ou recuperação.

11. TURBINA (1) de acordo com a reivindicação 9, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é projetado para controlar a turbina eólica (1) de tal maneira que, se a energia eólica disponível (P_w) corresponder a uma potência elétrica maior do que a potência operacional nominal (P_{nom}) da turbina eólica (1), ou seja, se a turbina eólica (1) trabalhar em modo de plena carga com as lâminas (3) em uma posição pelo menos parcialmente embandeirada, a quantidade de embandeiramento é reduzida durante o período de sobreprodução e/ou recuperação para que a energia eólica adicional disponível seja utilizada para reduzir a desaceleração/aumentar a reaceleração e/ou aumentar a potência elétrica de saída (P_e).

12. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de que o controlador (10) é arranjado para monitorar, detectar e processar eventos sinalizadores tais como sinais de controle externos ou resultados de medições e avaliações realizadas pela turbina eólica (1) de um ou mais parâmetros da rede elétrica, particularmente da frequência da rede elétrica e/ou da mudança do ângulo da voltagem.

13. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de que o gerador elétrico (9) consiste de um gerador de larga escala, sendo que o valor mínimo da velocidade (ω_{min}) de rotação na qual o controlador (10) inicia o período de recuperação é a velocidade mínima na qual a turbina eólica (1) pode ser operada para produzir a potência mínima de saída (P_{emin}) necessária durante o período de recuperação (P_{emin}) e para a reaceleração do rotor (2).

14. TURBINA (1) de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizada pelo fato de que o gerador elétrico (9) consiste de um gerador de indução de dupla alimentação, sendo que o valor mínimo da velocidade ($\omega_{\min}$) de rotação na qual o controlador (10) é projetado para iniciar o período de recuperação é representado por uma das seguintes condições: a velocidade mínima na qual o gerador de indução de dupla alimentação pode ser operado para produzir a potência mínima de saída ($P_{\min}$) necessária durante o período de recuperação e para reacelerar o rotor, ou o limiar inferior de construção da faixa de velocidade de rotação do gerador (9), seja qual for o maior valor.

15. CONTROLADOR (10) DA OPERAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL (1), disposto como um microprocessador com memória associada, disposto para executar o software de controle, e compreendendo um rotor (2) com lâminas (3) e sendo arranjado para ser conectado a uma rede elétrica (17), o controlador (10) é projetado para realizar atividades de suporte à estabilidade da rede elétrica de forma não periódica, como segue:

- o controlador (10) é projetado para monitorar eventos sinalizando a necessidade de um aumento da potência elétrica de saída (P_e) da turbina eólica (1) para a rede elétrica (17) para suportar a estabilidade da rede elétrica (17),

- o controlador (10) é projetado para, quando a turbina eólica (1) operar em modo de carga parcial, ou seja, com potência abaixo da potência nominal da turbina eólica, e depois que um evento sinalizador foi detectado, controlar a turbina eólica (1) para que a mesma entre em um período de sobreprodução no qual a potência elétrica de saída (P_e) é aumentada além da potência elétrica normal de operação (P_{e0}), sendo que a potência elétrica de saída adicional é retirada da energia cinética armazenada no rotor (2) e sem alterar a operação da turbina eólica (1), pelo menos durante a operação em um modo

parcial de carga, para um ponto mais eficiente de trabalho,

caracterizado pelo fato de que,

- o controlador (10) é projetado para, no mais tardar, quando a velocidade de rotação do rotor (2) atingir um valor mínimo ($\omega_{\min}$), controlar a turbina eólica (1) para que a mesma entre em um período de recuperação para reacelerar o rotor (2) à velocidade de rotação normal (ω_0), enquanto continua a contribuir para a estabilidade da rede elétrica (17) com o fornecimento de pelo menos um mínimo predeterminado de energia elétrica ($P_{\min}$) à rede elétrica (17).

16. MÉTODO PARA CONTROLAR UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL (1) para fornecer energia elétrica adicional para neutralizar perturbações não periódicas em uma rede elétrica, a turbina eólica (1) tendo um rotor (2) com lâminas (3) e sendo projetada para ser conectada a uma rede elétrica (17), o método não periódico, compreendendo:

- o monitoramento de eventos sinalizando a necessidade de um aumento da potência elétrica de saída (P_e) da turbina eólica (1) para a rede elétrica (17) para suportar a estabilidade da rede elétrica (17),

- quando a turbina eólica (1) operar em modo de carga parcial, ou seja, com potência abaixo da potência nominal da turbina eólica, e depois que um evento sinalizador foi detectado, a entrada em um período de sobreprodução no qual a potência elétrica de saída (P_e) é aumentada além da potência elétrica normal de operação (P_{e0}), sendo que a potência elétrica de saída adicional é retirada da energia cinética armazenada no rotor (2) e sem alterar a operação da turbina eólica (1), pelo menos durante a operação em um modo parcial de carga, para um ponto mais eficiente de trabalho,

caracterizado pelo fato de que,

- no mais tardar, quando a velocidade de rotação do rotor (2)

atingir um valor mínimo ($\omega_{\min}$), a entrada em um período de recuperação para reacelerar o rotor (2) à velocidade de rotação normal (ω_0), enquanto continua a contribuição para a estabilidade da rede elétrica (17) com o fornecimento de pelo menos um mínimo predeterminado de energia elétrica ($P_{\min}$) à rede elétrica (17).

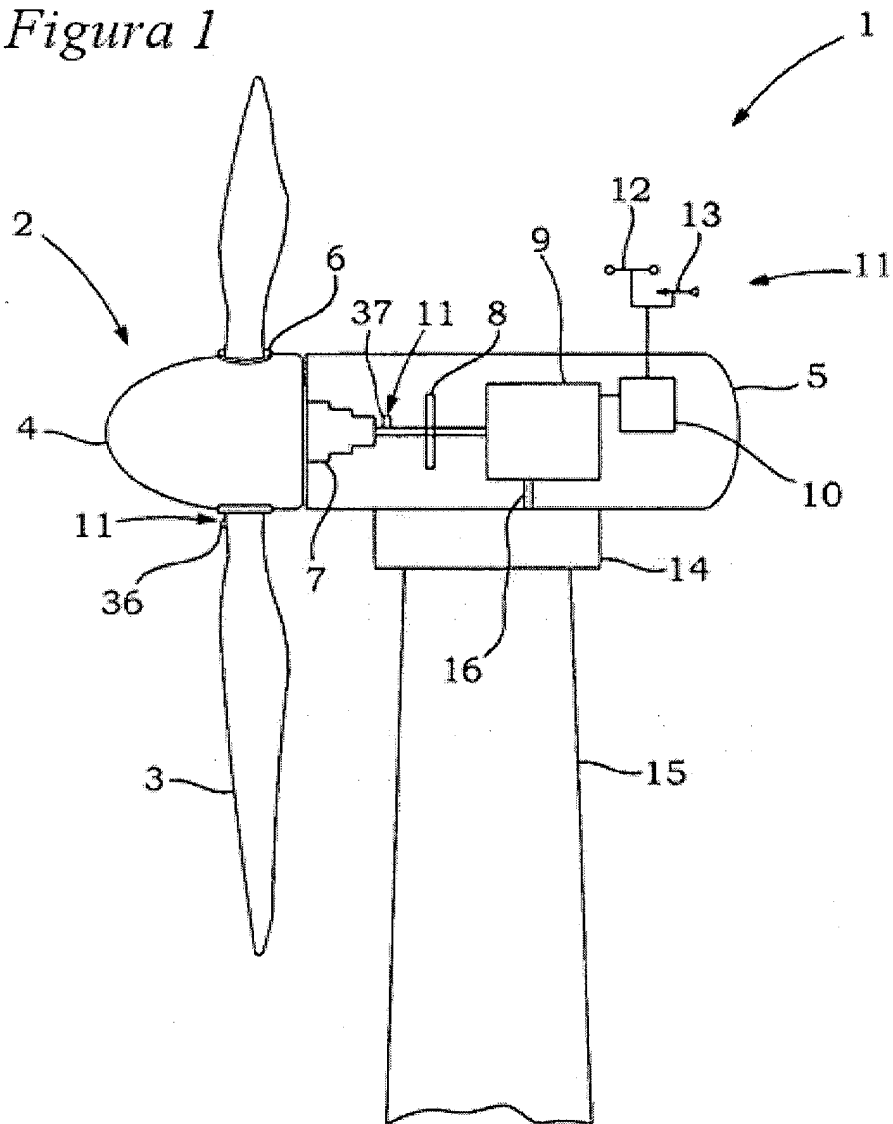
Figura 1

Figura 2

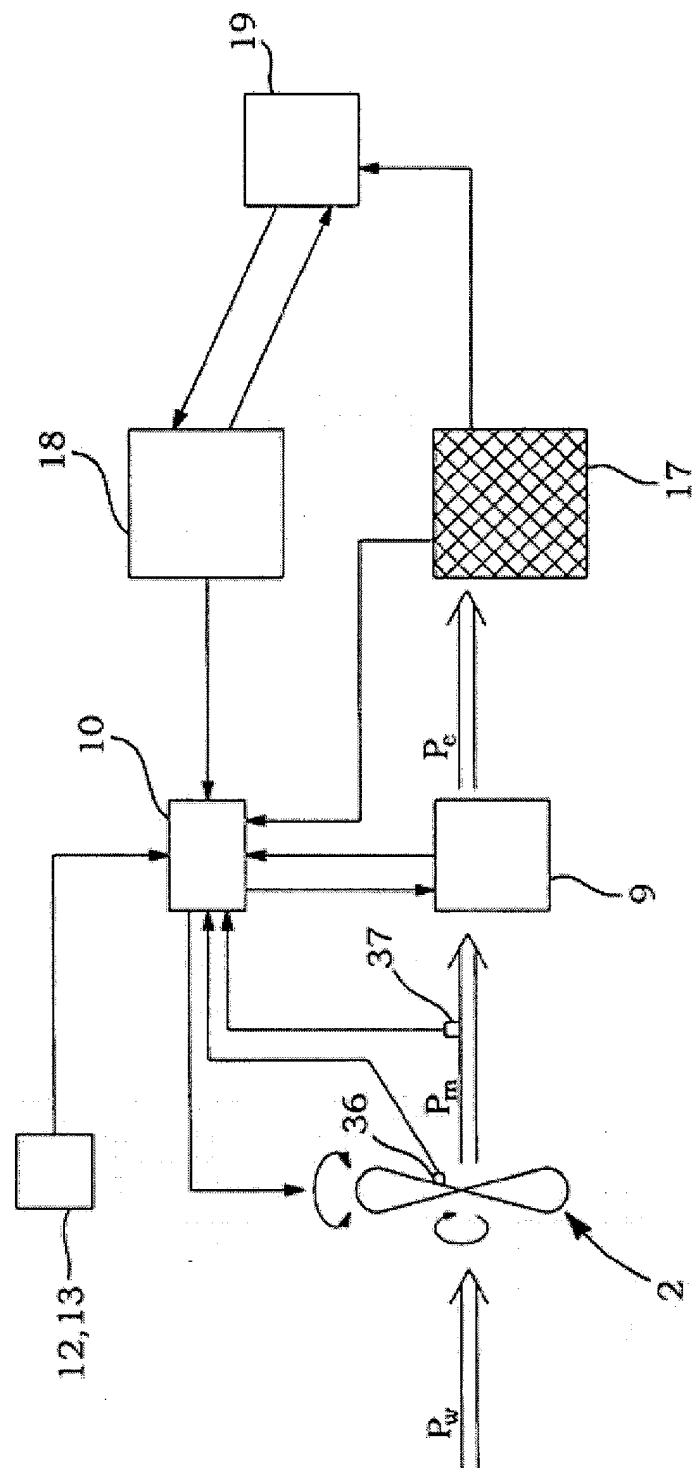


Figura 3

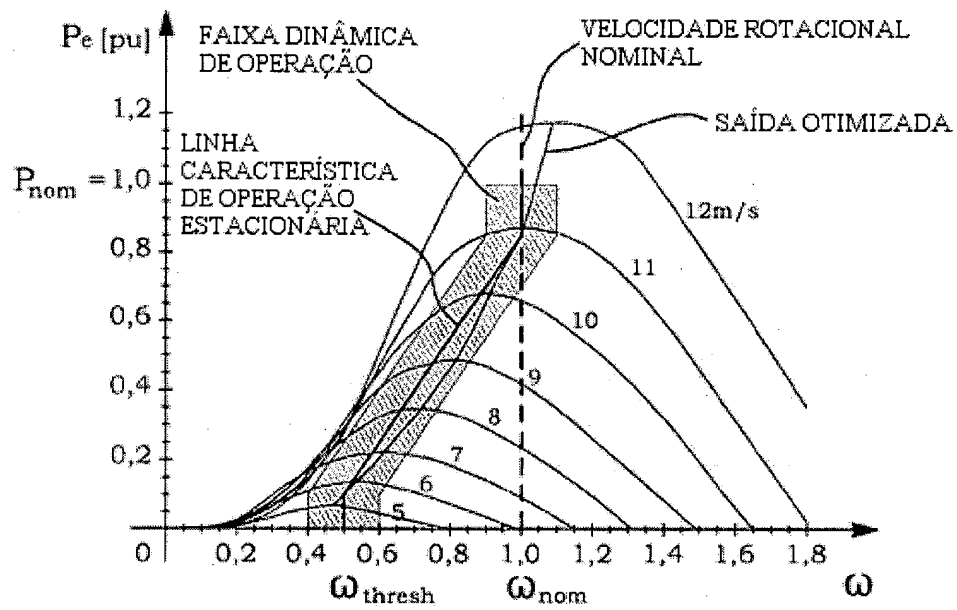


Figura 4

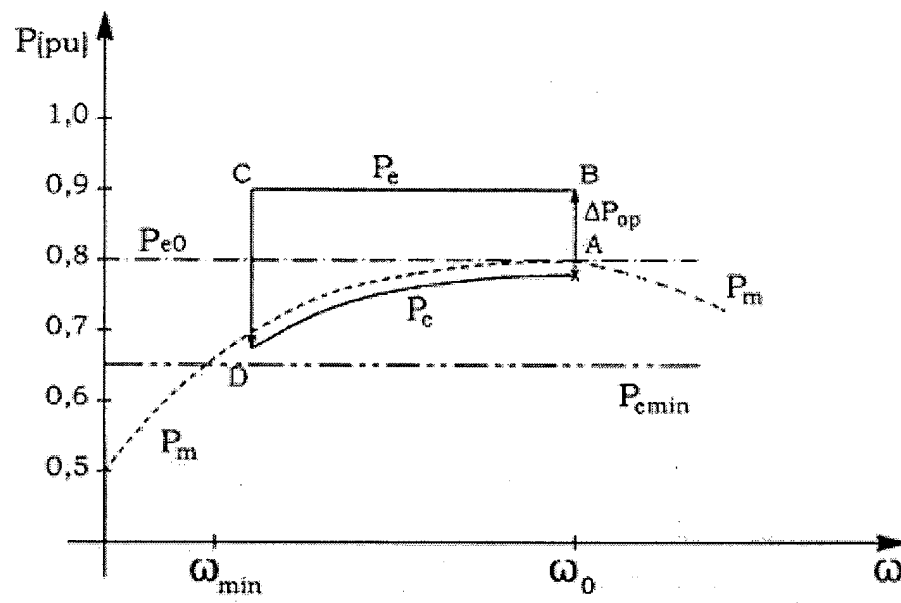


Figura 5

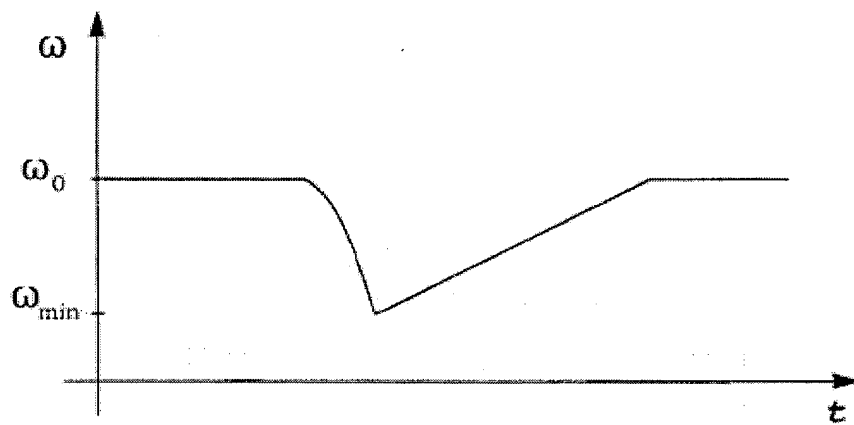
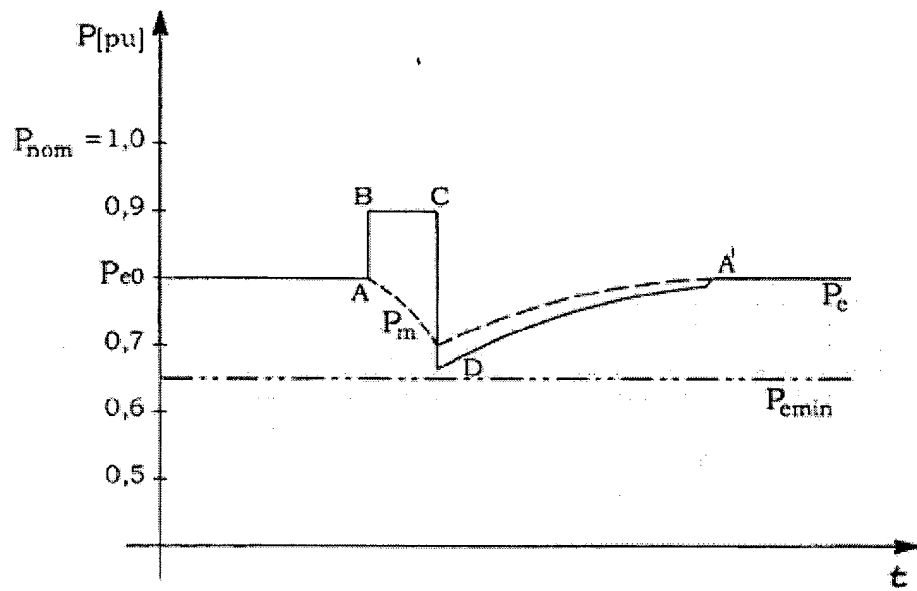


Figura 5a

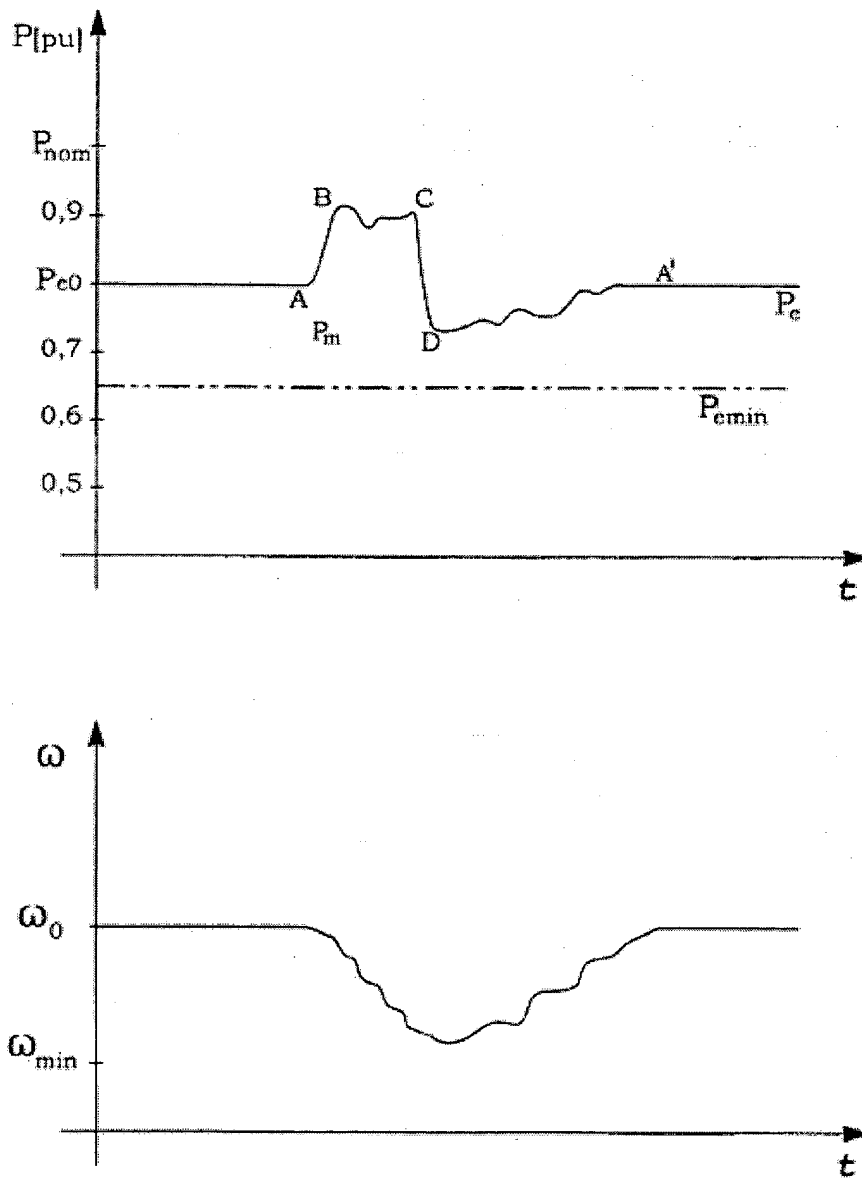


Figura 6

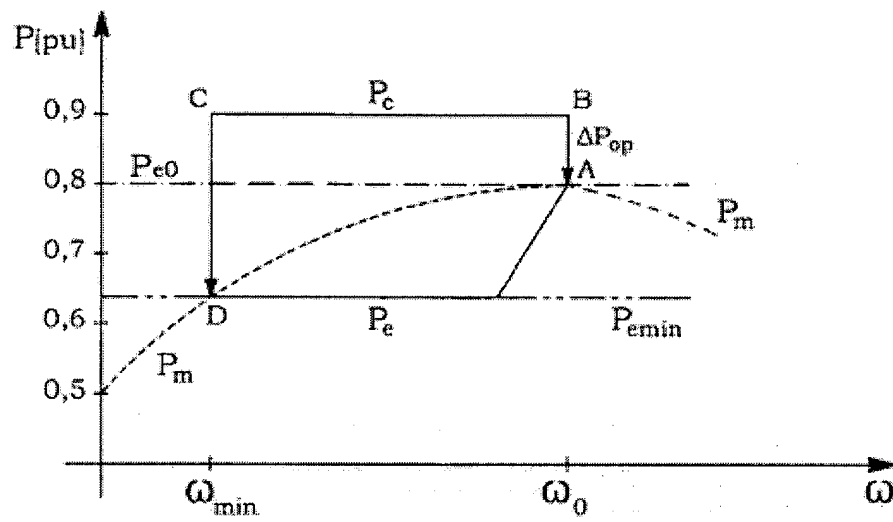


Figura 7

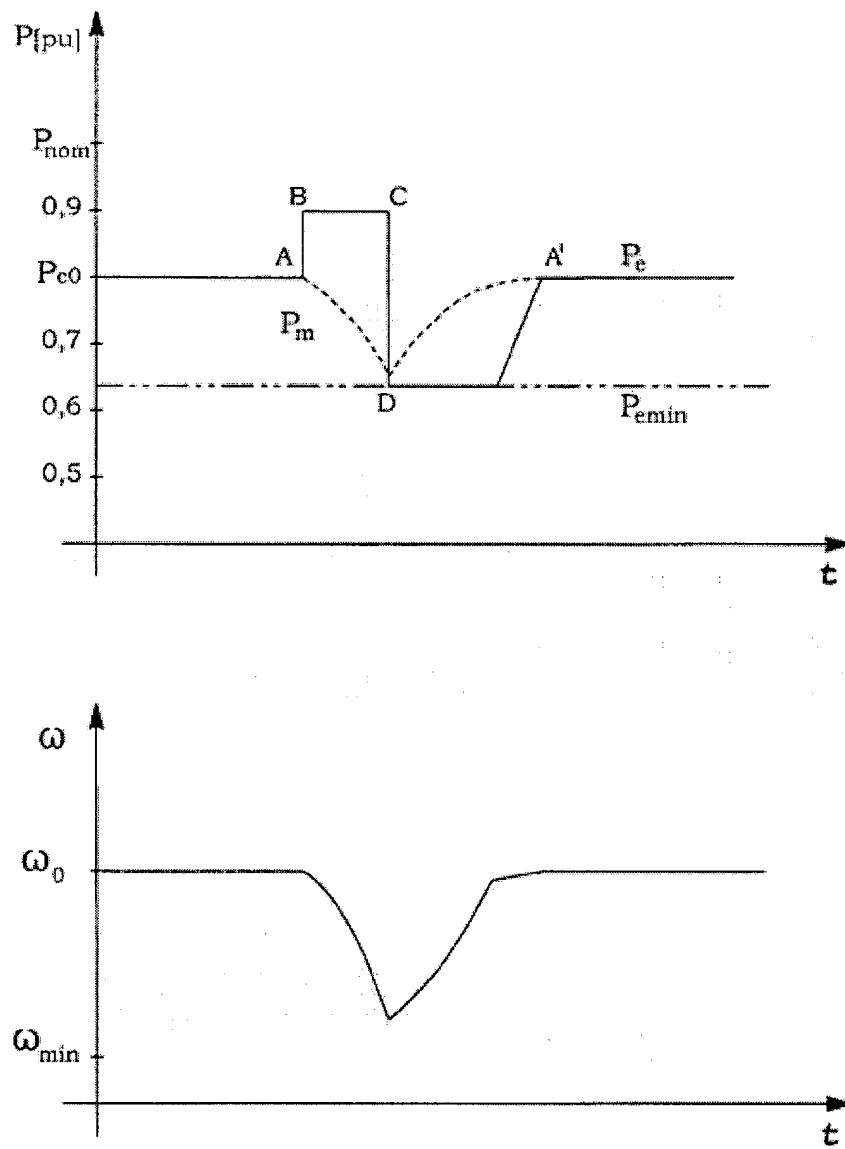


Figura 8

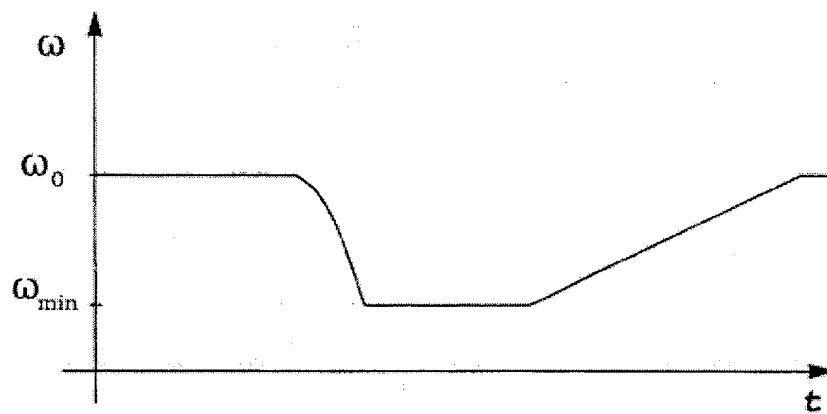
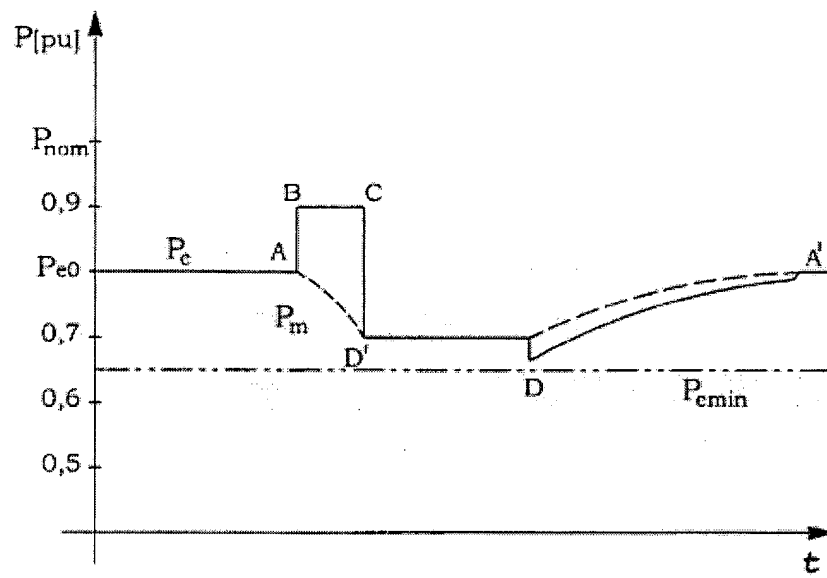


Figura 9

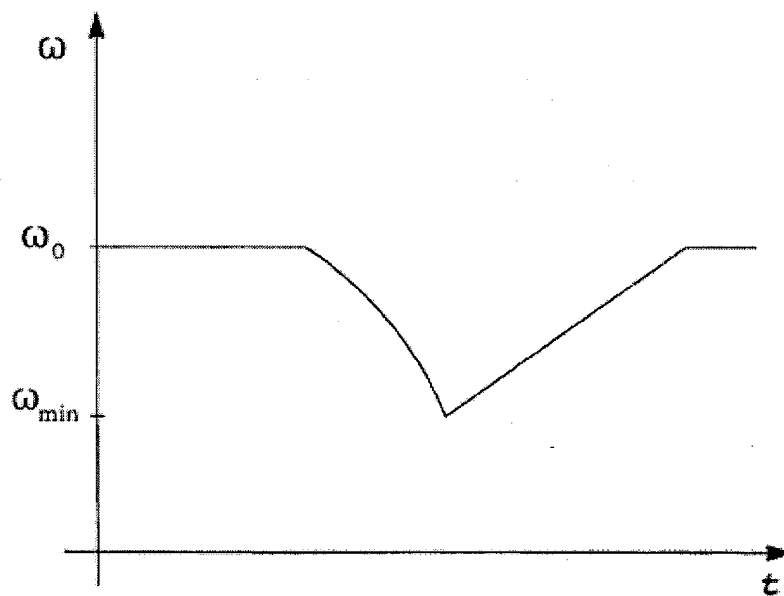
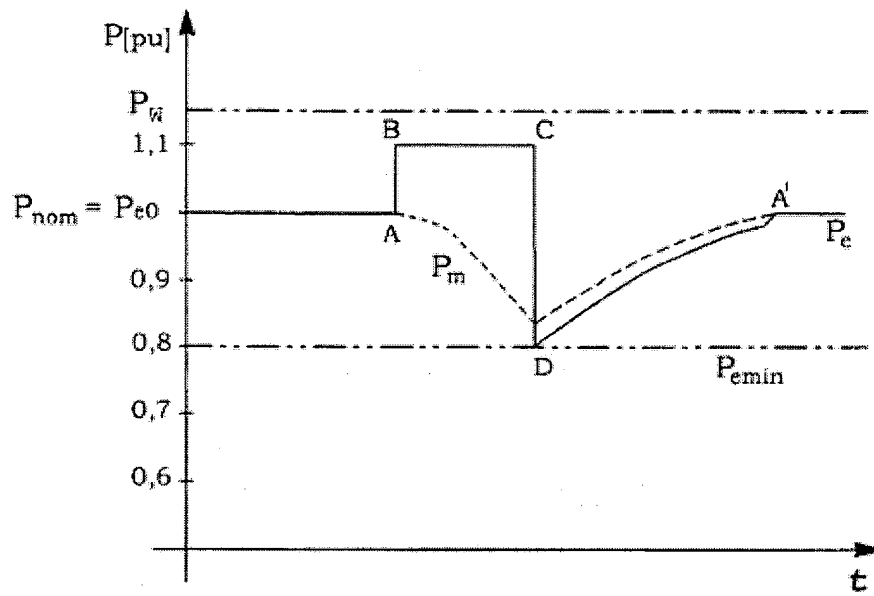


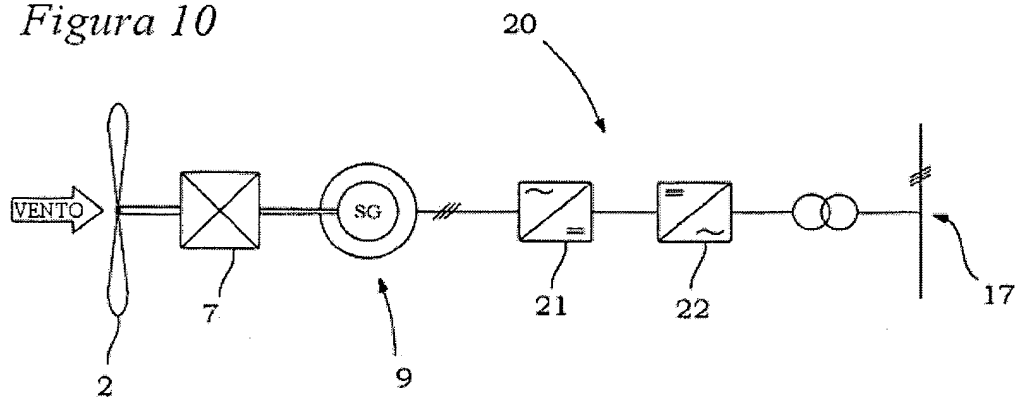
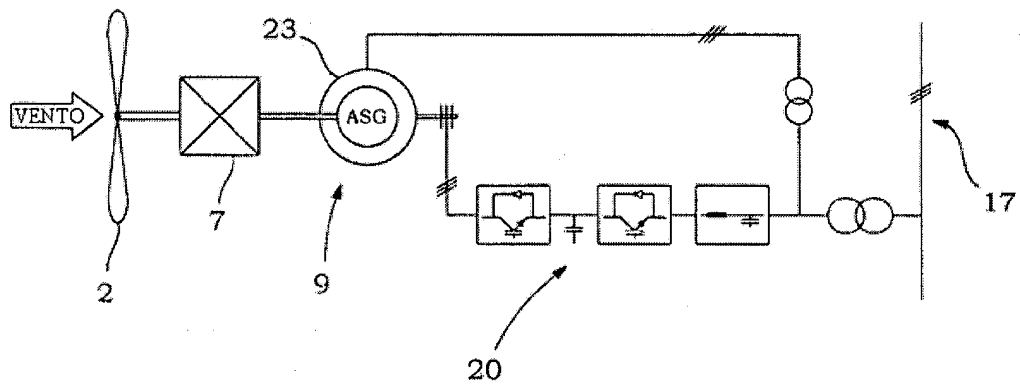
Figura 10*Figura 11*

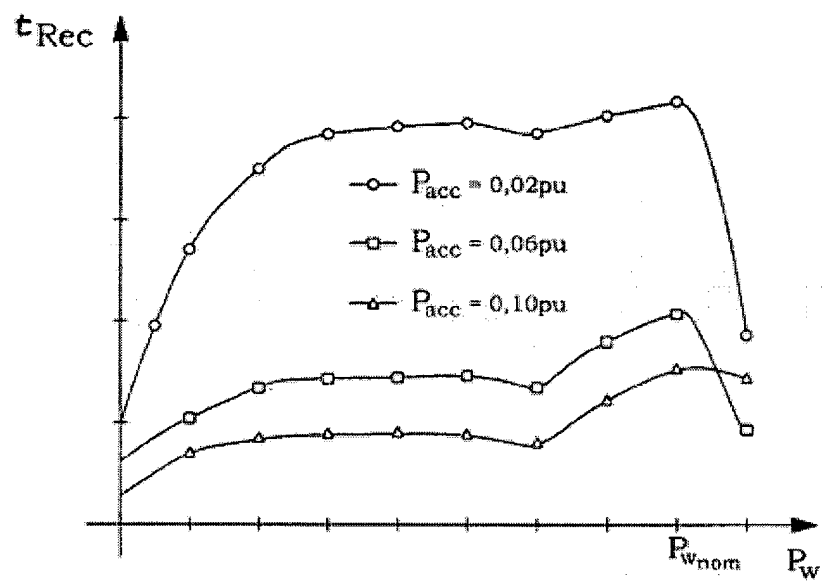
Figura 12

Figura 13