



República Federativa do Brasil  
Ministério do Desenvolvimento, Indústria  
e do Comércio Exterior  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI 1105416-6 A2**

(22) Data de Depósito: 21/12/2011  
(43) Data da Publicação: 30/10/2012  
(RPI 2182)



(51) *Int.Cl.:*  
H04Q 9/14  
H02J 13/00

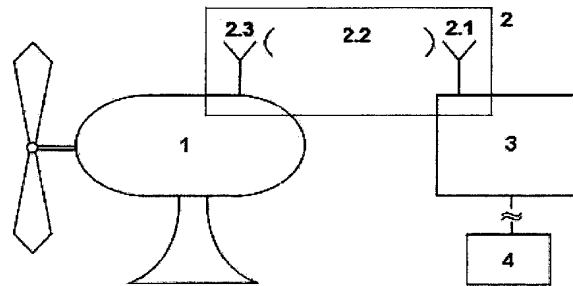
(54) **Título:** SISTEMA DE CONTROLE SEM FIO DE POTÊNCIAS ELÉTRICAS PARA APLICAÇÃO EM REDES INTELIGENTES

(73) **Titular(es):** UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP

(72) **Inventor(es):** ALFEU JOÃOZINHO SQUAREZI FILHO, CARLOS EDUARDO CAPOVILLA, ERNESTO RUPPERT FILHO, IVAN R. S. CASELLA

(74) **Procurador(es):** LUCIANA ALBOCCINO BARBOSA CATALANO

(57) **Resumo:** SISTEMA DE CONTROLE SEM FIO DE POTÊNCIAS ELÉTRICAS PARA APLICAÇÃO EM REDES INTELIGENTES. O presente pedido de patente de invenção refere-se a um sistema de controle sem fio de potências elétricas para aplicação em redes inteligentes. Adicionalmente, a invenção trata de um sistema contendo um sistema de controle deadbeat codificado sem fio de potências para aplicação em redes inteligentes e sua aplicação em um gerador de indução duplamente alimentado voltado à geração de energia eólica.



## SISTEMA DE CONTROLE SEM FIO DE POTÊNCIAS ELÉTRICAS PARA APLICAÇÃO EM REDES INTELIGENTES

### Campo da invenção

O presente pedido de patente de invenção refere-se a um sistema de controle sem fio de potências elétricas para aplicação em redes inteligentes. Adicionalmente, a invenção trata de um sistema contendo um sistema de controle *deadbeat* codificado sem fio de potências para aplicação em redes inteligentes e sua aplicação em um gerador de indução duplamente alimentado voltado à geração de energia eólica.

### 10 Fundamentos da invenção

Os sistemas de energias renováveis têm atraído o interesse e inúmeros esforços de diversos governos em oposição a outras fontes energéticas que aumentam a emissão de CO<sub>2</sub> ou causam enormes impactos ambientais. Tais redes renováveis geram energia elétrica através de fontes eólicas, solares e das marés.

Recentemente, o conceito de redes inteligentes vem sendo largamente aplicado a essas plantas energéticas para viabilizar e otimizar esse desafio (Blau, 2010). Os trabalhos realizados para a consolidação e implementação do conceito de redes inteligentes empregando sistemas eólicos tem despertado grande interesse da comunidade e tem sido o foco de diversos estudos científicos recentes (Glinkowski et al., 2011; Wang et al., 2011; Xiwen et al., 2010).

As redes inteligentes são uma evolução das redes de energia elétrica atuais e se baseiam no uso mais eficiente da infra-estrutura de geração, transmissão e distribuição, de forma a gerenciar a relação entre oferta e demanda evitando contingências no sistema elétrico e para tal é necessário um conjunto com forte interação formado por redes de comunicação, gerenciamento de dados e aplicações de monitoramento em tempo real. Entretanto, a transmissão sem fio está sujeita a distorções e erros causados pelo canal de radiopropagação que podem ocasionar sérios problemas aos equipamentos controlados ou monitorados e, conseqüentemente, à planta

energética como um todo. Em contrapartida, uma das vantagens na utilização dos sistemas sem fio modernos é a possibilidade de melhorar a robustez do sistema através da utilização de técnicas de codificação e correção de erros direta (FEC - *Forward Error Correction*). A codificação de FEC é uma técnica empregada em todos os sistemas sem fio atuais e essencial para garantir a integridade da informação, reduzindo significativamente a taxa de erros de e o atraso do sistema através do acréscimo de redundância à informação transmitida.

Existem atualmente diversas técnicas diferentes de codificação de FEC sendo empregadas em sistemas comerciais sem fio. Dentre as técnicas existentes, a codificação LDPC (*Low Density Parity Check*) é atualmente a técnica de estado da arte que apresenta um excelente compromisso entre complexidade de decodificação e desempenho (MacKay e Neal, 1996; Richardson et al., 2001). A codificação LDPC foi recentemente acrescentada ao padrão IEEE 802.16e, mais conhecido como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) para aplicações móveis.

É importante ressaltar que existem alguns trabalhos na literatura científica referentes à aplicação da tecnologia sem fio no monitoramento de geradores eólicos baseados em redes de sensores (Adamowicz et al., 2010), entretanto não existem estudos mais profundos relacionados a utilização da tecnologia sem fio para aplicações de controle nestes sistemas. Adicionalmente, nos trabalhos de (Li et al., 2009 e Wanzhi et al., 2009) são apresentados estudos e implementações de sistemas de comunicação sem fio para aplicações de controle e monitoramento em plantas eólicas referenciadas a uma central remota, demonstrando seu potencial de aplicabilidade em um futuro próximo.

Apesar destes trabalhos exemplificarem e evidenciarem as reais vantagens e funcionalidades oferecidas pelo uso dos canais de comunicação sem fio, nenhum deles propõe ou analisa técnicas que possam garantir a confiabilidade e segurança das informações de controle e monitoramento transmitidas quanto à robustez a erros de transmissão devido aos efeitos

degradantes do canal de comunicação sem fio. Deste modo, essa invenção pretende preencher uma lacuna no estado da técnica ao demonstrar a viabilidade funcional do uso de sistemas sem fio para este tipo de aplicação desde que sejam empregadas técnicas de codificação adequadas.

5                   No tocante aos geradores empregados em turbinas eólicas, o Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA) é amplamente empregado por apresentar algumas vantagens, em relação a outros geradores utilizados, como operação em velocidade variável e emprego de conversores que processam em torno de 30% da potência nominal do gerador. Neste tipo de  
10 gerador o controle das potências é realizado através de técnicas de controle por orientação de campo baseadas na posição espacial do vetor espacial tensão ou fluxo do estator, o que possibilita o desacoplamento das componentes do eixo direto e em quadratura, tornando possível o controle independente das potências ativa e reativa.

15                   No trabalho de (Tapia et al., 2003) foram realizadas algumas investigações para o controle das potências de um GIDA com a utilização de controladores do tipo Proporcional-Integral (PI), entretanto, esse tipo de controlador apresenta problemas relacionados ao projeto de seus ganhos devido às condições de operação do gerador. Nos trabalhos de (Xin-fang et al.,  
20 2004; Morren e Sjoerd W. H. de Haan et al., 2005; Guo et al., 2008) foram feitas investigações, quando empregadas técnicas de controle preditivo funcional e controle de modo interno. Apesar de ambos controladores apresentarem um desempenho satisfatório, eles são difíceis de serem implementados devido a suas formulações intrínsecas.

25                   Sendo assim, é interessante que o estado da técnica disponha de um sistema de controle *deadbeat* codificado sem fio de potências utilizando codificação LDPC, e seu uso em um gerador de indução duplamente alimentado voltado à geração eólica para aplicações em redes inteligentes.

#### **Breve descrição das figuras e anexos**

30                   O invento passará a ser descrito a seguir com referência aos desenhos apensos, nos quais:

A Figura 1 apresenta um diagrama do sistema de controle sem fio de centrais remotas de geração de energia com aplicação em rede inteligente. O sistema é composto por um sistema de geração de energia (1), um sistema de comunicação sem fio (2) que integra, adicionalmente, um conjunto de antenas de transmissão (2.1) e recepção (2.3) e o canal de radiopropagação (2.2), e uma central remota de comando (3) com conexão para rede inteligente (4).

A Figura 2 apresenta um diagrama mais detalhado do sistema de comunicação sem fio (2) para controle de centrais remotas de geração de energia através de um canal de radiopropagação (2.2). A etapa de transmissão deste sistema, implementada na central remota de comando, é composta por um conjunto de conversores analógico-digitais e um multiplexador (5), um codificador de canal LDPC (6), um entrelaçador em bloco (7), um modulador digital empregando um esquema QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*) (8) e uma antena de transmissão (2.1). A etapa de recepção, implementada no sistema de geração de energia, é composta por uma antena de recepção (2.3), um demodulador digital QPSK (9), um desentrelaçador em bloco (10), um decodificador de canal (11) e um demultiplexador e um conjunto de conversores digital-analógicos (12).

A Figura 3 apresenta um diagrama do sistema controlador de potências do GIDA. Ele é composto por um bloco integrador de velocidade elétrica de rotor (13), um estimador de fluxo de estator (14), um controlador de potências *deadbeat*, cuja função é calcular a tensão a ser aplicada aos terminais do rotor do gerador para que as referências das potências sejam atendidas (15), a rede elétrica (16), um gerador de indução duplamente alimentado (17) e um conversor eletrônico de potência (18). Os terminais do estator são conectados diretamente à rede elétrica e o rotor é conectado a rede elétrica através de conversores eletrônicos de potência.

Breve descrição da invenção

O presente pedido de patente de invenção refere-se a um sistema de controle sem fio de potências elétricas para aplicação em redes inteligentes,

compreendendo: um sistema de geração de energia, um sistema de comunicação sem fio e uma central remota de comando com conexão para rede inteligente. O sistema proposto faz a comunicação entre o gerador de energia e a central remota de comando através de um sistema de comunicação sem fio, sem a necessidade de cabos, como é feito hoje em dia. Durante a transmissão pelo canal de radiopropagação podem ocorrer erros fazendo com que o sistema não opere de forma adequada, pois o sistema de geração de energia pode gerar um valor de potência elétrica que não está de acordo com o valor enviado pela rede inteligente à central de remota de comando. Neste contexto, um dos objetivos desta invenção é também minimizar a ocorrência de erros na informação de referência recebida no sistema de geração de energia e garantir seu perfeito funcionamento.

Adicionalmente, a invenção trata de um sistema de controle sem fio de potências elétricas para aplicação em geradores de energia eólica duplamente alimentados, contendo um sistema de controle *deadbeat* codificado sem fio de potências para aplicação em redes inteligentes.

#### **Descrição detalhada da invenção**

Refere-se o presente pedido de patente de invenção a um sistema de controle sem fio de potências elétricas para aplicação em redes inteligentes. A invenção também se refere a um novo sistema de controle *deadbeat* codificado sem fio para um GIDA empregado na geração eólica para aplicações em redes inteligentes.

#### **Sistema de controle sem fio de potências elétricas para aplicação em redes inteligentes**

O sistema de controle sem fio de potências elétricas compreende:

- a) um sistema de geração de energia,
- b) um sistema de comunicação sem fio,
- c) uma central remota de comando com conexão para rede inteligente.

O sistema de comunicação sem fio envolve todos os equipamentos relacionados à transmissão por radiopropagação da informação de controle da central remota de comando ao sistema de geração de energia,

sem a necessidade do uso de cabeamento, de forma robusta e resistente a ruídos e interferências. Para a correta operação, este sistema engloba, adicionalmente, diversas etapas como sincronismo de portadora, quadro e símbolo, amplificação do sinal, controle automático de ganho, modulação e demodulação digital, codificação e decodificação de canal e outras operações  
5 necessárias para conformação do sinal a ser transmitido.

O sistema de comunicação sem fio é compreendido por:

- a) um conjunto de conversores analógico-digitais,
- b) um multiplexador de sinais digitais,
- 10 c) um codificador de canal LDPC,
- d) um entrelaçador em bloco,
- e) um modulador digital QPSK,
- f) um demodulador digital QPSK,
- g) um desentrelaçador em bloco,
- 15 h) um decodificador de canal,
- i) um demultiplexador de sinais digitais,
- j) um conjunto de conversores digital-analógicos, e
- k) meios para transmissão e recepção dos sinais.

O sistema de geração de energia compreende o conjunto de  
20 equipamentos responsáveis pela geração de energia elétrica a partir de outra fonte de energia que não seja elétrica. As fontes de energia podem ser do tipo solar, eólica, hidráulica ou biomassa. No caso do uso da energia hidráulica ou eólica, o sistema de geração será composto pelo gerador, que é a máquina que fará a conversão da potência mecânica em elétrica, e o sistema que acionará a  
25 máquina que operará como gerador, neste caso, hidráulica ou eólica.

A central remota de comando consiste no local responsável pela interação entre o sistema de rede inteligente e os sistemas de geração de energia elétrica. Ela tem por finalidade enviar os sinais de referência de potência para os sistemas de geração de energia elétrica. Ela também pode  
30 monitorar as variáveis relacionadas aos sistemas de geração de energia, neste caso, velocidade do vento nos aerogeradores, incidência solar em painéis

solares, os valores das potências ativa, reativa e aparente geradas pelos sistemas de geração e o fator de potência do mesmo.

A aquisição das referências das potências ativa e reativa,  $P_{ref}$  e  $Q_{ref}$ , respectivamente, são feitas através da rede inteligente. Em seguida, são aplicadas as técnicas de codificação e modulação para a transmissão das informações de referência pelo canal de radiopropagação até o sistema de geração de energia.

Como os sinais transmitidos podem sofrer erros devido aos efeitos degradantes do canal de radiopropagação, será adotada a notação  $\hat{P}_{ref}$  e  $\hat{Q}_{ref}$  para representar as informações de referência das potências recebidas no sistema de geração de energia.

Os erros causados pelo canal podem fazer com que o sistema não opere de forma adequada, pois o sistema de geração de energia pode gerar um valor de potência elétrica que não está de acordo com o valor enviado pela rede inteligente à central de remota de comando. Com isto, a eficiência do sistema de geração de energia pode ser reduzida e, em alguns casos, o sistema pode inclusive não gerar energia elétrica e consumi-la do sistema elétrico. Outros problemas possíveis seriam a geração de componentes harmônicos indesejáveis e até a danificação dos conversores eletrônicos de potência responsáveis pelo processamento de energia do gerador para a rede elétrica.

Neste contexto, um dos objetivos desta invenção é minimizar a ocorrência de erros na informação de referência recebida no sistema de geração de energia e garantir seu perfeito funcionamento.

Para o sistema sem fio proposto, a central remota de comando deve possuir um conjunto de conversores analógico-digitais, um multiplexador de sinais digitais, um codificador de canal LDPC, um entrelaçador em bloco, um modulador digital QPSK e uma antena de transmissão, que serão responsáveis pela codificação e transmissão das referências das potências ativa e reativa provenientes da rede inteligente.



na qual  $N_c$  é a quantidade de *bits* de código e  $N_m$  é a quantidade de *bits* de paridade.

Dado a restrição imposta sobre a matriz  $\mathbf{H}$ , a codificação depende de  $\mathbf{H}_1^T$  e  $\mathbf{H}_2^T$  e a matriz de geração pode ser expressa na forma sistemática  
5 pela seguinte matriz ( $N_b$ ) x ( $N_c$ ):

$$\mathbf{G} = [\mathbf{I} \ \Psi]$$

na qual  $N_b$  é o número total de bits de informação de controle transmitido,  $\Psi = \mathbf{H}_1^T \cdot \mathbf{H}_2^T$  e  $\mathbf{H}_2^T$  é a matriz triangular superior dada por:

$$\mathbf{H}_2^{-T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ & & 1 & & 1 & 1 \\ & & & \ddots & \vdots & \vdots \\ & & & & 1 & 1 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

10 O processo de codificação pode ser realizado multiplicando, primeiramente, o vetor de informação de controle  $\mathbf{q}_b = [q_b(1) \dots q_b(N_b)]^T$  pela matriz esparsa  $\mathbf{H}_1^T$  e, em seguida, codificando diferencialmente este resultado parcial para obter os *bits* de paridade.

O vetor de palavras de código sistemáticas  $\mathbf{q}_c = [q_c(1) \dots q_c(N_c)]^T$   
15 pode ser obtido simplesmente combinando as informações de controle e os *bits* de paridade:

$$\mathbf{q}_c = [\mathbf{q}_b \ \Psi]$$

No processo de transmissão, o vetor de palavras de código é, primeiramente, entrelaçado e, em seguida, modulado em QPSK empregando  
20 codificação *Gray*, resultando no vetor de símbolos  $\mathbf{s} = [s(1) \dots s(N_s)]^T$  na qual  $N_s$  é o número de símbolos de controle codificados transmitido. Ao final, os símbolos codificados são filtrados, transladados em frequência e transmitidos através do canal de radiopropagação.

Assumindo que as variações do canal são lentas o suficiente para que a interferência intersimbólica (ISI) possa ser desprezada, o canal com desvanecimento pode ser considerado como uma sequência de variáveis aleatórias Gaussianas complexas de média zero e com a modelagem da função de autocorrelação decorrente de uma dispersão isotrópica (Barbieri et al., 2007):

$$R_h(\tau) = J_0(2\pi f_D T_s \tau)$$

na qual  $J_0$  é a função de Bessel de ordem zero,  $T_s$  é o tempo de símbolo e  $f_D$  é o espalhamento Doppler.

Assim, no processo de recepção, o sinal recebido passa-baixas complexo equivalente pode ser representado por:

$$\mathbf{r} = \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n}$$

na qual  $\mathbf{r} = [r(1) \dots r(N_s)]^T$  é o vetor do sinal recebido,  $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma(1) \dots \gamma(N_s)]^T$  é o vetor de coeficientes complexos relacionados ao canal com desvanecimento variante no tempo e  $\mathbf{n} = [n(1) \dots n(N_s)]^T$  é um vetor de AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Note que a multiplicação vetorial apresentada é realizada elemento a elemento.

Uma vez recuperado o vetor transmitido  $\mathbf{s}$  no receptor, considerando uma perfeita estimativa do canal de radiopropagação, torna-se possível obter os bits de controle transmitidos através da demodulação dos símbolos recebidos, desentrelaçamento dos *bits* de código e, finalmente, decodificação dos *bits* de informação.

A decodificação dos *bits* pode ser realizada por um processo iterativo de passagem de mensagens baseado no critério Maximum a Posteriori (MAP):

$$\hat{\mathbf{q}}_c = \arg \max_{\mathbf{q}_c \in \{1,0\}} p(\mathbf{d} | \mathbf{q}_c) \cdot p(\mathbf{q}_c)$$

na qual  $\mathbf{d}$  é o vetor de *bits* codificados resultante dos processos de demodulação e desentrelaçamento.

O algoritmo de passagem de mensagens, também conhecido como *Belief Propagation* quando as mensagens são representadas por probabilidades, troca a informação suave, de forma iterativa, entre os nós de variáveis e de cheque. A atualização dos nós pode ser feita atualizando, primeiramente, os nós de variáveis e, em seguida, os nós de cheque.

A troca de mensagens pode ser representada pela seguinte LLR (*Log-Likelihood Ratio*):

$$L_{c_k} = \log \left[ \frac{p(\mathbf{q}_c(k) = 0 | \mathbf{d})}{p(\mathbf{q}_c(k) = 1 | \mathbf{d})} \right]$$

A mensagem LLR do j-ésimo nó de cheque para o k-ésimo nó de variável é dada por:

$$L_{r_{j,k}} = 2 \operatorname{atanh} \left[ \prod_{k' \in V_{j \setminus k}} \tanh \left( \frac{L_{q_{k',j}}}{2} \right) \right]$$

O conjunto  $V_i$  contém todos os nós de variáveis conectados aos j-ésimo nó de cheque e o conjunto  $C_k$  contém todos os nós de cheque conectados ao k-ésimo nó de variável. O subconjunto  $V_{jk}$  é o conjunto  $V_i$  sem os k-ésimos membros, e o subconjunto  $C_{kj}$  é o conjunto  $V_j$  sem os j-ésimos membros.

A mensagem LLR do k-ésimo nó de variável para o j-ésimo nó de cheque pode ser representada por:

$$L_{q_{k,j}} = L_{c_k} + \sum_{j' \in C_{k \setminus j}} L_{r_{j',k}}$$

20

e a mensagem LLR para o k-ésimo bit de código é dada por:

$$L_{Q_k} = L_{c_k} + \sum_{j \in C_k} L_{r_{j,k}}$$

Ao final de cada iteração, a mensagem  $L_{Qk}$  fornece uma estimativa atualizada da LLR *A Posterior* do *bit* de código transmitido  $q_c(k)$ . Se  $L_{Qk} > 0$ , então  $q_c(k) = 1$ , caso contrário,  $q_c(k) = 0$ .

#### Sistema controlador de potências do GIDA

5                   É um objeto adicional desta invenção um sistema controlador de potências para um gerador de energia eólica de indução duplamente alimentado (GIDA). Este sistema faz parte de um sistema de geração de energia eólica e tem como finalidade controlar as potências ativa e reativa do GIDA.

10                   O sistema controlador de potências do GIDA é composto por:

a) Bloco integrador, que tem como finalidade integrar a velocidade elétrica do rotor

b) Estimador de fluxo do estator, que tem como finalidade a aquisição dos sinais de tensão e corrente do estator, e a partir destes dados fazer a

15                   transformação do sistema de coordenadas trifásico abc para o sistema de coordenadas bifásico  $\alpha\beta$  estacionário e obter a posição espacial do fluxo do estator e a magnitude do vetor fluxo do estator,

c) Controlador de potências *deadbeat*, que tem como finalidade calcular a tensão a ser aplicada aos terminais do rotor do gerador de forma que as

20                   referências das potências sejam atendidas,

d) Rede elétrica,

e) Gerador de indução duplamente alimentado,

f) Conversor eletrônico de potência.

25                   Os terminais do estator são conectados diretamente à rede elétrica e o rotor é conectado a rede elétrica através de conversores eletrônicos de potência, como mostra a Figura 3.

O GIDA no referencial síncrono pode ser representado por:

$$\vec{v}_{1dq} = R_1 \vec{i}_{1dq} + \frac{d\vec{\lambda}_{1dq}}{dt} + j\omega_1 \vec{\lambda}_{1dq}$$

$$\vec{v}_{2dq} = R_2 \vec{i}_{2dq} + \frac{d\vec{\lambda}_{2dq}}{dt} + j(\omega_1 - B\omega_r) \vec{\lambda}_{2dq}$$

onde  $\vec{v}$ ,  $\vec{i}$ ,  $\vec{\lambda}$  são, respectivamente, os vetores espaciais de tensão, corrente e fluxo, R é a resistência do enrolamento, L é a indutância do enrolamento, B é o número de pares de pólos,  $\omega_1$  é a velocidade síncrona,  $\omega_r$  é a velocidade de rotor e os subscritos 1 e 2 são, respectivamente, referências ao estator e ao rotor.

As potências ativa e reativa podem ser obtidas por:

$$P = \frac{3}{2} (v_{1d}i_{1d} + v_{1q}i_{1q})$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_{1q}i_{1d} - v_{1d}i_{1q})$$

10 Utilizando a técnica de orientação pelo fluxo de estator, que desacopla as componentes d e q, as relações entre as correntes de estator e rotor se tornam:

$$i_{1d} = \frac{\lambda_1}{L_1} - \frac{L_M}{L_1} i_{2d}$$

$$i_{1q} = -\frac{L_M}{L_1} i_{2q}$$

15 onde  $L_M$  é a indutância mútua.

Sendo assim, as potências ativa e reativa serão:

$$P = -\frac{3}{2} v_1 \frac{L_M}{L_1} i_{2q}$$

$$Q = \frac{3}{2} v_1 \left( \frac{\lambda_1}{L_1} - \frac{L_M}{L_1} i_{2d} \right)$$

20 Estas equações mostram que o sistema pode prover controle das potências ativa e reativa de forma independente pela alteração da corrente de rotor. A proposta do controle de potências *deadbeat*, mostrada na Figura 3,

considera justamente essa relação. Consequentemente, o controle das potências ativa e reativa de estator pode ser realizado por meio do controle da corrente de rotor do GIDA com o seu estator conectado diretamente a rede elétrica.

5 As equações discretizadas das correntes de rotor no referencial síncrono operando com um tempo de amostragem  $T$ , considerando a posição do fluxo de estator no instante  $(k+1)T$  e podem ser representadas (Filho e Ruppert, 2010) por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{2d}(k+1) \\ i_{2q}(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_2 T}{\sigma L_2} & \frac{\omega_{sl} T}{\sigma} \\ \frac{-\omega_{sl} T}{\sigma} & 1 - \frac{R_2 T}{\sigma L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2d}(k) \\ i_{2q}(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{T}{\sigma L_2} & 0 \\ 0 & \frac{T}{\sigma L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{2d}(k) \\ v_{2q}(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_{sl} L_M T}{\sigma L_2} \\ \frac{-\omega_{sl} L_M T}{\sigma L_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d}(k) \\ i_{1q}(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

10 nas quais  $\omega_{sl} = \omega_1 - B\omega_r$ , é a frequência de escorregamento e  $\sigma = 1 - L_M^2 / (L_1 L_2)$  é o fator de dispersão global.

A tensão de rotor, que é calculada para garantir um erro de regime permanente nulo com o emprego da técnica de controle, é dada por:

$$\begin{aligned} v_{2d}(k) &= \sigma L_2 \frac{i_{2d}(k+1) - i_{2d}(k)}{T} + R_2 i_{2d}(k) + \\ &\quad - L_2 \omega_{sl} i_{2q}(k) - L_M \omega_{sl} i_{1q}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v_{2q}(k) &= \sigma L_2 \frac{i_{2q}(k+1) - i_{2q}(k)}{T} + R_2 i_{2q}(k) + \\ &\quad + L_2 \omega_{sl} i_{2d}(k) + L_M \omega_{sl} i_{1d}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

15

Para o controle da potência ativa, a referência da corrente de rotor do eixo em quadratura  $i_{2q}$  é dada por:

$$i_{2q}(k+1) = i_{2q_{ref}} = -\frac{2P_{ref}L_1}{3v_1L_M}$$

e para o controle da potência reativa, a referência da corrente de rotor do eixo direto  $i_{2d}$ , é dada por:

$$i_{2d}(k+1) = i_{2d_{ref}} = -\frac{2Q_{ref}L_1}{3v_1L_M} + \frac{\lambda_1}{L_M}$$

- 5 nas quais  $P_{ref}$  é a referência da potência ativa e  $Q_{ref}$  é a referência da potência reativa.

Assim, se as componentes d e q de tensão calculadas pelas equações acima forem aplicadas ao rotor do gerador, então a convergência das potências ativa e reativa para seus respectivos valores de comando irão  
10 ocorrer em alguns intervalos de amostragem. A tensão de rotor desejada no referencial do rotor  $\delta_s-\delta_r$  gera os sinais de chaveamento para conversor conectado ao rotor com emprego da modulação de vetores espaciais.

O controlador de potências *deadbeat* tem a finalidade de executar as seguintes etapas:

- 15 a) Fazer a aquisição dos sinais de tensão, corrente, velocidade do rotor potências ativa e reativa, fluxo magnético e a posição espacial do fluxo magnético do estator.
- b) Transformar os dados do sistema de coordenadas trifásico abc para o sistema de coordenadas bifásico  $\alpha\beta$  estacionário e depois para o dq com  
20 o emprego da posição espacial do fluxo do estator  $\delta_s$ ,
- c) Fazer a aquisição dos sinais de corrente do rotor,
- d) Transformar o sistema de coordenadas trifásico abc do rotor para o sistema de coordenadas síncrono dq através da posição espacial do fluxo do estator  $\delta_s$  e da posição do rotor  $\delta_r$
- 25 e) Calcular as tensões do rotor através das equações 1 e 2,
- f) Transformar as tensões do rotor do referencial síncrono dq para o referencial do rotor ( $\alpha\beta r$ ),

- g) Calcular os tempos de chaveamento para acionar o conversor a partir de uma técnica de modulação por largura de pulso.

#### Estimador do fluxo do estator

Para o controle de potências *deadbeat*, é necessário calcular os valores das potências ativa e reativa, seus erros, a magnitude e posição do fluxo de estator, a velocidade de escorregamento e a frequência síncrona de operação.

A estimação do fluxo de estator  $\vec{\lambda}_{1\alpha\beta}$  no referencial estacionário é dada por:

$$\vec{\lambda}_{1\alpha\beta} = \int \left( \vec{v}_{1\alpha\beta} - R_1 \vec{i}_{1\alpha\beta} \right) dt \quad (3)$$

Esta expressão pode ser implementada de forma a permitir a estimação do fluxo de estator, mesmo quando a máquina operar em baixas velocidades num sistema de controle direto de torque para motor de indução, como apresentado em Filho e Filho (2009).

A posição do fluxo de estator utilizando a como:

$$\delta_s = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\lambda_{1\beta}}{\lambda_{1\alpha}} \right) \quad (4)$$

A estimação da velocidade síncrona  $\omega_1$  é dada por:

$$\omega_1 = \frac{d\delta_s}{dt} = \frac{(v_{1\beta} - R_1 i_{1\beta}) \lambda_{1\alpha} - (v_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha}) \lambda_{1\beta}}{(\lambda_{1\alpha})^2 + (\lambda_{1\beta})^2} \quad (5)$$

e a estimação da velocidade de escorregamento utilizando a velocidade do rotor e a velocidade síncrona é dada por:

$$\omega_{sl} = \omega_1 - B\omega_{mec}$$

enquanto a posição do rotor no referencial do rotor é dado por:

$$\delta_s - \delta_r = \int \omega_{sl} dt$$

Sendo assim, o estimador de fluxo magnético é responsável por realizar as seguintes etapas:

- 5 a) Fazer a aquisição dos sinais de tensão e corrente do estator,
- b) Transformar os sistemas de coordenadas trifásico abc para o sistema de coordenadas estacionário  $\alpha\beta$ ,
- c) Calcular fluxo do estator, sua posição, e a velocidade síncrona de acordo com as equações 3, 4 e 5 respectivamente.

### Referências

- 10 (Blau, 2010) - J. Blau, "Europe plans a north sea grid," IEEE Spectrum, pp. 08–09, March (2010).  
Filho and Filho (2009) – Filho, A. J. S. and Filho, E. R.. "The complex controller for three-phase induction motor direct torque control", SBA Controle e automação. vol. 20, pp. 256-262 (2009).
- 15 (Glinkowski et al., 2011) - Glinkowski, M., Hou, J. and Rackliffe, G., "Advances in wind energy technologies in the context of smart grid", Proceedings of the IEEE 99: 1083-1097 (2011).  
Tanner (1981) - R. M. Tanner, "A recursive approach to low complexity codes," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 27, no. 5, pp. 533–547, (1981).
- 20 Wang et al., (2011) - Wang, J., DU, X. and Zhang, X.. "Comparison of wind power generation interconnection technology standards", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (2011).  
Xiwen et al., 2010 - Xiwen, W., Xiaoyan, Q., X. and Xingyuan, L., "Reactive power optimization in smart grid with wind power generator", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (2010).
- 25

## REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de controle sem fio de potências elétricas para aplicação em redes  
5 inteligentes **caracterizado por** compreender:
- a) um sistema de geração de energia;
  - b) um sistema de comunicação sem fio, e
  - c) uma central remota de comando com conexão para rede inteligente.
2. Sistema, de acordo com a reivindicação 1 **caracterizado pelo** fato do  
10 sistema de geração de energia poder ser eólico, solar, hidráulico e/ou  
biomassa.
3. Sistema, de acordo com a reivindicação 2 **caracterizado pelo** sistema de  
geração de energia ser eólico e compreender adicionalmente um sistema  
controlador de potências *deadbeat* para um gerador de indução duplamente  
15 alimentado.
4. Sistema de acordo com a reivindicação 3 **caracterizado pelo** dito sistema  
controlador de potências compreender:
- a) um bloco integrador;
  - b) um estimador de fluxo do estator;
  - 20 c) um controlador de potências *deadbeat*;
  - d) uma rede elétrica;
  - e) um gerador de indução duplamente alimentado, e
  - f) um conversor eletrônico de potência.
5. Sistema de acordo com a reivindicação 4 **caracterizado pelo** estimador de  
25 fluxo do estator ser responsável por realizar as seguintes etapas:
- a) Fazer a aquisição dos sinais de tensão e corrente do estator;
  - b) Transformar os sistemas de coordenadas trifásico abc para o sistema de  
coordenadas estacionário  $\alpha\beta$ , e
  - c) Calcular fluxo do estator, sua posição, e a velocidade síncrona.
- 30 6. Sistema de acordo com a reivindicação 5 **caracterizado pelo** fato da etapa  
(c) ser realizada de acordo com as equações 3, 4 e 5 respectivamente.

7. Sistema de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelo** controlador de potências *deadbeat* realizar as seguintes etapas:
- a) fazer a aquisição dos sinais de tensão, corrente, velocidade do rotor potências ativa e reativa, fluxo magnético e a posição espacial do fluxo magnético do estator;
  - 5 b) transformar os dados do sistema de coordenadas trifásico abc para o sistema de coordenadas bifásico  $\alpha\beta$  estacionário;
  - c) fazer a aquisição dos sinais de corrente do rotor;
  - d) transformar o sistema de coordenadas trifásico abc do rotor para o sistema de coordenadas síncrono dq através da posição espacial do fluxo do estator  $\delta_s$ ; e posição do rotor  $\delta_r$ ;
  - 10 e) calcular as tensões do rotor.
  - f) transformar as tensões do rotor do referencial síncrono dq para o referencial do rotor ( $\alpha\beta_r$ ),
  - 15 g) calcular os tempos de chaveamento para acionar o conversor
8. Sistema de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo** fato da etapa (e) calcular as tensões do rotor a partir das equações 1 e 2.
9. Sistema de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo** fato da etapa (g) calcular os tempos de chaveamento para acionar o conversor a partir de uma técnica de modulação por largura de pulso.
- 20 10. Sistema, de acordo com a reivindicação 1 **caracterizado pelo** sistema de comunicação sem fio compreender:
- a) um conjunto de conversores analógico-digitais,
  - b) um multiplexador de sinais digitais,
  - 25 c) um codificador de canal LDPC,
  - d) um entrelaçador em bloco,
  - e) um modulador digital QPSK,
  - f) um demodulador digital QPSK,
  - g) um desentrelaçador em bloco,
  - 30 h) um decodificador de canal,
  - i) um demultiplexador de sinais digitais, e

j) um conjunto de conversores digital-analógicos,

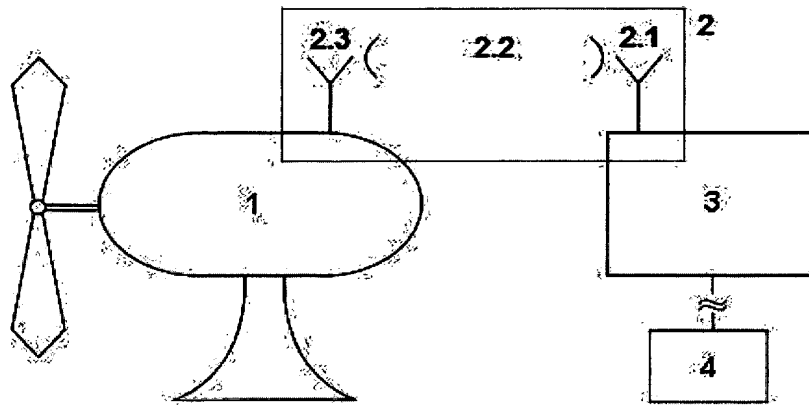


Figura 1

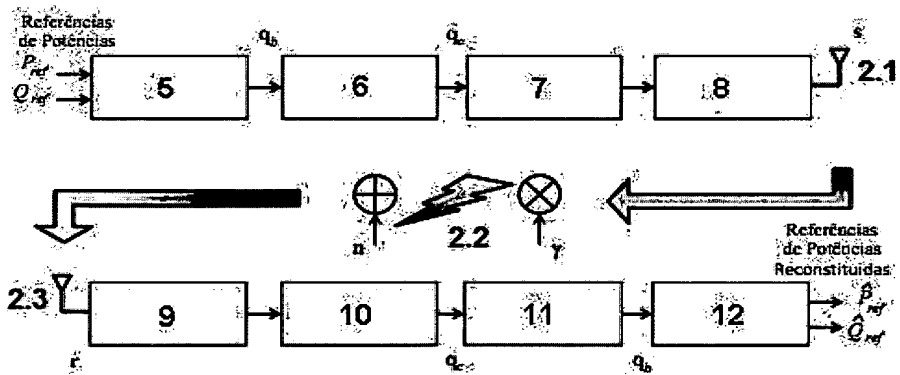


Figura 2

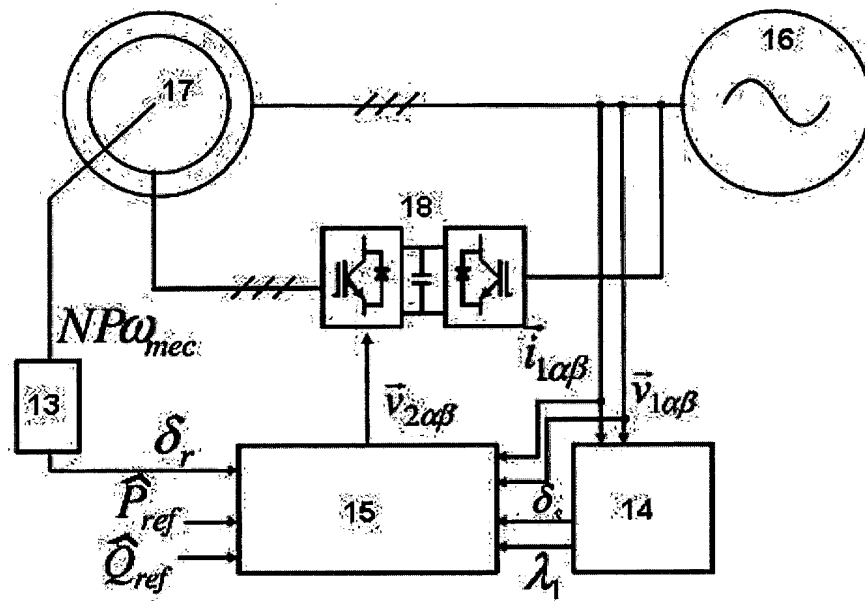


Figura 3

**RESUMO**

**SISTEMA DE CONTROLE SEM FIO DE POTÊNCIAS ELÉTRICAS PARA  
APLICAÇÃO EM REDES INTELIGENTES**

O presente pedido de patente de invenção refere-se a um sistema  
5 de controle sem fio de potências elétricas para aplicação em redes inteligentes.  
Adicionalmente, a invenção trata de um sistema contendo um sistema de  
controle *deadbeat* codificado sem fio de potências para aplicação em redes  
inteligentes e sua aplicação em um gerador de indução duplamente alimentado  
voltado à geração de energia eólica.