



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

(11) PI 0403798-7 B1

(22) Data do Depósito: 02/09/2004

(45) Data de Concessão: 14/03/2017



(54) Título: SISTEMA DE CONTROLE DE TENSÃO EM GERADOR EÓLICO

(51) Int.Cl.: F03D 9/00; H02P 9/04

(30) Prioridade Unionista: 03/09/2003 US 10/655,514

(73) Titular(es): GENERAL ELECTRIC COMPANY

(72) Inventor(es): EINAR V. LARSEN

SISTEMA DE CONTROLE DE TENSÃO EM GERADOR EÓLICO

CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A invenção se refere a geradores de turbina eólica. Mais em particular, a invenção se refere a sistemas e técnicas de controle da tensão para uso em geradores a turbina eólica apresentando um controle contínuo da potência reativa para pelo menos parte da função de compensação da potência reativa.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

[002] A geração de energia eólica é tipicamente fornecida por um parque eólico com um grande número (geralmente 100 ou mais) de geradores a turbina eólica. Os geradores individuais a turbina eólica podem fornecer importantes benefícios a operação do sistema energético. Estes benefícios estão relacionados com a eliminação da oscilação da tensão causada por rajadas de vento e a eliminação das derivações da tensão causadas por eventos externos.

[003] Em um conjunto de um parque eólico, cada gerador a turbina eólica pode experimentar uma força única do vento. Portanto, cada gerador a turbina eólica pode incluir um controlador local para controlar a resposta às rajadas de vento e aos eventos externos. O controle das fazendas de vento do estado da arte tem sido baseado em uma dentre duas arquiteturas: controle local com fator de potência constante e controle do nível do parque em um controle rápido da tensão, ou controle local em um controle constante de tensão sem um controle do nível do parque.

[004] Ambas as arquiteturas de controle do estado da arte apresentam desvantagens. O controle local com o fator de potência constante e com o controle do nível do parque em um controle rápido da tensão necessita comunicações rápidas com uma ação agressiva por parte do nível do parque em relação ao nível local. Se o controle do nível do parque está inativo, o

controle local pode agravar a oscilação da tensão. Com um controle constante da tensão em cada gerador, a operação em estado estável varia significativamente a partir de pequenos desvios na carga da rede de transmissão. Isto faz com que os geradores a turbina eólica encontrem limites na operação em estado estável o que evita uma resposta aos distúrbios - resultando em uma perda na regulação da tensão. Uma vez que a corrente reativa é maior que a necessária durante este modo de operação, a eficiência total do gerador a turbina eólica decai.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[005] A invenção é ilustrada a título de exemplo, e não a título de limitação, pelas figuras que acompanham os desenhos, nas quais os números de referência iguais se referem a elementos similares:

- a figura 1 é um diagrama de bloco de um parque eólico apresentando vários geradores a turbina eólica acoplados a uma rede de transmissão;

- a figura 2 é um diagrama de controle de uma forma de realização de um sistema de controle de gerador a turbina eólica;

- a figura 3 é um diagrama de fluxo de uma forma de realização da operação de um sistema de controle a turbina eólica;

- a figura 4 é um conjunto de exemplo das formas de onda correspondentes a um controle local do estado da arte com um fator de potência constante sem o controle de nível do parque;

- a figura 5 é um conjunto de exemplo das formas de onda correspondentes a um controle local do estado da arte com um fator de potência constante e controle de nível do parque eólico em controle rápido da tensão;

- a figura 6 é um conjunto de exemplo das formas de onda correspondentes a um controle local de um gerador a turbina eólica

apresentando um controlador conforme descrito na figura 2, sem um controle de nível do parque eólico; e

- a figura 7 é um conjunto de exemplo das formas de onda correspondentes a um controle local de um gerador a turbina eólica apresentando um controlador conforme descrito na figura 2, com um controle de nível do parque eólico.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[006] Um sistema de controle para um gerador a turbina eólica inclui uma regulação da tensão relativamente rápida para os geradores individuais com uma regulação da potência reativa total relativamente mais lenta em uma sub-estação ou nível do parque eólico. O regulador da potência reativa relativamente lento ajusta o ponto de ajuste do regulador de tensão relativamente rápido. A regulação de tensão relativamente rápida pode ser nos terminais do gerador ou em um ponto remoto sintetizado (por exemplo, entre os terminais do gerador e o barramento do coletor). Os controladores de potência reativa do estado da arte são elaborados com constantes de tempo de valores numéricos menores que aqueles usados nos desenhos dos reguladores de tensão. Isto é, no estado da arte, o ciclo de controle da potência reativa esta dentro do ciclo de controle da tensão, o que resulta em um sistema menos estável que o ora descrito.

[007] A figura 1 é um diagrama de bloco de um parque eólico apresentando vários geradores a turbina eólica acoplados com a rede de transmissão. A figura 1 ilustra somente três geradores eólicos; contudo, qualquer número de geradores eólicos pode ser incluído em um parque eólico.

[008] Cada gerador a turbina eólica 110 inclui um controlador local o qual é responsável pelas condições do gerador a turbina eólica que está sendo controlado. Em uma forma de realização, o controlador de cada gerador a turbina eólica detecta somente a tensão e a corrente nos terminais (através

dos transformadores de potencial e de corrente). A tensão e a corrente detectadas são empregadas pelo controlador local para fornecer uma resposta apropriada para fazer com que o gerador a turbina eólica forneça a tensão e a potência reativa desejadas. Um diagrama do sistema de controle correspondendo a uma forma de realização de um controlador do gerador a turbina eólica é descrito em maiores detalhes abaixo, com relação à figura 2.

[009] Cada gerador a turbina eólica 110 é acoplado ao barramento do coletor 120 através dos transformadores de conexão do gerador 115 para fornecer as potências real e reativa (indicadas por P_{wg} e Q_{wg} , respectivamente) para o barramento do coletor 120. Os transformadores de conexão do gerador e os barramentos do coletor são conhecidos da arte.

[010] O parque eólico 100 fornece as saídas de potência real e reativa (indicadas por P_{wf} e Q_{wf} , respectivamente) através do transformadore principal 130 do parque eólico. O controlador de nível do parque 150 detecta a saída do parque eólico assim como a tensão no ponto de acoplamento comum 140 para fornecer um comando da potência reativa de nível do parque (nível do parque Q_{Cmd}) 155. Em uma forma de realização, o controlador de nível do parque 150 fornece um comando de potência reativa simples para todos os geradores a turbina eólica do parque eólico 100. Em formas alternativas de realização, o controlador do nível do parque 150 fornece comandos múltiplos para os subconjuntos dos geradores a turbina eólica do parque eólico 100. Os comandos para os subconjuntos dos geradores a turbina eólica podem estar baseados em, por exemplo, informações adicionais relacionadas com as condições operacionais de um ou mais dos geradores a turbina eólica.

[011] O sistema de controle da figura 2 fornece uma estrutura de controle incrementada envolvendo tanto o controle do nível do parque local ou do nível do parque para superar as desvantagens das arquiteturas de controle do estado da arte supra descritas. O sistema de controle da figura 2 elimina a

necessidade de um controle agressivo e rápido do nível do parque eólico. Uma resposta incrementada é fornecida se o controle do nível do parque está fora de serviço. Ainda mais, uma operação em estado estável eficiente é atingida, quando a resposta dinâmica permanece bem dentro dos limites ajustados.

[012] A figura 2 é um diagrama do sistema de controle correspondente a uma forma de realização de um sistema de controle para um gerador a turbina eólica. Em uma forma de realização, o sistema de controle para um gerador a turbina eólica em geral inclui dois ciclos ou loops: o ciclo do regulador de tensão e o ciclo do regulador Q. O ciclo do regulador de tensão opera relativamente rápido (p. ex. 20 rad/s) quando comparado com o ciclo do regulador Q (p. ex. com uma constante de tempo em ciclo fechado maior que 1 segundo). O regulador Q ajusta o ponto de ajuste do regulador de tensão.

[013] De forma conceitual, o sistema de controle da figura 2 fornece para um gerador a turbina eólica um controle da tensão no terminal através da regulagem da tensão de acordo com um ponto de referência através de um controlador do gerador de nível maior (p. ex. uma sub-estação, um parque eólico). A potência reativa é regulada por um longo tempo (p. ex. vários segundos) enquanto que a tensão nos terminais do gerador a turbina eólica é regulada por um tempo menor (p. ex. menor que alguns segundos) para evitar os efeitos das transições rápidas da rede.

[014] O comando Q 200 do operador ou do nível do parque é um sinal que indica a potência reativa necessária nos terminais do gerador. Em operações no nível do parque, o comando Q do gerador a turbina eólica é ajustado igual à saída do controle do nível do parque (linha 155 na figura 1). Em um controle local, o comando do operador é ajustado manualmente, tanto no local do gerador eólico quanto em um local remoto. O comando Q 200 do operador ou do nível do parque pode ser gerado ou transmitido, por exemplo, por um sistema de computador usado para controlar o gerador a turbina eólica.

O comando Q 200 do operador ou do nível do parque pode também vir de um operador da rede de utilidade ou de uma sub-estação.

[015] Em uma forma de realização, o comando Q 200 do operador ou do nível do parque é transmitido para o limitador do comando 220, o qual opera para manter os comandos da potência reativa dentro de uma faixa 20 predeterminada. Qmax 222 e Qmin 224 indicam os limites superior e inferior da faixa de comando da potência reativa.

[016] Os valores específicos usados para Qmax e para Qmin são baseados, por exemplo, na capacidade reativa do gerador. Em uma forma de realização o valor de Qmax é 800 KVAR e o valor para Qmin é -1200 KVAR para um gerador a turbina eólica de 1,5 MW; contudo, os valores específicos são dependentes da capacidade do gerador que está sendo usado.

[017] A saída do sinal pelo limitador do comando 220 é o comando Q 230, o qual é um comando que indica a potência reativa alvo que deve ser produzida. O comando Q 230 está dentro da faixa entre Qmin 224 e Qmax 222. O comando Q 230 é comparado a um sinal indicativo da potência reativa medida 210. O sinal de erro resultante, erro Q 235, indica a diferença entre a potência reativa medida e a potência reativa comandada.

[018] O erro Q 235 é um sinal de entrada para o regulador Q 240, o qual gera o comando V 250, o qual indica ao gerador a potência reativa a ser fornecida pelo gerador. Em uma forma de realização, o regulador Q 240 é um controlador integral proporcional (PI) que apresenta uma constante de tempo em ciclo ou loop fechado dentro da faixa de 1 a 10 segundos (por exemplo, 3 segundos, 5 segundos, 5,5 segundos). Também podem ser empregados outros tipos de controladores, por exemplo, controladores derivativos proporcionais (PD), controladores derivativos integrais proporcionais (PID), controladores de estado de espaço, etc. Outras constantes de tempo podem ser usadas para o regulador Q 240 desde que a constante de tempo

para o regulador Q 240 seja numericamente maior que a constante de tempo para o regulador de tensão 270.

[019] O comando V 250 está limitado dentro de uma faixa determinada, entre V_{max} 242 e V_{min} 244. Em uma forma de realização, V_{max} 242 e V_{min} 244 são definidos em termos de porcentagem da saída nominal do gerador. Por exemplo, V_{max} 242 pode ser 105% da tensão nominal do gerador e V_{min} 244 pode ser 95% da tensão nominal do gerador. Podem ser usados limites alternativos.

[020] O comando V 250 é comparado a um sinal que indica a tensão medida nos terminais 255 para o gerador. A diferença entre o comando V 250 e a tensão medida nos terminais 255 é um sinal de erro da tensão 260. O sinal de erro da tensão 260 é o sinal de entrada para o regulador de tensão 270.

[021] O regulador de tensão 270 gera o comando da corrente do rotor 280, o qual é usado para controlar a corrente no rotor do gerador. Em uma forma de realização, o regulador Q 240 é um controlador PI o qual apresenta uma constante de tempo em ciclo fechado de aproximadamente 50 milissegundos. Podem ser usados outros tipos de controladores (p, ex. 1 segundo, 20 milissegundos, 75 milissegundos, 45 milissegundos) para o regulador de tensão 270 desde que a constante de tempo para o regulador de tensão 270 seja menor que a constante de tempo para o regulador Q 240.

[022] Em geral, existem dois componentes para o comando da corrente do rotor. Eles são o componente de potência real indicado por I_{rq}_Cmd e o componente de potência reativa indicado por I_{rd}_Cmd. O comando de corrente do rotor (240), gerado como descrito em relação à figura 2, é o componente reativo ou o comando I_{rd}_Cmd. O componente real ou I_{rq}_Cmd pode ser gerado de qualquer forma conhecida pela arte. O comando de corrente do rotor 280 está limitado entre I_{rdmax} 272 e I_{rdmin} 274. Os

valores para I_{rdmax} 272 e I_{rdmin} 274 podem estar baseados na corrente nominal do gerador. Por exemplo, I_{rdmax} 272 pode ser a corrente nominal de pico para o rotor do gerador e I_{rdmin} 274 pode ser uma porcentagem da corrente nominal de pico para o rotor do gerador. Podem ser empregados limites alternativos.

[023] Em uma forma de realização, todos os limites discutidos com relação à figura 2 não são limites definitivos; contudo, em formas alternativas de realização, um subconjunto dos limites pode ser de limites não definitivos. Os limites foram discutidos em termos de parâmetros fixos; contudo, parâmetros variáveis de forma dinâmica, por exemplo, por uma tabela de referência ou por um processador ou por uma máquina de estado executando um algoritmo de controle, podem gerar os limites. Um tal limite variável de forma dinâmica pode estar baseado na corrente nominal do gerador e em uma saída contemporânea da potência real.

[024] A figura 3 é um diagrama de fluxo de uma forma de realização da operação de um sistema de controle de um gerador. Um comando da potência reativa é recebido, 300. Como supracitado, o comando da potência reativa pode ser um comando do operador, um comando a nível do parque ou um comando local. O ajuste da tensão é determinado com base no comando da potência reativa, 305. O ajuste da tensão é limitado por uma faixa definida por limites superior e inferior os quais estão baseados na tensão nos terminais do gerador. Em uma forma de realização, os limites são definidos em termos de um percentual da saída nominal do gerador. Por exemplo, o limite superior pode ser de 105%, 110%, 102%, 115% da tensão nominal do gerador e o limite inferior pode ser de 95%, 98%, 92%, 90%, 97% da tensão nominal do gerador. Podem ser empregados limites alternativos.

[025] O comando da corrente do rotor para o gerador é determinado com base no ajuste da tensão, 315. O comando da corrente do

rotor é limitado, 320, dentro de uma faixa com base, por exemplo, na corrente nominal do gerador. Por exemplo, podem ser usadas as correntes nominais de pico para os limites, ou podem ser usados percentuais das correntes de pico nominais para os limites. O comando da corrente do rotor é transmitido para o controlador do rotor, 325. O controlador do rotor faz com que a corrente comandada seja fornecida ao rotor do gerador. O gerador então fornece uma saída de potência reativa com base na corrente do rotor fornecida, 330.

[026] As figuras 4 e 5 ilustram as características típicas do comportamento operacional do gerador a turbina eólica para os sistemas de controle do estado da arte. Estes gráficos mostram a resposta dos geradores a turbina eólica e da fazenda em sua totalidade com e sem o controle de tensão a nível do parque. Os geradores a turbina eólica individuais são operados com um controle constante do fator de potência com um ponto de ajuste para uma operação de rendimento sobre excitado (como poderia ser necessário para suportar o sistema de transmissão externo à fazenda externa). Nas figuras 4 e 5, as seguintes variáveis são mostradas, de cima para baixo (com referência à figura 1, para que se veja onde estas estão no parque eólico): P_{wg} é a potência real de um gerador a turbina eólica individual, Q_{wg} é a potência reativa do gerador, Q_{Cmd_Farm} é a saída do controlador a nível do parque (linha 155 na figura 1), V_{wg} é a tensão no terminal do gerador, V_{pcc} é a tensão no ponto de acoplamento comum (140 na figura 1). O objetivo é em geral de manter V_{pcc} em um valor constante mesmo quando a potência flutua devido a variações da velocidade do vento.

[027] A figura 4 é o estado da arte somente com controle local (isto é, Q_{Cmd_Farm} é constante). Note que o sinal V_{pcc} varia de forma considerável com as flutuações da potência P_{wg} , o que não é desejável. A figura 5 é o estado da arte com o controle a nível do parque ativado. Apesar de V_{pcc} ser muito mais estável que na figura 4, o sinal de controle do nível do

parque varia de forma considerável. Isto é devido ao fato que o controle a nível do parque deve superar os efeitos adversos inerentes do controle local do estado da arte.

[028] As figuras 6 e 7 são comparáveis às figuras 4 e 5, mas com o controle descrito na figura 2. A resposta inerente do controle local é em geral relativamente boa, de tal forma que o controle a nível do parque forneça somente um controle de equilíbrio. Assim, os objetivos de permitir que o controle a nível do parque seja menos agressivo e mais lento são atingidos com o novo controle.

[029] Qualquer referência no relatório a "uma forma de realização" significa que uma particular apresentação, estrutura ou característica descrita em conexão com a forma de realização está incluída em pelo menos uma forma de realização da presente invenção. As aparições da expressão "uma forma de realização" em vários locais no relatório não fazem necessariamente referência à mesma forma de realização.

[030] Na descrição supra, a invenção foi descrita com referência à formas específicas de realização desta. Contudo, é evidente que várias modificações e alterações podem ser feitas nesta sem escapar do espírito amplo e escopo da invenção. A descrição e os desenhos devem, desta forma, ser vistos em sentido ilustrativo ao invés de restritivo.

REIVINDICAÇÕES

1. SISTEMA DE CONTROLE DE TENSÃO EM GERADOR EÓLICO de parque eólico (100) compreendendo múltiplos geradores a turbina eólica (110) acoplados com uma rede de transmissão (190), o sistema de controle sendo caracterizado pelo fato de que cada gerador a turbina eólica (110) inclui um controlador local que usa tensão e corrente detectadas nos terminais para fornecer uma resposta apropriada para fazer com que o respectivo gerador a turbina eólica forneça a tensão e a potência reativa desejadas, o sistema de controle de gerador a turbina eólica compreendendo ainda:

um regulador da potência reativa (240) para controlar a produção da potência reativa pelo gerador a turbina eólica através do ajuste do ponto de ajuste da tensão de um regulador de tensão (270), o regulador de potência reativa apresentando uma primeira constante de tempo; e

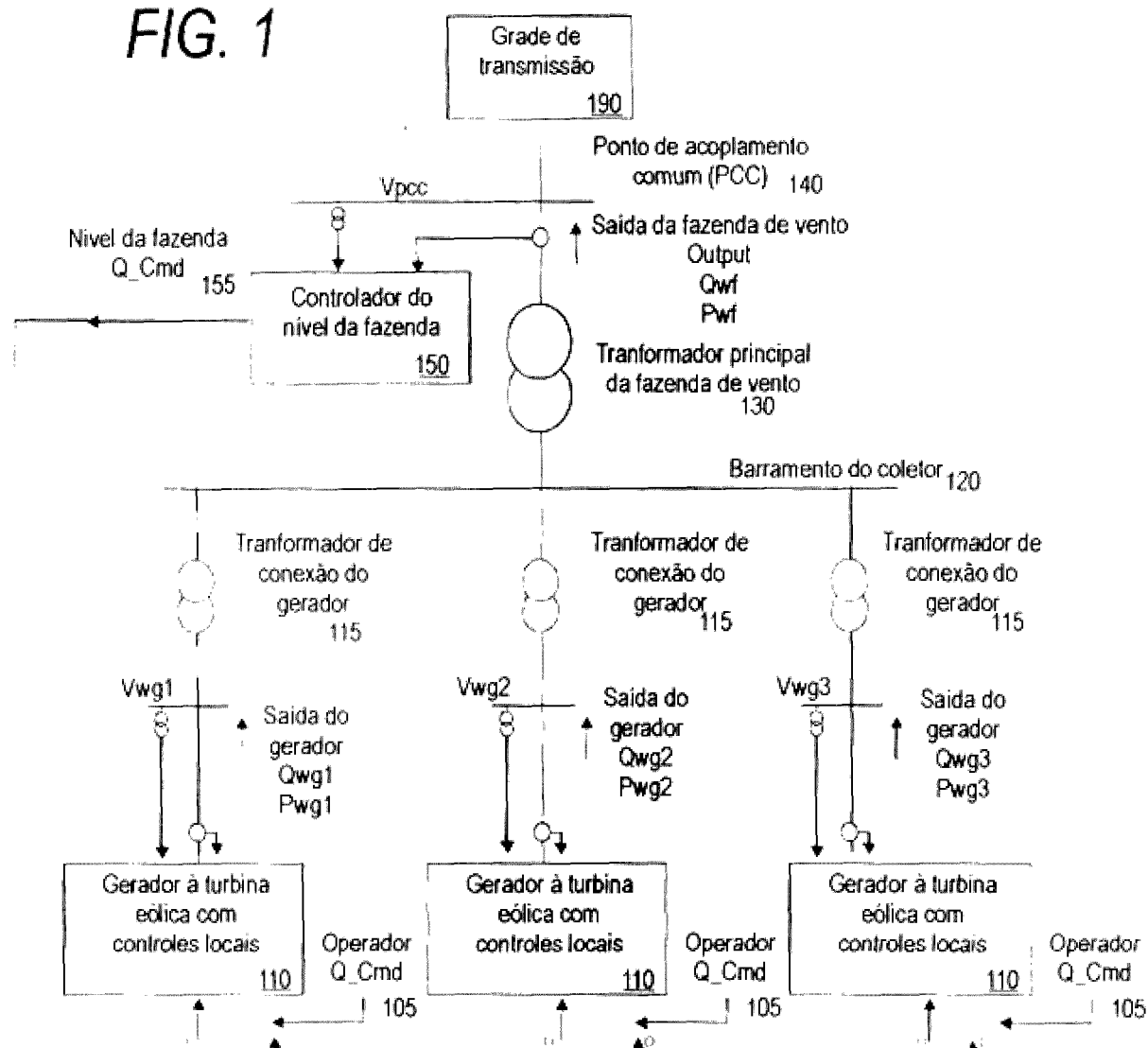
o regulador de tensão (270), sendo acoplado ao controlador de potência reativa (240) para controlar a produção de potência real através pelo respectivo gerador a turbina eólica, o regulador de tensão apresentando uma segunda constante de tempo, sendo que a primeira constante de tempo é numericamente maior que a segunda constante de tempo, o sistema de controle recebendo um comando de potência reativa a nível do parque (155) de um controlador de nível do parque (150).

2. SISTEMA DE CONTROLE de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que um sinal de entrada para o regulador de potência reativa (235) compreende um sinal de erro que indica uma diferença entre um comando limitado a uma faixa predeterminada baseada na capacidade de potência reativa do gerador (230) e um sinal indicativo da potência reativa medida (210).

3. SISTEMA DE CONTROLE de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que um sinal de saída do regulador de potência reativa (250) é limitado a uma faixa predeterminada definida por limites superior (242) e inferior (244) baseados na tensão nos terminais do gerador.

4. SISTEMA DE CONTROLE de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que um sinal de entrada para o regulador de tensão (270) compreende um sinal de erro que indica uma diferença entre um sinal de saída do regulador de potência reativa limitado a uma faixa predeterminada definida por limites superior e inferior com base nas conversões nominais e/ou pontos de ajuste operacionais (250) e um sinal que indica a tensão medida no terminal (255), sendo que o sinal de saída do regulador de tensão (280) determina a corrente a ser fornecida ao gerador.

FIG. 1



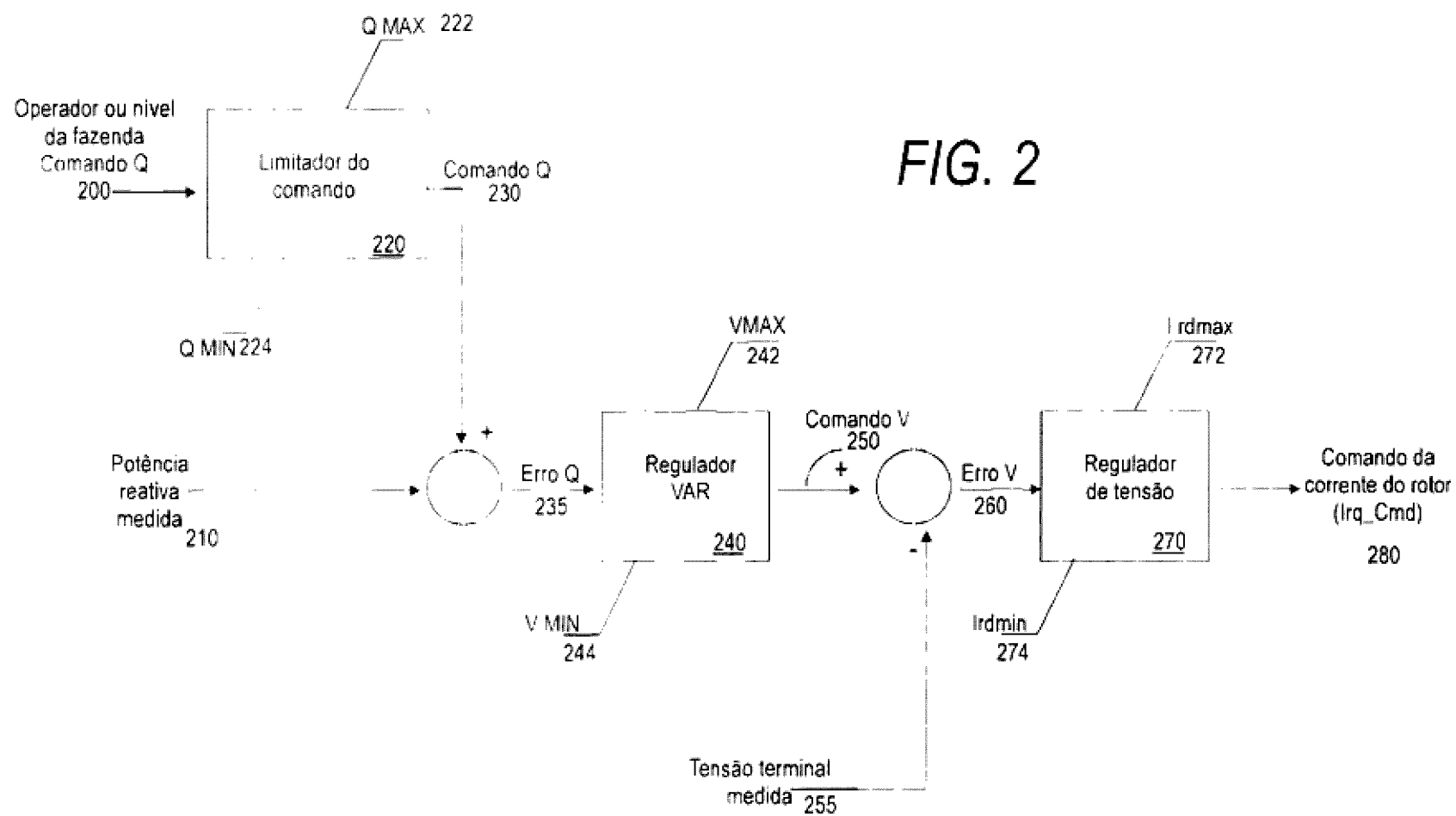


FIG. 3

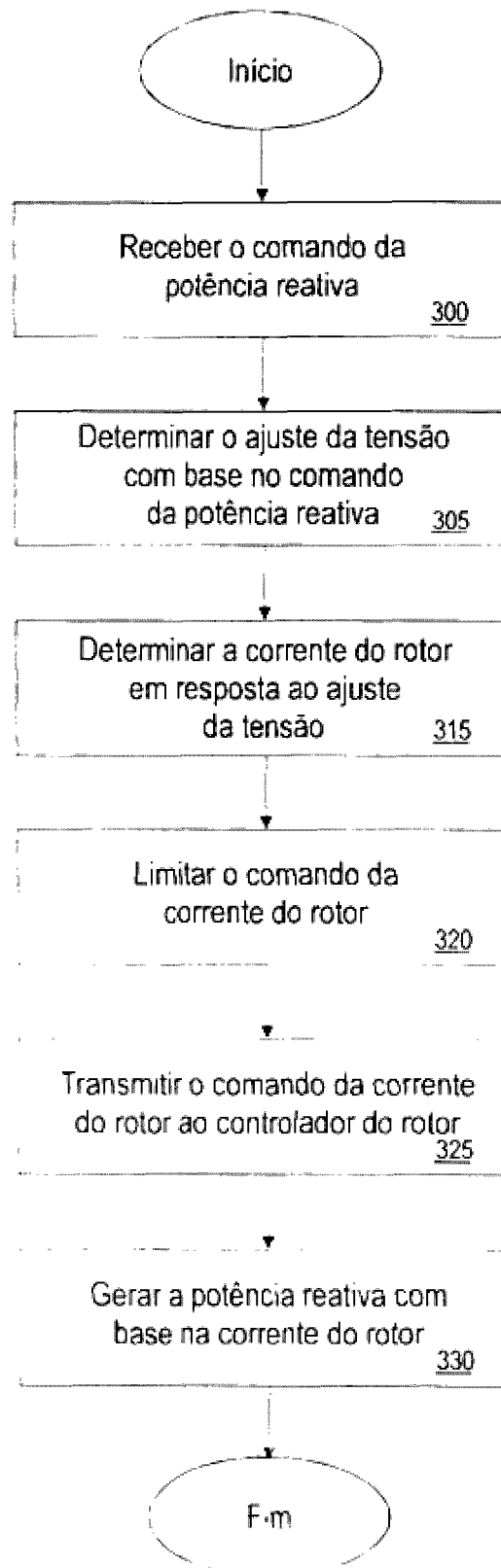


FIG. 4

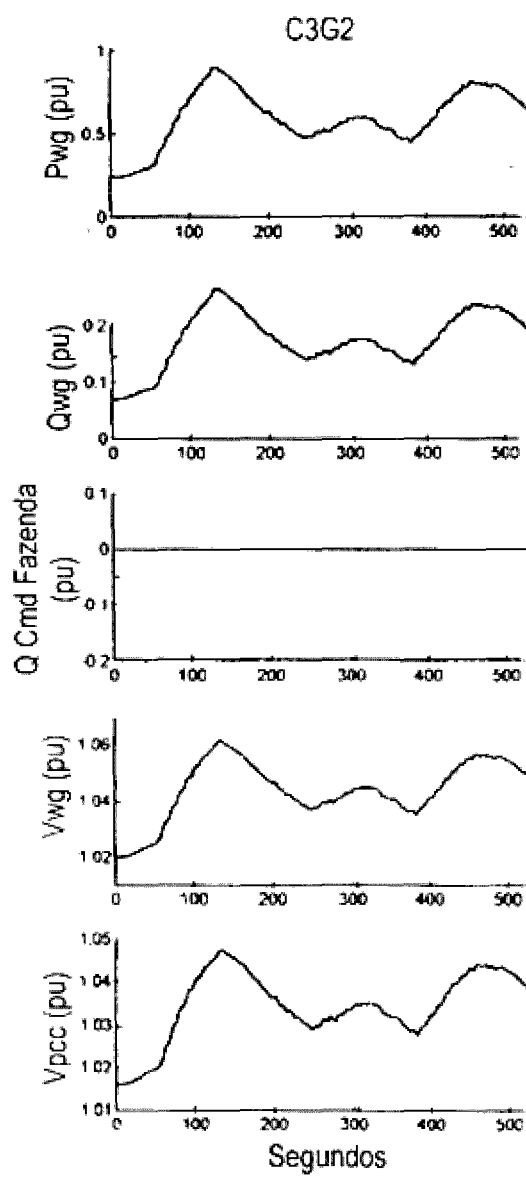


FIG. 5

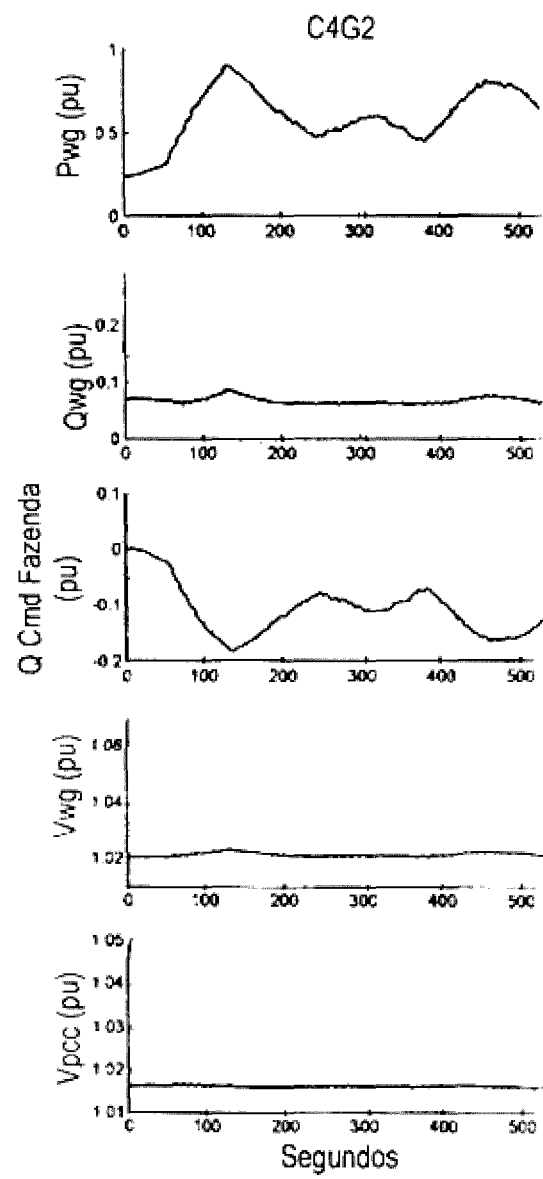


FIG. 6

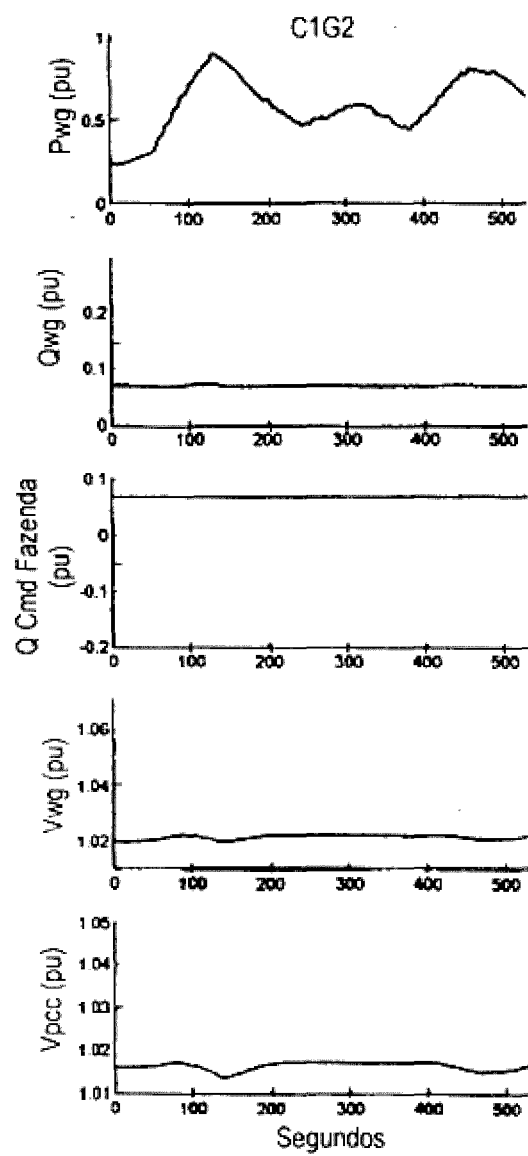


FIG. 7

