



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETÀ INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

UIBM

DOMANDA NUMERO	101983900003230
Data Deposito	30/03/1983
Data Pubblicazione	30/09/1984

Priorità	364.707
Nazione Priorità	US
Data Deposito Priorità	02-APR-82

Titolo

SISTEMA DI SMORZAMENTO DI UNA TORRE PER TURBINA A VENTO CON PREVISIONE
--

DOCUMENTAZIONE RILEGATA

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"SISTEMA DI SMORZAMENTO DI UNA TORRE PER TURBINA A VENTO CON PREVISIONE
DEL SUO MOVIMENTO"

della UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION

Società dello Stato del Delaware

a HARTFORD, Connecticut (U.S.A.)

Inventori: Joseph Michael KOS, John Peter PATRICK, Kermit Ivan HARNER

30 MAR. 1983..... **20 367 A/ 83**

R I A S S U N T O

Lo smorzamento del modo di flessione primario di una torre (12) che monta una turbina a vento avente un controllo (36) per fornire un segnale di riferimento (40) dell'angolo del passo di pala per modulare il passo delle pale (1) della turbina attraverso un meccanismo (38) variatore del passo per una potenza costante viene fornito generando il segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala come integrale (104) della sommatoria (266) di un segnale (98) di regime di riferimento dell'angolo del passo di pala che controlla la coppia/potenza con un segnale (255) di accelerazione stimata generato dal filtraggio (250,252,254) del segnale di riferimento (40) dell'angolo del passo di pala con la seguente funzione di trasferimento

$$\frac{(KA)S^2}{\bar{K} \{(TA) S+1\} \{(\bar{M}/\bar{K})S^2 + (\bar{D}/\bar{K})S+1\}}$$

TESTO DELLA DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda sistemi generatori di energia elettrica a turbina a vento montati su torre, e più particolarmente lo smorzamento della frequenza risonante primaria della torre mentre si modula l'angolo della pala

del rotore per mantenere una coppia od una potenza di esercizio.

L'uso del vento come sorgente a basso costo di energia elettrica ha l'ovvio svantaggio di essere dipendente dalle condizioni del vento. Per rendere un sistema generatore elettrico a turbina a vento sia utile che economicamente valido, è necessario assicurare il funzionamento della turbina a vento su una ampia gamma di condizioni di vento e sulla più larga frazione di tempo possibile. Perciò le turbine a vento sono tipicamente posizionate (qualche volta in gruppi chiamati "fattorie di energia eolica) ove le condizioni prevalenti del vento sono relativamente favorevoli, vale a dire ove vi è una velocità sufficiente su una parte piuttosto grande del tempo. Tuttavia quando il vento è di forza sufficiente per una generazione di energia elettrica utile, esso è generalmente a raffiche durante una frazione notevole del tempo.

Per un'efficace generazione del vento, pale molto grandi (coppie di pale che in totale sono dell'ordine da 30 a 100 m di lunghezza) sono montate alla sommità di torri molto alte (come tra 30 m e 90 m di altezza). Poiché la turbina a vento è collegata direttamente al generatore elettrico ed al sistema di energia (benché attraverso ruotismi ed alberi d'accoppiamento elastici), il mantenimento del livello desiderato di produzione di energia elettrica (in modo che essa può contribuire all'energia totale fornita ad una rete di distribuzione elettrica) richiede la modulazione dell'angolo di pala per compensare gli effetti di raffiche di vento imprevedibili e della turbolenza sulla potenza sviluppata dalla turbina a vento. Perciò sono stati forniti sistemi per sorvegliare o la coppia desiderata di albero del rotore del rotore della turbina a vento, oppure la potenza generata dal generatore ed utilizzare le variazioni nell'uno o l'altro di questi fattori per modulare l'angolo del passo delle pale

di rotore in maniera tale da mantenere la potenza di esercizio per le velocità del vento alla velocità del vento di esercizio ed al di sopra di essa. Poiché la coppia e la potenza sono direttamente correlate dalla velocità di rotazione del generatore, questi termini sono usati in modo intercambiabile in questa relazione e vengono indicati alternativamente come coppia/potenza. L'effetto massimo avviene quando le pale hanno un basso passo (le superfici della pala sono essenzialmente perpendicolari all'albero del rotore), e l'effetto minimo si verifica quando le pale sono ad un angolo massimo di circa 90° (le superfici sono sostanzialmente parallele all'albero del rotore), la quale posizione viene chiamata come messa in bandiera. Un sistema di controllo dell'angolo di pala di questo tipo viene descritto nel brevetto U.S.A. N° 4.193.005 della stessa richiedente.

Un'alta torre di supporto per turbina a vento, con pale molto grandi, alberi ed ingranaggi, apparecchiature generatrici di elettricità e apparecchiature varie di controllo e di protezione disposte alla sua sommità, è necessariamente una massa a sbalzo avente una rigidità costante ed un rapporto di smorzamento strutturale. Qualsiasi forza ecciterà la risonanza primaria della torre.

La spinta sulle pale (provocata dal vento che agisce sulle pale parallele all'asse di rotazione del rotore della turbina a vento) una forza che tende ad accelerare l'apparecchiatura della turbina a vento nella direzione del vento. La sommità della torre per la turbina a vento perciò assume (in condizioni di stato stazionario) una posizione in cui la forza di spinta viene equilibrata dalla forza di sollecitazione e sviluppata nella struttura della torre, dipendente dalla rigidità della torre. Se la velocità del vento cambia (una raffica), ciò altera la forza netta sull'apparecchiatura in corrispondenza della sommità

della torre che fa sì che la torre si defletta avanti ed indietro (oscilli) in una direzione parallela alla forza del vento. Quando la velocità del vento è al di sotto di quella che produrrà la potenza di esercizio, l'angolo di pala del rotore può essere fisso oppure può essere modulato leggermente per ottimizzare la cattura di energia quando cambia la velocità del vento. Con un angolo di pala fisso (o quasi costante), la spinta (forza del vento longitudinale) sulle pale aumenterà con l'aumento della velocità del vento in tutti i casi, e perciò qualsiasi movimento della sommità della torre fornirà uno smorzamento aerodinamico positivo alla torre (nello stesso senso dello smorzamento strutturale della torre). In tal caso l'oscillazione della torre nel suo modo di flessione primario, in risposta ad una forza incrementale dovuta ad una raffica di vento, si smorzerà e sarà di poco disturbo. Al di sopra della velocità di esercizio del vento (cioè quella che produrrà la potenza di esercizio), il controllo di potenza reagisce alle variazioni di potenza o di coppia provocate dalle raffiche di vento o dalla turbolenza per regolare (modulare) l'angolo di pala del rotore in una maniera tale da tendere a mantenere costante la potenza o la coppia. Quando la velocità del vento aumenta, se la potenza viene tenuta costante, la spinta diminuisce inerentemente. Così la modulazione di pala, in risposta ad una raffica, per mantenere costante la potenza, risulta inerentemente in una spinta incrementale opposta, che è perciò in una direzione tale da fornire uno smorzamento aerodinamico negativo alla torre. Questo smorzamento negativo si sottrae dallo smorzamento strutturale della torre e risulta in oscillazioni aumentate della torre. In turbine a vento progettate per una massima cattura di energia del vento ed uno stretto controllo di potenza, lo smorzamento negativo può superare lo smorzamento strutturale durante il funzio-

namiento controllo in potenza. Ciò produce uno smorzamento negativo netto sulla torre in modo che la torre diventa instabile (il movimento della torre aumenta in ciascun ciclo di essa alla frequenza risonante primaria della torre). Infatti l'analisi dettagliata ha mostrato che l'interazione tra la torre ed il controllo coppia /potenza può risultare in una severa degradazione della durata alla fatica della torre, da diverse decine di anni fino all'ordine di pochi anni.

La considerazione iniziale del problema può portare in risalto l'utilizzazione del filtro a tacca per tagliare severamente la correzione dell'angolo di pala ad una frequenza di comando dell'angolo di pala relativa alla frequenza della torre del primo modo di flessione e al suo apparecchio. Tuttavia questo sistema risulta in grandi errori transitori nella potenza generata a causa di una riduzione nelle caratteristiche di risposta dell'anello di controllo di potenza. E' stato anche suggerito che un regime di variazione del passo dello angolo di pala potrebbe essere aumentato su un segnale preso dalla flessione della torre per fornire lo smorzamento effettivo sulla torre; tuttavia non si è fatto niente di tale suggerimento.

Gli scopi della presente invenzione includono quello di fornire uno smorzamento positivo ulteriore ad una torre per turbina a vento mentre si permette che un controllo di potenza moduli l'angolo di pala per minimizzare le fluttuazioni di coppia o potenza che risultano dalla turbolenza del vento.

In conformità con la presente invenzione, un sistema generatore elettrico motorizzato con turbina a vento avente un controllo per modulare l'angolo di pala del rotore per mantenere una coppia o potenza di esercizio in vento turbolento, disposto alla sommità di una torre, fornisce una componente di comando

dell'angolo di pala che regolerà l'angolo di pala del rotore di turbina in una maniera da fornire uno smorzamento aerodinamico positivo della torre in risposta ad un segnale di movimento previsto indicativo del movimento longitudinale anticipato analiticamente della torre parallelo all'asse del rotore come una funzione filtrata del segnale di riferimento dell'angolo di pala.

In ulteriore accordo con la presente invenzione, l'ulteriore smorzamento positivo viene fornito da una componente di segnale di riferimento di angolo di pala correlata al segnale di riferimento dell'angolo di pala dalla funzione di trasferimento $\frac{KA S}{\bar{K} \{(TA)S+1\} \{(\bar{M}/\bar{K})S^2 + (\bar{D}/\bar{K})S+1\}}$, in cui KA é il guadagno desiderato, TA approssima il ritardo del meccanismo dell'angolo del passo di pala, $\bar{K}$, $\bar{M}$, $\bar{D}$ sono valori approssimati calcolati di rigidità, massa e fattore di smorzamento rispettivamente della torre di turbina a vento.

La presente invenzione può essere realizzata in un modo analogico oppure può essere realizzata in un modo digitale, o con parti fisiche componenti digitali dedicate o come elementi di programma in un adatto calcolatore quale un microprocessore.

La presente invenzione fornisce una riduzione notevole nella risposta al modo primario di flessione di una torre per turbina a vento dovuta all'accoppiamento tra la torre ed il sistema di controllo dell'angolo di pala correlato ad essa, con un minimo impatto sulla prestazione di generazione di potenza. La presente invenzione viene facilmente realizzata senza ulteriori elementi dinamici alla sommità della torre di controllo, per mezzo di una semplice aggiunta di circuiti o di una semplice variazione nel programma di un calcolatore che controlla l'angolo di pala.

I precedenti ed altri scopi, caratteristiche e vantaggi della presente invenzione diverranno più chiari alla luce della seguente descrizione dettagliata di sue forme di realizzazione esemplificative come illustrate nei disegni annessi in cui:

la Fig. 1 é un diagramma a blocchi schematico semplificato di una turbina a vento che include un sistema di controllo dell'angolo del passo di pala avente una forma di realizzazione della presente invenzione incorporata in esso; e

la Fig. 2 é un diagramma teorico illustrante le caratteristiche strutturali di una torre per turbina a vento e di alcuni degli effetti di spinta su di essa.

Una forma di realizzazione esemplificativa della presente invenzione viene descritta come essa può essere realizzata in un sistema di controllo a molti modi per turbine a vento del tipo descritto nel già menzionato brevetto U.S.A. N° 4.193.005. Una descrizione generale del sistema di controllo descritto in detto brevetto viene dapprima data rispetto ai numeri di riferimento 10-104 nei disegni annessi, che sono gli stessi numeri di quelli di detto brevetto; i riferimenti tra parentesi alle figure si riferiscono alle figure di detto brevetto. Dopo di ciò il problema di interazione tra torre e controllo viene analizzato e vengono descritte forme di realizzazione dell'invenzione.

Riferendosi ora ai disegni annessi, una costruzione rappresentativa di turbina a vento consiste in due pale di rotore 10 identiche diametralmente opposte, che formano tipicamente un totale in lunghezza tra 30 m e 100 m, montate su una torre di supporto 12. I componenti meccanici, i dispositivi di controllo e l'apparecchiatura generatrice elettrica che compongono la turbina a vento sono contenuti in una gondola 14 supportata dalla torre 12. La costruzione delle turbine a vento e delle apparecchiature accessorie per esse, come i controlli di imbar-

data per orientare le pale nel vento prevalente, sono tutte cose ben note

e non vengono descritte ulteriormente in questa relazione.

Le pale di rotore 10 della turbina sono montate su un mozzo 16 che é collegato attraverso un albero d'accoppiamento 18 a bassa velocità ad una apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32 che può includere una scatola ingranaggi, un albero ad alta velocità, un generatore sincrono, un'apparecchiatura per collegare il generatore ad un carico (come la rete di energia di un servizio di energia elettrica), ed un circuito sincronizzatore di fase. L'apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32 fornisce un segnale di linea escluso/inserito su una linea di segnale 34 indicativa di quando il generatore é collegato sulla linea alla rete di utilizzo.

Un controllo 36 dell'angolo del passo di pala, mostrato generalmente in Fig. 3 di detto brevetto, fornisce un segnale di angolo di pala desiderato o di riferimento BR ad un meccanismo 38 elettroidraulico di variazione del passo su una linea 40. Il meccanismo 38 di variazione del passo fa si che le pale 10 raggiungano un angolo di pala effettivo (BP in detto brevetto) eguale al segnale BR dell'angolo di pala di riferimento sulla linea 40.

Segnali indicativi dei parametri operativi istantanei della turbina a vento sono forniti al controllo 36 dell'angolo del passo di pala. Un trasduttore 46 di velocità del rotore associato con il mozzo 16 fornisce un segnale di velocità di rotore NR su una linea 48. Un simile trasduttore 50 collegato ad un albero nel generatore sincrono fornisce un segnale di velocità di generatore NG su una linea 52. Un trasduttore di coppia 54, che può comprendere estensimetri disposti sull'albero 18, oppure su un albero adatto entro l'apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32, fornisce un segnale QS di coppia dell'albero su una linea

56. Il segnale di coppia dell'albero sulla linea 56 può ^{alternativamente} essere fornito in qualsiasi altra maniera adatta, come rilevando la posizione reciproca di punti spostati assialmente sulla periferia dell'albero in una maniera ben nota. Il controllo 36 dell'angolo del passo di pala é anche fornito di una pluralità di segnali di riferimento fissi o variabili indicativi di una velocità di riferimento del rotore a vuoto, limiti sull'accelerazione e la decelerazione del rotore ed un segnale di avviamento e di arresto indicativo di quando la turbina a vento deve essere operativa o messa in bandiera ed essenzialmente stazionaria. Questi segnali vengono descritti più completamente rispetto alla Fig. 2 di detto brevetto. Un sensore 74 della velocità del vento, disposto sulla gondola 14, fornisce un segnale indicativo di una velocità media del vento VW su una linea 76.

Quando la turbina a vento non é in uso, le pale 10 sono posizionate al loro massimo angolo di passo 90° in modo che esse sono messe in bandiera. Così le pale non eserciteranno essenzialmente alcuna coppia sul mozzo 16. Quando la turbina a vento deve essere posta in uso, un segnale di avviamento fa sì che i controlli a vuoto, di avviamento e di arresto 78-94 (non chiamati in questa maniera in detto brevetto e descritti più particolarmente nelle Figg. 4 e 5 di detto brevetto) diminuiscano gradualmente l'angolo di pala in modo da accelerare il rotore ed in generatore verso condizioni di velocità di esercizio senza stallo della pala o senza indurre grandi sollecitazioni di accelerazione. Una volta che il rotore della turbina a vento sta funzionando ad una velocità angolare che é correlata nel modo desiderato alla frequenza dell'energia elettrica generata che é necessaria, la velocità può quindi essere variata leggermente finché l'apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32 sta funzionando in

modo sincrono con la frequenza dell'energia elettrica sulla rete di utilizzo alla quale verrà in definitiva collegato il generatore. A questo punto nel tempo, il controllo viene spostato dal controllo a vuoto, di avviamento e di arresto 78-94 al controllo 100 di coppia dell'albero, descritto in dettaglio rispetto alla Fig. 6 di detto brevetto). Se la turbina a vento deve essere arrestata, il controllo ritorna ai controlli a vuoto, di avviamento ed arresto 78-94 in modo da far sì che le pale vengano messe in bandiera senza eccessive sollecitazioni di decelerazione. Come descritto in detto brevetto, il segnale di regime di angolo di pala minimo BMN sulla linea 95 é tale da provocare una variazione nell'angolo di pala necessaria a mantenere un regime fisso di accelerazione angolare del rotore durante l'avviamento, per mantenere l'appropriata velocità di rotazione angolare durante la marcia a vuoto, e per mantenere un regime fisso di decelerazione angolare del rotore durante l'arresto.

Quando l'apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32 é messa in fase sincrona con la tensione sulla rete di energia (stessa frequenza, ampiezza e fase), l'apparecchiatura é collegata alla rete di energia ed un segnale appare sulla linea 34 per indicare che la turbina a vento é in linea. La transizione tra il funzionamento in linea ed il funzionamento fuori linea viene effettuata mediante un selettore di modo 96 (descritto in maggiore dettaglio rispetto alla Fig. 7 di detto brevetto) che risponde al segnale di linea escluso/inserito 34. Quando ciò si verifica, il selettore di modo 96 applica un segnale $\dot{BQ}$ di regime d'angolo di pala di coppia dell'albero su una linea 98 (non tenendo conto del perfezionamento dell'invenzione che viene descritta qui appresso) ad una linea 102 ove diventa il segnale di regime di riferimento di angolo di pala BR; ma quando la turbina a vento é fuori linea, l'assenza del segnale sulla linea

34 fa sì che la linea 102 sia rispondente al segnale di regime minimo $\dot{B}MN$ su una linea 95. Quando la turbina a vento è in linea, il segnale di regime di angolo di pala di coppia sulla linea 98 è tale che estrarrà la potenza massima dalla turbina a vento fino al valore di potenza di esercizio per tutte le velocità del vento tra l'inserimento ed il distacco; alle velocità di vento di esercizio, il segnale sulla linea 98 viene variato per mantenere la coppia d'albero rilevata (o potenza) al valore di riferimento (di esercizio).

Il segnale di regime d'angolo di pala desiderato prescelto, il segnale di regime di riferimento dell'angolo di pala $\dot{B}R$ sulla linea 102, viene convertito nel segnale di riferimento di angolo di pala BR sulla linea 40 per mezzo di un integratore 104 (descritto più completamente con riferimento alla Fig. 8 in detto brevetto). L'integratore 104 include un apparecchio per limitare il regime di variazione del segnale sulla linea 40 nonché per limitare le sue grandezze massime positiva e negativa.

La descrizione finora effettuata rispetto ai numeri di riferimento 10-104 è descrittiva di un sistema di controllo esemplificativo della tecnica precedente in cui la presente invenzione può essere messa in pratica. Questa descrizione è un riassunto di quella del brevetto sopra menzionato. Come descritto brevemente in precedenza, l'accoppiamento avverso tra il modo di pressione primario della torre di supporto 12 ed il sistema di controllo della turbina a vento descritto finora viene alleviato dalla presente invenzione attraverso lo espediente di fornire ulteriori componenti di comando di riferimento dell'angolo di pala per provocare variazioni incrementali di spinta che sono previste essere in fase con la velocità della sommità della torre, in modo da fornire ulteriore smorzamento aerodinamico positivo alla torre. Ciò aiuta a smorzare

via qualsiasi oscillazione della torre indotta da perturbazioni sul carico delle pale e la correzione proporzionata dell'angolo di pala come viene provocata da turbolenza di vento imprevedibile.

Per un'analisi linearizzata del problema dell'accoppiamento del controllo dell'angolo di pala e torre di turbina a vento a cui si allude in precedenza, si fa riferimento alla Fig. 2. In essa l'apparecchio a torre 220 rappresenta la torre 12, la gondola 14 e tutti gli altri apparecchi disposti alla sommità della torre (incluse le pale 10). La Fig. 2 illustra la risposta della torre come conseguenza di una spinta incrementale sulle pale (assialmente, parallelamente all'albero del mozzo del rotore). Una spinta incrementale ΔT è rappresentata da una linea 221; l'effetto di tale spinta è ridotto in 222 dall'effetto di smorzamento illustrato da una linea 223 e l'effetto di rigidità illustrato da una linea 234. La spina effettiva netta rappresentata da una linea 225 provocherà una variazione nell'accelerazione rappresentata da una linea 226 in una maniera correlata inversamente alla massa 227 della torre. L'accelerazione indicata in questa relazione come $\ddot{Z}$, avviene nella direzione dell'asse del mozzo, ed è di una polarità dipendente dalla direzione della spinta incrementale ΔT . L'integrale 228 dell'accelerazione incrementale 226 risulta in una velocità incrementale $\dot{Z}$ 229.

L'integrazione 230 della velocità incrementale 229 risulta in una posizione incrementale 231 dell'apparecchio alla sommità della torre. La posizione incrementale 231 è rappresentativa di una variazione avvicinandosi od allontanandosi da una posizione di riposo della torre entro la quale la sollecitazione nella direzione Z è nulla. Se la torre viene piegata in modo che il suo apparecchio è ulteriormente distaccato dalla posizione di riposo, la rigidità è equivalente ad

una resistenza alla spinta; ciò viene rappresentato dal blocco 232 in cui KT rappresenta la rigidità effettiva della torre.

La velocità incrementale della torre 229 é correlata dal rapporto di smorzamento effettivo DI della torre 233 alla spinta negativa equivalente in una maniera nota. Tuttavia il movimento della torre 229 provoca anche una variazione nella velocità del vento relativa 234. Così se vi é un aumento nella velocità del vento, il vento in effetti soffierà sulla torre nella direzione più Z, in modo che la velocità netta relativa del vento sulle pale stesse é inferiore di quanto sarebbe se la torre fosse incapace di muoversi nella direzione Z. Questa analisi é un'investigazione semplificata e linearizzata dell'effetto di una tale raffica di vento sulla torre, inclusi gli effetti correttivi forniti dal sistema di controllo della Fig. 1, il controllo 36 dell'angolo del passo di pala ed il meccanismo 38 di variazione del passo che sono rappresentati in una maniera idealizzata (nella maniera descritta qui appresso) dal blocco 235.

La spinta (forza sulle pale parallela all'asse di rotazione delle pale) é una funzione dell'angolo di pala (B), della velocità del vento (VW), e della velocità del rotore (NR). Per piccole perturbazioni attorno ad un punto operativo allo stato stazionario, la variazione nella spinta (ΔT) viene espressa da:

$$(1) \quad \Delta T = \frac{dT}{dB} \Delta B + \frac{dT}{dVW} \Delta VW + \frac{dT}{dNR} \Delta NR$$

Una simile espressione per la variazione nella coppia del rotore (ΔQR) é:

$$(2) \quad \Delta QR = \frac{dQR}{dB} \Delta B + \frac{dQR}{dVW} \Delta VW + \frac{dQR}{dNR} \Delta NR$$

Nelle espressioni (1) e (2) "d" denota la derivata parziale.

L'effetto di un generatore elettrico che alimenta una grande rete di utilizzo può essere paragonato ad un motore che comanda un volano infinito ad una velocità nominale. A causa di ciò ed a causa del fatto che vi é un'elasticità suffi-

ciente nell'albero tra il rotore ed il generatore, la velocità del rotore della turbina a vento é essenzialmente costante ($\Delta NR = 0$). Per un controllo di potenza ideale (un controllo che é capace di fornire una regolazione completa ed istantanea dell'angolo di pala per le variazioni in potenza o coppia), quando si opera al di sopra della velocità del vento di esercizio, la coppia del rotore é anche costante ($\Delta QR = 0$). Perciò, dall'espressione (2)

$$(3) \quad \frac{dQR}{dB} \Delta B = - \frac{dQR}{dVW} \Delta VW$$

e

$$(4) \quad \Delta B = - \frac{dQR/dVW}{dQR/dB} \Delta VW$$

Sostituendo l'espressione (4) nell'espressione (1) per il caso in cui l'ultimo termine (ΔNR) = 0,

$$(5) \quad \Delta T = - \frac{dT}{dB} \cdot \frac{dQR/dVW}{dQR/dB} \Delta VW + \frac{dT}{dVW} \Delta VW$$

$$(6) \quad \Delta T = \left\{ \frac{dT}{dVW} - \frac{dQR/dVW}{dQR/dB} \left(\frac{dT}{dB} \right) \right\} \Delta VW$$

Per un angolo di pala fisso $\Delta B = 0$, si ha così:

$$(7) \quad \frac{dT}{dB} \Delta B = 0$$

in modo che lo smorzamento aerodinamico della torre in tal caso sarà semplicemente:

$$(8) \quad \frac{\Delta T}{\Delta VW} = \frac{dT}{dVW}$$

Lo smorzamento aerodinamico dell'espressione (8) é dello stesso senso dello smorzamento strutturale positivo della torre e si aggiunge ad esso.

D'altra parte con un controllo effettivo di potenza in posizione, in modo che l'angolo di pala non é fisso, lo smorzamento aerodinamico sulla torre é molto più complesso. Considerando un controllo di potenza ideale dall'espressione (6), lo smorzamento aerodinamico totale é:

$$(9) \quad \frac{\Delta T}{\Delta VW} = \frac{dT}{dVW} - \frac{dQR/dVW}{dQR/dB} \left(\frac{dT}{dB} \right)$$

Riferendosi ora alla Fig. 2, l'espressione (1) viene riportata nei blocchi 240-243 della parte di effetto di spinta 236 che assieme con il controllo idealizzato 235 é anche rappresentativo dell'espressione (9) purché si assuma che la variazione nella velocità del rotore (ANR) é nulla. Si noti che una componente ΔT negativa (se aggiunta a ΔT alla linea 221, Fig. 2) sarebbe dello stesso senso dello smorzamento strutturale positivo sulla linea 223 e si aggiungerebbe ad esso.

Così la Fig. 2 é un'espressione dell'effetto della raffica di vento sulla torre, inclusa la dinamica della torre, l'effetto del vento sulle pale, e l'effetto della variazione proporzionata potenza/coppia che opera attraverso una unità di controllo di potenza idealizzata che varia l'angolo di pala come conseguenza di tale raffica di vento. L'analisi di un'ampia varietà di configurazioni di torre e di controllo, incluse le caratteristiche strutturali della torre, l'aerodinamica della turbina a vento e le caratteristiche di risposta del controllo di un controllo idealizzato, mostreranno che l'effetto totale della spinta incrementale come conseguenza di una raffica di vento risulta nello smorzamento negativo in modo che la torre é instabile.

Secondo una forma di realizzazione della presente invenzione, una componente di segnale di regime di riferimento di angolo di passo di pala correttiva viene sommata come il segnale $\dot{B}Q$ di regime di riferimento di angolo di passo di pala controllo di coppia/potenza sulla linea 98 in una maniera tale da fornire ulteriore smorzamento al movimento della torre nel suo modo di flessione primario, su una base di una stima del movimento della torre che risulterà da una componente incrementale dell'angolo di pala che risulta dalla reazione del controllo

coppia/potenza ad una raffica di vento (per esempio 235, Fig. 2).

Riferendosi alla Fig. 1, il segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala sulla linea 40 viene applicato ad un filtro di ritardo 250 le cui caratteristiche si avvicinano al ritardo effettivo del meccanismo elettroidraulico 38 di variazione del passo. Ciò fornisce un segnale di riferimento filtrato (BL_n) dell'angolo di pala su una linea 251 ad un amplificatore 252 che ha un guadagno equivalente alla derivata parziale della coppia rispetto all'angolo di pala (e perciò è rappresentativo del blocco 241 in Fig. 2). Ciò fornisce un segnale di punta incrementale su una linea 253 che è equivalente al segnale di spinta incrementale (ΔI) sulla linea 221 della Fig. 2, e viene applicato attraverso un filtro 254 che è un modello della struttura della torre di controllo in modo da fornire una componente di segnale correttivo di regime di riferimento dell'angolo del passo di pala su una linea 255 che risulta in una componente di spinta incrementale che fornisce lo smorzamento positivo aerodinamico alla torre descritta rispetto alla Fig. 2 qui in precedenza. Entro il filtro 254 i fattori $\bar{M}$, $\bar{K}$, $\bar{D}$ sono equivalenti calcolati e stimati della massa effettiva, della costante elastica e del fattore di smorzamento della torre per turbina a vento (come illustrata entro l'apparecchio di torre 220 della Fig. 2). Per la realizzazione in una maniera analogica, la linea di segnale 253 alimenta un amplificatore che fornisce le funzioni di una giunzione di sommazione 256 con un guadagno 257 di $1/\bar{M}$, la cui uscita sulla linea 255 viene alimentata ad un integratore 258 e di qui su una linea 259 ad un secondo integratore 260. Il segnale sulla linea 259 viene applicato ad un amplificatore 261 avente un guadagno $\bar{D}$, la cui uscita su una linea 262 viene alimentata allo ingresso 256 della giunzione di sommazione dell'amplificatore. In modo simile

l'uscita dell'integratore 260 su una linea 263 viene alimentata attraverso un amplificatore 264 avente un guadagno di $\bar{K}$, la cui uscita su una linea 265 viene anche applicata all'entrata di sommazione 256 dell'amplificatore. Nell'apparecchio effettivo il guadagno 252 viene regolato per l'effetto desiderato e generalmente sarà superiore a dT/dB ; il guadagno totale desiderato del filtro viene chiamato in questa relazione KA . Naturalmente il guadagno 252 potrebbe essere fornito entro il filtro di ritardo 250 nella maniera usuale ben nota; la sua illustrazione separata in Fig. 1 serve a chiare la funzione che viene effettuata.

Il filtro totale incluso il modello di torre 254 in unione con il filtro di ritardo 250 ed il guadagno 252 illustrato in Fig. 1 ha la seguente funzione di trasferimento:

$$(10) \quad \frac{(KA)S^2}{\bar{K} \{ (TA) S + 1 \} \{ (\bar{M}/\bar{K})S^2 + (\bar{D}/\bar{K})S + 1 \}}$$

in cui KA è il guadagno totale che può essere regolato per fornire il grado di smorzamento desiderato della torre. In effetti l'invenzione può essere messa in pratica semplicemente applicando una versione ritardata del segnale di riferimento BR di angolo di pala sulla linea 40 a qualsiasi mezzo elaboratore di segnale che possa fornire la funzione di trasferimento dell'espressione (10). Per esempio in un sistema di controllo dell'angolo del passo di pala per turbina a vento che viene realizzato utilizzando un opportuno calcolatore programmato, l'aggiunta al programma di calcolatore richiesta per aggiungere la presente invenzione ad una versione a calcolatore programmato del sistema di controllo del brevetto sopra menzionato può essere come viene riportato qui appresso.

Programma di filtro

1. Passare alla fine se non in linea
2. $BL_n = BL_m + TA (BR - BL_m)$
3. $BL_m = BL_n$
4. $\Delta T = dT/dB * BL_n$ (o $\Delta T = KA * BL_n$)
5. $\bar{T} = \Delta T + \bar{D} * \dot{Z}_m + \bar{K} * Z_m$
6. $\dot{Z}_n = \bar{T} / \bar{M}$
7. $\dot{Z}_n = k_1 * \dot{Z}_n + \dot{Z}_m$
8. $Z_n = k_2 * \dot{Z}_n + Z_m$
9. $\dot{Z}_m = \dot{Z}_n$
10. $Z_m = Z_n$
11. $\dot{BQ}'_n = \dot{BQ}_n + \ddot{Z}_n$
12. Fine

La prima fase del programma di filtro semplicemente sorpassa il programma ogni volta che la turbina a vento non é in linea (vale a dire non vi é equivalente di indicatore individuale al segnale sulla linea 34 indicante che il sistema é in linea). La seconda fase del programma fornisce il segnale di riferimento dell'angolo di pala filtrato mediante un ben noto algoritmo di ritardo, in cui TA é un equivalente della costante di tempo del filtro 250 in Fig. 1, come correlata al tempo di ciclo del calcolatore (che può essere dello ordine di 50 millisecondi circa). Nel programma "n" denota il valore corrispondente per il ciclo corrente mentre "m" denota il valore correlato nel ciclo immediatamente precedente. La terza fase del programma semplicemente aggiorna il valore del segnale di riferimento dell'angolo di pala filtrato per l'uso nel ciclo successivo. La quarta fase del programma fornisce il guadagno dello amplificatore 252 in Fig. 1 (oppure il guadagno complessivo desiderato KA). La quinta fase del programma fornisce la sommatoria dell'ingresso di sommazione 256; si noti che come é vero in qualsiasi realizzazione di calcolatore di

un sistema a retroazione, il valore di retroazione può soltanto essere generato con valori di componente forniti nel ciclo immediatamente precedente: poiché questi valori cambiano soltanto leggermente in un tempo di ciclo del calcolatore, ciò non influenza le prestazioni complessive in alcuna maniera misurabile. La fase 6 fornisce il guadagno dell'amplificatore 257 e la fase 7 fornisce l'integrazione 258 ove il valore K_1 è una costante di tempo equivalente per il tempo del ciclo del calcolatore in maniera ben nota. In modo simile la fase 8 fornisce l'integrazione 260 della Fig. 1. Le fasi 9 e 10 aggiornano i valori dei fattori di movimento e di distanza per l'uso in un ciclo successivo. La fase 11 fornisce una sommatoria equivalente alla giunzione di sommazione 266 in Fig. 1 e la fase 12 indica la fine dell'operazione (ritorno alle altre parti del programma) in una maniera ben nota. In un caso tipico, la previsione del segnale di riferimento dell'angolo di pala (linea 40, Fig. 1) può essere preferita da accogliere in un calcolatore digitale che può effettuare notevole sorveglianza di autodiagnosi, correzione del modo di avaria e controllo di arresto. In un tal caso la presente invenzione può preferibilmente essere realizzata dal precedente programma filtro entro tale calcolatore digitale. In un caso in cui si impieghi un sistema analogico (generalmente del tipo mostrato in Fig. 1) per generare il segnale di riferimento dell'angolo di pala, un apparecchio analogico capace di realizzare la funzione di trasferimento dell'espressione 10 riportata in precedenza, sia del tipo mostrato in Fig. 1 od altrimenti, può anche essere impiegato. Oppure si può utilizzare ogni qualvolta sia appropriato un apparecchio digitale dedicato di opportuno tipo. Tutto ciò può essere fornito bene entro le conoscenze della tecnica utilizzando apparecchi e tecnologie che sono facilmente disponibili alla luce dei precedenti

principi.

Un'altra maniera di considerare la presente invenzione é che essa fornisce una stima prevedibile del movimento incrementale della torre che può risultare come conseguenza di una variazione nell'angolo di pala. Come tale essa é una versione analitica grossolana della soluzione descritta nella domanda di brevetto depositata in pari data dalla stessa richiedente dal titolo "Sistema di smorzamento di una torre per turbina a vento rispondente al suo movimento". Così il segnale $\ddot{Z}$ sulla linea 255 o nella fase 6, può essere considerato un segnale di accelerazione prevista generato dal filtraggio del segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala con la funzione di trasferimento dell'espressione (10) riportata in precedenza.

Si noti che l'integrazione 104 della sommatoria sulla linea 98a della componente di modulazione coppia/potenza sulla linea 98 e della componente di smorzamento sulla linea 255 risulta in una componente del segnale di riferimento dell'angolo di pala per lo smorzamento che é una funzione della velocità ($\dot{Z}$). Perciò il segnale di velocità previsto sulla linea 259 potrebbe essere sommato con l'uscita dell'integratore 104 invece di sommare il segnale di accelerazione prevista con il regime di riferimento dell'angolo del passo di pala prima dell'integratore 104. Nell'uno o nell'altro caso la relazione della componente del segnale di smorzamento con il segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala é quella dell'espressione (10) riportata in precedenza, ma con S al posto di S^2 al numeratore. L'invenzione può essere usata anche nel modo fuori linea se lo si desidera. Il fattore significativo é che il movimento previsto fornisce una componente dell'angolo del passo di pala che risulta in una componente di spinta per lo smorzamento aerodinamico positivo.

In modo simile, benché la presente invenzione é stata mostrata e descritta rispetto a sue forme di realizzazione esemplificative, si deve comprendere da parte delle persone esperte nella tecnica che le precedenti e varie altre modifiche, omissioni ed aggiunte possono essere apportate in essa e ad essa senza discostarsi dallo spirito e dall'ambito dell'invenzione stessa.

RIVENDICAZIONI

1. Sistema di turbina a vento per generare energia elettrica comprendente: una torre; un rotore disposto su detta torre includente pale disposte per ruotare attorno ad un asse ed un meccanismo di variazione dell'angolo del passo di pala; mezzi per fornire un segnale effettivo coppia/potenza indicativo della coppia/potenza effettiva generata da detto sistema di turbina a vento; e mezzi elaboratori di segnale per fornire un segnale di riferimento coppia/potenza indicativo della coppia/potenza generata desiderata, e per fornire un segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala come funzione della differenza tra detto segnale coppia/potenza effettiva e detto segnale coppia/potenza di riferimento, caratterizzato dal fatto che detto elaborazione di segnale comprende mezzi per fornire detto segnale di riferimento dell'angolo di passo di pala come combinazione di una componente di segnale di smorzamento correlata ad una funzione filtrata di detto segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala e di una componente di segnale di controllo coppia/potenza che é detta funzione della differenza tra detto segnale coppia/potenza effettiva e detto segnale coppia/potenza di riferimento.

2. Sistema di turbina a vento secondo la rivendicazione 1 caratterizzato dal fatto che detti mezzi di elaborazione di segnale comprendono mezzi per fornire detto componente del segnale di smorzamento filtrando detto segnale di riferi-

mento dell'angolo del passo di pala con la funzione di trasferimento

$$\frac{(KA) S}{\bar{K} \{(TA) + 1\} \{(\bar{M}/\bar{K})S^2 + (\bar{D}/\bar{K})S + 1\}}$$

in cui S é l'Operatore di LaPlass, TA é una costante di tempo che si approssima al ritardo di detto meccanismo di variazione del passo nel rispondere a detto segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala, e $\bar{K}$, $\bar{M}$ e $\bar{D}$ approssimano rispettivamente la rigidità, la massa e la costante di smorzamento di detta torre e dell'apparecchio disposto su di essa, e per fornire detta componente del segnale di controllo coppia/potenza come funzione integrale della differenza tra detto segnale di coppia/potenza effettiva e detto segnale di coppia/potenza di riferimento.

3. Sistema di turbina a vento secondo la rivendicazione 1 caratterizzato dal fatto che detto mezzo elaboratore di segnale comprende mezzi per fornire un segnale di movimento previsto della torre filtrando detto segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala con la funzione di trasferimento

$$\frac{(KA) S^2}{\bar{K} \{(TA) + 1\} \{(\bar{M}/\bar{K})S^2 + (\bar{D}/\bar{K})S + 1\}}$$

in cui S é l'Operatore di LaPlass, TA é una costante di tempo che si approssima al ritardo di detto meccanismo di variazione del passo nel rispondere a detto segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala, e $\bar{K}$, $\bar{M}$ e $\bar{D}$ approssimano rispettivamente la rigidità, la massa e la costante di smorzamento di detta torre e dell'apparecchio disposto su di essa, per fornire un segnale di regime di riferimento dell'angolo del passo di pala come sommatoria di detto segnale di movimento previsto della torre con un segnale indicativo della differenza tra detto segnale di coppia/potenza effettiva e detto segnale di coppia/

potenza di riferimento, e per fornire detto segnale di riferimento dello
angolo del passo di pala come funzione integrale di detto segnale di regi-
me di riferimento dell'angolo del passo di pala.

pp. UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION

Società dello Stato del Delaware

Il mandatario:

RICCARDI Sergio
Consulente in Proprietà Industriale



20367A/83

Numero di serie: 364707

Esaminatore assistente: (illeggibile)

Classe 290 ; Sottoclasse 44 ; Gruppo 217 ;

Data di deposito: 2/4/82

Richiedenti: KERMIT I. HARNER, WINDSOR, CT; JOHN P. PATRICK, SOUTH WINDSOR, CT;
JOSEPH M. KOS, HOLYOKE, MA.

Titolo dell'invenzione: "SISTEMA DI SMORZAMENTO DI UNA TORRE PER TURBINA A
VENTO CON PREVISIONE DEL SUO MOVIMENTO"

Inviare corrispondenza a: M.P. WILLIAMS
PATENT SECTION
UNITED TECHNOLOGIES CORP.
HARTFORD, CT. 06101

Principale procuratore:

La presente sta a certificare che l'allegata é una copia autentica dai registri dell'Ufficio Brevetti degli Stati Uniti della domanda come originariamente depositata e che é sopraidentificata.

F.to G.V. DORSEY

Ufficiale Certificante

Data: 18 GENNAIO 1983

Timbro tondo:

Ufficio Brevetti e Marchi degli Stati Uniti

364707

Stanza ricevimento posta

2 Aprile 1982

DESCRIZIONE

SISTEMA DI SMORZAMENTO DI UNA TORRE PER TURBINA A VENTO CON PREVISIONE
DEL SUO MOVIMENTO

Campo della tecnica

La presente invenzione riguarda sistemi generatori di energia elettrica a turbina a vento montati su torre, e più particolarmente lo smorzamento della frequenza risonante primaria della torre mentre si modula l'angolo della pala

del rotore per mantenere una coppia od una potenza di esercizio.

Fondamento della tecnica

L'uso del vento come sorgente a basso costo di energia elettrica ha l'ovvio svantaggio di essere dipendente dalle condizioni del vento. Per rendere un sistema generatore elettrico a turbina a vento sia utile che economicamente valido, é necessario assicurare il funzionamento della turbina a vento su una ampia gamma di condizioni di vento e sulla più larga frazione di tempo possibile. Perciò le turbine a vento sono tipicamente posizionate (qualche volta in gruppi chiamati "fattorie di energia eolica) ove le condizioni prevalenti del vento sono relativamente favorevoli, vale a dire ove vi é una velocità sufficiente su una parte piuttosto grande del tempo. Tuttavia quando il vento é di forza sufficiente per una generazione di energia elettrica utile, esso é generalmente a raffiche durante una frazione notevole del tempo.

Per un'efficace generazione del vento, pale molto grandi (coppie di pale che in totale sono dell'ordine da 30 a 100 m di lunghezza) sono montate alla sommità di torri molto alte (come tra 30 m e 90 m di altezza). Poiché la turbina a vento é collegata direttamente al generatore elettrico ed al sistema di energia (benché attraverso ruotismi ed alberi d'accoppiamento elastici), il mantenimento del livello desiderato di produzione di energia elettrica (in modo che essa può contribuire all'energia totale fornita ad una rete di distribuzione elettrica) richiede la modulazione dell'angolo di pala per compensare gli effetti di raffiche di vento imprevedibili e della turbolenza sulla potenza sviluppata dalla turbina a vento. Perciò sono stati forniti sistemi per sorvegliare o la coppia desiderata di albero del rotore del rotore della turbina a vento, oppure la potenza generata dal generatore ed utilizzare le variazioni nell'uno o l'altro di questi fattori per modulare l'angolo del passo delle pale

di rotore in maniera tale da mantenere la potenza di esercizio per le velocità del vento alla velocità del vento di esercizio ed al di sopra di essa. Poiché la coppia e la potenza sono direttamente correlate dalla velocità di rotazione del generatore, questi termini sono usati in modo intercambiabile in questa relazione e vengono indicati alternativamente come coppia/potenza. L'effetto massimo avviene quando le pale hanno un basso passo (le superfici della pala sono essenzialmente perpendicolari all'albero del rotore), e l'effetto minimo si verifica quando le pale sono ad un angolo massimo di circa 90° (le superfici sono sostanzialmente parallele all'albero del rotore), la quale posizione viene chiamata come messa in bandiera. Un sistema di controllo dell'angolo di pala di questo tipo viene descritto nel brevetto U.S.A. N° 4.193.005 della stessa richiedente.

Un'alta torre di supporto per turbina a vento, con pale molto grandi, alberi ed ingranaggi, apparecchiature generatrici di elettricità e apparecchiature varie di controllo e di protezione disposte alla sua sommità, è necessariamente una massa a sbalzo avente una rigidità costante ed un rapporto di smorzamento strutturale. Qualsiasi forza ecciterà la risonanza primaria della torre.

La spinta sulle pale (provocata dal vento che agisce sulle pale parallele all'asse di rotazione del rotore della turbina a vento) una forza che tende ad accelerare l'apparecchiatura della turbina a vento nella direzione del vento. La sommità della torre per la turbina a vento perciò assume (in condizioni di stato stazionario) una posizione in cui la forza di spinta viene equilibrata dalla forza di sollecitazione e sviluppata nella struttura della torre, dipendente dalla rigidità della torre. Se la velocità del vento cambia (una raffica), ciò altera la forza netta sull'apparecchiatura in corrispondenza della sommità

della torre che fa sì che la torre si defletta avanti ed indietro (oscilli) in una direzione parallela alla forza del vento. Quando la velocità del vento è al di sotto di quella che produrrà la potenza di esercizio, l'angolo di pala del rotore può essere fisso oppure può essere modulato leggermente per ottimizzare la cattura di energia quando cambia la velocità del vento. Con un angolo di pala fisso (o quasi costante), la spinta (forza del vento longitudinale) sulle pale aumenterà con l'aumento della velocità del vento in tutti i casi, e perciò qualsiasi movimento della sommità della torre fornirà uno smorzamento aerodinamico positivo alla torre (nello stesso senso dello smorzamento strutturale della torre). In tal caso l'oscillazione della torre nel suo modo di flessione primario, in risposta ad una forza incrementale dovuta ad una raffica di vento, si smorzerà e sarà di poco disturbo. Al di sopra della velocità di esercizio del vento (cioè quella che produrrà la potenza di esercizio), il controllo di potenza reagisce alle variazioni di potenza o di coppia provocate dalle raffiche di vento o dalla turbolenza per regolare (modulare) l'angolo di pala del rotore in una maniera tale da tendere a mantenere costante la potenza o la coppia. Quando la velocità del vento aumenta, se la potenza viene tenuta costante, la spinta diminuisce inerentemente. Così la modulazione di pala, in risposta ad una raffica, per mantenere costante la potenza, risulta inerentemente in una spinta incrementale opposta, che è perciò in una direzione tale da fornire uno smorzamento aerodinamico negativo alla torre. Questo smorzamento negativo si sottrae dallo smorzamento strutturale della torre e risulta in oscillazioni aumentate della torre. In turbine a vento progettate per una massima cattura di energia del vento ed uno stretto controllo di potenza, lo smorzamento negativo può superare lo smorzamento strutturale durante il funzio-

namento controllo in potenza. Ciò produce uno smorzamento negativo netto sulla torre in modo che la torre diventa instabile (il movimento della torre aumenta in ciascun ciclo di essa alla frequenza risonante primaria della torre). Infatti l'analisi dettagliata ha mostrato che l'interazione tra la torre ed il controllo coppia /potenza può risultare in una severa degradazione della durata alla fatica della torre, da diverse decine di anni fino all'ordine di pochi anni.

La considerazione iniziale del problema può portare in risalto l'utilizzazione del filtro a tacca per tagliare severamente la correzione dell'angolo di pala ad una frequenza di comando dell'angolo di pala relativa alla frequenza della torre del primo modo di flessione e al suo apparecchio. Tuttavia questo sistema risulta in grandi errori transitori nella potenza generata a causa di una riduzione nelle caratteristiche di risposta dell'anello di controllo di potenza. E' stato anche suggerito che un regime di variazione del passo dello angolo di pala potrebbe essere aumentato su un segnale preso dalla flessione della torre per fornire lo smorzamento effettivo sulla torre; tuttavia non si è fatto niente di tale suggerimento.

Descrizione dell'invenzione

Gli scopi della presente invenzione includono quello di fornire uno smorzamento positivo ulteriore ad una torre per turbina a vento mentre si permette che un controllo di potenza moduli l'angolo di pala per minimizzare le fluttuazioni di coppia o potenza che risultano dalla turbolenza del vento.

In conformità con la presente invenzione, un sistema generatore elettrico motorizzato con turbina a vento avente un controllo per modulare l'angolo di pala del rotore per mantenere una coppia o potenza di esercizio in vento turbolento, disposto alla sommità di una torre, fornisce una componente di comando

dell'angolo di pala che regolerà l'angolo di pala del rotore di turbina in una maniera da fornire uno smorzamento aerodinamico positivo della torre in risposta ad un segnale di movimento previsto indicativo del movimento longitudinale anticipato analiticamente della torre parallelo all'asse del rotore come una funzione filtrata del segnale di riferimento dell'angolo di pala.

In ulteriore accordo con la presente invenzione, l'ulteriore smorzamento positivo viene fornito da una componente di segnale di riferimento di angolo di pala correlata al segnale di riferimento dell'angolo di pala dalla funzione di trasferimento $\frac{KA S}{\bar{K} \{(TA)S+1\} \{(\bar{M}/\bar{K})S^2 + (\bar{D}/\bar{K})S+1\}}$, in cui KA é il guadagno desiderato, TA approssima il ritardo del meccanismo dell'angolo del passo di pala, $\bar{K}$, $\bar{M}$, $\bar{D}$ sono valori approssimati calcolati di rigidità, massa e fattore di smorzamento rispettivamente della torre di turbina a vento.

La presente invenzione può essere realizzata in un modo analogico oppure può essere realizzata in un modo digitale, o con parti fisiche componenti digitali dedicate o come elementi di programma in un adatto calcolatore quale un microprocessore.

La presente invenzione fornisce una riduzione notevole nella risposta al modo primario di flessione di una torre per turbina a vento dovuta all'accoppiamento tra la torre ed il sistema di controllo dell'angolo di pala correlato ad essa, con un minimo impatto sulla prestazione di generazione di potenza. La presente invenzione viene facilmente realizzata senza ulteriori elementi dinamici alla sommità della torre di controllo, per mezzo di una semplice aggiunta di circuiti o di una semplice variazione nel programma di un calcolatore che controlla l'angolo di pala.

I precedenti ed altri scopi, caratteristiche e vantaggi della presente invenzione diverranno più chiari alla luce della seguente descrizione dettagliata di sue forme di realizzazione esemplificative come illustrate nei disegni annessi in cui:

Breve descrizione dei disegni
la Fig. 1 é un diagramma a blocchi schematico semplificato di una turbina a vento che include un sistema di controllo dell'angolo del passo di pala avente una forma di realizzazione della presente invenzione incorporata in esso; e

la Fig. 2 é un diagramma teorico illustrante le caratteristiche strutturali di una torre per turbina a vento e di alcuni degli effetti di spinta su di essa.

Una forma di realizzazione esemplificativa della presente invenzione viene descritta come essa può essere realizzata in un sistema di controllo a molti modi per turbine a vento del tipo descritto nel già menzionato brevetto U.S.A. N° 4.193.005. Una descrizione generale del sistema di controllo descritto in detto brevetto viene dapprima data rispetto ai numeri di riferimento 10-104 nei disegni annessi, che sono gli stessi numeri di quelli di detto brevetto; i riferimenti tra parentesi alle figure si riferiscono alle figure di detto brevetto. Dopo di ciò il problema di interazione tra torre e controllo viene analizzato e vengono descritte forme di realizzazione dell'invenzione.

Riferendosi ora ai disegni annessi, una costruzione rappresentativa di turbina a vento consiste in due pale di rotore 10 identiche diametralmente opposte, che formano tipicamente un totale in lunghezza tra 30 m e 100 m, montate su una torre di supporto 12. I componenti meccanici, i dispositivi di controllo e l'apparecchiatura generatrice elettrica che compongono la turbina a vento sono contenuti in una gondola 14 supportata dalla torre 12. La costruzione delle turbine a vento e delle apparecchiature accessorie per esse, come i controlli di imbar-

data per orientare le pale nel vento prevalente, sono tutte cose ben note e non vengono descritte ulteriormente in questa relazione.

Le pale di rotore 10 della turbina sono montate su un mozzo 16 che é collegato attraverso un albero d'accoppiamento 18 a bassa velocità ad una apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32 che può includere una scatola ingranaggi, un albero ad alta velocità, un generatore sincrono, un'apparecchiatura per collegare il generatore ad un carico (come la rete di energia di un servizio di energia elettrica), ed un circuito sincronizzatore di fase. L'apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32 fornisce un segnale di linea escluso/inserito su una linea di segnale 34 indicativa di quando il generatore é collegato sulla linea alla rete di utilizzo.

Un controllo 36 dell'angolo del passo di pala, mostrato generalmente in Fig. 3 di detto brevetto, fornisce un segnale di angolo di pala desiderato o di riferimento BR ad un meccanismo 38 elettroidraulico di variazione del passo su una linea 40. Il meccanismo 38 di variazione del passo fa si che le pale 10 raggiungano un angolo di pala effettivo (BP in detto brevetto) eguale al segnale BR dell'angolo di pala di riferimento sulla linea 40.

Segnali indicativi dei parametri operativi istantanei della turbina a vento sono forniti al controllo 36 dell'angolo del passo di pala. Un trasduttore 46 di velocità del rotore associato con il mozzo 16 fornisce un segnale di velocità di rotore NR su una linea 48. Un simile trasduttore 50 collegato ad un albero nel generatore sincrono fornisce un segnale di velocità di generatore NG su una linea 52. Un trasduttore di coppia 54, che può comprendere estensimetri disposti sull'albero 18, oppure su un albero adatto entro l'apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32, fornisce un segnale QS di coppia dell'albero su una linea

56. Il segnale di coppia dell'albero sulla linea 56 può alternativamente essere fornito in qualsiasi altra maniera adatta, come rilevando la posizione reciproca di punti spostati assialmente sulla periferia dell'albero in una maniera ben nota. Il controllo 36 dell'angolo del passo di pala é anche fornito di una pluralità di segnali di riferimento fissi o variabili indicativi di una velocità di riferimento del rotore a vuoto, limiti sull'accelerazione e la decelerazione del rotore ed un segnale di avviamento e di arresto indicativo di quando la turbina a vento deve essere operativa o messa in bandiera ed essenzialmente stazionaria. Questi segnali vengono descritti più completamente rispetto alla Fig. 2 di detto brevetto. Un sensore 74 della velocità del vento, disposto sulla gondola 14, fornisce un segnale indicativo di una velocità media del vento VW su una linea 76.

Quando la turbina a vento non é in uso, le pale 10 sono posizionate al loro massimo angolo di passo 90° in modo che esse sono messe in bandiera. Così le pale non eserciteranno essenzialmente alcuna coppia sul mozzo 16. Quando la turbina a vento deve essere posta in uso, un segnale di avviamento fa sì che i controlli a vuoto, di avviamento e di arresto 78-94 (non chiamati in questa maniera in detto brevetto e descritti più particolarmente nelle Figg. 4 e 5 di detto brevetto) diminuiscano gradualmente l'angolo di pala in modo da accelerare il rotore ed in generatore verso condizioni di velocità di esercizio senza stallo della pala o senza indurre grandi sollecitazioni di accelerazione. Una volta che il rotore della turbina a vento sta funzionando ad una velocità angolare che é correlata nel modo desiderato alla frequenza dell'energia elettrica generata che é necessaria, la velocità può quindi essere variata leggermente finché l'apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32 sta funzionando in

modo sincrono con la frequenza dell'energia elettrica sulla rete di utilizzo alla quale verrà in definitiva collegato il generatore. A questo punto nel tempo, il controllo viene spostato dal controllo a vuoto, di avviamento e di arresto 78-94 al controllo 100 di coppia dell'albero, descritto in dettaglio rispetto alla Fig. 6 di detto brevetto). Se la turbina a vento deve essere arrestata, il controllo ritorna ai controlli a vuoto, di avviamento ed arresto 78-94 in modo da far sì che le pale vengano messe in bandiera senza eccessive sollecitazioni di decelerazione. Come descritto in detto brevetto, il segnale di regime di angolo di pala minimo BMN sulla linea 95 è tale da provocare una variazione nell'angolo di pala necessaria a mantenere un regime fisso di accelerazione angolare del rotore durante l'avviamento, per mantenere l'appropriata velocità di rotazione angolare durante la marcia a vuoto, e per mantenere un regime fisso di decelerazione angolare del rotore durante l'arresto.

Quando l'apparecchiatura generatrice di elettricità 20-32 è messa in fase sincrona con la tensione sulla rete di energia (stessa frequenza, ampiezza e fase), l'apparecchiatura è collegata alla rete di energia ed un segnale appare sulla linea 34 per indicare che la turbina a vento è in linea. La transizione tra il funzionamento in linea ed il funzionamento fuori linea viene effettuata mediante un selettore di modo 96 (descritto in maggiore dettaglio rispetto alla Fig. 7 di detto brevetto) che risponde al segnale di linea escluso/inserito 34. Quando ciò si verifica, il selettore di modo 96 applica un segnale BQ di regime d'angolo di pala di coppia dell'albero su una linea 98 (non tenendo conto del perfezionamento dell'invenzione che viene descritta qui appresso) ad una linea 102 ove diventa il segnale di regime di riferimento di angolo di pala BR; ma quando la turbina a vento è fuori linea, l'assenza del segnale sulla linea

34 fa sì che la linea 102 sia rispondente al segnale di regime minimo $\dot{B}MN$ su una linea 95. Quando la turbina a vento è in linea, il segnale di regime di angolo di pala di coppia sulla linea 98 è tale che estrarrà la potenza massima dalla turbina a vento fino al valore di potenza di esercizio per tutte le velocità del vento tra l'inserimento ed il distacco; alle velocità di vento di esercizio, il segnale sulla linea 98 viene variato per mantenere la coppia d'albero rilevata (o potenza) al valore di riferimento (di esercizio).

Il segnale di regime d'angolo di pala desiderato prescelto, il segnale di regime di riferimento dell'angolo di pala $\dot{B}R$ sulla linea 102, viene convertito nel segnale di riferimento di angolo di pala BR sulla linea 40 per mezzo di un integratore 104 (descritto più completamente con riferimento alla Fig. 8 in detto brevetto). L'integratore 104 include un apparecchio per limitare il regime di variazione del segnale sulla linea 40 nonché per limitare le sue grandezze massime positiva e negativa.

La descrizione finora effettuata rispetto ai numeri di riferimento 10-104 è descrittiva di un sistema di controllo esemplificativo della tecnica precedente in cui la presente invenzione può essere messa in pratica. Questa descrizione è un riassunto di quella del brevetto sopra menzionato. Come descritto brevemente in precedenza, l'accoppiamento avverso tra il modo di pressione primario della torre di supporto 12 ed il sistema di controllo della turbina a vento descritto finora viene alleviato dalla presente invenzione attraverso lo espediente di fornire ulteriori componenti di comando di riferimento dell'angolo di pala per provocare variazioni incrementali di spinta che sono previste essere in fase con la velocità della sommità della torre, in modo da fornire ulteriore smorzamento aerodinamico positivo alla torre. Ciò aiuta a smorzare

via qualsiasi oscillazione della torre indotta da perturbazioni sul carico delle pale e la correzione proporzionata dell'angolo di pala come viene provocata da turbolenza di vento imprevedibile.

Per un'analisi linearizzata del problema dell'accoppiamento del controllo dell'angolo di pala e torre di turbina a vento a cui si allude in precedenza, si fa riferimento alla Fig. 2. In essa l'apparecchio a torre 220 rappresenta la torre 12, la gondola 14 e tutti gli altri apparecchi disposti alla sommità della torre (incluse le pale 10). La Fig. 2 illustra la risposta della torre come conseguenza di una spinta incrementale sulle pale (assialmente, parallelamente all'albero del mozzo del rotore). Una spinta incrementale ΔT è rappresentata da una linea 221; l'effetto di tale spinta è ridotto in 222 dall'effetto di smorzamento illustrato da una linea 223 e l'effetto di rigidità illustrato da una linea 234. La spina effettiva netta rappresentata da una linea 225 provocherà una variazione nell'accelerazione rappresentata da una linea 226 in una maniera correlata inversamente alla massa 227 della torre. L'accelerazione indicata in questa relazione come $\ddot{Z}$, avviene nella direzione dell'asse del mozzo, ed è di una polarità dipendente dalla direzione della spinta incrementale ΔT . L'integrale 228 dell'accelerazione incrementale 226 risulta in una velocità incrementale $\dot{Z}$ 229.

L'integrazione 230 della velocità incrementale 229 risulta in una posizione incrementale 231 dell'apparecchio alla sommità della torre. La posizione incrementale 231 è rappresentativa di una variazione avvicinandosi od allontanandosi da una posizione di riposo della torre entro la quale la sollecitazione nella direzione Z è nulla. Se la torre viene piegata in modo che il suo apparecchio è ulteriormente distaccato dalla posizione di riposo, la rigidità è equivalente ad

una resistenza alla spinta; ciò viene rappresentato dal blocco 232 in cui K_T rappresenta la rigidità effettiva della torre.

La velocità incrementale della torre 229 è correlata dal rapporto di smorzamento effettivo D_T della torre 233 alla spinta negativa equivalente in una maniera nota. Tuttavia il movimento della torre 229 provoca anche una variazione nella velocità del vento relativa 234. Così se vi è un aumento nella velocità del vento, il vento in effetti soffierà sulla torre nella direzione più Z , in modo che la velocità netta relativa del vento sulle pale stesse è inferiore di quanto sarebbe se la torre fosse incapace di muoversi nella direzione Z . Questa analisi è un'investigazione semplificata e linearizzata dell'effetto di una tale raffica di vento sulla torre, inclusi gli effetti correttivi forniti dal sistema di controllo della Fig. 1, il controllo 36 dell'angolo del passo di pala ed il meccanismo 38 di variazione del passo che sono rappresentati in una maniera idealizzata (nella maniera descritta qui appresso) dal blocco 235.

La spinta (forza sulle pale parallela all'asse di rotazione delle pale) è una funzione dell'angolo di pala (B), della velocità del vento (VW), e della velocità del rotore (NR). Per piccole perturbazioni attorno ad un punto operativo allo stato stazionario, la variazione nella spinta (ΔT) viene espressa da:

$$(1) \quad \Delta T = \frac{dT}{dB} \Delta B + \frac{dT}{dVW} \Delta VW + \frac{dT}{dNR} \Delta NR$$

Una simile espressione per la variazione nella coppia del rotore (ΔQR) è:

$$(2) \quad \Delta QR = \frac{dQR}{dB} \Delta B + \frac{dQR}{dVW} \Delta VW + \frac{dQR}{dNR} \Delta NR$$

Nelle espressioni (1) e (2) "d" denota la derivata parziale.

L'effetto di un generatore elettrico che alimenta una grande rete di utilizzo può essere paragonato ad un motore che comanda un volano infinito ad una velocità nominale. A causa di ciò ed a causa del fatto che vi è un'elasticità suffi-

ciente nell'albero tra il rotore ed il generatore, la velocità del rotore della turbina a vento é essenzialmente costante ($\Delta NR = 0$). Per un controllo di potenza ideale (un controllo che é capace di fornire una regolazione completa ed istantanea dell'angolo di pala per le variazioni in potenza o coppia), quando si opera al di sopra della velocità del vento di esercizio, la coppia del rotore é anche costante ($\Delta QR = 0$). Perciò, dall'espressione (2)

$$(3) \quad \frac{dQR}{dB} \Delta B = - \frac{dQR}{dVW} \Delta VW$$

e

$$(4) \quad \Delta B = - \frac{dQR/dVW}{dQR/dB} \Delta VW$$

Sostituendo l'espressione (4) nell'espressione (1) per il caso in cui l'ultimo termine (ΔNR) = 0,

$$(5) \quad \Delta T = - \frac{dT}{dB} \cdot \frac{dQR/dVW}{dQR/dB} \Delta VW + \frac{dT}{dVW} \Delta VW$$

$$(6) \quad \Delta T = \left\{ \frac{dT}{dVW} - \frac{dQR/dVW}{dQR/dB} \left(\frac{dT}{dB} \right) \right\} \Delta VW$$

Per un angolo di pala fisso $\Delta B = 0$, si ha così:

$$(7) \quad \frac{dT}{dB} \Delta B = 0$$

in modo che lo smorzamento aerodinamico della torre in tal caso sarà semplicemente:

$$(8) \quad \frac{\Delta T}{\Delta VW} = \frac{dT}{dVW}$$

Lo smorzamento aerodinamico dell'espressione (8) é dello stesso senso dello smorzamento strutturale positivo della torre e si aggiunge ad esso.

D'altra parte con un controllo effettivo di potenza in posizione, in modo che l'angolo di pala non é fisso, lo smorzamento aerodinamico sulla torre é molto più complesso. Considerando un controllo di potenza ideale dall'espressione (6), lo smorzamento aerodinamico totale é:

$$(9) \quad \frac{\Delta T}{\Delta VW} = \frac{dT}{dVW} - \frac{dQR/dVW}{dQR/dB} \left(\frac{dT}{dB} \right)$$

Riferendosi ora alla Fig. 2, l'espressione (1) viene riportata nei blocchi 240-243 della parte di effetto di spinta 236 che assieme con il controllo idealizzato 235 é anche rappresentativo dell'espressione (9) purché si assuma che la variazione nella velocità del rotore (ΔNR) é nulla. Si noti che una componente ΔT negativa (se aggiunta a ΔT alla linea 221, Fig. 2) sarebbe dello stesso senso dello smorzamento strutturale positivo sulla linea 223 e si aggiungerebbe ad esso.

Così la Fig. 2 é un'espressione dell'effetto della raffica di vento sulla torre, inclusa la dinamica della torre, l'effetto del vento sulle pale, e l'effetto della variazione proporzionata potenza/coppia che opera attraverso una unità di controllo di potenza idealizzata che varia l'angolo di pala come conseguenza di tale raffica di vento. L'analisi di un'ampia varietà di configurazioni di torre e di controllo, incluse le caratteristiche strutturali della torre, l'aerodinamica della turbina a vento e le caratteristiche di risposta del controllo di un controllo idealizzato, mostreranno che l'effetto totale della spinta incrementale come conseguenza di una raffica di vento risulta nello smorzamento negativo in modo che la torre é instabile.

Secondo una forma di realizzazione della presente invenzione, una componente di segnale di regime di riferimento di angolo di passo di pala correttiva viene sommata come il segnale $\dot{B}Q$ di regime di riferimento di angolo di passo di pala controllo di coppia/potenza sulla linea 98 in una maniera tale da fornire ulteriore smorzamento al movimento della torre nel suo modo di flessione primario, su una base di una stima del movimento della torre che risulterà da una componente incrementale dell'angolo di pala che risulta dalla reazione del controllo

coppia/potenza ad una raffica di vento (per esempio 235, Fig. 2).

Riferendosi alla Fig. 1, il segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala sulla linea 40 viene applicato ad un filtro di ritardo 250 le cui caratteristiche si avvicinano al ritardo effettivo del meccanismo elettroidraulico 38 di variazione del passo. Ciò fornisce un segnale di riferimento filtrato (BL_n) dell'angolo di pala su una linea 251 ad un amplificatore 252 che ha un guadagno equivalente alla derivata parziale della coppia rispetto all'angolo di pala (e perciò è rappresentativo del blocco 241 in Fig. 2). Ciò fornisce un segnale di punta incrementale su una linea 253 che è equivalente al segnale di spinta incrementale (ΔT) sulla linea 221 della Fig. 2, e viene applicato attraverso un filtro 254 che è un modello della struttura della torre di controllo in modo da fornire una componente di segnale correttivo di regime di riferimento dell'angolo del passo di pala su una linea 255 che risulta in una componente di spinta incrementale che fornisce lo smorzamento positivo aerodinamico alla torre descritta rispetto alla Fig. 2 qui in precedenza. Entro il filtro 254 i fattori $\bar{M}$, $\bar{K}$, $\bar{D}$ sono equivalenti calcolati e stimati della massa effettiva, della costante elastica e del fattore di smorzamento della torre per turbina a vento (come illustrata entro l'apparecchio di torre 220 della Fig. 2). Per la realizzazione in una maniera analogica, la linea di segnale 253 alimenta un amplificatore che fornisce le funzioni di una giunzione di sommazione 256 con un guadagno 257 di $1/\bar{M}$, la cui uscita sulla linea 255 viene alimentata ad un integratore 258 e di qui su una linea 259 ad un secondo integratore 260. Il segnale sulla linea 259 viene applicato ad un amplificatore 261 avente un guadagno $\bar{D}$, la cui uscita su una linea 262 viene alimentata allo ingresso 256 della giunzione di sommazione dell'amplificatore. In modo simile

l'uscita dell'integratore 260 su una linea 263 viene alimentata attraverso un amplificatore 264 avente un guadagno di $\bar{K}$, la cui uscita su una linea 265 viene anche applicata all'entrata di sommazione 256 dell'amplificatore. Nell'apparecchio effettivo il guadagno 252 viene regolato per l'effetto desiderato e generalmente sarà superiore a dT/dB ; il guadagno totale desiderato del filtro viene chiamato in questa relazione KA . Naturalmente il guadagno 252 potrebbe essere fornito entro il filtro di ritardo 250 nella maniera usuale ben nota; la sua illustrazione separata in Fig. 1 serve a chiare la funzione che viene effettuata.

Il filtro totale incluso il modello di torre 254 in unione con il filtro di ritardo 250 ed il guadagno 252 illustrato in Fig. 1 ha la seguente funzione di trasferimento:

$$(10) \quad \frac{(KA)S^2}{\bar{K} \{(TA) S+1\} \{(\bar{M}/\bar{K})S^2 + (\bar{D}/\bar{K})S+1\}} -$$

in cui KA è il guadagno totale che può essere regolato per fornire il grado di smorzamento desiderato della torre. In effetti l'invenzione può essere messa in pratica semplicemente applicando una versione ritardata del-segnale di riferimento BR di angolo di pala sulla linea 40 a qualsiasi mezzo elaboratore di segnale che possa fornire la funzione di trasferimento dell'espressione (10). Per esempio in un sistema di controllo dell'angolo del passo di pala per turbina a vento che viene realizzato utilizzando un opportuno calcolatore programmato, l'aggiunta al programma di calcolatore richiesta per aggiungere la presente invenzione ad una versione a calcolatore programmato del sistema di controllo del brevetto sopra menzionato può essere come viene riportato qui appresso.

Programma di filtro

1. Passare alla fine se non in linea
2. $BL_n = BL_m + TA (BR - BL_m)$
3. $BL_m = BL_n$
4. $\Delta T = dT/dB * BL_n$ (o $\Delta T = KA * BL_n$)
5. $\bar{T} = \Delta T + \bar{D} * \dot{Z}_m + \bar{K} * Z_m$
6. $\dot{Z}_n = \bar{T} / \bar{M}$
7. $\dot{Z}_n = k_1 * \dot{Z}_n + \dot{Z}_m$
8. $Z_n = k_2 * \dot{Z}_n + Z_m$
9. $\dot{Z}_m = \dot{Z}_n$
10. $Z_m = Z_n$
11. $\ddot{BQ}'_n = \ddot{BQ}_n + \ddot{Z}_n$
12. Fine

La prima fase del programma di filtro semplicemente sorpassa il programma ogni volta che la turbina a vento non é in linea (vale a dire non vi é equivalente di indicatore individuale al segnale sulla linea 34 indicante che il sistema é in linea). La seconda fase del programma fornisce il segnale di riferimento dell'angolo di pala filtrato mediante un ben noto algoritmo di ritardo, in cui TA é un equivalente della costante di tempo del filtro 250 in Fig. 1, come correlata al tempo di ciclo del calcolatore (che può essere dello ordine di 50 millisecondi circa). Nel programma "n" denota il valore corrispondente per il ciclo corrente mentre "m" denota il valore correlato nel ciclo immediatamente precedente. La terza fase del programma semplicemente aggiorna il valore del segnale di riferimento dell'angolo di pala filtrato per l'uso nel ciclo successivo. La quarta fase del programma fornisce il guadagno dello amplificatore 252 in Fig. 1 (oppure il guadagno complessivo desiderato KA). La quinta fase del programma fornisce la sommatoria dell'ingresso di sommazione 256; si noti che come é vero in qualsiasi realizzazione di calcolatore di

un sistema a retroazione, il valore di retroazione può soltanto essere generato con valori di componente forniti nel ciclo immediatamente precedente: poiché questi valori cambiano soltanto leggermente in un tempo di ciclo del calcolatore, ciò non influenza le prestazioni complessive in alcuna maniera misurabile. La fase 6 fornisce il guadagno dell'amplificatore 257 e la fase 7 fornisce l'integrazione 258 ove il valore K_1 è una costante di tempo equivalente per il tempo del ciclo del calcolatore in maniera ben nota. In modo simile la fase 8 fornisce l'integrazione 260 della Fig. 1. Le fasi 9 e 10 aggiornano i valori dei fattori di movimento e di distanza per l'uso in un ciclo successivo. La fase 11 fornisce una sommatoria equivalente alla giunzione di sommazione 266 in Fig. 1 e la fase 12 indica la fine dell'operazione (ritorno alle altre parti del programma) in una maniera ben nota. In un caso tipico, la previsione del segnale di riferimento dell'angolo di pala (linea 40, Fig. 1) può essere preferita da accogliere in un calcolatore digitale che può effettuare notevole sorveglianza di autodiagnosi, correzione del modo di avaria e controllo di arresto. In un tal caso la presente invenzione può preferibilmente essere realizzata dal precedente programma filtro entro tale calcolatore digitale. In un caso in cui si impieghi un sistema analogico (generalmente del tipo mostrato in Fig. 1) per generare il segnale di riferimento dell'angolo di pala, un apparecchio analogico capace di realizzare la funzione di trasferimento dell'espressione 10 riportata in precedenza, sia del tipo mostrato in Fig. 1 od altrimenti, può anche essere impiegato. Oppure si può utilizzare ogni qualvolta sia appropriato un apparecchio digitale dedicato di opportuno tipo. Tutto ciò può essere fornito bene entro le conoscenze della tecnica utilizzando apparecchi e tecnologie che sono facilmente disponibili alla luce dei precedenti

principi.

Un'altra maniera di considerare la presente invenzione é che essa fornisce una stima prevedibile del movimento incrementale della torre che può risultare come conseguenza di una variazione nell'angolo di pala. Come tale essa é una versione analitica grossolana della soluzione descritta nella domanda di brevetto depositata in pari data dalla stessa richiedente dal titolo "Sistema di smorzamento di una torre per turbina a vento rispondente al suo movimento". Così il segnale $\ddot{Z}$ sulla linea 255 o nella fase 6, può essere considerato un segnale di accelerazione prevista generato dal filtraggio del segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala con la funzione di trasferimento dell'espressione (10) riportata in precedenza.

Si noti che l'integrazione 104 della sommatoria sulla linea 98a della componente di modulazione coppia/potenza sulla linea 98 e della componente di smorzamento sulla linea 255 risulta in una componente del segnale di riferimento dell'angolo di pala per lo smorzamento che é una funzione della velocità ($\dot{Z}$). Perciò il segnale di velocità previsto sulla linea 259 potrebbe essere sommato con l'uscita dell'integratore 104 invece di sommare il segnale di accelerazione prevista con il regime di riferimento dell'angolo del passo di pala prima dell'integratore 104. Nell'uno o nell'altro caso la relazione della componente del segnale di smorzamento con il segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala é quella dell'espressione (10) riportata in precedenza, ma con S al posto di S^2 al numeratore. L'invenzione può essere usata anche nel modo fuori linea se lo si desidera. Il fattore significativo é che il movimento previsto fornisce una componente dell'angolo del passo di pala che risulta in una componente di spinta per lo smorzamento aerodinamico positivo.

In modo simile, benché la presente invenzione é stata mostrata e descritta rispetto a sue forme di realizzazione esemplificative, si deve comprendere da parte delle persone esperte nella tecnica che le precedenti e varie altre modifiche, omissioni ed aggiunte possono essere apportate in essa e ad essa senza discostarsi dallo spirito e dall'ambito dell'invenzione stessa.

RIVENDICAZIONI

1. Sistema di turbina a vento per generare energia elettrica comprendente: una torre; un rotore disposto su detta torre includente pale disposte per ruotare attorno ad un asse ed un meccanismo di variazione dell'angolo del passo di pala; mezzi per fornire un segnale effettivo coppia/potenza indicativo della coppia/potenza effettiva generata da detto sistema di turbina a vento; e mezzi elaboratori di segnale per fornire un segnale di riferimento coppia/potenza indicativo della coppia/potenza generata desiderata, e per fornire un segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala come funzione della differenza tra detto segnale coppia/potenza effettiva e detto segnale coppia/potenza di riferimento, caratterizzato dal fatto che detto elaborazione di segnale comprende mezzi per fornire detto segnale di riferimento dell'angolo di passo di pala come combinazione di una componente di segnale di smorzamento correlata ad una funzione filtrata di detto segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala e di una componente di segnale di controllo coppia/potenza che é detta funzione della differenza tra detto segnale coppia/potenza effettiva e detto segnale coppia/potenza di riferimento.

2. Sistema di turbina a vento secondo la rivendicazione 1 caratterizzato dal fatto che detti mezzi di elaborazione di segnale comprendono mezzi per fornire detto componente del segnale di smorzamento filtrando detto segnale di riferi-

mento dell'angolo del passo di pala con la funzione di trasferimento

$$\frac{(KA) S}{\bar{K} \{ (TA) + 1 \} \{ (\bar{M}/\bar{K}) S^2 + (\bar{D}/\bar{K}) S + 1 \}}$$

in cui S é l'Operatore di LaPlass, TA é una costante di tempo che si approssima al ritardo di detto meccanismo di variazione del passo nel rispondere a detto segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala, e $\bar{K}$, $\bar{M}$ e $\bar{D}$ approssimano rispettivamente la rigidità, la massa e la costante di smorzamento di detta torre e dell'apparecchio disposto su di essa, e per fornire detta componente del segnale di controllo coppia/potenza come funzione integrale della differenza tra detto segnale di coppia/potenza effettiva e detto segnale di coppia/potenza di riferimento.

3. Sistema di turbina a vento secondo la rivendicazione 1 caratterizzato dal fatto che detto mezzo elaboratore di segnale comprende mezzi per fornire un segnale di movimento previsto della torre filtrando detto segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala con la funzione di trasferimento

$$\frac{(KA) S^2}{\bar{K} \{ (TA) + 1 \} \{ (\bar{M}/\bar{K}) S^2 + (\bar{D}/\bar{K}) S + 1 \}}$$

in cui S é l'Operatore di LaPlass, TA é una costante di tempo che si approssima al ritardo di detto meccanismo di variazione del passo nel rispondere a detto segnale di riferimento dell'angolo del passo di pala, e $\bar{K}$, $\bar{M}$ e $\bar{D}$ approssimano rispettivamente la rigidità, la massa e la costante di smorzamento di detta torre e dell'apparecchio disposto su di essa, per fornire un segnale di regime di riferimento dell'angolo del passo di pala come sommatoria di detto segnale di movimento previsto della torre con un segnale indicativo della differenza tra detto segnale di coppia/potenza effettiva e detto segnale di coppia/

potenza di riferimento, e per fornire detto segnale di riferimento dello
 angolo del passo di pala come funzione integrale di detto segnale di regi-
 me di riferimento dell'angolo del passo di pala.

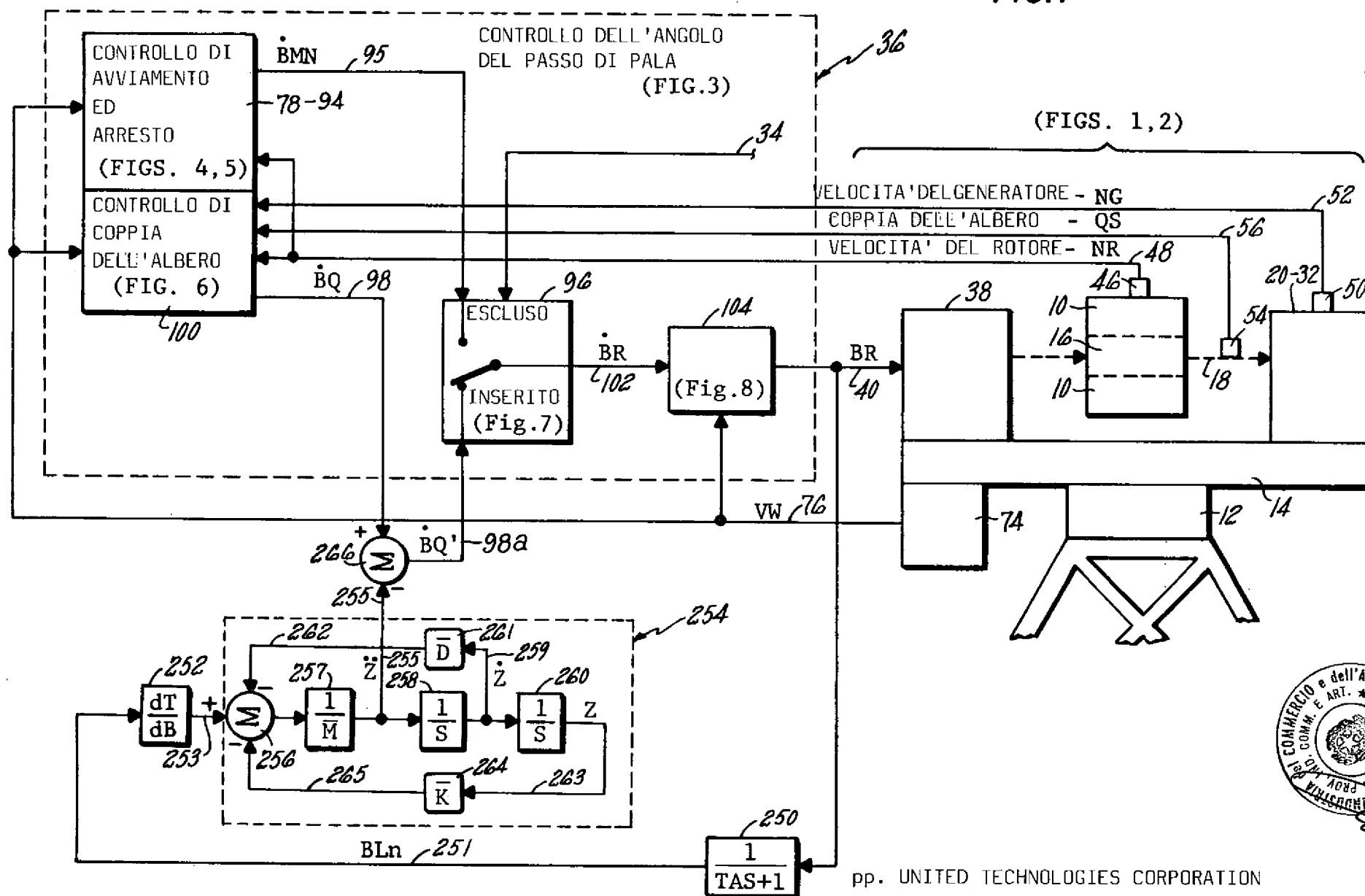
SISTEMA DI SMORZAMENTO DI UNA TORRE PER TURBINA A VENTO CON PREVISIONE DEL SUO MOVIMENTO

RIASSUNTO

Lo smorzamento del modo di flessione primario di una torre (12) che monta
 una turbina a vento avente un controllo (36) per fornire un segnale di rife-
 rimento (40) dell'angolo del passo di pala per modulare il passo delle pale
 (1) della turbina attraverso un meccanismo (38) variatore del passo per una
 potenza costante viene fornito generando il segnale di riferimento dell'angolo
 del passo di pala come integrale (104) della sommatoria (266) di un segnale
 (98) di regime di riferimento dell'angolo del passo di pala che controlla
 la coppia/potenza con un segnale (255) di accelerazione stimata generato dal
 filtraggio (250,252,254) del segnale di riferimento (40) dell'angolo del passo
 di pala con la seguente funzione di trasferimento

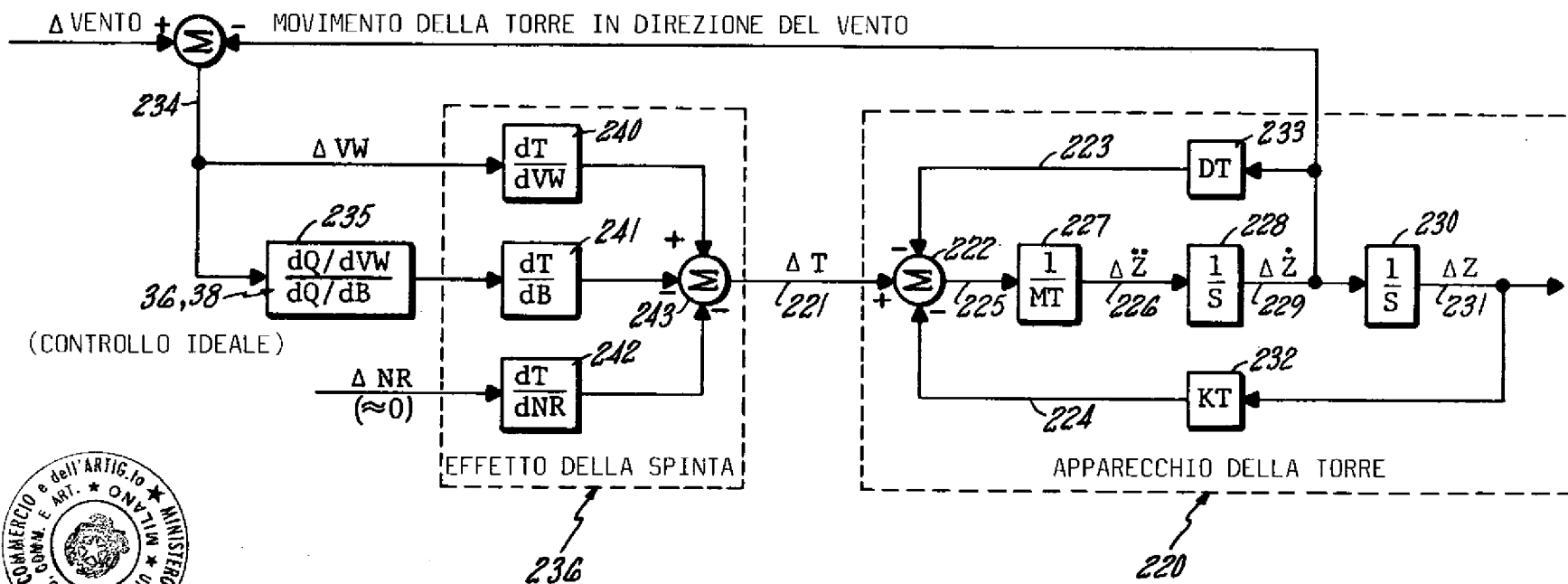
$$\frac{(KA)S^2}{\bar{K} \{(TA) S+1\} \{(\bar{M}/\bar{K})S^2 + (\bar{D}/\bar{K})S+1\}}$$

FIG. 1



pp. UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION
Società dello Stato del Delaware
Il mandatario:
RICCARDI Sergio
Consulente in Proprietà Industriale

FIG. 2



TAV. II



20367A/88

pp. UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION
Società dello Stato del Delaware

Il mandatario

RICCARDI Sergio

Consulente in Proprietà Industriale