

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102009901780117A1

Publication Date

20110503

Applicant

TREVI ENERGY S.P.A.

Title

SISTEMA DI CONTROLLO DI CENTRALI EOLICHE CON AEROGENERATORI
EQUIPAGGIATI CON CONVERTITORI MODULARI A CORRENTE CONTINUA.

Sistema di controllo di centrali eoliche con
aerogeneratori equipaggiati con convertitori modulari a
corrente continua.

5

La presente invenzione si riferisce al campo dei
controlli per macchine elettriche ed in particolare
riguarda un sistema di controllo di centrali eoliche
con aerogeneratori equipaggiati con convertitori
10 modulari a corrente continua.

Come illustrato schematicamente in figura 1, è
noto che le centrali eoliche impiegano una pluralità di
aerogeneratori 1, ognuno equipaggiato con una
rispettiva girante eolica 1a, la quale viene alimentata
15 dall'energia cinetica del vento e può essere
meccanicamente controllata in modo tale da:

- poter variare il suo allineamento rispetto alla
direzione del vento;

- poter variare l'incidenza delle pale che formano
20 la girante 1a, così da regolare la potenza del vento
convertita in potenza meccanica.

All'interno della centrale eolica, ogni
aerogeneratore è connesso in parallelo ad altri
aerogeneratori 1 attraverso una rete elettrica di
25 distribuzione in media tensione comprendente una
pluralità di linee elettriche L di tipo bipolare ed in
corrente continua. L'energia elettrica prodotta dagli
aerogeneratori 1 è convogliata attraverso la rete di
distribuzione in media tensione e corrente continua,
30 viene trasmessa attraverso una o più linee elettriche
in corrente continua in media o alta tensione. A valle

di tali linee elettriche vi è una stazione di trasformazione 3, la quale connette la centrale eolica alla rete elettrica nazionale di trasmissione.

5 All'interno della stazione di trasformazione 3 sono presenti almeno un inverter 3a avente un ingresso alimentato dalla linea L in corrente continua ed una rispettiva uscita alimentante l'ingresso di uno o più trasformatori elevatori 3b collegati tra l'uscita dell'inverter 3a e la rete elettrica.

10 All'interno dell'aerogeneratore 1 sono presenti, così da formarne il treno di potenza o catena di conversione dell'energia (tecnicamente noto con il nome di *drivetrain*), un generatore elettrico 1b avente una pluralità di circuiti elettrici trifase indipendenti di
15 statore (o stelle di tensioni trifase) 2 ognuno dei quali è connesso, tramite una rispettiva linea trifase 2a, con uno stadio di conversione statica dell'energia elettrica 4 di tipo modulare e multi-livello, da tensione alternata (presente sulle stelle 2) a tensione
20 continua. Tra il generatore elettrico 1b e la girante eolica 1a non è interposto alcun moltiplicatore di giri (scatola di ingranaggi), in modo tale da poter ridurre il più possibile il peso della navicella dell'aerogeneratore 1 e da aumentare l'efficienza
25 energetica e l'affidabilità dell'intero sistema.

Più in dettaglio, come illustrato in figura 2, lo stadio di conversione 4 da corrente (tensione) alternata (AC) a corrente (tensione) continua (DC), comprende al suo interno una pluralità di moduli di
30 conversione AC-DC 4a'-4a'''' ognuno dei quali ha un rispettivo ingresso connesso con una rispettiva linea trifase 2a e una rispettiva coppia di terminali di

uscita 4b 4c tra i quali è connesso un rispettivo banco di condensatori. I moduli di conversione AC-DC 4a'-4a'''' sono del tipo a tensione impressa formati da dispositivi elettronici comandati a commutazione forzata (IGBT, IGCT o MCS) e dai rispettivi diodi di ricircolo connessi a loro in antiparallelo, in modo da formare un ponte trifase.

Ogni modulo di conversione AC-DC 4a'-4a'''' è connesso in serie ai restanti moduli di conversione AC-DC, cosicché, ognuno dei terminali 4b di ogni modulo di conversione AC-DC 4a è direttamente connesso con il terminale 4c del convertitore adiacente.

Rispettivamente i due moduli di conversione AC-DC 4a', 4a''', all'estremo della serie presentano un rispettivo terminale 4b e rispettivamente 4c connesso in uscita allo stadio di conversione 4, in modo tale da formare la linea L bipolare in media tensione e corrente continua.

La struttura proposta per il sistema di controllo della centrale eolica illustrata in figura 1, equipaggiata con aerogeneratori con catena di conversione come in figura 2, si basa sul sistema di controllo utilizzato ad oggi negli aerogeneratori direct-drive con convertitore statico AC/DC/AC di tipo full scale (cioè a piena potenza) riportato in figura 3, che rappresenta lo stato dell'arte per le ultime generazioni di turbine eoliche. In questa struttura di controllo un PLC 6 (controllore logico programmabile) opera come controllore generale della turbina eolica (Wind Turbine Controller) ricevendo in ingresso una pluralità di segnali relativi agli stati, agli allarmi ed alle misure provenienti dai vari sottosistemi (non

illustrati) che sono integrati nell'aerogeneratore. Il PLC 6 gestisce, attraverso i propri segnali di uscita, rispettivamente l'angolo di calettamento delle pale α , l'angolo di imbardata δ della girante eolica 1a e la
5 velocità di rotazione ω del generatore 1b, da cui dipendono la coppia e quindi la potenza convertita all'albero dall'aerogeneratore. Inoltre il PLC 6 fornisce i riferimenti di potenza e coppia ad:

- un primo stadio di controllo 5 del convertitore,
10 che controlla il generatore 1b attraverso lo stadio di conversione 4; e

- ad un secondo stadio di controllo 8 del convertitore, installato nella stazione di trasformazione 3, che comanda l'inverter 3a di
15 interfaccia con la rete elettrica. Come illustrato in dettaglio in figura 3 ogni stadio di conversione 4 presenta un rispettivo primo stadio di controllo 5 detto "master" (e cioè principale) ricevente in ingresso un primo segnale V_{DC} , relativo alla tensione
20 presente sulla linea L ed un secondo segnale C_{RIF} di coppia meccanica generata dal generatore elettrico 1b; tali segnali provengono dal controllore PLC 6. Lo scopo del primo stadio di controllo 5 è quello di regolare gli impulsi del terminale di porta dei transistori IGBT
25 o IGCT presenti all'interno dei moduli di conversione AC-DC 4a'-4a''''.

Il controllore PLC 6 invia anche un ulteriore segnale di controllo ad un secondo stadio di controllo 8, il quale comanda il funzionamento dell'inverter 3a.

30 L'inverter 3a possiede infatti un proprio stadio di controllo 8, in grado di monitorare e mantenere costante la suddetta tensione presente sulla linea L.

La struttura di controllo descritta in fig. 3, utilizzata ad oggi per ognuno degli aerogeneratori 1, è presente su ogni aerogeneratore della centrale eolica.

Supponendo che, come illustrato in figura 1, ogni
5 modulo di conversione AC-DC 4a produca sui suoi terminali di uscita 4b 4c una tensione continua pari a 6kV, e che i moduli di conversione AC-DC 4a'-4a'''' posti in serie siano proprio quattro come rappresentato in figura 2, è evidente che sulla linea L è presente
10 una tensione continua di 24kV, quindi in media tensione, diretta verso la stazione di trasformazione 3.

L'insieme di aerogeneratori 1, stazione di trasformazione 3, linee elettriche L, PCL 6 e del
15 primo, secondo stadio di controllo di conversione 5, 8, formano il cosiddetto sistema MVDC (media tensione e corrente continua).

Tuttavia, se si provasse a gestire una centrale eolica con tali sistemi di controllo, senza apportare
20 alcuna modifica, si presenterebbero alcuni svantaggi. In dettaglio, sebbene la tensione sulla linea L sia controllata e tenuta costante dal secondo stadio di controllo 8 dell'inverter 3a, non è possibile verificare con precisione come essa si ripartisca su
25 ogni singolo modulo di conversione AC-DC 4a. Ad esempio, supponendo come prima che ogni modulo di conversione AC-DC 4a'-4a'''' debba produrre nominalmente 6kV DC, in modo da ottenere sulla linea L una tensione continua di 24kV, a causa di squilibri o
30 scompensi tra le stelle o tra i moduli di conversione la tensione sulle uscite 4b, 4c di ciascuno dei moduli di conversione AC-DC 4a'-4a'''' può assumere valori

anche molto diversi(a puro titolo di esempio con i quattro moduli che producono rispettivamente 6kV, 4kV, 8kV e 6 kV) senza che la somma totale della tensione da loro prodotta cambi.

5 Giacché le stelle 2 ai quali i moduli di conversione AC-DC 4a'-4a'''' sono collegati non sono perfettamente identiche nelle caratteristiche, lo
scompenso di tensione tra un convertitore e l'altro è
effettivamente presente con una certa frequenza e, se
10 presente su valori elevati, può provocare la rottura
stessa del modulo di conversione AC-DC 4a'-4a'''' (ad
esempio dei suoi IGBT o IGCT) a causa di una tensione
troppo elevata.

 L'utilizzo di una rete di distribuzione in media
15 tensione e corrente continua per l'interconnessione
degli aerogeneratori, introduce un'ulteriore difficoltà
relativa al sistema di protezione della rete, dovuto in
particolare alla mancanza di interruttori in corrente
continua, atti a supportare tensione e potenza tale da
20 poter essere utilizzati in una rete multiterminale in
corrente continua come quella di figura 1.

 Infatti, nelle comuni rete elettriche in corrente
alternata, in caso di guasto, è possibile effettuare un
rapido sezionamento della sezione interessata dal
25 guasto senza avere la necessità di utilizzare
particolari accorgimenti costruttivi negli interruttori
AC posizionati a protezione delle linee elettriche;
questo in quanto la corrente alternata, per ogni
periodo, presenta due istanti in cui possiede valore
30 nullo (supponendo la corrente di tipo sinusoidale, tali
istanti si hanno per un angolo corrispondente a 0 o
180°), nei quali quindi il valore istantaneo di

corrente (zero, per l'appunto) rende più agevole l'apertura dell'interruttore e quindi il sezionamento del circuito.

Viceversa, impiegando una rete elettrica multiterminale di tipo in corrente continua, la
5 mancanza di passaggi per lo zero della media tensione ivi presente e quindi della corrente che transita sulle linee L, non permette un efficace sezionamento in caso di guasto, in quanto gli interruttori con tecnologia in
10 corrente continua oggi giorno presenti sul mercato non riuscirebbero ad estinguere efficacemente l'arco elettrico che si verrebbe a formare in caso di apertura del dispositivo in condizione di guasto; pertanto, essi non possono essere impiegati.

15 In caso di cortocircuito, quindi, la soluzione attualmente possibile è quella di utilizzare degli interruttori trifase sul lato AC dei convertitori 4a e di coordinarne l'impiego con un opportuno orientamento delle pale della girante 1a degli aerogeneratori, in
20 modo tale da rallentare la girante eolica fino all'arresto totale della turbina. Tuttavia tale procedura di messa fuori servizio in caso di guasto sulla rete DC, presenta lo svantaggio di essere particolarmente lunga e di non permettere pertanto uno
25 "spegnimento" della centrale in tempo ragionevole per prevenire ulteriori aggravamenti del guasto già sperimentato e per salvaguardare l'integrità del convertitore modulare e del generatore multipolare.

Uno scopo della presente invenzione è quello di
30 realizzare un sistema di controllo di centrali eoliche con aerogeneratori equipaggiati con convertitori modulari a corrente continua il quale sia esente dagli

inconvenienti sopra descritti.

Secondo la presente invenzione viene realizzato un sistema di controllo di centrali eoliche con aerogeneratori equipaggiati con convertitori modulari a
5 corrente continua come rivendicato nella rivendicazione 1.

L'invenzione verrà ora descritta con riferimento ai disegni annessi, che ne illustrano un esempio di attuazione non limitativo, in cui:

- 10 - la figura 1 illustra uno schema a blocchi di una centrale elettrica eolica di tipo noto;
- la figura 2 illustra un dettaglio di parte della centrale elettrica di figura 1;
- la figura 3 illustra uno schema a blocchi di parte
15 di un sistema di controllo per centrali elettriche eoliche di tipo noto;
- la figura 4 illustra uno schema a blocchi di una centrale elettrica eolica impiegante un sistema di controllo secondo la presente invenzione;
- 20 - la figura 5 illustra un dettaglio di parte dello schema a blocchi illustrato in figura 4;
- la figura 6 illustra un dettaglio di uno schema a blocchi del sistema di controllo secondo la presente invenzione.

25 Con riferimento alla figura 4, con 50, 100 è indicato nel suo complesso un sistema di controllo di centrali eoliche con aerogeneratori di tipo ad accoppiamento diretto ("direct drive", ovvero senza moltiplicatore di giri, ovvero scatola di ingranaggi,

al fine di ridurre il peso della navicella dell'aerogeneratore) equipaggiati con convertitori modulari con uscita in media tensione e corrente continua.

5 Il sistema di controllo secondo la presente invenzione è atto a controllare e proteggere un aerogeneratore 10 di una centrale eolica, la quale comprende una pluralità di aerogeneratori 10 installati o sulla terra ferma o in mezzo al mare, ognuno dei
10 quali possiede almeno un generatore elettrico 10b direttamente connesso ad una girante eolica 10a, composta da una o più pale, le quali possono essere controllate in un primo valore di incidenza δ (angolo di imbardata della girante rispetto alla direzione del
15 vento) ed in un secondo valore α (angolo di calettamento delle pale sul mozzo della girante) in modo da variare l'incidenza del vento sulla girante e, pertanto, la velocità di rotazione ω del generatore elettrico 10b e quindi la potenza meccanica convertita
20 all'albero dalla girante eolica 10a.

Ogni aerogeneratore 10 è connesso, all'interno della centrale eolica, in parallelo ad altri aerogeneratori 10, all'uscita dei quali è presente una linea elettrica che realizza una rete MTDC (Multi-
25 Terminale in Corrente Continua) a media tensione (da 15kV a 60kV) in corrente continua, sulla quale viene convogliata l'energia elettrica prodotta dalla centrale eolica e diretta ad una stazione di trasformazione 30 installata sulla terraferma sia nel caso di centrale

eolica in mezzo al mare (off-shore) che sulla terra ferma (on-shore).

All'interno della stazione di trasformazione 30 sono presenti:

5 - almeno un inverter 30a da corrente continua (DC) a corrente alternata (AC) avente un ingresso connesso con la linea MTDC; e

 - un trasformatore 30b elevatore di tensione (da 20÷80kV a 150kV o più) connesso in ingresso con una
10 uscita dell'inverter 30a e avente un'uscita diretta verso la rete elettrica di trasmissione dell'energia diretta all'utenza utilizzatrice.

All'interno dell'aerogeneratore 10 sono presenti un generatore elettrico 10b avente una pluralità N di
15 circuiti trifase di tensione indipendenti 20, indicate come stelle, ognuna delle quali è connessa, tramite una rispettiva linea trifase in cavo 20a, con uno stadio di conversione statica dell'energia 40 da tensione alternata (che proviene appunto dalle stelle 20) a
20 tensione continua. Tra il generatore elettrico 10b e la girante eolica 10a non è interposta alcuna scatola di ingranaggi o moltiplicatore di giri, in modo tale da poter ridurre il più possibile il peso della navicella dell'aerogeneratore 10 e, al contempo, incrementarne
25 l'efficienza energetica. Per tale ragione, l'aerogeneratore 10 è detto di tipo "direct drive".

Più in dettaglio, come illustrato in figura 4, lo stadio di conversione statica dell'energia 40 comprende al suo interno una pluralità di moduli di conversione

AC-DC 40a'-40a'''' ognuno dei quali ha un rispettivo ingresso connesso con una rispettiva linea trifase 20a e una rispettiva coppia di terminali di uscita 40b 40c. I moduli di conversione AC-DC 40a'-40a'''' sono del
5 tipo a inverter trifase funzionante a tensione impressa, comprendenti almeno una pluralità di dispositivi elettronici comandati a commutazione forzata (IGBT, IGCT o MCS) e dei rispettivi diodi di ricircolo connessi in antiparallelo ai suddetti
10 dispositivi elettronici comandati a commutazione forzata, in modo da formare un ponte trifase.

Ogni modulo di conversione AC-DC 40a'-40a'''' è connesso in serie ai restanti moduli di conversione AC-DC, cosicché, ognuno dei terminali 40b di ogni modulo
15 di conversione AC-DC 40a'-40a'''' è direttamente connesso con il terminale 40c del convertitore adiacente. Tra i terminali 40b, 40c di ognuno dei moduli di conversione AC-DC 40a'-40a'''' è presente un elemento capacitivo (banco di condensatori del DC bus)
20 40d.

Rispettivamente i due moduli di conversione AC-DC 40a', 40a''', all'estremo della serie presentano un rispettivo terminale 40b e rispettivamente 40c connesso
in uscita allo stadio di conversione statica
25 dell'energia 40, in modo tale da formare la linea MTDC bipolare.

Come illustrato in dettaglio in figura 4 e 5 ogni stadio di conversione statica dell'energia 40 presenta un rispettivo primo stadio di controllo 50 principale
30 (o master) ricevente in ingresso un primo segnale V_{DC}

di tensione relativo alla linea MTDC ed un secondo segnale C_{RIF} di coppia meccanica relativo alla coppia impressa all'albero dalla girante eolica 10a e da far generare, sotto forma di coppia elettromagnetica
5 equilibrante, al generatore elettrico 10b; tali segnali provengono da un controllore PLC 60, il quale possiede una pluralità di uscite sulle quali sono presenti una pluralità di segnali s_1 , s_2 atti a controllare l'angolo di calettamento α delle pale e l'angolo di imbardata δ
10 della girante eolica 10a dell'aerogeneratore 10, e di conseguenza la velocità di rotazione ω . Lo scopo del primo stadio di controllo 50 è quello di controllare gli stadi di controllo secondari (o slave) 100, i quali inviano i segnali di controllo degli impulsi del
15 terminale di porta dei dispositivi elettronici comandati a commutazione forzata all'interno dei moduli di conversione AC-DC 40a'-40a''''.

In particolare, il primo stadio di controllo 50 comprende al suo interno:

- 20 - un primo modulo 50a di elaborazione, il quale provvede a moltiplicare il secondo segnale C_{RIF} , alimentato su di un suo primo ingresso logico, per un fattore proporzionale a $1/(K_c N)$, con K_c costante di coppia del generatore elettrico 10b ed
25 N pari al numero di stelle 20 che formano il generatore, al fine di produrre su di una sua uscita il segnale di riferimento di corrente I_{qn} , riferimento di corrente vettoriale di asse in quadratura, il quale viene inviato in ingresso
30 agli stadi di controllo secondario 100; e
- un secondo modulo 50b di elaborazione, il quale

agisce come divisore, dividendo il primo segnale V_{DC} per un fattore N pari al numero di stelle 20 di ogni aerogeneratore; il secondo modulo 50b presenta quindi un'uscita sulla quale è presente
5 il segnale V_{DCm} , il quale rappresenta il valore di tensione presente sulla linea MTDC diviso per il numero N di stelle 20.

Il controllore PLC 60 invia anche un ulteriore segnale di controllo ad un secondo stadio di controllo
10 80, il quale comanda il funzionamento dell'inverter 30a posizionato nella stazione di trasformazione a terra 30.

Supponendo che, come illustrato in figura 4, ogni modulo di conversione AC-DC 40a'-40a'''' produca sui
15 suoi terminali di uscita 40b 40c una tensione continua pari a 6kV, e che i moduli di conversione AC-DC 40a'-40a'''' posti in serie siano proprio quattro come rappresentato in figura, è evidente che sulla linea MTDC sarà presente una tensione continua di 24kV,
20 quindi in media tensione, diretta verso la stazione di trasformazione 30.

L'inverter 30a possiede un proprio stadio di controllo in grado di monitorare e mantenere costante la suddetta tensione presente sulla linea MTDC.

25 Il primo stadio di controllo 50 gestisce un numero N di stadi di controllo secondari 100, in numero pari al numero di moduli di conversione AC-DC 40a'-40a'''' , presenti all'interno dello stadio di conversione 40, il quale ha funzione di controllo del mantenimento della
30 costanza della tensione continua presente sui terminali d'uscita 40b, 40c del rispettivo modulo di conversione AC-DC 40a, al fine di mantenere bilanciata la stessa

rispetto alla tensione continua presente sui terminali di uscita 40b, 40c dei restanti moduli di conversione AC-DC 40a.

In altre parole questo significa che, supponendo
 5 presenti quattro moduli di conversione AC-DC 40a per ogni stadio di conversione 40, come in figura 4, una tensione continua del rispettivo primo, secondo, terzo e quarto modulo di conversione AC-DC 40a V_{dc_i} con $i=1, \dots, 4$, si manterrà pari ad un quarto del valore
 10 totale di tensione continua d'uscita V_{dc} presente sulla linea MTDC.

Per tale ragione, generalizzando, lo scopo degli stadi di controllo secondari 100 è quello di controllare la coppia generata da ogni singola stella
 15 20 del generatore 10b attraverso un controllo vettoriale ad orientamento di campo su asse diretto d e asse di quadratura q e di mantenere la tensione continua V_{dc_i} dell' i -esimo modulo di conversione AC-DC pari a:

$$20 \quad V_{dc_i} = \frac{1}{N} V_{dc}$$

in cui V_{dc} rappresenta il valore di tensione continua presente sulla linea MTDC.

Come illustrato in dettaglio in figura 6, ognuno degli stadi di controllo secondari 100 comprende una
 25 pluralità di ingressi 100a-100c, 101, 102, 103 ed un'uscita 105 la quale invia segnali di controllo ai terminali di porta dei dispositivi elettronici comanda ti IGBT o IGCT dei presenti moduli di conversione AC-DC 40a'-40a''''.

30 Più in dettaglio, la suddetta pluralità di

ingressi 100a-100c, 101, 102, 103 comprende una prima terna di ingressi 100a-100c relativa alle misure delle correnti transittanti sulla linea trifase 20a che da ogni stella 20 si diparte verso il rispettivo modulo di conversione AC-DC 40a'-40a'''''. La prima terna di ingressi 100a-100c è connessa in ingresso ad un primo stadio di elaborazione 110, il quale effettua il calcolo della Trasformata di Park su assi rotanti come segue:

10

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

in cui θ rappresenta l'angolo di un sistema di assi rotanti con velocità ω , d (asse diretto) e q (asse in quadratura), solidali al rotore del generatore elettrico 10b. Applicando la Trasformata di Park su assi rotanti alle misure di corrente 100a, 100b, 100c si giunge alla definizione di un fasore spaziale di corrente identificabile dalle componenti di corrente lungo l'asse d, I_d , e lungo l'asse q, I_q .

Attraverso questa trasformazione si riesce quindi a controllare la coppia generata da ogni singola stella 20 mediante un algoritmo di controllo vettoriale ad orientamento di campo, basato sulla regolazione delle componenti di correnti I_d e I_q prodotte da ogni modulo di conversione 40a.

Il primo stadio di elaborazione 110 comprende inoltre una prima ed una seconda uscita 110a, 110b, rispettivamente connesse:

- ad un primo ingresso 112a di un primo sommatore 112; e
- ad un primo ingresso 113a di un secondo sommatore 113.

5 Il primo ed il secondo sommatore 112, 113 comprendono inoltre rispettivi secondi ingressi 112b, 113b, i quali sono connessi direttamente agli ingressi 101, 103 dello stadio di controllo secondario 100.

10 Sul primo ingresso 101 è presente un segnale di riferimento per il valore della componente di corrente in quadratura I_{qn} (tecnicamente noto con il nome di segnale di set-point) da far produrre al modulo di conversione AC-DC 40a, mentre sul terzo ingresso 103 perviene un segnale di riferimento per il valore della

15 componente di corrente di asse diretto I_{dn} , che tipicamente, per basse velocità di rotazione del generatore come nel caso di una turbina eolica ad azione diretta, è settato ad un valore pari a zero per non procedere con il deflussaggio del generatore 10b.

20 Sul secondo ingresso 102 è presente un segnale di tensione V_{dc_m} , proveniente dal primo stadio di controllo 50, il quale rappresenta il valore di tensione presente sulla linea MTDC diviso per il numero di stelle 20 che ogni generatore 10b possiede e che

25 funge da riferimento per il regolatore di tensione 130.

 Il primo sommatore 112 presenta un'uscita 112c pari all'errore istantaneo tra la misura presente sull'ingresso 112a dello stadio di trasformazione di Park 110 (misura della corrente di asse diretto I_d) ed

30 il riferimento I_{dn} 101; l'uscita 112c è connessa direttamente ad un ingresso di un primo regolatore di corrente 115, il quale presenta inoltre un'uscita

connessa con un primo ingresso 116a di un terzo sommatore 116, il quale presenta inoltre un secondo ingresso 116b sul quale è presente un primo segnale di controllo mozionale sml.

5 L'uscita del terzo sommatore 116 rappresenta la componente V_d di un fasore spaziale di Park delle tensioni che devono essere prodotte dal modulo di conversione AC-DC 40a per attuare la giusta regolazione della componente di correnti di asse diretto I_d . Tale
10 segnale è indirizzato ad un primo ingresso di uno stadio di antitrasformazione di Park 117, il quale moltiplica i propri segnali in ingresso provenienti dal terzo e da un quarto nodo sommatore 116, 120 per la seguente matrice di trasformazione:

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

15

Lo stadio di antitrasformazione di Park 117 presenta infatti un secondo ingresso 117b, sul quale è presente il segnale relativo alla componente di
20 tensione di asse in quadratura V_q del fasore spaziale di Park delle tensioni, le quali devono essere prodotte dal modulo di conversione AC-DC 40a' per attuare la giusta regolazione della componente di corrente di asse di quadratura I_q e della tensione di DC bus V_{DCi} sulle
25 uscite 40b, 40c del singolo modulo di conversione AC-DC 40a'. Lo stadio di antitrasformazione di Park 117 presenta inoltre una prima, seconda e terza uscita 117c, 117d, 117e, le quali sono poste in ingresso con uno stadio di modulazione 118, il quale presenta
30 un'uscita diretta verso il rispettivo modulo di

conversione AC-DC 40a', e sulla quale sono presenti i segnali di comando di apertura e chiusura dei terminali di porta dei dispositivi elettronici comandati a tensione impressa ivi presenti al suo interno.

5 Al secondo ingresso 117b dello stadio di antitrasformazione di Park 117 arriva un segnale proveniente da un quarto e quinto sommatore 120, 121 rispettivamente connessi in serie, i quali sommano un secondo e terzo segnale di controllo mozionale sm2,
10 sm3, non influenti direttamente sul giusto funzionamento del sistema di controllo ma utili a migliorare la risposta dinamici dei regolatori di corrente, ad un segnale di regolazione di corrente i_r proveniente da un'uscita di un secondo regolatore di
15 corrente 125. Il secondo regolatore di corrente 125 presenta un rispettivo ingresso 125i connesso all'uscita del secondo sommatore 113; su tale ingresso è presente il segnale di errore relativo alla componente di corrente di asse q, che deve essere
20 portato a zero per mezzo del regolatore 125, al fine di garantire il giusto funzionamento del sistema di controllo vettoriale ad orientamento di campo.

Lo stadio di controllo secondario (o slave) 100 comprende inoltre uno stadio regolatore di tensione
25 130, avente un rispettivo ingresso connesso con un'uscita 131c di un sesto sommatore 131 ed una rispettiva uscita connessa ad un terzo ingresso 113c del secondo sommatore 113. Lo stadio regolatore di tensione 130 è dotato di un'uscita con saturatore la
30 quale genera un segnale di correzione del detto segnale di corrente in quadratura (I_{qn}). Tale segnale di correzione serve per ristabilire lo squilibrio di

tensione sulle uscite 40b, 40c (DC bus) del rispettivo modulo di conversione AC-DC 40a'-40a'''' rispetto agli altri, in modo tale che la tensione continua presente sulla linea MTDC sia equamente divisa tra tutti i
5 moduli di conversione AC-DC 40a'-40a''''.

Il sesto sommatore 131 possiede un primo ed un secondo ingresso riceventi rispettivamente il segnale di riferimento di tensione V_{dcm} presente sul secondo ingresso 102 dello 100 e un segnale di misura della
10 tensione V_{dci} presente sull' uscita del rispettivo controllore AC-DC 40a'-40a''''.

Si illustra ora una seconda forma di realizzazione del sistema di controllo secondo la presente invenzione. Tale seconda forma di realizzazione si
15 differenzia dalla precedente per il fatto che, oltre ad esercitare una funzione di controllo della tensione continua prodotta da ognuno dei moduli di conversione AC-DC 40a'-40a'''' di ogni stadio di conversione 40, essa svolge anche una funzione di protezione della
20 centrale eolica in caso di guasti derivanti da cortocircuiti sulla linea MTDC.

Tale seconda forma di realizzazione, per poter funzionare correttamente, deve prevedere che almeno parte dei moduli di conversione AC-DC 40a'-40a''''
25 presenti al suo interno dei dispositivi elettronici comandati a tensione impressa (ad esempio IGBT) i cui terminali di collettore ed emettitore sono connessi, rispettivamente, ad un catodo ed anodo di un tiristore, e non ad un semplice diodo di ricircolo. In questo
30 modo, come sarà meglio descritto in seguito, è possibile limitare la forte corrente di guasto che si verrebbe a formare sulla linea MTDC in caso di

cortocircuito nella rete in continua, estinguendola in tempo brevissimo, al massimo pari alla metà di un ciclo (da un minimo di 10 ms ad un massimo di 35 ms) della corrente alternata prodotta dal generatore 10b , senza
5 aver la necessità di provvedere all'interruzione dell'elevata corrente di guasto per mezzo di interruttori con tecnologia in corrente continua da installare sulla linea stessa.

Per fare ciò, un sensore di sovracorrente,
10 posizionato sulla linea MTDC, misura costantemente il valore della derivata temporale della corrente elettrica ivi fluente; in condizioni normali (prima configurazione operativa) tale sensore di sovracorrente non agisce sugli stadi di controllo secondari 100, e il
15 sistema di controllo funziona esattamente come nel caso precedentemente descritto. Viceversa, allorché tale valore è superiore ad un determinato valore di soglia Δm , sintomo di un guasto od un corto circuito, il sensore di sovracorrente entra in una seconda
20 configurazione operativa nella quale esso agisce sugli stadi di controllo secondari 100 alimentandoli con un segnale di allarme, il quale impone di porre gli impulsi del terminale di porta dei dispositivi elettronici comandati a tensione impressa IGBT o IGCT
25 dei moduli di conversione AC-DC 40a'-40a'''' a zero, e togliendo l'impulso di controllo ai tiristori di ricircolo.

I vantaggi del sistema di controllo secondo la presente invenzione sono chiari alla luce della
30 descrizione che precede. In particolare, il sistema di controllo secondo la presente invenzione permette

dapprima di mantenere equilibrata la tensione continua prodotta da ognuno dei moduli di conversione AC-DC 40a'-40a'''' rispetto agli altri presenti nello stesso stadio di conversione 40, senza che si creino squilibri
5 che un inverter 30a non noterebbe (in quanto la somma delle tensioni V_{dc_i} rimarrebbe costante) ma potenzialmente in grado di danneggiare se non rompere del tutto gli IGBT, IGCT, diodi o tiristori presenti all'interno del modulo di conversione AC-DC stesso.

10 Questo permette di avere un singolo inverter 30a ad altissima potenza (ad esempio 10 MW o più), per una vasta pluralità di aerogeneratori 10, e cioè avere un singolo inverter ad altissima potenza che gestisce, on-shore, tutti gli aerogeneratori 10 potenzialmente
15 presenti nella centrale eolica, senza preoccuparsi - durante il suo funzionamento - di come si comportano i singoli moduli di conversione AC-DC 40a'-40a''''', in quanto tale controllo è demandato agli stadi di controllo secondari 100.

20 Il sistema di controllo 50, 100 permette pertanto di ottenere ottime prestazioni nel mantenimento della costanza delle tensioni V_{DCi} sulle uscite dei moduli di conversione AC_DC 40a'-40a''''', a seguito ad esempio di un inserimento di condensatori C di diversa capacità
25 sulle uscite dei moduli di conversione AC-DC, diversa resistenza o induttanza dei cavi della linea di connessione tra le stelle 20 e i moduli di conversione 40a'-40a''''', cortocircuito tra le spire di una o più fasi dell'aerogeneratore, inserzione di una resistenza
30 additiva su uno dei cavi della linea MTDC o disconnessione di uno degli aerogeneratori stessi dal parallelo all'interno della centrale eolica.

Inoltre il sistema secondo la presente invenzione
permette inoltre di ridurre il rischio di gravi danni
in caso di cortocircuiti sulla linea MTDC, senza la
necessità di complessi sistemi di interruzione
5 meccanica della corrente né costosi e complessi sistemi
di veloce messa fuori servizio delle pale 10a degli
aerogeneratori 10.

Al dispositivo fin qui descritto possono essere
applicate alcune varianti modifiche o aggiunte ovvie
10 per un tecnico del ramo senza per questo uscire
dall'ambito di tutela delle rivendicazioni annesse.

Barzanò & Zanardo Milano S.p.A.

RIVENDICAZIONI

1) Sistema di controllo (50, 100) di centrali eoliche, le dette centrali eoliche comprendendo aerogeneratori (10) equipaggiati con convertitori (40) modulari a corrente continua; il sistema di controllo (50, 100) comprende mezzi per la ricezione di almeno un segnale di tensione proveniente da una linea (MTDC) a media tensione in corrente continua elettricamente connessa ai detti convertitori (40) ed un segnale di coppia meccanica (C_{RIF}) prodotta dai detti aerogeneratori (10) e controlla una pluralità di stadi di conversione AC-DC (40a'-40a''''') della detta centrale, aventi al loro interno una pluralità di dispositivi elettronici comandati a tensione impressa e producenti su delle loro uscite una rispettiva tensione continua parziale (V_{dc_i}), posizionati entro i detti convertitori (40); il sistema di controllo (50, 100) è caratterizzato dal fatto di comprendere, per ogni aerogeneratore (10), una pluralità di stadi di controllo secondario (100) ed un singolo stadio di controllo principale (50); ognuno degli stadi di controllo secondario (100) alimenta segnali di controllo ad un rispettivo stadio di conversione AC-DC (40a'-40a''''') ed è configurato per mantenere ad un valore costante la detta tensione continua parziale (V_{dc_i}).

2) Sistema secondo la rivendicazione 1, in cui la detta tensione continua parziale di ogni singolo modulo di conversione AC-DC (40a'-40a''''') è pari ad una

frazione della tensione continua presente sulla detta linea (MTDC).

3) Sistema secondo la rivendicazione 1, in cui ogni stadio di controllo secondario (100), la cui
5 molteplicità è pari ad un numero di stelle (20) del detto aerogeneratore (10), comprende un regolatore di tensione (130) ricevente al suo ingresso un primo segnale di tensione (V_{dc_m}) relativo ad un singolo modulo di conversione AC-DC ed una pluralità di segnali
10 di corrente di riferimento (I_{dn} , I_{qn}).

4) Sistema secondo la rivendicazione 3, in cui il detto regolatore di tensione (130) riceve in ingresso un secondo segnale di tensione (V_{dc_i}) di una tensione continua prodotta in uscita dal detto rispettivo modulo
15 di conversione AC-DC (40a'-40a'''); il detto primo e secondo segnale di tensione (V_{dc_m} , V_{dc_i}) essendo algebricamente sommati tra loro da un sommatore (131) connesso in ingresso al detto regolatore di tensione (130).

20 5) Sistema secondo la rivendicazione 4, in cui i detti segnali di corrente di riferimento comprendono un primo segnale di corrente di asse diretto (I_{dn}) ed un secondo segnale di corrente in quadratura (I_{qn}) ed in cui il detto regolatore di tensione (130) genera, su di
25 una sua uscita, un segnale di correzione del detto segnale di corrente in quadratura (I_{qn}) per ristabilire uno squilibrio di tensione del rispettivo modulo di conversione AC-DC.

6) Sistema secondo la rivendicazione 5,

comprendente inoltre un primo ed un secondo stadio di regolazione di corrente (115, 125), aventi un rispettivo ingresso rispettivamente alimentato con almeno il detto segnale di corrente di asse diretto (Idn) ed il detto segnale di corrente in quadratura (Iqn).

7) Sistema secondo la rivendicazione 6, comprendente inoltre un primo ed un secondo sommatore (112, 113); il detto primo sommatore (112) avendo un primo ingresso (112b) alimentato direttamente con il detto segnale di corrente di asse diretto (Idn) ed una uscita (112c) direttamente alimentante il detto ingresso del detto primo regolatore di corrente (115); il detto secondo sommatore (113) avendo un primo ingresso (113b) alimentato direttamente con il detto segnale di corrente in quadratura (Iqn), un secondo ingresso (113c) direttamente alimentato dal detto regolatore di tensione (130), ed un'uscita (113c) direttamente alimentante il detto ingresso (125i) del secondo regolatore di corrente (125).

8) Sistema secondo la rivendicazione 1, comprendente inoltre uno stadio di trasformazione di Park (110) ed uno stadio di antitrasformazione di Park (117); lo stadio di trasformazione di Park (110) avendo una terna di ingressi (100a-100c) rispettivamente alimentati con un segnale elettrico proveniente da una linea d'uscita (20a) direttamente connessa con una singola stella (20) del detto aerogeneratore (10); lo stadio di antitrasformazione di Park (117) possedendo

una terna di uscite (117a-117c) alimentanti uno stadio di modulazione (118) del detto stadio di controllo secondario (100); il detto stadio di modulazione (118) avendo un'uscita alimentante segnali di controllo al
5 detto rispettivo modulo di conversione AC-DC (40a'-40a''').

9) Sistema secondo le rivendicazioni 7 ed 8, in cui il detto stadio di trasformazione di Park (110) comprende una coppia di uscite alimentanti
10 rispettivamente un secondo ingresso (112a) del detto primo sommatore (112) ed un secondo ingresso (113a) del detto secondo sommatore (113).

10) Sistema secondo la rivendicazione 1, comprendente inoltre un sensore di sovracorrente, il
15 quale misura un valore di corrente elettrica su di una linea in media tensione (MTDC) alimentata dai detti moduli di conversione AC-DC (40a'-40a'''); il detto sensore di sovracorrente essendo configurato per operare in una prima condizione operativa nella quale
20 non si ha intervento sul funzionamento dei detti stadi di controllo secondario (110) ed una seconda condizione operativa, nella quale esso alimenta i detti stadi di controllo secondario (110) con un segnale di allarme per l'azzeramento della tensione elettrica prodotta dal
25 detto aerogeneratore (10).

11) Sistema secondo la rivendicazione 10, in cui la detta misura di un valore di corrente elettrica è una misura di una derivata temporale della detta corrente.

12) Sistema secondo la rivendicazione 11, in cui la detta seconda condizione operativa scatta allorché un valore di soglia della detta derivata viene oltrepassato, ed in cui il detto segnale di allarme
5 causa un segnale nullo di alimentazione di terminali di porta di una pluralità di dispositivi elettronici comandati a tensione impressa contenuti in ognuno dei detti moduli di conversione AC-DC (40a'-40a'''''), ed un
segnale di azzeramento di impulso di terminali di
10 controllo di un tiristore di ricircolo connesso in antiparallelo ad ognuno dei detti dispositivi elettronici comandati a tensione impressa.

Barzanò & Zanardo Milano S.p.A.

CLAIMS

1) A wind plants control system (50, 100), said wind plants comprising aerogenerators (10) provided with DC modular converters (40); the control system (50, 100) comprises means for receiving at least a voltage signal coming from a DC medium voltage line (MTDC) electrically connected to said converters (40) and a mechanical torque signal (C_{RIF}) produced by said aerogenerators (10) and controls a plurality of AC-DC conversion modules (40a'-40a''') of said plant, having inside themselves a plurality of electronic devices driven by impressed voltage and producing on their outputs a respective partial continuous voltage (V_{dc_i}), positioned within said converters (40); the control system (50, 100) is characterized in that it comprises, for each aerogenerator (10), a plurality of secondary control stages (100) and a single main control stage (50); each of the secondary control stages (100) feeds control signal to a respective AC-DC conversion module (40a'-40a''') and is designed to keep said partial continuous voltage (V_{dc_i}) at a constant value.

2) A system according to claim 1, wherein said partial continuous voltage of each single AC-DC conversion module (40a'-40a''') is equal to a fraction of the continuous voltage present on said line (MTDC).

3) A system according to claim 1, wherein each secondary control stage (100), of which multiplicity is equal to a number of stars (20) of said aerogenerator (10), comprises a voltage regulator (130) receiving at its input a first voltage signal (V_{dc_m}) related to a single AC-DC conversion module and a plurality of reference current signals (I_{dn} , I_{qn}).

4) A system according to claim 3, wherein said voltage regulator (130) receives as input a second voltage signal (V_{dc_i}) of an output continuous voltage produced from said respective AC-DC conversion module (40a'-40a'''); said first and second voltage signal (V_{dc_m} , V_{dc_i}) being algebraically summed between them by an adder (131) connected as input to said voltage regulator (130).

5) A system according to claim 4, wherein said reference current signals comprise a first direct axis current signal (I_{dn}) and a second quadrature current signal (I_{qn}) and wherein said voltage regulator (130) generates, upon its output, a correction signal of said quadrature current signal (I_{qn}) for restoring a voltage unbalance of the respective AC-DC conversion module.

6) A system according to claim 5, comprising also a first and a second current regulation stage (115, 125), having a respective input supplied with at least said direct axis current signal (I_{dn}) and said quadrature current signal (I_{qn}) respectively.

7) A system according to claim 6, comprising also a first and a second adder (112, 113); said first adder (112) having a first input (112b) directly fed with said direct axis current signal (I_{dn}) and an output (112c) directly feeding said input of said first voltage regulator (115); said second adder (113) having a first input (113b) directly fed with said quadrature current signal (I_{qn}), a second input (113c) directly fed by said voltage regulator (130), and an output (113c) directly feeding said input (125i) of said second voltage regulator (125).

8) A system according to claim 1, comprising also

a Park-transformed stage (110) and a Park-anti-transformed stage (117); the Park-transformed stage (110) having a triad of inputs (110a-110c) fed with an electric signal coming from an output line (20a) directly connected to a single star (20) of said aerogenerator (10) respectively; the Park-anti-transformed stage (117) having a triad of outputs (117a-117c) feeding a modulation stage (118) of said secondary control stage (100); said modulation stage (118) having an output feeding control signals to said respective AC-DC conversion module (40a'-40a''').

9) A system according to claims 7 and 8, wherein said Park-transformed stage (110) comprises a couple of outputs feeding a second input (112a) of said first adder (112) and a second input (113a) of said second adder (113) respectively.

10) A system according to claim 1, comprising also an overcurrent sensor, which measures a value of the electric current on a medium voltage line (MVDC) supplied by said AC-DC conversion modules (40a'-40a'''); said overcurrent sensor being designed to operate in a first operating condition in which there is not an action on the operation of said secondary control stages (110) and a second operating condition, in which it feeds said secondary control stages (110) with an alarm signal for the zero setting of the electric voltage produced by said aerogenerator (10).

11) A system according to claim 10, wherein said measure of a value of electric current is a measure of a time derivative of said current.

12) A system according to claim 11, wherein said second operating condition switches when a threshold

value of said derivative is exceeded, and wherein said alarm signal causes a null signal of voltage of gate terminals of a plurality of electronic devices driven by impressed voltage contained in each of said AC-DC conversion modules (40a'-40a'''), and a signal of impulse zero setting of control terminals of a recirculation thyristor antiparallel connected to each of said electronic devices driven by impressed voltage.

Barzanò & Zanardo Milano S.p.A.

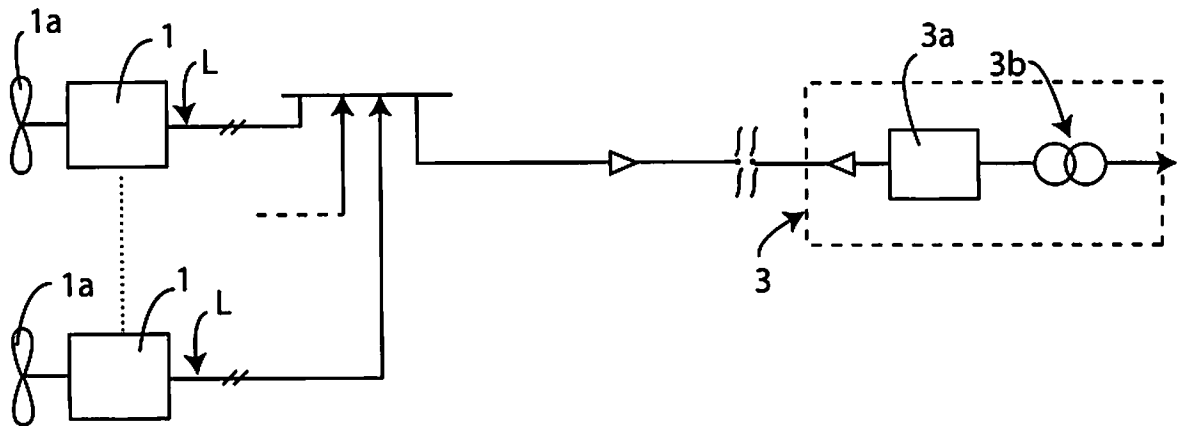


Fig. 1

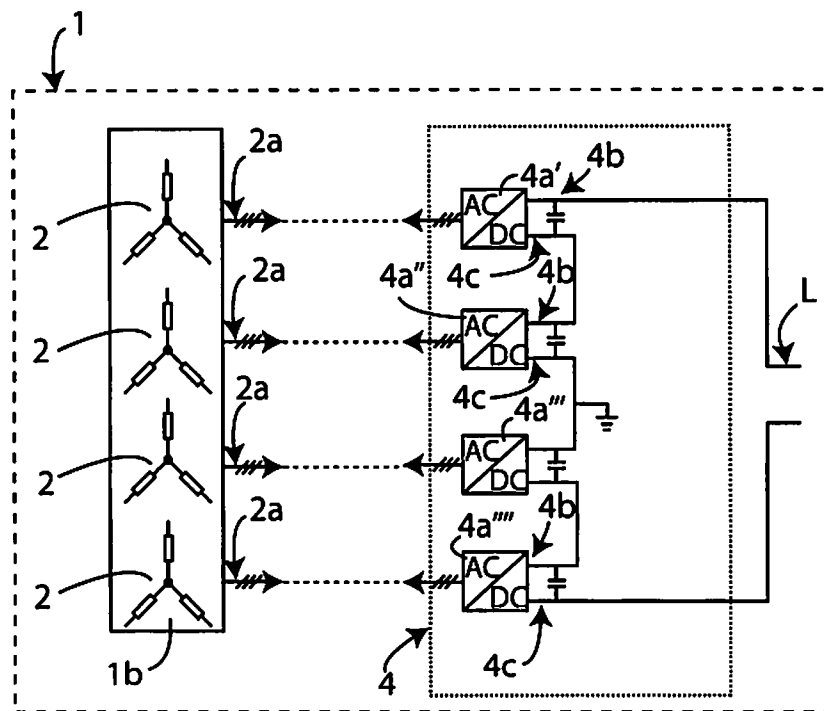


Fig. 2

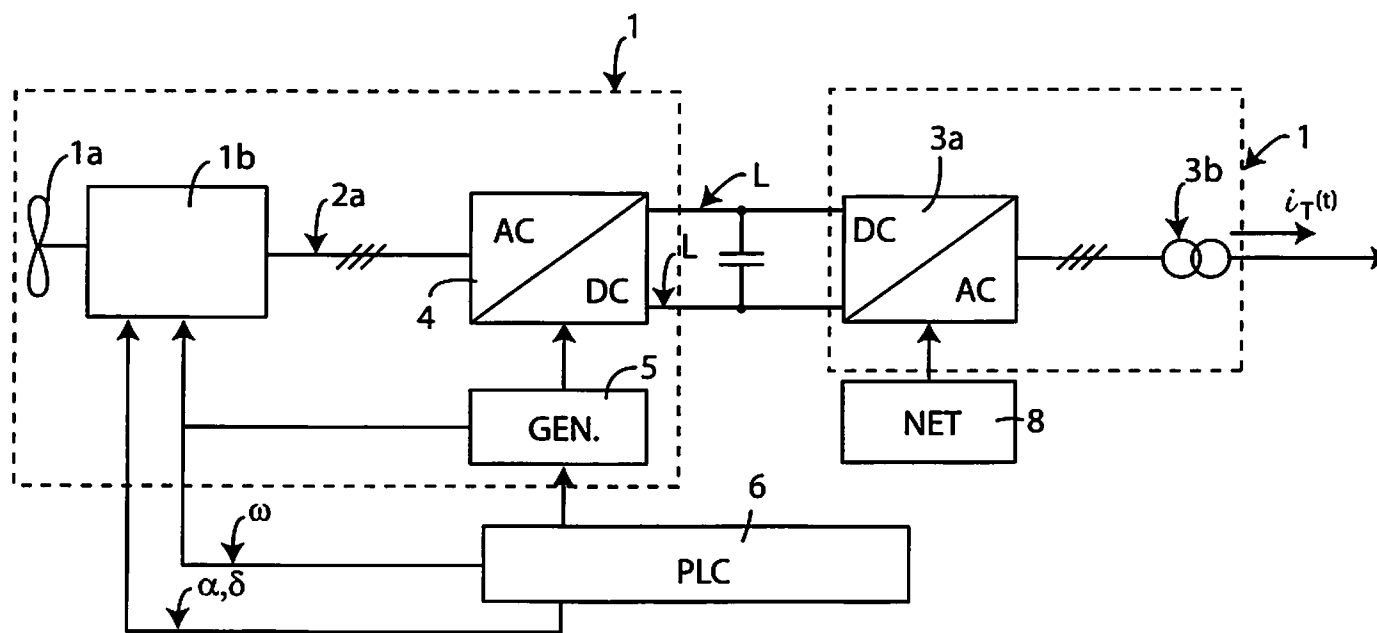


Fig. 3

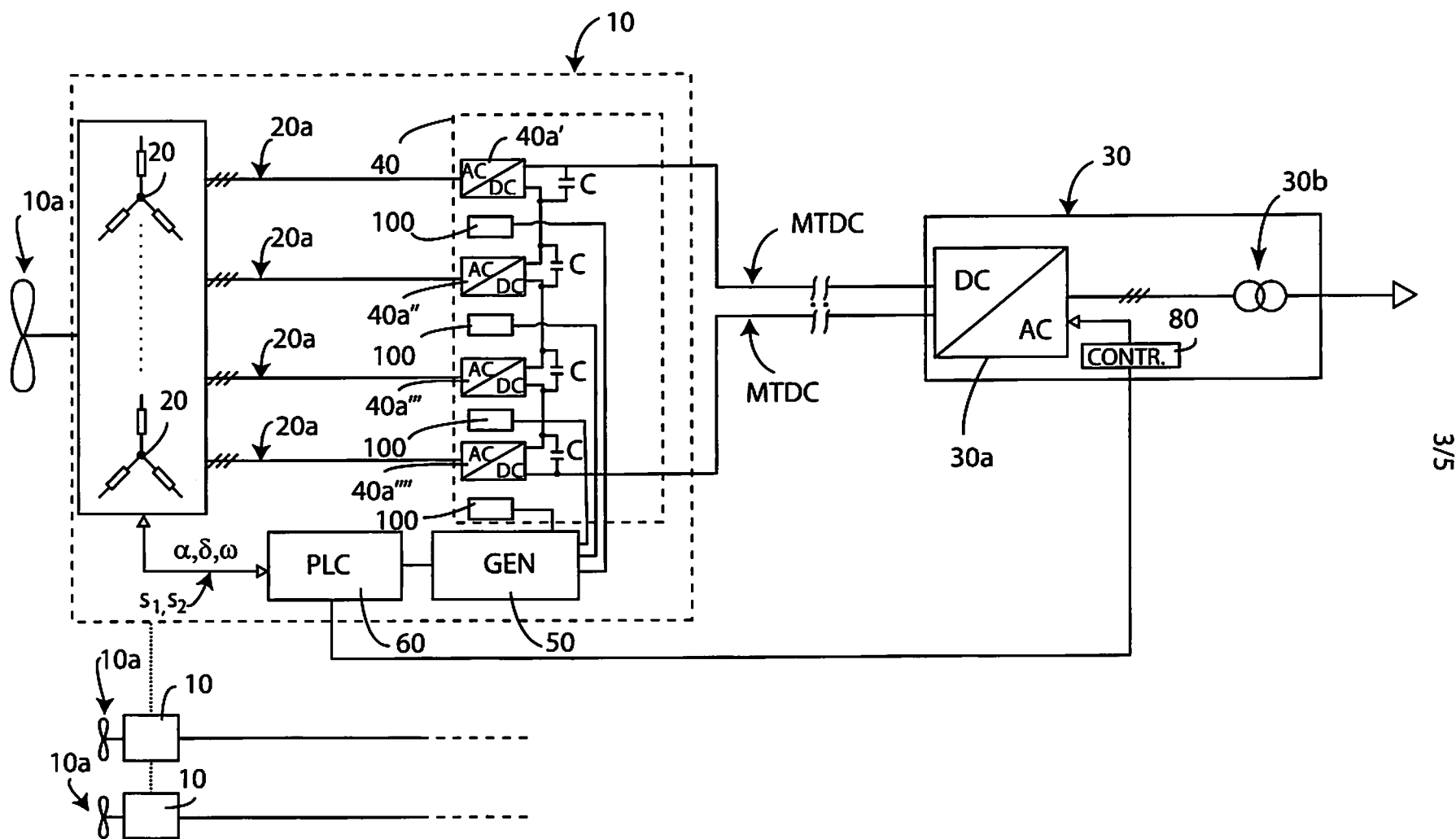


Fig. 4

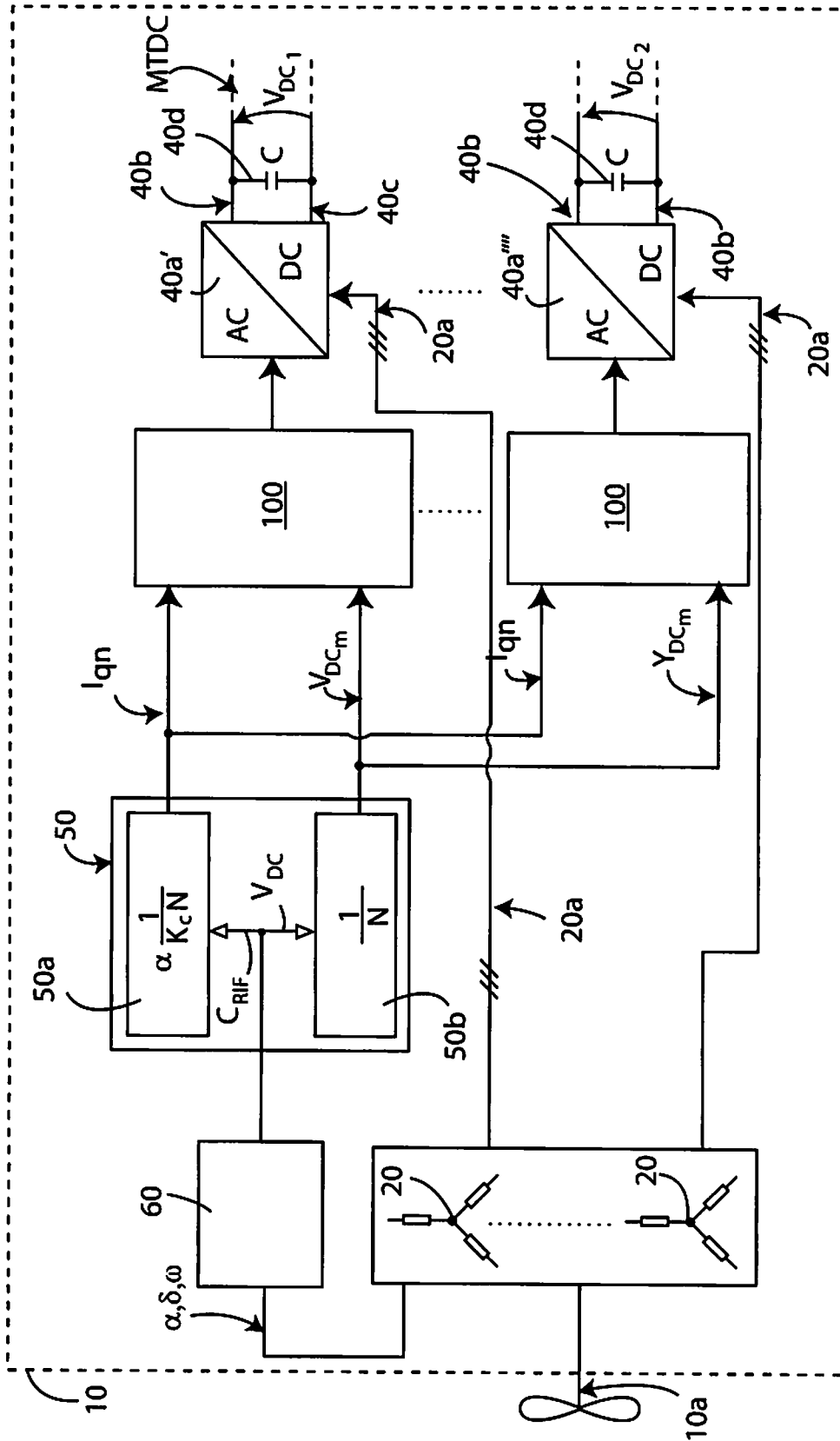


Fig. 5

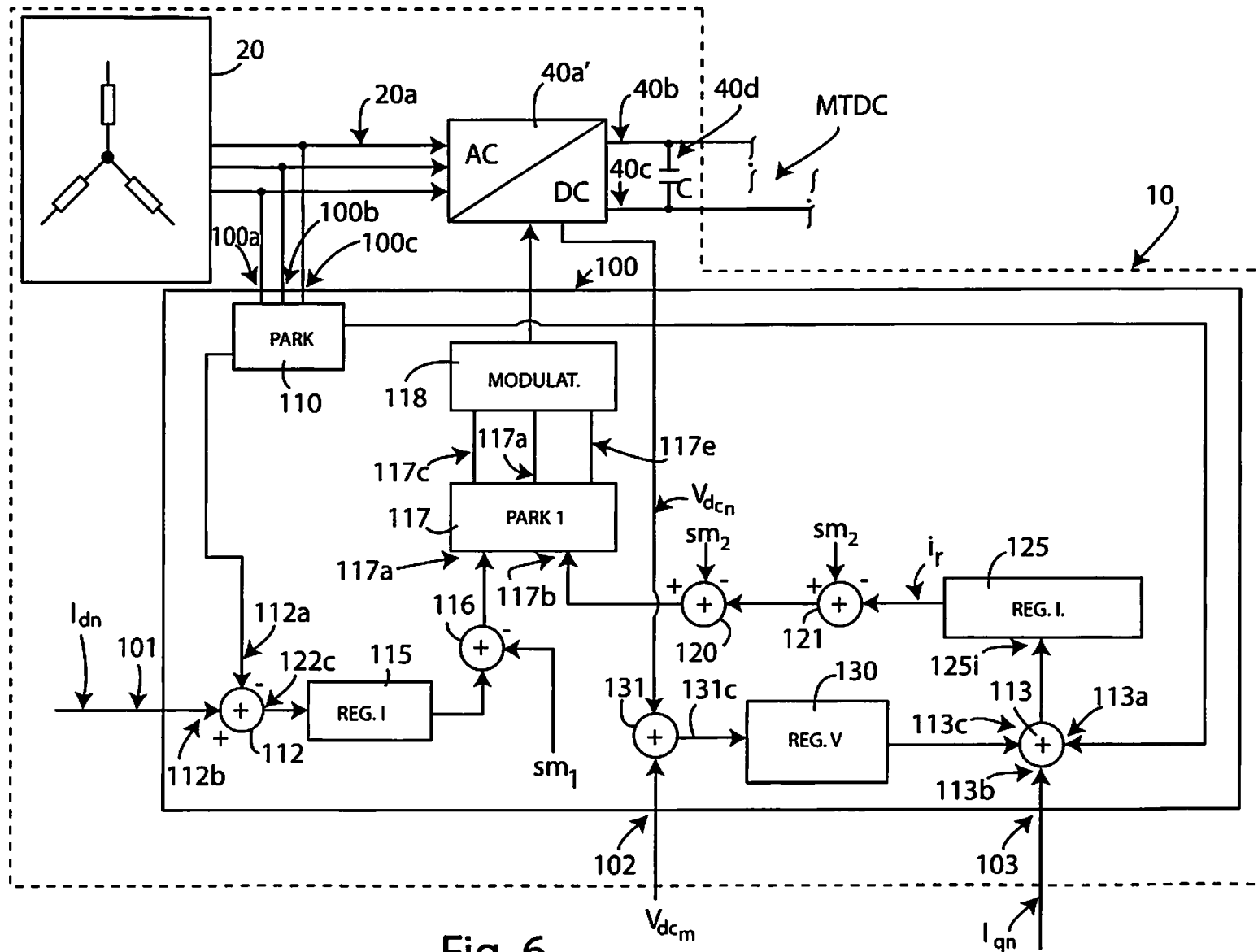


Fig. 6