

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
19. Januar 2012 (19.01.2012)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/007111 A2

- (51) **Internationale Patentklassifikation:**
F03D 7/04 (2006.01)
- (21) **Internationales Aktenzeichen:** PCT/EP201 1/003270
- (22) **Internationales Anmeldedatum:**
1. M i 201 1 (01.07.2011)
- (25) **Einreichungssprache:** Deutsch
- (26) **Veröffentlichungssprache:** Deutsch
- (30) **Angaben zur Priorität:**
10 2010 027 229.9 15. Juli 2010 (15.07.2010) DE
- (71) **Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US):** ROBERT BOSCH GMBH [DE/DE]; 70469 Stuttgart (DE).
- (72) **Erfinder; und**
- (71) **Anmelder :** HESS, Felix [DE/DE]; Richard-Arnold-Strasse 25, 71642 Ludwigsburg (DE). VOSS, Martin [DE/DE]; Mittenfeldstrasse 103, 70499 Stuttgart (DE). BUCHTALA, Boris [DE/DE]; Lindachstrasse 38, 75417 Mühlacker (DE). EITNER, Christian [DE/DE]; Hamburger Strasse 37, 80809 München (DE).
- (74) **Anwalt:** THÜRER, Andreas; c/o Bosch Rexroth AG, Zum Eisengießer 1, 97816 Lohr am Main (DE).
- (81) **Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart):** AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) **Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart):** ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** METHOD AND DEVICE FOR MARING AN ANGLE OF ATTACK CORRECTION SIGNAL AVAILABLE FOR A PREDETERMINED ROTOR BLADE OF A WIND TURBINE

(54) **Bezeichnung :** VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BEREITSTELLUNG EINES ANSTELLWINKEL-KORREKTURSIGNALS FÜR EIN VORBESTIMMTES ROTORBLATT EINER WINDKRAFTANLAGE

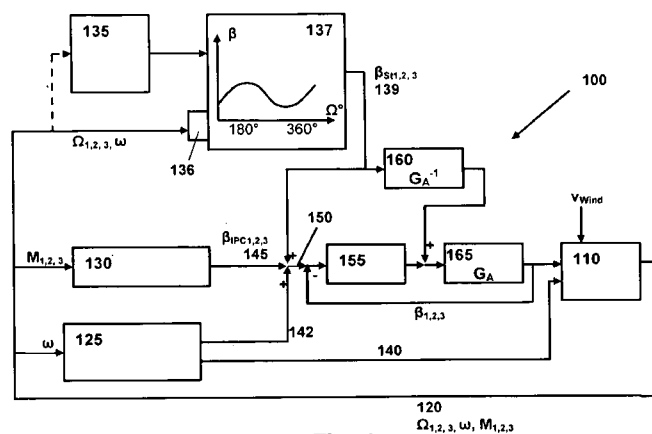


Fig. 1

(57) **Abstract:** The invention relates to a method (900) for making an angle of attack correction signal (139) available for a predetermined rotor blade (210) of a plurality of rotor blades of a wind turbine (110). The angle of attack correction signal for modifying a signal (145) is provided for Controlling an individual angle of attack of the rotor blade. The method (900) comprises the following steps: reading in (910) a rotor blade position signal (120) which represents an angular position (Ω) of the rotor blade relative to a rotational axis (310) of the rotor of the wind turbine and/or reading in a rotational speed (ω) of the rotor blade about the rotational axis (301). The method (900) further comprises a step of determining (920) the angle of attack correction signal (139) for the predetermined rotor blade of the wind turbine using a correlation between an angular position and an angle of attack correction factor saved in a memory (137), the angle of attack correction signal representing the angle of attack correction factor which, when used, prompts correction of the signal (145) for Controlling the individual angle of attack for

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2012/007111 A2

Veröffentlicht:

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

the predetermined rotor blade so that an impact of a torque (M_1) onto the predetermined rotor blade is matched with an impact of a torque (M_2, M_3) onto the at least one further rotor blade of the wind turbine, the determination being carried out using the read-in rotor blade position signal and/or the read-in rotational speed.

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung schafft ein Verfahren (900) zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals (139) für ein vorbestimmtes Rotorblatt (210) aus einer Mehrzahl von Rotorblättern einer Windkraftanlage (110). Dabei ist das Anstellwinkel-Korrektursignal zur Veränderung eines Signals (145) zur Ansteuerung eines individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt vorgesehen. Das Verfahren (900) weist einen Schritt des Einlesens (910) eines Rotorblatt-Positionssignals (120) auf, das eine Winkelposition (Ωt) des Rotorblattes bezüglich einer Drehachse (310) des Rotors der Windkraftanlage repräsentiert und/oder Einlesen einer Drehgeschwindigkeit (ω) des Rotorblattes um die Drehachse (310). Weiterhin umfasst das Verfahren (900) einen Schritt des Ermitteln (920) des Anstellwinkel-Korrektursignals (139) für das vorbestimmte Rotorblatt der Windkraftanlage unter Verwendung eines in einem Speicher (137) abgelegten Zusammenhangs zwischen einer Winkelposition und einem Anstellwinkel-Korrekturfaktor, wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal den Anstellwinkel-Korrekturfaktor repräsentiert, der bei einer Verwendung eine Korrektur des Signals (145) zur Ansteuerung des individuellen Anstellwinkels für das vorbestimmte Rotorblatt bewirkt, so dass eine Wirkung eines Momentes (M_1) auf das vorbestimmte Rotorblatt einer Wirkung eines Momentes (M_2, M_3) auf zumindest ein weiteres Rotorblatt der Windkraftanlage angeglichen wird und wobei das Ermitteln unter Verwendung des eingelesenen Rotorblatt-Positionssignals und/oder der eingelesenen Drehgeschwindigkeit erfolgt.

5

Verfahren und Vorrichtung zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals für ein vorbestimmtes Rotorblatt einer Windkraftanlage

- 10 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals für ein vorbestimmtes Rotorblatt aus einer Mehrzahl von Rotorblättern einer Windkraftanlage gemäß den unabhängigen Patentansprüchen.
- 15 Bei Windenergieanlagen mit horizontaler Achse und mindestens zwei Rotorblättern wird durch synchrone Verstellung der Blattwinkel die Drehzahl oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit so geregelt, dass durch die Änderung des Anstellwinkels (auch als Pitchwinkel bezeichnet) der aerodynamische Auftrieb und somit das Antriebsmoment in solcher Weise verändert wird, dass eine Reduktion der für das Antriebsmoment verantwortlichen Auftriebskraft erreicht werden kann und somit die Anlage im Bereich der
- 20 Nenndrehzahl gehalten werden kann. Bei Windgeschwindigkeiten oberhalb der Abschaltgeschwindigkeit wird dieser Blattverstellmechanismus zudem als Bremse benutzt, indem die Blätter mit der Nase in den Wind gestellt werden, so dass der Rotor keine nennenswerten Antriebsmomente mehr liefert. Die Rotorblätter können dann als aerodynamische Bremsen verwendet werden indem sie komplett in die Windanströmrichtung gestellt werden (Fahnenstellung) oder der Anströmwinkel so stark erhöht wird, dass die Strömung abreist (Stall). Bei dieser kollektiven Blattverstellung (Collective Pitch Control = CPC) ergeben sich aufgrund asymmetrischer aerodynamischer Lasten
- 25 Nick- und Giermomente auf die Gondel. Die asymmetrischen Lasten entstehen z.B.
- 30 durch Windscherungen in vertikaler Richtung (Grenzschichten), Gierwinkelfehler, Böen und Turbulenzen, Aufstauung der Strömung am Turm etc. In letzter Zeit wird verstärkt ein neuer Ansatz für die Regelung von Dreiflügler-Windkraftanlagen untersucht, wel-

eher zusätzlich zu dem kollektiven Pitchwinkel einen individuellen Pitchwinkel der einzelnen Rotorblätter berechnet. Die individuelle Pitchverstellung (engl. Individual Pitch Control = IPC) erlaubt eine Reduzierung der asymmetrischen Lasten, welche über die Gondel auf die Nabe übertragen werden. Hierzu werden die an den einzelnen Rotorblattwurzeln wirkenden Biegemomente gemessen und die für die Reduktion des Gier- und Nickmomentes nötige individuelle Blattverstellung berechnet. Die aus der IPC- und CPC-Regelung berechneten Pitchwinkel werden dann als Vorgabe an die Regler der entsprechenden Pitchaktuatoren gesendet. Die Biegemomente dienen somit als Regelgröße für die individuelle Blattverstellung.

10

Andere Verfahren ermitteln die Nick- und Giermomente durch Messung der Gondelbeschleunigung über Gyrometer oder durch Sensoren, welche über Abstandsmessungen die durch die Belastungen auftretenden Verformungen von Anlagenteilen messen und dadurch die Belastungen bestimmen. Ein solcher Ansatz ist beispielsweise in der

15 Druckschrift DE 197 39 164 B4 offenbart.

20

Die Regelung der Rotorblätter-Anstellwinkel ist jedoch in einigen Situationen zu träge, so dass der optimale Anstellwinkel nicht gefunden wird. Es ist ein die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Verbesserung für die Regelung der Anstellwinkel zu schaffen.

25

Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den jeweiligen Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung.

30

Die vorliegende Erfindung schafft ein Verfahren zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals für ein vorbestimmtes Rotorblatt aus einer Mehrzahl von Rotorblättern einer Windkraftanlage, wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal zur Veränderung eines Signals zur Ansteuerung eines individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt geeignet ist, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

- Einlesen eines Rotorblatt-Positionssignals, das eine Winkelposition des Rotorblattes bezüglich einer Drehachse eines Rotors der Windkraftanlage repräsentiert

und/oder Einlesen einer Drehgeschwindigkeit des Rotorblattes um die Drehachse;
und

- 5
- Ermitteln des Anstellwinkel-Korrektursignals für das vorbestimmte Rotorblatt der Windkraftanlage unter Verwendung eines in einem Speicher abgelegten Zusammenhangs zwischen der Winkelposition und einem Anstellwinkel-Korrekturfaktor, wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal den Anstellwinkel-Korrekturfaktor repräsentiert, der bei einer Verwendung eine Korrektur des individuellen Anstellwinkels für das vorbestimmte Rotorblatt bewirkt, so dass eine Wirkung eines Momentes auf das vorbestimmte Rotorblatt einer Wirkung eines

10

Momentes auf zumindest ein weiteres Rotorblatt der Windkraftanlage angeglichen wird und wobei das Ermitteln unter Verwendung des eingelesenen Rotorblatt-Positionssignals und/oder der eingelesenen Drehgeschwindigkeit erfolgt.

Weiterhin schafft die vorliegende Erfindung eine Vorrichtung zur Bereitstellung eines

15

Anstellwinkel-Korrektursignals für ein vorbestimmtes Rotorblatt aus einer Mehrzahl von Rotorblättern einer Windkraftanlage, wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal zur Veränderung eines Signals zur Ansteuerung eines individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt vorgesehen ist, wobei die Vorrichtung die folgenden Merkmale aufweist:

- eine Schnittstelle zum Einlesen eines Rotorblatt-Positionssignals, das eine Winkelposition des Rotorblattes bezüglich einer Drehachse des Rotors der Windkraftanlage repräsentiert und/oder Einlesen einer Drehgeschwindigkeit des Rotorblattes um die Drehachse; und
 - eine Einheit zum Ermitteln des Anstellwinkel-Korrektursignals für das vorbestimmte Rotorblatt der Windkraftanlage aus einem Speicher, wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal einen Anstellwinkel-Korrekturfaktor repräsentiert, der bei einer Verwendung eine Korrektur des individuellen Anstellwinkels für das vorbestimmte Rotorblatt bewirkt, so dass eine Wirkung eines Momentes auf das vorbestimmte Rotorblatt einer Wirkung eines Momentes auf zumindest ein weiteres Rotorblatt der Windkraftanlage angeglichen wird und wobei das Ermitteln unter
 - 25
 - 30
- Verwendung des eingelesenen Rotorblatt-Positionssignals und/oder der eingelesenen Drehgeschwindigkeit erfolgt.

Von Vorteil ist auch ein Computerprogrammprodukt mit Programmcode, der auf einem maschinenlesbaren Träger wie einem Halbleiterspeicher, einem Festplattenspeicher oder einem optischen Speicher gespeichert ist und der zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorstehend beschriebenen Ausführungsformen verwendet wird, wenn
5 das Programm auf einem Steuergerät oder einer Vorrichtung ausgeführt wird.

Die vorliegende Erfindung basiert auf der Erkenntnis, dass eine deutlich schnellere und bessere Regelung des Anstellwinkels eines Rotorblatts erreicht werden kann, wenn ein Korrektursignal bereitgestellt wird, das einen Korrekturfaktor für den Anstellwinkel
10 eines bestimmten Rotorblatts in Abhängigkeit von einer Winkelposition dieses Rotorblatts aus einem Speicher ausliest. Als Anstellwinkel wird in diesem Zusammenhang derjenige Winkel bezeichnet, um den das Rotorblatt an der Rotornabe um die Rotorblattachse gegenüber einer Null-Stellung in der Rotorebene gedreht ist, wobei in der Null-Stellung das Rotorblatt eine größte Schubkraft aus Wind in Richtung der Rotorachse aufweist. Wird der vorstehend genannte Zusammenhang verwendet, können weit-
15 gehend stationäre Kräfte auf den Rotor, die beispielsweise durch eine schräge Anströmung des Rotors, Windstaueffekte am Turm der Windkraftanlage oder Kräfte durch eine Windscherung in Abhängigkeit von der Winkelposition des Rotorblatts für das Rotorblatt Blatt-individuell korrigiert werden, so dass sich die individuelle Anstellwinkel-
20 Regelung für die einzelnen Rotorblätter lediglich auf die Kompensation der Effekte durch Windturbulenzen beschränken kann. Dies entlastet die Regelung der individuellen Anstellwinkel erheblich. Die stationären Kräfte werden dabei für die Bestimmung des Anstellwinkel-Korrektursignals in Abhängigkeit von der Winkelposition des Rotorblatts berücksichtigt, da beispielsweise die Effekte durch eine Windscherung oder die
25 Windstaueffekte am Turm der Windkraftanlage in unterschiedlichen Winkelpositionen des Rotorblatts unterschiedliches Gewicht haben.

Die vorliegende Erfindung bietet den Vorteil, dass durch die Trennung von stationären Effekten und durch Turbulenzen ausgelöste dynamischen Effekten im Belastungsverhalten der Rotorblätter eine deutlich schnellere und zugleich genauere Regelung der
30 optimalen Anstellwinkel ermöglicht. Dabei braucht durch die vorliegende Erfindung die Regelung noch nicht direkt ausgeführt zu werden, vielmehr besteht der wesentliche

Kern der Erfindung in der Bereitstellung eines entsprechenden Korrektursignals, dessen Verwendung auf die bereits bekannte Regelung der individuellen Anstellwinkel möglich ist. Die vorliegende Erfindung bietet dabei den zusätzlichen Vorteil, dass ein bestehendes Regelungskonzept weiterverwendet werden kann und durch den Einsatz der vor-

5 liegenden Erfindung verbessert wird. Dies ermöglicht auch die Nachrüstung an bestehenden Windkraftanlagen, was einen zusätzlichen wirtschaftlichen Vorteil für den Einsatz der vorliegenden Erfindung darstellt.

Günstig ist es, wenn im Schritt des Ermitteins eine Veränderung des im Speicher abgelegten Zusammenhangs erfolgt. Eine derartige Ausführungsform der vorliegenden Er-

10 findung bietet den Vorteil, dass eine schnelle und flexible Aktualisierung des im Speicher abgelegten Zusammenhangs an die entsprechenden Windverhältnisse vor Ort durchgeführt werden kann.

Gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann im Schritt des Ermitteins für die Veränderung des im Speicher abgelegten Zusammenhangs eine Be-

15 stimmung einer Windgeschwindigkeit an unterschiedlichen Segmenten eines Rotorblattes erfolgen, wobei die Bestimmung der Windgeschwindigkeit an den einzelnen Segmenten des Rotorblattes unter Berücksichtigung einer ermittelten aktuellen Neigung der

20 Rotorachse gegen die Horizontalen, einer aktuellen Distanz einer Rotornabe zu einem Turm der Windkraftanlage, einem ermittelten Schräg-Anströmungswinkel von Wind bezüglich der Rotorachse im Bereich des betreffenden Segmentes, einer aktuellen

Windgeschwindigkeit in Richtung der Rotorachse im Bereich des betreffenden Segmentes des Rotorblattes in Abhängigkeit von der Höhe des betreffenden Segmentes über der

25 Erdoberfläche und/oder einem Durchmesser eines Turms der Windkraftanlage in einer Höhe des betreffenden Segmentes des Rotorblattes erfolgen. Eine derartige Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bietet den Vorteil, dass der im Speicher abgelegte Zusammenhang sehr präzise einen Korrekturfaktor abbildet, der zur Kompensation von weitgehend stationären Störungen verwendet werden kann. Auf diese Weise kann

30 die Regelung des individuellen Anstellwinkels entlastet und damit beschleunigt werden.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn im Schritt des Ermitteins eine Segmentierung eines Flugkreises des Rotorblattes um die Rotorachse in unterschiedliche Segmente erfolgt, wobei zumindest eine Information über eine Belastung des vorbestimmten Rotorblatts in einem der Segmente des Flugkreises aufgezeichnet wird und die aufgezeichnete Information zur Ermittlung eines Anstellwinkel-Korrektursignals eines weiteren Rotorblattes der Windkraftanlage verwendet wird, insbesondere wobei die aufgezeichnete Information zur Ermittlung eines Anstellwinkel-Korrektursignals eines Rotorblattes der Windkraftanlage verwendet wird, das in Drehrichtung des Rotors dem vorbestimmten Rotorblatt unmittelbar nachfolgt. Eine derartige Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bietet den weiteren Vorteil, dass der im Speicher abgelegte Zusammenhang sehr flexibel und schnell auf kleinere lokale Änderungen der weitgehend stationären Störungen angepasst werden kann. Auf diese Weise kann beispielsweise ein dem Rotorblatt direkt nachfolgendes Rotorblatt bereits die Belastungsinformationen nutzen, die durch Sensoren von dem ersten, das heißt von dem vorbestimmten Rotorblatt erfasst wurden.

In einer besonderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann im Schritt des Ermitteins für zumindest ein Segment eine Information über eine Belastung des dem vorbestimmten Rotorblatt nachfolgenden Rotorblattes aufgezeichnet werden, wobei ferner eine Abweichung zwischen der Belastung des vorbestimmten Rotorblattes und der Belastung des weiteren Rotorblattes, insbesondere des dem vorbestimmten Rotorblatt unmittelbar nachfolgenden Rotorblattes ermittelt wird und wobei die ermittelte Abweichung für eine Bestimmung der Belastung und/oder eines Anstellwinkel-Korrektursignals für ein drittes Rotorblatt der Windkraftanlage verwendet wird, wenn sich das dritte Rotorblatt in dem Segment des Flugkreises befindet. Eine derartige Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bietet den Vorteil, dass bei einer Veränderung der im Wesentlichen stationären Störgröße bereits eine Schätzung diese Veränderung für ein nachfolgendes Rotorblatt getroffen werden kann. Das bereitgestellte Anstellwinkel-Korrektursignal kann damit auf einer Vorhersage für sich ändernde (im Wesentlichen stationäre) Störgrößen basieren, was sich durch eine weitere Verbesserung in der Schnelligkeit und Präzision der Regelung des Anstellwinkels niederschlägt, wenn das besagte Anstellwinkel-Korrektursignal verwendet wird.

Auch kann gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung im Schritt des Ermittlens eine Information über eine Belastung des weiteren Rotorblattes, insbesondere des dem vorbestimmten Rotorblatt unmittelbar nachfolgenden Rotorblattes, im betreffenden Segment erfasst werden und ferner in dem Speicher die Information über die Belastung des Rotorblattes durch die erfasste Information über die Belastung des weiteren Rotorblattes ersetzt werden. Eine derartige Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bietet den Vorteil, dass der im Speicher abgelegte Zusammenhang in sehr kurzen Zeitabständen aktualisiert wird, so dass die Bereitstellung des Anstellwinkel-Korrektursignals auf einer möglichst präzisen aktuellen Basis von Messwerten basiert. Dies stellt eine schnelle und hochgenaue Regelung des individuellen Anstellwinkels für ein einzelnes Rotorblatt sicher, wenn das genannte Anstellwinkel-Korrektursignal zur Veränderung des individuellen Anstellwinkels dieses Rotorblattes verwendet wird.

15

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung kann das Verfahren ferner die folgenden Schritte aufweist:

- Einlesen eines weiteren Rotorblatt-Positionssignals, das eine Winkelposition zumindest eines anderen Rotorblattes bezüglich einer Drehachse des Rotors repräsentiert; und
- Ermitteln eines weiteren Anstellwinkel-Korrektursignals für das andere Rotorblatt der Windkraftanlage unter Verwendung des im Speicher abgelegten Zusammenhangs zwischen einer Winkelposition und einem Anstellwinkel-Korrekturfaktor, wobei das weitere Anstellwinkel-Korrektursignal einen Anstellwinkel-Korrekturfaktor repräsentiert, der bei einer Verwendung eine Korrektur eines individuellen Anstellwinkels für das andere Rotorblatt bewirkt, so dass eine Wirkung eines Momentes auf das andere Rotorblatt einer Wirkung eines Momentes auf das vorbestimmte Rotorblatt der Windkraftanlage angeglichen wird und wobei das Ermitteln unter Verwendung des eingelesenen weiteren Rotorblatt-Positionssignals und/oder der eingelesenen Drehgeschwindigkeit erfolgt.

Eine derartige Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bietet den Vorteil, dass nicht nur eine Optimierung des Anstellwinkels eines einzelnen Rotorblattes erfolgt, sondern dass die Optimierung für mehrere Rotorblätter gemeinsam durchgeführt wird. Dies stellt eine weitere Verbesserung bei der Regelung der Anstellwinkel der Rotorblätter der Windkraftanlage dar. Insbesondere wird hierdurch eine Verringerung der Gier- und Nickmomente auf den Turm oder die Gondel der Windkraftanlage erreicht.

Auch kann in einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ein Verfahren zur Veränderung eines Signals zur Ansteuerung eines individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt vorgesehen sein, wobei dieses Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

- die Schritte des Verfahrens wie es vorstehend beschrieben wurde; und
- Verändern des Signals zur Ansteuerung des individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt unter Verwendung des bereitgestellten Anstellwinkel-Korrektursignals.

15

Eine derartige Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bietet den Vorteil, dass nicht nur ein Anstellwinkel-Korrektursignal bereitgestellt wird, sondern dass tatsächlich das Signal zur Ansteuerung des individuellen Anstellwinkels verändert wird. Hierdurch lassen sich die Vorteile implementieren, die durch das Bereitstellen des Anstellwinkel-Korrektursignals eröffnet werden.

20

Die Erfindung wird nachstehend anhand der beigefügten Zeichnungen beispielhaft näher erläutert. Es zeigen:

25 Fig. 1 ein Blockschaltbild eines Regelkreises zur Verstellung der individuellen Anstellwinkel für Rotorblätter des Rotors der Windkraftanlage, wobei ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung eingesetzt wird;

Fig. 2 eine Vorderansicht einer Windkraftanlage, wobei eine Darstellung einer Segmentierung der Rotorblätter zur Bestimmung des aktuellen Anstellwinkel-Korrekturfaktors wiedergegeben ist;

30

- Fig. 3 eine Darstellung einer Windscherung in unterschiedlicher Höhe über der Erdoberfläche sowie einer Seitenansicht einer Windkraftanlage, bei der die Rotorachse gekippt dargestellt ist;
- Fig. 4 eine Draufsicht-Darstellung auf eine Windkraftanlage, wobei die Rotorblätter von Wind schräg angeströmt werden;
- 5 Fig. 5 eine Darstellung zur Erläuterung des Turmstaueffekts;
- Fig. 6 Darstellungen zur Verdeutlichung der Wirkung von gemessenen Belastungswerten auf nachfolgende Rotorblätter der Windkraftanlage;
- Fig. 7a ein Diagramm von Belastungswerten in einem Flugkreissegment eines Rotorblattes in zeitlicher Abfolge bei einer Zunahme von Wind;
- 10 Fig. 7b ein Diagramm, das eine Änderung eines Korrekturfaktors für den Anstellwinkel für die in Fig. 7a gezeigte Zunahme der Windbelastung innerhalb des Flugkreissegmentes des Rotorblattes zu unterschiedlichen Zeitpunkten;
- Fig. 8 ein Blockschaltbild eines Regelkreises zur Verstellung der individuellen Anstellwinkel für Rotorblätter des Rotors der Windkraftanlage, wobei ein weiteres Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung eingesetzt wird; und
- 15 Fig. 9 ein Ablaufdiagramm eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung als Verfahren.
- 20 Gleiche oder ähnlich wirkende Elemente können in den nachfolgenden Figuren durch gleiche oder ähnliche Bezugszeichen versehen sein. Ferner enthalten die Figuren der Zeichnungen, deren Beschreibung sowie die Ansprüche zahlreiche Merkmale in Kombination. Einem Fachmann ist dabei klar, dass diese Merkmale auch einzeln betrachtet werden oder sie zu weiteren, hier nicht explizit beschriebenen Kombinationen zusammengefasst werden können. Weiterhin ist die Erfindung in der nachfolgenden Beschreibung eventuell unter Verwendung von unterschiedlichen Maßen und Dimensionen erläutert, wobei die Erfindung nicht auf diese Maße und Dimensionen eingeschränkt zu verstehen ist. Ferner können erfindungsgemäße Verfahrensschritte wiederholt sowie in einer anderen als in der beschriebenen Reihenfolge ausgeführt werden. Umfasst ein
- 25 Ausführungsbeispiel eine „und/oder“-Verknüpfung zwischen einem ersten Merkmal/Schritt und einem zweiten Merkmal/Schritt, so kann dies so gelesen werden, dass das Ausführungsbeispiel gemäß einer Ausführungsform sowohl das erste Merkmal / der
- 30

erst Schritt als auch das zweite Merkmal /der zweite Schritt und gemäß einer weiteren Ausführungsform entweder nur das erste Merkmal / den ersten Schritt oder nur das zweite Merkmal / den zweiten Schritt aufweist.

- 5 Ein wichtiges Ziel der vorliegenden Erfindung ist darin zu sehen, dass eine Störgrößen-
aufschaltung für die IPC-Regelung realisiert bzw. ermöglicht werden soll. Dadurch
kann eine wesentlich verbesserte Performance der IPC-Regelung erreicht werden. Die
Erfindung lässt sich mit den bekannten IPC-Regelungsverfahren sehr einfach kombinie-
10 werden können. Hierzu sollen für die individuelle Pitchregelung eines Rotorblattes die
über bis zu einem kompletten Rotorumlauf gespeicherte Messinformationen im güns-
tigsten Fall sämtlicher Rotorblätter verwendet werden. Die Belastungsmessreihen, die
aus den Messinformationen gewonnen werden, lassen sich dann verwenden, um die zu
erwartenden Rotorbelastungen abzuschätzen. Basierend auf dieser Abschätzung kann
15 dann eine Solltrajektorie der einzelnen Pitchwinkel berechnet und für die Vorsteuerung
der Pitchaktuatoren verwendet werden.

Ein wichtiger Aspekt der vorliegenden Erfindung ist darin zu sehen, dass sich die IPC-
Regelung um eine Störkompensation erweitern lässt, welche die Gier- und Nickmomen-
20 te an der Windkraftanlage ausregeln soll, die durch bekannte Störeffekte entstehen. Zu
diesen Störeffekte zählen beispielsweise:

- 1) die Neigung der Rotorachse gegen die Horizontale (üblicherweise um ca. 5°). Da-
durch entstehen Momente durch die auf die Blätter wirkende Gewichtskraft, sowie
eine sich periodisch ändernde Anströmung, da sich die Blattspitzen während eines
25 Umlaufs vor und zurück bewegen.
- 2) Fehler in der Anströmung durch den Turmschatten;
- 3) Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe über dem Boden durch
Windscherung;
- 4) Schräganströmung der Rotorblätter; und
- 30 5) Sonstige Effekte (z.B. Abschattung einer Hälfte der Rotorfläche durch andere An-
lagen, etc.).

Da all diese Effekte sich zeitlich nur langsam ändern, lassen sie sich durch eine Störkompen-
kulation eliminieren, bevor sie am Ausgang messbar sind. Dazu wird zunächst der
Verlauf einer Korrekturgröße für die individuellen Pitchwinkel für jedes Rotorblatt be-
stimmt, die erforderlich ist, um die Störungen zu eliminieren. Diesen Verlauf gibt man
5 dann als Störkompensation additiv zusätzlich zu dem vom IPC-Regler berechneten in-
dividuellen Pitchwinkel und führt das erhaltene Signal einem Pitch-Aktuator zu. Eine
prinzipielle Vorgehensweise bei der Bestimmung der korrigierten individuellen An-
stellwinkel ist aus dem Blockschaltbild gemäß der Fig. 1 erkennbar.

10 Dabei zeigt das Blockschaltbild aus der Fig. 1, wie ein Regelkreis 100 ausgestaltet sein
könnte, der die vorliegende Erfindung einsetzt. Hierbei wird der Anstellwinkel von in
Fig. 1 nicht dargestellten Rotorblättern einer Windkraftanlage 110 geregelt. Diese Rege-
lung erfolgt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Windes 115, der auf die Ro-
torblätter der Windkraftanlage 110 wirkt. An der Windkraftanlage 110 werden durch
15 Sensoren verschiedene Messgrößen 120 erfasst, wie beispielsweise die Drehzahl des
Rotors, die Winkelgeschwindigkeit des Rotors, eine oder mehrere Winkelpositionen der
Rotorblätter oder Biegemomente, die an den Blattwurzeln der Rotorblätter auftreten
repräsentieren. Diese Messgrößen 120 wie beispielsweise $\Omega_{1,2,3}$ (die Winkelpositionen
der Rotorblätter 1, 2 bzw. 3), ω , $M_{1,2,3}$ (die Momente der Rotorblätter 1, 2 bzw. 3) wer-
20 den einer Einheit 125 zur Betriebsführung der Windkraftanlage 110, einem IPC-Regler
130 sowie einer Vorrichtung 135 und über eine Schnittstelle 136 einem Speicher 137
zugeführt, der eine Einheit darstellt, die das Anstellwinkel-Korrektursignal 139 auch als
 $\beta_{su,2,3}$ für das Störgrößensignal für das erste, zweite und dritte Rotorblatt bezeichnet, bereit-
stellt. Insbesondere kann durch den Speicher 137 ein Anstellwinkel-Korrektursignal für
25 jedes der Rotorblätter der Windkraftanlage 110 bereitgestellt werden. In dem Speicher
137 ist dabei ein Zusammenhang zwischen dem Anstellwinkel-Korrektursignal für
zumindest eines der Rotorblätter des Rotors der Windkraftanlage 110 abgelegt, die an-
sprechend auf eine aktuelle Winkelposition des betreffenden Rotorblattes und/oder einer
Winkelgeschwindigkeit des Rotors für die Korrektur des individuellen Anstellwinkels
30 139 des betreffenden Rotorblatts ausgegeben wird.

In der Vorrichtung 135 können gemäß der nachfolgend noch detaillierter dargestellten Beschreibung Korrekturen des im Speicher 137 abgelegten Zusammenhangs ausgeführt werden und diese Korrekturen im Speicher 137 abgelegt werden. Hierdurch kann der im Speicher 137 abgelegte Zusammenhang aktuell gehalten werden, so dass eine sehr präzise Regelung des Anstellwinkels möglich wird.

Die Einheit 125 zur Betriebsführung liefert auf der Basis der Drehzahl ω allgemeine Steuersignale, die eine Optimierung der Leistungsabgabe der Windkraftanlage 110 betreffen. Beispielsweise liefert die Einheit 125 zur Betriebsführung ein aktuelles Generatormoment 140, welches direkt der Windkraftanlage 110 zur Verfügung gestellt wird, um eine Regelung der Drehzahl des Generators und damit eine Optimierung der Leistungsabgabe des Generators der Windkraftanlage zu erreichen. Weiterhin liefert die Einheit 125 zur Betriebsführung ein Signal 142, das einen gemeinsamen Anstellwinkel für alle Rotorblätter des Rotors der Windkraftanlage 110 repräsentiert, damit unter Berücksichtigung der aktuellen Windgeschwindigkeit 115 (und eventuell der aktuellen Windrichtung) die Windkraftanlage 110 in ihrem aktuellen optimalen Leistungspunkt arbeitet.

Der IPC-Regler 130 verwendet beispielsweise eines oder mehrerer Signale über Momente $M_{1,2,3}$, die an den einzelnen Rotorblattwurzeln erfasst werden und kann hieraus für zumindest einen, besser jedoch für jedes der einzelnen Rotorblätter einen individuellen Anstellwinkel 145 (aus mit $\beta_{IPC1,2,3}$ bezeichnet) bereitstellen.

Das Anstellwinkel-Korrektursignal 139 für ein bestimmtes Rotorblatt, das Signal 145, das den individuellen Anstellwinkel für das betreffende Rotorblatt repräsentiert sowie das Signal 142, das einen gemeinsamen Anstellwinkel aller Rotorblätter repräsentiert können dann additiv zu einem korrigierten Anstellwinkel-Ansteuersignal 150 verknüpft werden. Von diesem korrigierten Anstellwinkel-Ansteuersignal 150 wird ein nachfolgend noch näher beschriebenes Signal $\beta_{i,2,3}$ für einen aktuellen Anstellwinkel für das betreffende Rotorblatt 1, 2 oder 3 subtrahiert, wobei das aus der Subtraktion erhaltene Signal einem unterlagerten Anstellwinkelregler 155 zugeführt wird, der beispielsweise als P-Regler mit dem Regelungsfaktor k_A ausgestaltet ist. Das von dem unterlagerten

Anstellwinkelregler 155 erhalten Signal wird additiv mit einem Signal aus einer Vorsteuerungseinheit 160 für den Anstellwinkel-Aktuator verknüpft. Das derart verknüpfte Signal wird nachfolgend einem Anstellwinkel-Aktuator 165 mit der Transformationsvorschrift G_A zugeführt, der den tatsächlichen Anstellwinkel für das betreffende Rotorblatt einstellt. Ein Signal, das diesen tatsächlichen Anstellwinkel für das betreffende Rotorblatt repräsentiert, wird als vorstehend aktueller Anstellwinkel dem Signal 150 abgezogen. Die Vorsteuerungseinheit 160 für den Anstellwinkel-Aktuator führt dabei eine Prädiktion des zu erwartenden Anstellwinkels auf der Basis des Anstellwinkel-Korrektursignals 139 durch, so dass eine schnellere Regelung des korrigierten individuellen Anstellwinkels für das betreffende Rotorblatt möglich ist. Die vorstehend genannte Beschreibung kann auch für jedes einzelne Rotorblatt des Rotors der Windkraftanlage 110 durchgeführt werden, so dass eine Optimierung der Regelung des individuellen Anstellwinkels für die Rotorblätter möglich wird. Es ist jedoch nicht erforderlich, dass die Anstellwinkel für alle Rotorblätter optimiert werden.

15

Da der Verlauf der Größe für die Störkompensation im Voraus bekannt ist, kann für den hinterlagerten Pitchregler 155 eine Versteuerung realisiert werden, welche eine deutlich verbesserte und schnellere Folgeregelung des Pitchaktuators 165 ermöglicht. Dadurch kann der Aktuator die sich aus der Störkompensation mit Hilfe des Anstellwinkel-Korrektursignals 139 ergebenden Pitchanteile praktisch verzögerungsfrei einstellen. Bei korrekt berechnetem Pitchverlauf für die Störkompensation können damit die asymmetrischen Belastungen bei konstantem, turbulenzfreiem Wind vollständig ausgeglichen werden. Die Störkompensation verwendet dabei eine Kurve in dem Speicher 137, welche einen Zusammenhang für den zur Störkompensation für jedes Blatt notwendigen Pitch- oder Anstellwinkel enthält. Diese Kurve kann durch die Vorrichtung 135 berechnet werden, indem in der Vorrichtung 135 der Verlauf der Windgeschwindigkeit an einzelnen Blattelementen berechnet wird. Anschließend wird die Kurve für den Pitchwinkel so optimiert, dass die daraus resultierenden Anströmverhältnisse zu keinen oder sehr geringen asymmetrischen Momenten resultieren.

30

Die Kurve für den Pitchwinkel kann aber auch in einer verbesserten Ausführung der Erfindung laufend angepasst werden, indem aus den gemessenen Daten 120 der Wind-

kraftanlage laufend die Parameter der Windscherung, des Turmvorstaus, etc. ausgelesen und unter Verwendung dieser Parameter der im Speicher 137 abgelegte Zusammenhang angepasst wird. In diesem Fall sollten die einzelnen Störeffekte auch nicht getrennt aufgelöst werden, sondern es kann ein Algorithmus implementiert werden, welcher den
5 Pitchverlauf über die Rotorblattposition so anpasst, dass alle Störeffekte, die nicht aus der Turbulenz des Windes stammen, kompensiert werden.

Für die Berechnung der Windgeschwindigkeiten an den einzelnen Rotorblättern kann beispielsweise eine Betrachtung von einzelnen Segmenten 200 des oder der jeweiligen
10 Rotorblätter 210 der Windkraftanlage 110 herangezogen werden, wie sie in der Fig. 2 dargestellt ist. Dabei wird ein Abstand r des betreffenden Segmentes 200 von der Nabe des Rotors sowie die Drehgeschwindigkeit ω und/oder die Winkelposition Ω des Rotorblattes 210 berücksichtigt, an dem sich das betreffende Segment aktuell befindet. Dabei wird ein Koordinatensystem betrachtet, bei dem die z - und y -Achsen gemäß der Dar-
15 **Stellung** aus Fig. 2 verlaufen.

Weiterhin kann für die Berechnung der Windgeschwindigkeiten die Windscherung in unterschiedlicher Höhe H über der Erdoberfläche berücksichtigt werden. Hierzu wird beispielsweise ein Nickwinkel δ der Rotorachse 310 gegenüber der Horizontalen sowie
20 ein Abstand der Rotornabe 320 gegenüber der Mitte des Turms der Windkraftanlage berücksichtigt, wie es in der Fig. 3 schematisch dargestellt ist. In der Fig. 3 ist ferner der Verlauf der x -Koordinate für ein Koordinatensystem eingetragen, wie es bei der Berechnung der Windgeschwindigkeiten verwendet wird. Bei der Bestimmung der Windscherung sind dabei unterschiedliche Windgeschwindigkeiten zu berücksichtigen, die
25 gemäß der linken schematischen Darstellung aus Fig. 3 in unterschiedlicher Höhe über der Erdoberfläche auftreten können, wobei in großer Höhe über der Erdoberfläche eine größeren Windgeschwindigkeit zu beobachten ist, als dicht über der Erdoberfläche.

Auch wird beispielsweise bei der Bestimmung der Windgeschwindigkeiten die Schräganströmung der Rotorblätter 210 unter dem Anströmwinkel γ gegenüber der Rotorachse berücksichtigt, wie es schematisch aus der Fig. 4 ersichtlich ist.
30

Zusätzlich kann auch bei der Berechnung der Windgeschwindigkeiten ein Luftstau am Turm der Windkraftanlage berücksichtigt werden, wie es in der Darstellung aus Fig. 5 verdeutlicht ist. Dabei wird in der Fig. 5 durch die durchgezogenen Linien ein Strömungsverhalten von Wind um einen feststehenden Turm einer Windkraftanlage dargestellt, wobei vereinfacht von einem Turmradius r in Höhe des betrachteten Segmentes 200 bei einem Winkel ϕ und einem Abstand r dieses Segmentes 200 von der Mitte des Turmes ausgegangen wird. Die Anströmgeschwindigkeit des Windes wird dabei mit der Variable u bezeichnet.

10 Unter Verwendung der vorstehend genannten Zusammenhänge lassen sich nun die Windgeschwindigkeiten in unterschiedliche Koordinatenrichtung unter Zuhilfenahme der folgenden Formeln abschätzen:

$$z = r \cdot \cos \Omega \cdot \cos \delta;$$

15 $y = -r \cdot \sin \delta;$

$$x = -h + r \cdot \sin \delta \cdot \cos \Omega;$$

Weiterhin wird für die Windgeschwindigkeiten in x- und y-Richtung folgender Zusammenhang verwendet:

20

$$v_x = v_{HH} \cdot \left(\frac{z_{Hub} + z}{z_{Hub}} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot \left(1 + \frac{a^2(z)}{x^2 + y^2} \right) \cdot (\sin^2 \varphi \sim \cos^2 \varphi) \quad (1)$$

$$v_y = v_{HH} \cdot \left(\frac{z_{Hub} + z}{z_{Hub}} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot \left(-2 + \frac{a^2(z)}{x^2 + y^2} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \right), \quad (2)$$

25 wobei $\phi = \arctan^{\wedge}$ gilt. Auch kann als Exponent statt 1/7 der Wert des Scherungskoeffizienten α verwendet werden. Dieser kann sich mit der Zeit ändern

Hierbei repräsentiert in den Gleichungen (1) und (2) der Term

30 $v_{HH} \cdot \left(\frac{z_{Hub} + z}{z_{Hub}} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot \left(1 + \frac{a^2(z)}{x^2 + y^2} \right)$

die Komponente des Windes, die durch die Windscherung verursacht ist und der Term

$$\left(1 + \frac{a^2(z)}{x^2+y^2}\right) \cdot \left(\sin^2(\varphi) - \cos^2(\varphi)\right) \cdot \left(-2 + \frac{a^2(z)}{x^2+y^2}\right) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$$

- 5 diejenige Komponente, die durch das Turmstaumodell über den Potentialströmungsansatz berechnet werden kann. Ferner werden für die Windgeschwindigkeit beim Potentialstaumodell die folgenden beiden Gleichungen verwendet:

$$u_r = u \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \cdot \cos \phi$$

10 und

$$u_v = -u \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \cdot \sin \phi.$$

- Die gesamte Rotor-Anströmung, d.h. die Anströmgeschwindigkeit des Rotors von Wind lässt sich vereinfacht unter Vernachlässigung des geringen Anteils von v_y folgendermaßen ermitteln:

$$v = v_x \cdot \cos \gamma + r \cdot \sin \delta \cdot \omega \cdot \sin \Omega. \quad (3)$$

- Dabei bildet der Term $\cos \gamma$ die Schräganströmung des Rotors ab, während der Term $r \cdot \sin \delta \cdot \omega \cdot \sin \Omega$ die Geschwindigkeit auf Grund der Achsneigung repräsentiert.

- Unter Verwendung der vorstehend genannten Formeln lässt sich der in dem Speicher 137 abgelegte Zusammenhang für die Anstellwinkel-Korrektur in Bezug zur aktuellen Winkelposition des Rotors und/oder der Drehzahl des Rotors verändern. Dies kann durch die Einheit 135 erfolgen, in der ein entsprechendes Modell hinterlegt ist, welcher Anstellwinkel für ein einzelnes Rotorblatt bei welcher Windgeschwindigkeit aus welcher Richtung erforderlich ist, um eine optimale d.h. möglichst symmetrische Reduktion der Belastung der Windkraftanlage zu erreichen. Hierbei ist zu beachten, dass die vorstehend genannten Größen die stationären Verhältnisse wiedergeben, die sich nicht schnell, d.h. die sich im Bereich von einigen 10 Sekunden ändern können. Für den erhaltenen günstigen Anstellwinkel kann dann ein entsprechender Korrekturfaktor ermit-

telt werden, der zu einem individuellen Anstellwinkelsignal addiert wird, welcher auf der Basis der sehr kurzzeitigen (d.h. sich im Bereich von Sekunden ändernden) Luftturbulenzen durch den IPC-Regler 130 bestimmt wird.

5 Ein wichtiges Ziel der Erfindung gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung ist es, eine aktive Vorsteuerung der Pitchaktuatoren zu realisieren, basierend auf den in dem Umlaufzyklus des Rotors gemessenen Belastungsmessreihen. Die Belastungskurve eines Rotorblattes wird hierbei als die zu erwartende Belastungskurve des Nachläufers (d.h. des direkt nachfolgenden Rotorblattes) eines Flugkreissegmentes der Rotorblätter betrachtet, wobei der Flugkreis die Fläche bezeichnet, die die Rotorblätter bei der Drehung um die Rotornabe überstreichen. Zur Veranschaulichung dienen die folgenden Diagramme aus der Fig. 6. Es werden in den beiden linken als auch in den beiden rechten Diagramme je die gemessenen Schlagbiegemoment-Belastungen der Rotorblätter (untere Diagramme) gegenüber den gemessenen Windgeschwindigkeiten (obere Diagramme) dargestellt. Die Durchgangsreihenfolge eines Rotorsektors (d.h. des betrachteten Segmentes des Flugkreises der Rotorblätter) beträgt 3-2-1, das heißt bezüglich des Rotorblattes 2 ist Blatt 3 der Vorläufer und Blatt 1 der Nachläufer. Wenn die dargestellten Belastungskurven jeweils um $t = T/3$ (mit T der Rotorumlaufzeit) nach rechts in der Zeitschiene verschoben werden, können die Belastungskurven in den unteren Diagrammen aus der Fig. 6 nahezu in Deckung gebracht werden, d.h. die durchgezogene Linie entspricht im Wesentlichen der gestrichelt dargestellten Linie und die gestrichelt dargestellte Linie lässt sich dann auch die gepunktet dargestellte Linie abbilden; abgesehen von Änderungen der Belastungsmomente, die für allen drei Rotorblätter in der Tendenz gleich wirken.

25

Die Belastungskurven innerhalb eines Hauptsektors werden also dem jeweils nachfolgenden Rotorblatt zugeordnet. Um eine zu große Unsicherheit bezüglich der Vorhersage zu vermeiden, wird jeweils nur die Belastungskurve des Vorläufers für die Vorhersage der Belastung des Nachläufers betrachtet. Die Rotorfläche wird hierfür diskretisiert (z.B. mit einem Rotor-Azimuthwinkel von 1 Grad pro Segment). Während des Rotorumlaufes werden die gemessenen Belastungen den entsprechenden Rotor-Azimuthwinkeln bei Überstreichung des Diskretisierungsabschnittes bzw. des

30

Diskretisierungsschrittes zugeordnet. Auf diese Weise können bei Speicherung eines kompletten Rotorumlaufes drei (oder vier) Messwerte pro Rotor-Azimuthwinkelsegment und Umlauf realisiert werden. Die prinzipielle Idee für die Vorsteuerung gemäß diesem Ausführungsbeispiel besteht darin, die während eines drittel
5 Umlaufes (d.h. 120 Grad) gemessenen Sensordaten der einzelnen Rotorblätter als Grundlage für die Trajektorienplanung der Pitchwinkel von nachfolgenden Rotorblättern zu verwenden. Die in Messungen und Simulationen nachweisbaren zyklischen Belastungskurven bei Windkraftanlagen erlauben es, eine Vorhersage bezüglich der zu erwartenden Belastung zu treffen,

10

Somit beschränkt sich die Trajektorienplanung auf $3 \cdot 120^\circ$ -Sektoren, für die jeweils eine Solltrajektorie der Pitchverstellung berechnet wird. Diese Solltrajektorie kann für jeden der Sektoren in dem Speicher 137 gespeichert werden und zur Korrektur des individuellen Anstellwinkels eines Rotorblattes eingesetzt werden, das sich in den betreffenden
15 Sektor befindet. Nach Überstreichen eines 120° -Sektors wird die Trajektorienplanung für diesen Sektor auf Basis der neuen Messdaten des Rotorflügels aktualisiert, der diesen Sektor unmittelbar zuvor durchlaufen hat. In dem linken unteren Diagramm aus der Fig. 6 (Belastungskurve Böe) lässt sich eine zunehmende Rotorbelastung im Zeitbereich 10-22 Sekunden und eine abnehmende Belastung im Bereich 22-30 Sekunden erkennen
20 Im Falle z.B. einer Windböe oder allgemein einer Änderung der Windgeschwindigkeit (und damit der Rotorbelastung) kann für die einzelnen Rotorsegmente ein Belastungsgradient mittels der Messdaten berechnet werden.

Diese Änderung der Windgeschwindigkeit, die auch als Gradient bezeichnet werden
25 kann, kann dann als Korrekturfaktor für die Belastungskurven verwendet werden. Voraussetzung für die Berücksichtigung des Korrekturfaktors ist in diesem Fall eine klar feststellbare Tendenz anhand der Messdatenreihe der entsprechenden Rotorsektoren. Eine solche Tendenz ist beispielweise aus dem Diagramm aus Fig. 7a zu erkennen, bei der die Windgeschwindigkeit (und damit die Momentenbelastung M) in ein und demselben Rotorsegment kontinuierlich über die Drittel-Umlaufdauern T ansteigt. Hierbei
30 kann ein Korrekturfaktor

$$k = \frac{\Delta y}{3\Delta T}$$

ermittelt werden, um den die Belastungstrajektorie entsprechend verändert wird bzw. verändert werden sollte. Beispielsweise erfolgt dies entsprechend der Darstellung aus der Fig. 7B, bei der die durchgezogene dargestellte Solltrajektorie die Veränderung unter
5 Verwendung des Korrektur-Faktors, dessen Wirkung in der Fig. 7B durch die Pfeile darstellt ist, in eine korrigierte Solltrajektorie überführt wird, die gestrichelt dargestellt ist. Dies ermöglicht eine sehr kurzfristige Änderung der Korrektur-Faktoren und somit eine sehr schnelle Anpassung des einzustellenden Anstellwinkel-Korrektursignals auf die aktuellen Windverhältnisse in dem jeweils betrachteten Rotorsektor. Die vorstehend
10 beschriebene Vorgehensweise kann dann auch für mehrere Rotorsektoren durchgeführt werden, so dass möglichst für den gesamten Flugkreis des Rotors eine kurzfristige Aktualisierung der Windverhältnisse möglichst ist. Basierend auf den (korrigierten) Belastungskurven kann somit dann auch eine Vorsteuerung der Pitchaktuatoren im Rahmen der IPC-Regelung realisiert werden.

15 Ein derart ausgestaltetes Ausführungsbeispiel könnte gemäß einem Blockschaltbild aus Fig. 8 wiedergegeben werden. Hierbei ist in dem Speicher 137 eine Trajektorienplanung für die einzelnen Rotorsektoren enthalten, die durch die Einheit 135 jeweils aktualisiert werden. Gegenüber dementsprechend dem Blockschaltbild aus Fig. 1 ausgelegten Ausführungsbeispiel wird also in dem Speicher 137 nicht mehr ein Zusammenhang zwi-
20 schen einer Winkelposition und dem Anstellwinkel-Korrekturfaktor für ein Rotorblatt für einen vollständigen Umlauf hinterlegt, sondern es werden die Korrekturfaktoren hinterlegt, die für einzelne Rotorsektoren (oder zumindest einen Sektor) bestimmt und nach dem Überstreichen des nachlaufenden Rotorblattes aktualisiert werden. Auf diese
25 Weise wird eine hochgenaue und schnelle Regelung oder Korrektur der individuellen Anstellwinkel des oder der Rotorblätter erreicht.

Weiterhin schafft die vorliegende Erfindung ein Verfahren 900 zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals für ein vorbestimmtes Rotorblatt aus einer Mehrzahl
30 von Rotorblättern einer Windkraftanlage wie es als Ablaufdiagramm in der Fig. 9 dargestellt ist. Dabei ist das Anstellwinkel-Korrektursignal zur Veränderung eines Signals

zur Ansteuerung eines individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt vorgesehen. Das Verfahren 900 umfasst einen Schritt des Einlesens 910 eines Rotorblatt-Positionssignals, das eine Winkelposition des Rotorblattes bezüglich einer Drehachse des Rotorblattes repräsentiert und/oder Einlesen einer Drehgeschwindigkeit des Rotorblattes um die Drehachse. Weiterhin umfasst das Verfahren 900 einen Schritt des Ermitt-
5 teins 920 des Anstellwinkel-Korrektursignals für das vorbestimmte Rotorblatt der Windkraftanlage unter Verwendung eines in einem Speicher abgelegten Zusammen-
hang zwischen einer Winkelposition und einem Anstellwinkel-Korrekturfaktor, wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal den Anstellwinkel-Korrekturfaktor repräsentiert, der
10 bei einer Verwendung eine Korrektur des individuellen Anstellwinkels für das vorbestimmte Rotorblatt bewirkt, so dass eine Wirkung eines Momentes auf das vorbestimmte Rotorblatt einer Wirkung eines Momentes auf zumindest ein weiteres Rotorblatt der Windkraftanlage angeglichen wird und wobei das Ermitteln unter Verwendung des ein-
gelesenen Rotorblatt-Positionssignals und/oder der eingelesenen Drehgeschwindigkeit
15 erfolgt.

Die gezeigten Ausführungsbeispiele sind nur beispielhaft gewählt und können miteinander kombiniert werden.

Bezugszeichenliste

5		
	100	Vorrichtung zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals
	110	Windkraftanlage
10	120	Sensorsignale von Sensoren an oder in der Windkraftanlage
	125	Einheit zur Betriebsführung des Windkraftanlage
	130	Regler zur Ermittlung der individuellen Anstellwinkel
	135	Einheit zur Veränderung des im Speicher gespeicherten Zusammenhangs
	136	Schnittstelle
15	137	Speicher
	139	Anstellwinkel-Korektursignal
	140	Signal, das das Generatormoment repräsentiert
	142	Signa), das den gemeinsamen Pitchwinkel für alle Rotorblätter repräsentiert
	145	Signal zur individuellen Ansteuerung des Anstellwinkels aus dem IPC-Regler
20	150	korrigiertes individuelles Anstellwinkel-Ansteuersignal
	155	unterlagerter Pitchregler
	160	Vorsteuerung -für den Anstellwinkel-Aktuator/Pitchaktuator
	165	Pitchaktuator, Anstellwinkel-Aktuator
25	200	Segment eines Rotorblattes
	210	Rotorblatt
	310	Rotordrehachse
	320	Rotornabe
30	900	Verfahren zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals
	910	Schritt des Einlesens
	920	Schritt des Ermitteins

Ansprüche

5

1. Verfahren (900) zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals (β_i , 139) für ein vorbestimmtes Rotorblatt (210) aus einer Mehrzahl von Rotorblättern einer Windkraftanlage (110), wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal zur Veränderung eines Signals (145) zur Ansteuerung eines individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt vorgesehen ist, wobei das Verfahren (900) die folgenden Schritte aufweist:

10

- Einlesen (910) eines Rotorblatt-Positionssignals (Ω_i , 120), das eine Winkelposition (Ω_i) des Rotorblattes bezüglich einer Drehachse (310) des Rotors der Windkraftanlage (110) repräsentiert und/oder Einlesen einer Drehgeschwindigkeit (ω) des Rotorblattes um die Drehachse (310); und

15

- Ermitteln (920) des Anstellwinkel-Korrektursignals (139) für das vorbestimmte Rotorblatt der Windkraftanlage unter Verwendung eines in einem Speicher (137) abgelegten Zusammenhangs zwischen einer Winkelposition (Ω_i) und einem Anstellwinkel-Korrekturfaktor (β_i), wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal den Anstellwinkel-Korrekturfaktor repräsentiert, der bei einer Verwendung eine Korrektur des Signals (β_{jpci} , 145) zur Ansteuerung des individuellen Anstellwinkels für das vorbestimmte Rotorblatt bewirkt, so dass eine Wirkung eines Momentes (M_1) auf das vorbestimmte Rotorblatt einer Wirkung eines Momentes (M_2, M_3) auf zumindest ein weiteres Rotorblatt der Windkraftanlage angeglichen wird und wobei das Ermitteln unter Verwendung des eingelesenen Rotorblatt-Positionssignals (Ω_i) und/oder der eingelesenen Drehgeschwindigkeit (ω) erfolgt.

20

25

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass im Schritt des Ermittlens eine Veränderung des im Speicher abgelegten Zusammenhangs erfolgt.

30

3. Verfahren gemäß Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, **dass** im Schritt des Ermitteins für die Veränderung des im Speicher abgelegten Zusammenhangs eine Bestimmung einer Windgeschwindigkeit (115) an unterschiedlichen Segmenten (200) eines Rotorblattes erfolgt, wobei die Bestimmung der Windgeschwindigkeit an den einzelnen Segmenten des Rotorblattes unter Berücksichtigung einer ermittelten aktuellen Neigung (δ) der Rotorachse (310) gegen die Horizontalen, einer aktuellen Distanz einer Rotornabe (320) zu einem Turm der Windkraftanlage, einem ermittelten Schräg-Anströmungswinkel (γ) von Wind bezüglich der Rotorachse im Bereich des betreffenden Segmentes, einer aktuellen
- 5
10
15
20
25
4. Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Schritt des Ermitteins eine Segmentierung eines Flugkreises des Rotorblattes um die Rotorachse in unterschiedliche Segmente erfolgt, wobei zumindest eine Information über eine Belastung des vorbestimmten Rotorblatt in einem der Segmente des Flugkreises aufgezeichnet wird und die aufgezeichnete Information zur Ermittlung eines Anstellwinkel-Korrektursignals eines weiteren Rotorblattes der Windkraftanlage verwendet wird, insbesondere wobei die aufgezeichnete Information zur Ermittlung eines Anstellwinkel-Korrektursignals eines Rotorblattes der Windkraftanlage verwendet wird, das in Drehrichtung des Rotors dem vorbestimmten Rotorblatt unmittelbar nachfolgt.
- 30
5. Verfahren gemäß Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Schritt des Ermitteins für zumindest ein Segment eine Information über eine Belastung des dem vorbestimmten Rotorblatt unmittelbar nachfolgenden Rotorblattes aufgezeichnet wird, wobei ferner eine Abweichung zwischen der Belastung des vorbestimmten Rotorblattes und der Belastung des weiteren Rotorblattes, insbesondere des dem vorbestimmten Rotorblatt unmittelbar nachfolgenden Rotorblattes

ermittelt wird und wobei die ermittelte Abweichung für eine Bestimmung der Belastung und/oder eines Anstellwinkel-Korrektursignals für ein drittes Rotorblatt der Windkraftanlage verwendet wird, wenn sich das dritte Rotorblatt in dem einen Segment des Flugkreises befindet.

5

6. Verfahren gemäß Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Schritt des Ermittlens eine Information über eine Belastung des weiteren Rotorblattes, insbesondere des dem vorbestimmten Rotorblatt unmittelbar nachfolgenden Rotorblattes, im betreffenden Segment erfasst wird und ferner in dem Speicher die Information über die Belastung des Rotorblattes durch die erfasste Information über die Belastung des weiteren Rotorblattes ersetzt wird.

10

7. Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren ferner die folgenden Schritte aufweist:

15

- Einlesen eines weiteren Rotorblatt-Positionssignals (Ω_2), das eine Winkelposition zumindest eines anderen Rotorblattes bezüglich einer Drehachse des Rotors repräsentiert; und
- Ermitteln eines weiteren Anstellwinkel-Korrektursignals (β_{sa}) für das andere Rotorblatt der Windkraftanlage unter Verwendung des im Speicher abgelegten Zusammenhang zwischen einer Winkelposition und einem Anstellwinkel-Korrekturfaktor, wobei das weitere Anstellwinkel-Korrektursignal einen Anstellwinkel-Korrekturfaktor repräsentiert, der bei einer Verwendung eine Korrektur eines individuellen Anstellwinkels für das andere Rotorblatt bewirkt, so dass eine Wirkung eines Momentes auf das andere Rotorblatt einer Wirkung eines Momentes auf das vorbestimmte Rotorblatt der Windkraftanlage angeglichen wird und wobei das Ermitteln unter Verwendung des eingelesenen weiteren Rotorblatt-Positionssignals und/oder der eingelesenen Drehgeschwindigkeit erfolgt.

20

25

8. Verfahren zur Veränderung eines Signals zur Ansteuerung eines individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

30

- die Schritte des Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7; und
- Verändern des Signals zur Ansteuerung des individuellen Anstellwinkels (β_{pci}) für das Rotorblatt unter Verwendung des bereitgestellten Ansteuerwinkel-Korrektursignals (β_p).

5

9. Vorrichtung (100) zur Bereitstellung eines Anstellwinkel-Korrektursignals ($\beta_{s,i}$) für ein vorbestimmtes Rotorblatt aus einer Mehrzahl von Rotorblättern (210) einer Windkraftanlage (110), wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal zur Veränderung eines Signals (145) zur Ansteuerung eines individuellen Anstellwinkels für das Rotorblatt vorgesehen ist, wobei die Vorrichtung die folgenden Merkmale aufweist:

10

- eine Schnittstelle (136) zum Einlesen eines Rotorblatt-Positionssignals (Ω_1), das eine Winkelposition des Rotorblattes bezüglich einer Drehachse (320) des Rotors der Windkraftanlage repräsentiert und/oder Einlesen einer Drehgeschwindigkeit (ω) des Rotorblattes um die Drehachse; und

15

- eine Einheit (135, 137) zum Ermitteln des Anstellwinkel-Korrektursignals ($\beta_{s,i}$) für das vorbestimmte Rotorblatt der Windkraftanlage aus einem Speicher (137), wobei das Anstellwinkel-Korrektursignal einen Anstellwinkel-Korrekturfaktor repräsentiert, der bei einer Verwendung eine Korrektur des individuellen Anstellwinkels (β_{pci}) für das vorbestimmte Rotorblatt bewirkt, so dass eine Wirkung eines Momentes (M_i) auf das vorbestimmte Rotorblatt einer Wirkung eines Momentes (M_2, M_3) auf zumindest ein weiteres Rotorblatt der Windkraftanlage angeglichen wird und wobei das Ermitteln unter Verwendung des eingelesenen Rotorblatt-Positionssignals und/oder der eingelesenen Drehgeschwindigkeit erfolgt.

20

25

10. Computerprogrammprodukt mit Programmcode zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wenn das Programm auf einem Steuergerät oder einer Vorrichtung ausgeführt wird.

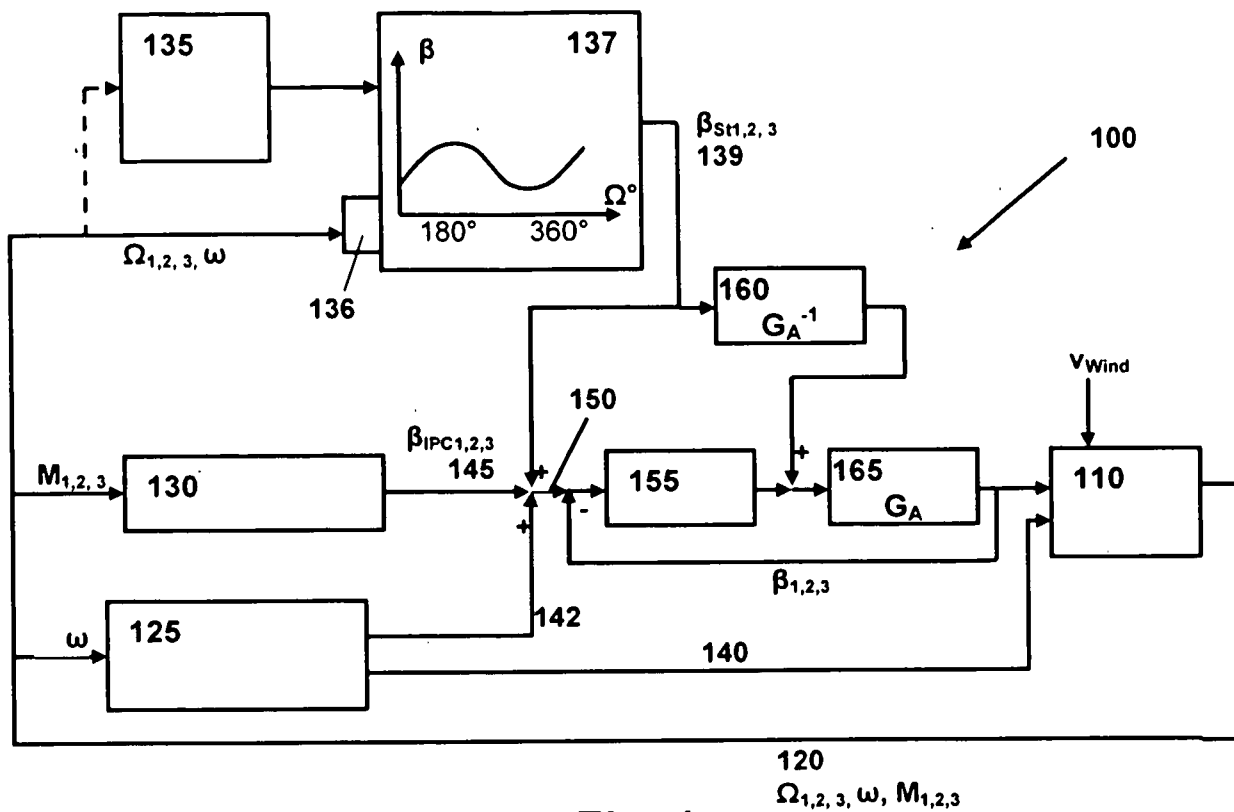


Fig. 1

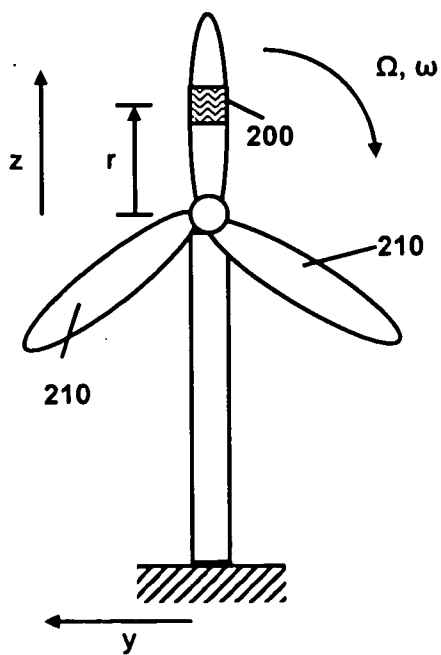


Fig. 2

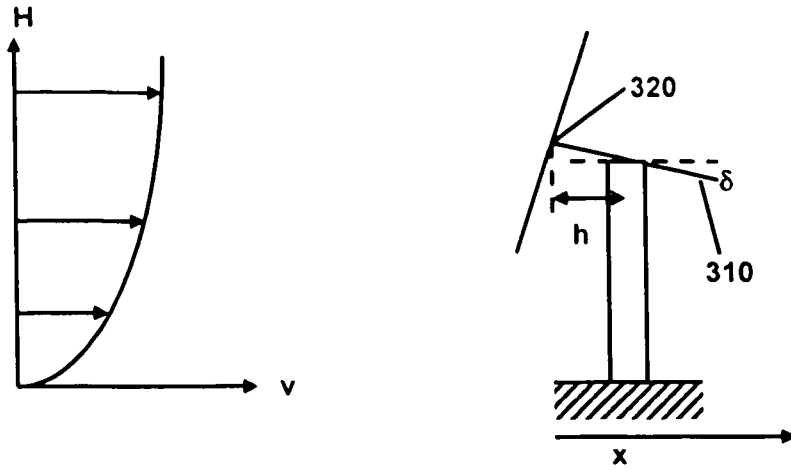


Fig. 3

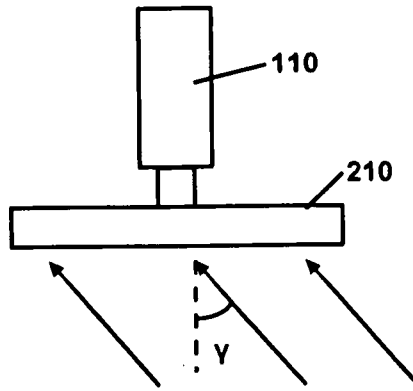


Fig. 4

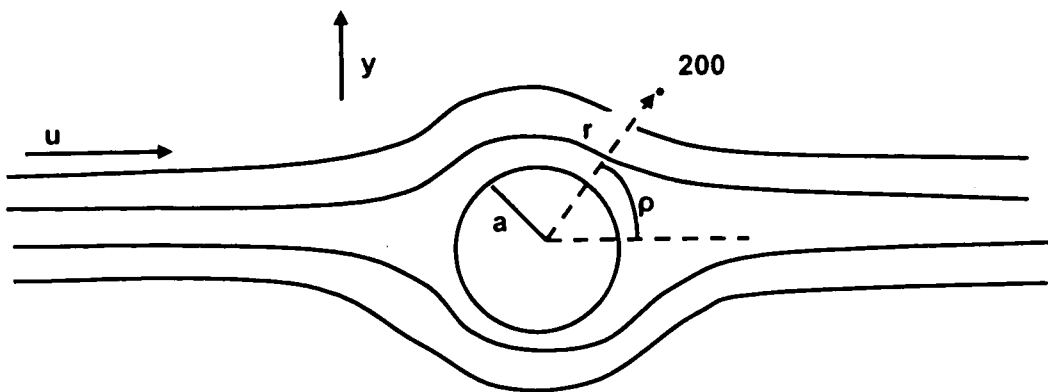


Fig. 5

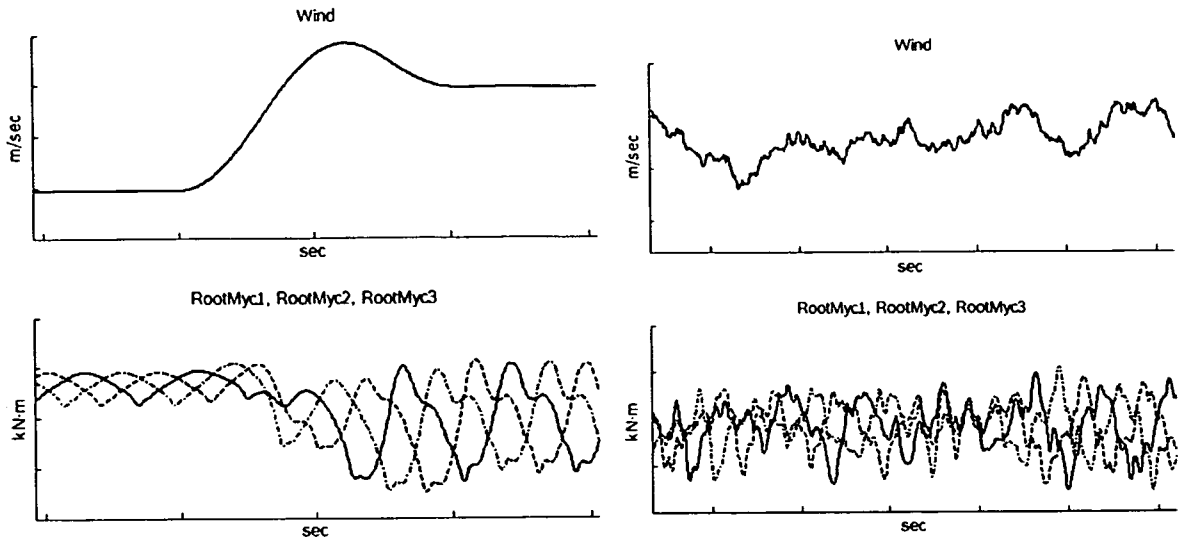


Fig. 6

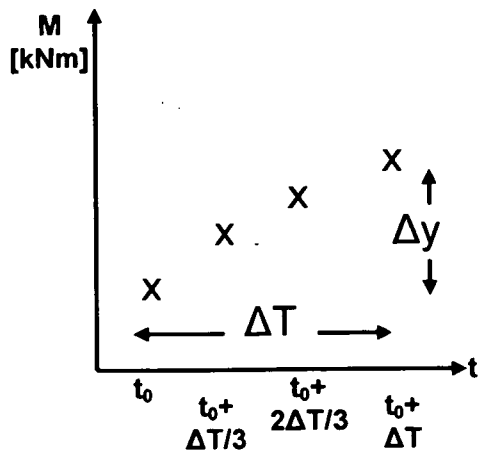


Fig. 7a

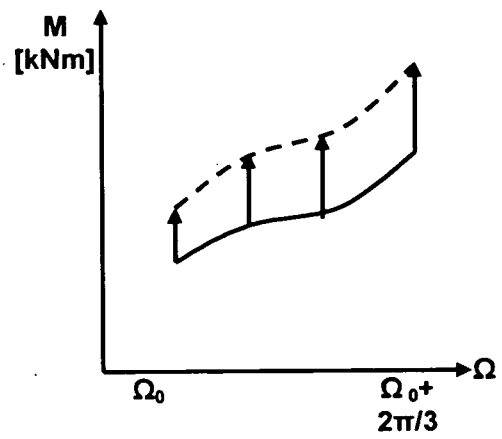


Fig. 7b

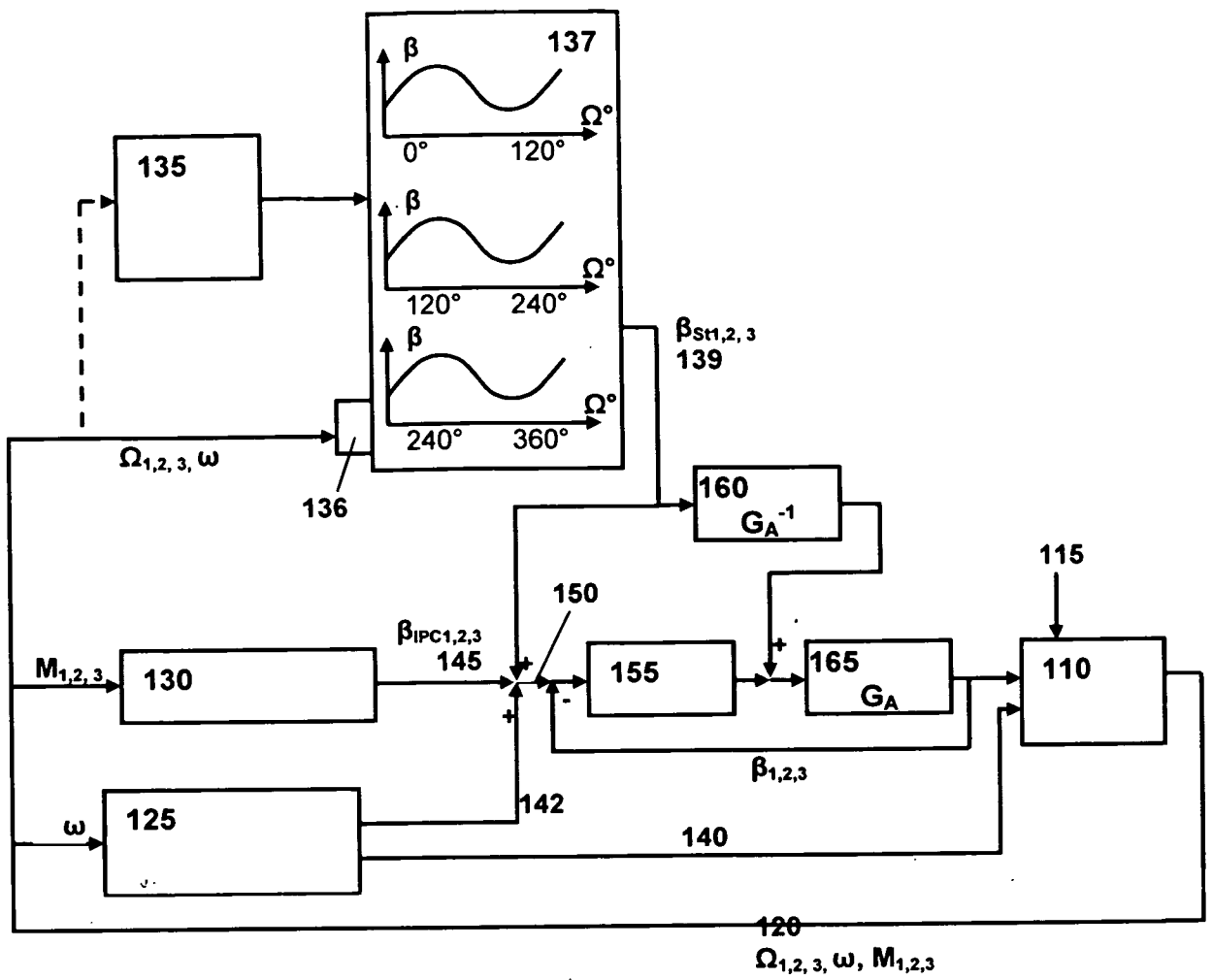


Fig. 8

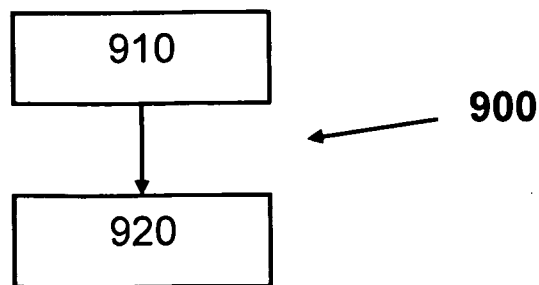


Fig. 9