

(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
9. September 2011 (09.09.2011)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2011/107208 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
F03D 7/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2011/000605

(22) Internationales Anmeldedatum:
9. Februar 2011 (09.02.2011)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2010 009 857.4 2. März 2010 (02.03.2010) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE]; 70469
Stuttgart (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **EITNER, Christian**
[DE/DE]; Hamburger Straße 37, 80809 München (DE).
DRESIG, Friedmar [DE/DE]; Friedrich-Schlöffer-Straße
19, 09114 Chemnitz (DE). **BUCHTALA, Boris**
[DE/DE]; Lindachstraße 38, 75417 Mühlacker (DE).

(74) Anwalt: **THÜRER, Andreas**; 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).

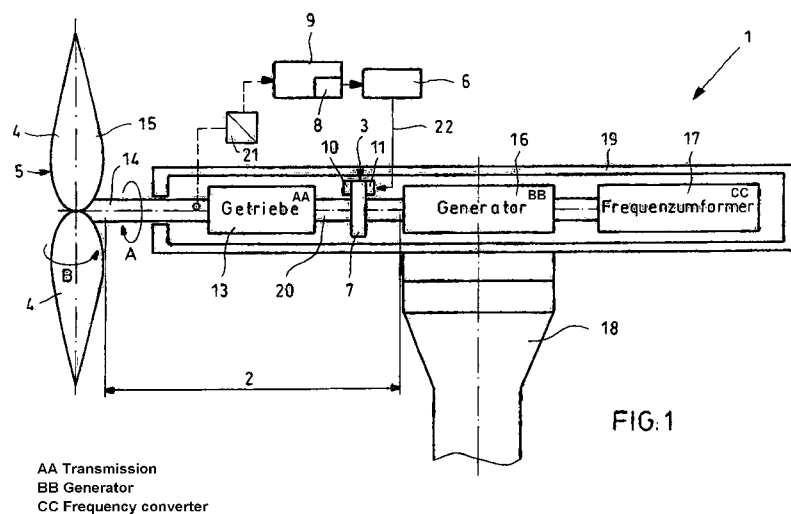
Veröffentlicht:

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

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR DECELERATING A WIND TURBINE AND DECELERATION DEVICE FOR CARRYING OUT
SAID METHOD

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM ABBREMSEN EINER WINDENERGIEANLAGE UND ABBREMSVORRICHTUNG
ZUR DURCHFÜHRUNG DES VERFAHRENS



(57) Abstract: The invention relates to a method for decelerating a wind turbine (1) and to a deceleration device (3) for carrying out said method. Initially rotor blades (4) of a rotor (15) are rotated in a feathering pitch (5). Subsequently, a deceleration control unit (8) in a control device (9) of the wind turbine (1) is activated and then the electrically controllable control valves (6) are controlled in order to apply braking torque to a brake disk (7) of the deceleration device of a drive train by gradually increasing the braking torque in at least two steps.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Abbremsen einer Windenergieanlage (1) und

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



eine Abbremsvorrichtung (3) zur Durchführung des Verfahrens. Dabei werden zunächst Rotorblätter (4) eines Rotors (15) in eine Fahnenstellung (5) gedreht. Anschließend wird eine Abbremssteuereinheit (8) in einem Steuergerät (9) der Windenergieanlage (1) aktiviert. Danach erfolgt ein Ansteuern von elektrisch steuerbaren Steuerventilen (6), die Bremsmomente auf eine Bremsscheibe (7) der Abbremsvorrichtung eines Antriebstranges unter stufenweiser Erhöhung der Bremsmomente in mindestens zwei Stufen aufbringen.

5 **Verfahren zum Abbremsen einer Windenergieanlage und Abbremsvorrichtung zur
Durchführung des Verfahrens**

Beschreibung

10

Verfahren zum Abbremsen einer Windenergieanlage und Abbremsvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

15

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Abbremsen einer Windenergieanlage und eine Abbremsvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Dabei werden zunächst Rotorblätter eines Rotors in ihre Fahnenstellungen gedreht. Eine Abbremssteuereinheit in einem Steuergerät der Windenergieanlage aktiviert elektrisch steuerbare Steuerventile, die Bremsmomente auf eine Bremsscheibe der Abbremsvorrichtung eines Antriebstranges aufbringen.

20

Aus der Druckschrift DE 10 2004 057 0729 A1 ist eine Bremseinrichtung zum Abbremsen eines Rotors einer Windenergieanlage bekannt. Die Bremseinrichtung hat zumindest einen hydraulisch betätigbaren Bremszylinder, dessen Bremsdruck mittels eines stetig verstellbaren Regelventils regelbar ist. Dazu weist die Bremseinrichtung eine Ablaufleitung von diesem Wegeventil zu einem Tank auf, wobei ein Sperrventil angeordnet ist, das ein leakagefreies

25

Absperren des Druckmittelstrompfades zum Tank ermöglicht.

30

Mit dieser Bremseinrichtung wird lediglich eine leckagedichte Absperrung eines hydraulisch betätigbaren Bremszylinders für eine Windenergieanlage gewährleistet. Dabei soll eine sichere Bremsdruck- oder Bremslüftungsdruckmodulation mit hoher Genauigkeit möglich werden, so dass ein sanftes Abbremsen des Rotors sichergestellt ist. Aufgrund dieses sanften Abbremsens des Rotors hat eine derartige Bremseinrichtung den Nachteil, dass sie für Not-situationen, in denen ein Rotor einer Windkraftanlage in kürzest möglicher Zeit abzubremsen ist, nicht geeignet ist. Vielmehr wird durch das sanfte Abbremsen ein Abbremsvorgang derart verlangsamt, dass er einem theoretisch möglichen aperiodischen Grenzfall nahe kommt, bei

dem jedes Überspringen unterdrückt wird, indem die Bremskraft so dosiert wird, dass ein steiler Drehmomentanstieg, wie es in Notsituationen zum Abbremsen eines Rotors einer Windenergieanlage in kürzester Zeit erforderlich wäre, mit einer derartigen Bremseinrichtung nicht realisierbar ist.

5

Um bei herkömmlichen Windenergieanlagen den Rotor in einer Notsituation abzubremesen, führt das Einfallen einer Bremse mit vollem Bremsmoment aufgrund der rotierenden hohen Massen zu einem dynamischen Drehmomentanstieg im Antriebstrang, der das durch das Bremsmoment verursachte kinetostatische Torsionsmoment überschreitet. Um derartige

10 Spitzen der Torsionsmomente beim Abbremsen eines Rotors in einer Notsituation durch den Antriebstrang aufnehmen zu können, müssen die im Leistungsfluss liegenden Komponenten des Antriebstranges wie Rotorwelle und Übersetzungsgetriebe der Windenergieanlage entsprechend überdimensioniert werden, damit derartige dynamische Spitzendrehmomente nicht zur Beschädigung der Energiegewinnungsanlage führen.

15

Aufgrund der bei einer derartigen Notbremsung auftretenden Torsionsschwingungen wird bei herkömmlichen Windenergieanlagen das Übersetzungsgetriebe auf das drei- bis vierfache der Betriebsbelastung ausgelegt, was bei Windkraftanlagen nachteilig zu erheblichen Gewichten in der Generatorgondel führt. Ähnliches gilt auch für die Rotorwelle, die aufgrund

20 ihrer Dimensionen und Elastizität sowie ihres Querschnitt bedingten Torsionsmomentes eine Eigenfrequenz aufweist, die über der maximal zulässigen Antriebsfrequenz des Rotors in allen Betriebsphasen der Windenergieanlage liegen muss. Deshalb ist der Antriebstrang unverzüglich abzubremesen, sobald die Rotorfrequenz in die Nähe der Eigenfrequenz der Rotorwelle kommt.

25

Bei solchen Notabbremsverfahren werden die Rotorblätter in eine Fahnen- oder Segelstellung verfahren, d.h. aus dem Wind genommen und eine mechanische Bremse wird an der schnell drehenden Getriebeabtriebswelle aktiviert. Dabei kann die Notabbremsung dazu dienen ein Durchdrehen des Rotors bei einem Generatorsausfall oder in einem kritischen Betriebszustand, bei dem z.B. eine für die Regelung benötigte Sensorik ausgefallen ist, zu vermeiden. Der gesamte Notabbremsvorgang muss innerhalb weniger Sekunden beendet sein, so dass das aus dem Stand der Technik bekannte sanfte Abbremsverfahren ungeeignet ist. Jedoch kommt es bei zu abrupten Einsetzen der mechanischen Bremse zu der oben erwähnten Torsionsüberlast im Antriebstrang, die ein Vielfaches des Bremsmomentes betra-

30

gen kann und zu einer Belastung des Turms aufgrund des Bremsmomentes aus den Trägheitskräften führt, was eine Zerstörung der Windenergieanlage zur Folge haben kann.

Der Antriebstrang bei großen Windenergieanlagen besteht aus der langsam drehenden Welle, welche direkt mit der Nabe und dem Rotor gekoppelt ist, dem Übersetzungsgetriebe und einer mit dem Generator gekoppelten schnell drehenden Abtriebswelle des Getriebes. Zwischen der Abtriebswelle des Getriebes und dem Generator befindet sich eine mechanische Bremsvorrichtung, die üblicherweise als Scheibenbremse ausgeführt ist, wobei ein statisches Bremsmoment mit Hilfe der Bremsbacken auf die Scheibenbremse einwirkt und über das Getriebe die Rotorwelle abbremst. Dabei können die Bremsbacken hydraulisch oder pneumatisch geschlossen werden und durch entsprechende Federn kann eine Offenstellung der Bremsbacken bzw. der Bremsvorrichtung im normalen Betrieb sichergestellt werden. Der Antriebstrang vom Rotor bis zu der Abtriebswelle des Übersetzungsgetriebes ist ein schwingungsfähiges System, dessen niedrigste Eigenfrequenz im Bereich von 2 Hz bis 3 liegt.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Torsionsüberlastung, wie sie beim Einsetzen der Scheibenbremse bei Notabschaltverfahren entsteht, durch eine Ausnutzung der Schwingungseigenschaften des Antriebstranges zu vermeiden. Durch eine Verringerung der maximalen Torsionsbelastung soll gleichzeitig eine Kostenreduzierung bei der Auslegung der mechanischen Antriebstrangkomponenten wie Bremsbacken, Bremsscheibe, Übersetzungsgetriebe- wellen, Zahnrädern und Rotorwelle erreicht werden.

Diese Aufgabe wird mit dem Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Erfindungsgemäß ist ein Verfahren zum Abbremsen einer Windenergieanlage und eine Abbremsvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens vorgesehen. Dabei werden zunächst Rotorblätter eines Rotors in eine Fahnenstellung gedreht und eine Abbremsseinheit in einem Steuergerät der Windenergieanlage aktiviert. Dazu steuert die Abbremssteuereinheit elektrisch steuerbare Steuerventile in der Weise, dass Bremsmomente auf eine Bremsscheibe der Abbremsvorrichtung eines Antriebstranges unter stufenweiser Erhöhung der Bremsmomente in mindestens zwei Bremsstufen aufgebracht werden.

Dieses Verfahren hat gegenüber dem bekannten Verfahren mit einem sanften Anstieg des Bremsmomentes den Vorteil, dass sich das stufenweise erhöhte Bremsmoment auf die Antriebseinheit derart auswirkt, dass der Rotor in wenigen Sekunden zum Stillstand kommt. Die stufenweise Erhöhung des Bremsmomentes hat darüber hinaus den Vorteil, dass ein Überspringen, wie es bei einer Vollbremsung auftritt deutlich vermindert ist, da vorzugsweise in der ersten Stufe lediglich das halbe Bremsmoment aufgebracht wird und erst in einer zweiten Stufe das volle Bremsmoment wirksam wird.

Wird die Erhöhung des Bremsmomentes auf drei Bremsstufen verteilt, so kann das Überspringen weiter eingedämmt werden, wobei zunächst ein Drittel des maximal zulässigen Bremsmomentes auf die Bremsscheibe und damit auf den Antriebstrang einwirkt und in einer zweiten Stufe zwei Drittel des maximal zulässigen Bremsmomentes aufgebracht werden und schließlich erst in einer dritten Stufe das volle Bremsmoment erreicht wird, so dass sich eine Torsionsbelastung für den Antriebstrang aus einem kinetostatischen und einem dynamischen Anteil zusammensetzt. Dabei kann die Schwingungskomponente, die das Überspringen kennzeichnet durch eine entsprechende Steuerung mit Hilfe von elektrisch steuerbaren Ventilen beeinflusst werden.

Diesem Verfahren liegt die Überlegung zugrunde, dass das Torsionsmoment der Restschwingung sich aus einem statischen Anteil M , der durch die Größe des gesamten Bremsmomentes bedingt sein kann, und einer dynamischen Restschwingung T , welche die Schwingungskomponente des Momentes darstellt, zusammensetzt, wobei sich eine Torsionsüberhöhung bei der Notbremsung von

$$T_{\max} = M + T$$

ergibt. Die dynamische Restschwingung T lässt sich analytisch bestimmen und ist eine Funktion der Größe und Richtung der vorgesehenen Bremsmomentstufen und der Aktivierungszeitpunkte, welche die Phasenlage der Schwingung entscheiden. Die Anzahl der Bremsmomentstufen kann mit i bezeichnet werden, der Zeitpunkt ihres Eingriffs mit t_i , ihre Größe mit ΔM_i und die relevante Eigenkreisfrequenz mit ω_0 bezeichnet werden. Damit ergibt sich die dynamische Restschwingung zu:

$$T = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \Delta M_i \cos \tau_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \Delta M_i \sin \tau_i \right)^2},$$

wobei $\tau_i = \omega_0 \cdot t_i$ die Phasenlage und ΔM_i die i 'te Bremsmomentstufe von insgesamt i Bremsmomentstufen beschreibt. Jede einzelne Bremsmomentstufe bewirkt eine Anregung der Torsionsschwingungen, wobei sich die Gesamtschwingung durch Überlagerung der Einzelschwingungen ergibt.

5

Die Überlagerung der harmonischen Schwingung, deren gemeinsame Frequenz der relevanten niedrigsten Eigenfrequenz des Antriebstranges ω_0 entspricht, kann graphisch anhand eines Zeigerdiagramms, wie es die Figur 2 zeigt, in der komplexen Zahlenebene dargestellt werden. Der Zeiger der resultierenden Schwingung ergibt sich als Vektoraddition der Teilschwingungen und die resultierende Restschwingung hat die gleiche Frequenz wie die Teilschwingungen.

10

Der Bremsvorgang wird nun mit Hilfe der Ansteuerungseinheit so eingestellt, dass die resultierende Restschwingung $T = 0$ wird. In dem Zeigerdiagramm der Figur 1 bedeutet dies, dass die resultierende der Restschwingung der Nullvektor ist, d.h. die Einzelvektoren werden ein geschlossenes Polygon bzw. ein n -Eck bilden, wie es die Figur 3 für drei Stufen zeigt. Wenn der Bremsvorgang lediglich über zwei Momentstufen realisiert wird, wie es Figur 2 zeigt, bedeutet dies, dass die Bremsmomentstufe die gleiche Amplitude und eine Phasendifferenz von einer halben Schwingung mit $\tau_1 = 0$ und $\tau_2 = \pi$ hat. Damit ist die Bedingung $T = 0$ mit

15

20

$$\Delta M_1 \cos \tau_1 + \Delta M_2 \cos \tau_2 = 0$$

und andererseits

$$\Delta M_1 \sin \tau_1 + \Delta M_2 \sin \tau_2 = 0.$$

Dieses Prinzip der Auslöschung der Restschwingung und der Vektoraddition werden in den Zeigerdiagrammen der Figuren 2 und 3 dargestellt.

25

Der Bremsvorgang selbst wird erfindungsgemäß in zwei oder mehrere zeitlich versetzte Bremsstufen unterteilt und die Bremsstufen derart zeitlich koordiniert, dass die resultierenden dynamischen Belastungen sich gleichzeitig, wie oben ausgeführt, auslöschen.

30

Um den geeigneten Zeitpunkt zum Setzen des Bremsmomentes zu finden, muss das Eigenfrequenzspektrum des Antriebstranges entweder über eine Näherungsrechnung bestimmt werden, oder durch einen Sensor, z.B. durch einen Dehnmessstreifen an der Rotorwelle er-

fasst werden. Das Erfassen der Eigenfrequenz ist von Vorteil, zumal sich im Laufe der Zeit durch Fertigungstoleranzen und Verschleiß die Eigenfrequenzen ändern können.

Eine mögliche Alternative zum stufenweise Setzen des Bremsmomentes besteht darin, dass das Bremsmoment über eine Rampe hochgefahren wird, wobei die Hochfahrzeit ca. 0,5 s (Sekunden) und damit der ungefähren Periodendauer der relevanten niedrigsten Antriebsstrang-Eigenschwingung entspricht.

Für die hydraulische Ansprechdauer ist eine Vorgabe von $t/t_p < 0,2$ relevant, wobei t die Ansprechdauer beispielsweise der Hydraulik und t_p die Periodendauer der relevanten Antriebsstrangschwingung ist. Das hydraulische oder pneumatisch angesteuerte Bremssystem kann vorzugsweise mit elektronisch gesteuerten Schaltventilen ausgeführt werden. Sind jedoch hochfrequente Bremsanforderungen mit > 10 Hz erforderlich, so ist es von Vorteil, Servoventile einzusetzen.

Anstelle der oben erwähnten Überprüfung des Eigenschwingungsverhaltens des Antriebsstranges mit Hilfe von Sensoren, arbeitet in einer weiteren Ausführungsform der Erfindung die Abbremssteuereinheit für ein stufenweise Aufbringen eines Bremsmomentes mit einer Wertetabelle, die vorher aufgrund der mechanischen und insbesondere elastischen Daten der Komponenten des Antriebsstranges ermittelt wurde. Dabei wird berücksichtigt, dass die zulässigen Torsionsmomente des Antriebsstranges von dem Rotor bis zu dem Getriebe nicht überschritten werden. Dazu wird in Abhängigkeit von einer niedrigsten Eigenfrequenz (f_e) des Antriebsstranges von der Abbremssteuereinheit die Zeitdauer (Δt) des stufenweise Erhöehens des Bremsmomentes eingestellt.

Dabei wird die Zeitdauer Δt des stufenweise Erhöehens des Bremsmomentes mit der Anzahl i der Stufen und der niedrigsten Eigenfrequenz f_e mit nachfolgender Beziehung

$$\Delta t = 1/(f_e \cdot i)$$

ermittelt.

Dieses Verfahrensprinzip kann auch beim Hochfahren der Windenergieanlage eingesetzt werden, wobei Lastmomente eines Generators stufenweise erhöht werden, so dass die Windenergieanlage nicht unter voller Generatorlast hochgefahren wird.

Auch lässt sich dieses Verfahrensprinzip für ein Lösen einer Abbremsvorrichtung einsetzen. Bei einem Verfahren zum Lösen einer Abbremsvorrichtung eines Antriebstranges einer Windenergieanlage werden nachfolgende Verfahrensschritte durchgeführt. Zunächst erfolgt
5 ein Ansteuern von elektrisch steuerbaren Steuerventilen mittels einer Abbremssteuereinheit in einem Steuergerät, wobei die Steuerventile Bremsmomente mittels Bremsbacken auf eine Bremsscheibe des Antriebstranges stufenweise in mindestens zwei Stufen bis zur völligen Freigabe der Bremsscheibe vermindern. Dadurch können die durch ein zu abruptes Anhalten verursachten Schwenkbewegungen der Rotorblätter und damit verbundene Torsionsstöße
10 vermieden werden.

Auch bei diesem Verfahren zum Lösen einer Abbremsvorrichtung, die vorher unter Vollbremsung stand, geht es darum, dass einerseits das Lösen zügig abgewickelt werden kann und andererseits eine Überlastung des Antriebstranges durch plötzliches Freigeben der Abbremsvorrichtung und damit verbundenen Überlastungen der Torsionselemente im Antriebstrang vermieden werden.
15

Ein weitere Aspekt der Erfindung betrifft eine Abbremsvorrichtung einer Windenergieanlage mit einem Antriebstrang aus Rotor, Rotorwelle und Übersetzungsgetriebe. Die Abbremsvorrichtung weist mindestens eine Bremsscheibe mit Bremsbacken auf. Dabei werden die
20 Bremsbacken mittels Federn in Offenstellung gehalten und für einen Abbremsfall in eine Schließstellung gepresst. Dazu wird eine Abbremssteuereinheit in einem Steuergerät der Windenergieanlage mit elektrisch steuerbaren Steuerventilen in einem Abbremsfall aktiviert. Dieses erfolgt in der Weise, dass das Steuergerät, welches mit elektrisch steuerbaren Steuerventilen zusammenwirkt, eine stufenweise Erhöhung eines Bremsmomentes für die
25 Bremsscheibe in Abhängigkeit von einer zulässigen Drehmomentbelastbarkeit des Antriebstranges steuert.

Eine derartige Vorrichtung hat gegenüber herkömmlichen Vorrichtungen den Vorteil, dass
30 kein sanftes Abbremsen mit einer hohen Zeitvorgabe vorgesehen ist, sondern dass mit dieser Vorrichtung ein zügiges Abbremsen einer Windenergieanlage durchgeführt werden kann, ohne den Antriebstrang und andere Anlagenkomponenten zu überlasten. Die dazu erforderlichen elektrisch steuerbaren Ventile können entweder Hydrauliksteuerventile oder pneumatische Steuerventile sein.

Die Erfindung wird nun anhand der beigefügten Figuren näher erläutert.

- 5 Figur 1 zeigt eine Prinzipskizze einer Windenergieanlage mit Bremsvorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung.
- 10 Figur 2 zeigt ein Zeigerdiagramm mit zwei Vektoren in Figur 2A, die als dynamische Restschwingungen bei einer zweistufigen Erhöhung des Bremsmomentes auftreten. Mit Figur 2B wird die Auslöschung der Restschwingungen innerhalb einer Eigenfrequenzperiode des Antriebstranges gezeigt.
- 15 Figur 3 zeigt ein Zeigerdiagramm mit drei Vektoren in Figur 3A, die als dynamische Restschwingungen bei einer dreistufigen Erhöhung des Bremsmomentes auftreten. In Figur 3B wird die Auslöschung der Restschwingungen innerhalb einer Eigenfrequenzperiode gezeigt.
- 20 Figur 4 zeigt den Anstieg des Bremsmomentes beim Aufbringen desselben in einer einzigen Stufe und vergleichsweise in zwei Stufen.
- 25 Figur 5 zeigt den Verlauf des Torsionsmomentes bei Aufbringen eines Bremsmomentes in einer einzigen Stufe und vergleichsweise in zwei Stufen.
- 30 Figur 6 zeigt in einem weiteren Maßstab den zeitlichen Verlauf des Torsionsmomentes bei zweistufigem Aufbringen des Bremsmomentes und nach Lösen einer Abbremsvorrichtung.

Figur 1 zeigt eine Prinzipskizze einer stationären Windenergieanlage 1 mit Abbremsvorrichtung 3 gemäß einer Ausführungsform der Erfindung. Die Windenergieanlage 1 setzt mechanische Energie eines Rotors 15 über mechanische Komponenten und einen Generator 16 in elektrische Energie um, die mit Hilfe eines Frequenzumformers 17 beispielsweise an eine Last oder an ein Netz abgegeben wird. Ein derartiger Rotor 15 weist im Gegensatz zu dem hier gezeigten schematisch dargestellten Rotor Dimensionen auf, die es erforderlich machen, die Windenergieanlage 1 auf einem Turm 18 anzuordnen. Dabei ist der Rotor 15 mit

seinen Rotorblättern 4 der Windkraft ausgesetzt, die eine Rotorwelle 14 in Pfeilrichtung A in Rotation versetzt.

Die Rotationsfrequenz des Rotors 15 in einem Frequenzbereich von einigen Zehntel Hertz wird über ein Übersetzungsgetriebe 13, das in einer Gondel 19 zusammen mit dem nachgeschalteten Generator 16 und dem Frequenzumformer 17 angeordnet ist, auf eine deutlich höhere Rotationsfrequenz übersetzt. Das Übersetzungsgetriebe 13 kann dabei Rotationsfrequenzen einer Getriebeabtriebswelle 20 zwischen einigen 10 Hz und einigen 100 Hz erreichen und damit den Generator 16 antreiben. In Folge dieser Übersetzung kann die Getriebeabtriebswelle 20 einen deutlich geringeren Durchmesser und damit ein geringeres Flächenträgheitsmoment aufweisen als die Rotorwelle 14.

Ferner kann eine Abbremsvorrichtung 3 mit einer Bremsscheibe 7 auf der Getriebeabtriebswelle 20 deutlich kleiner dimensioniert werden, als wenn eine derartige Abbremsvorrichtung im Bereich der Rotorwelle 14 angeordnet ist. Die Übersetzungswellen und Zahnräder des Übersetzungsgetriebes 13 müssen jedoch entsprechend dimensioniert werden, um die auf die Bremsscheibe 7 über die Bremsbacken 10 und 11 einwirkenden Bremsmomente der Abbremsvorrichtung 3 übertragen zu können. Dabei darf ein maximal zulässiges Torsionsmoment weder für die Getriebewellen noch für die Rotorwelle 14 nicht überschritten werden.

Um eine kurzfristige Notabbremmung für den Rotor 15 zu gewährleisten, ist ein Steuergerät 9 vorgesehen, das die Bremsmomente unter stufenweiser Erhöhung über die Bremsbacken 10 und 11 auf die Bremsscheibe 7 aufbringt. In einem Notfall, bei dem beispielsweise der Generator 16 ausfällt und die Drehzahl des Rotors 15 einen kritischen Wert wie beispielsweise 20 Umdrehungen pro Minute überschreitet, wird ein Abbremsverfahren eingeleitet. Dazu kann die Drehzahl des Rotors 15 bzw. der Rotorwelle 14 über einen Drehzahlsensor 21 einem Steuergerät 9 signalisiert werden. Das Steuergerät 9 weist eine Abbremssteuereinheit 8 auf, die wiederum über elektrisch steuerbare Ventile 6 und eine Hydraulikleitung 22 die Bremsbacken 10 und 11 unter stufenweise Erhöhung des Bremsmomentes der Drehscheibe 7 und damit den Antriebstrang 2 stufenweise abbremmt, während gleichzeitig die Rotorblätter 4 des Rotors 15 auf eine in Pfeilrichtung B gedrehte Fahnenstellung verstellt werden.

Die Winkelgeschwindigkeit, mit der die Verstellung der Rotorblätter 4 möglich ist, liegt bei leistungsstarken Windenergieanlagen 1 mit entsprechend großen Rotorblättern 4 bei etwa

15° pro Sekunde, so dass von einer Betriebsstellung von 15° ausgehend die 90° Fahnenstellung nach 5 s (Sekunden) erreicht ist. Demgegenüber erfolgt selbst bei stufenweisem Aufbringen des Bremsmomentes das Aufbringen des vollen Bremsmomentes in deutlich kürzerer Zeitspanne Δt , wenn das Eigenschwingverhalten des Antriebstranges beim Abbremsvorgang genutzt wird.

Die Zeitspanne Δt wird in Abhängigkeit von dem Kehrwert der niedrigsten Eigenfrequenz und dem Kehrwert der Anzahl der vorgesehenen Stufen bestimmt. Bei einer niedrigsten Eigenfrequenz $f_e = 2$ Hz ergibt sich daraus bei einer Anzahl i von zwei Bremsmomentstufen eine Zeitspanne von Δt von 0,25 s, so dass in relativ kurzer Zeit das volle Bremsmoment anliegt, noch bevor die Rotorblätter 4 die endgültige Fahnenstellung erreicht haben. Der Bremsvorgang muss so schnell und zügig eingeleitet werden, um in Notfallsituationen, wie bei Ausfall des Generators erforderlich, zu verhindern, dass die oben erwähnte kritische Rotorwellendrehzahl von beispielsweise 20 Umdrehungen pro Minute überschritten wird, so dass trotz verkürzter Zeitspanne Δt keine Erhöhung und damit keine Überlast durch Torsionsmomente auftritt.

Figur 2 zeigt mit Figur 2A ein Zeigerdiagramm mit zwei Vektoren ΔM_1 und ΔM_2 , die als dynamische Restschwingungen bei einer zweistufigen Erhöhung des Bremsmomentes auftreten, wie es bereits einleitend erörtert wurde. Figur 2B zeigt dazu die Auslöschung der Restschwingungen innerhalb einer Eigenfrequenzperiode des Antriebstranges. Für diese zweistufige Abbremsung wird zunächst das halbe Bremsmoment einer einstufigen Vollbremsung aufgebracht und nach $\omega t = \pi$ das volle Bremsmoment mit Hilfe der Bremsbacken an die Bremsscheibe angelegt, so dass sich die Restschwingungen, wie es Figur 2B zeigt, gegenseitig auslöschen.

Figur 3 zeigt in Figur 3A ein Zeigerdiagramm mit drei Vektoren ΔM_1 , ΔM_2 und ΔM_3 , die als dynamische Restschwingungen bei einer dreistufigen Erhöhung des Bremsmomentes auftreten und als Vektorpolygon ein Dreieck bilden. In Figur 3B wird dazu die Auslöschung der Restschwingungen innerhalb einer Eigenfrequenzperiode mit den drei Drehmomentstufen ΔM_1 , ΔM_2 und ΔM_3 gezeigt.

Figur 4 zeigt den zeitlichen Anstieg des Bremsmomentes M beim Aufbringen des Bremsmomentes in einer einzigen Stufe und vergleichsweise in zwei Stufen. Dazu zeigt die gestrichel-

te Kurve den Anstieg des Bremsmomentes M bei Aufbringen derselben in einer einzigen Stufe und die durchgezogene Kurve zeigt vergleichsweise den zeitlichen Ablauf des Aufbringens des Bremsmomentes M in zwei Stufen unter Berücksichtigung der Eigenfrequenzperiode der des Antriebstrangs.

5

Figur 5 zeigt den Verlauf des Torsionsmomentes bei Aufbringen eines in Figur 4 gezeigten Bremsmomentes M . Dabei wird wieder die Torsionsmomentbelastung der Rotorwelle bei einem einstufigen Aufbringen des Bremsmoments mit der gestrichelten Kurve, und die Torsionsmomentbelastung bei dem Aufbringen eines Bremsmomentes in zwei Stufen mit der durchgezogenen Kurve gezeigt. Bei diesem Diagramm wird davon ausgegangen, dass bei 10 20 s der Notfall eintritt und innerhalb einer halben Eigenfrequenzperiode des Antriebstrangs das volle Bremsmoment wirksam ist.

15

Figur 6 zeigt in einem weiteren Maßstab den zeitlichen Verlauf des Torsionsmomentes bei zweistufiger Aufbringung des Bremsmomentes und nach Lösen der Abbremsvorrichtung, sobald der Rotor und die Rotorwelle zum Stillstand gekommen sind. Dazu wird bei dieser Simulation wieder zunächst von einem Betriebszustand ausgegangen, bei dem mit mehr als 600 Kilonewtonmeter der Antriebstrang belastet wird und der Generator nach etwa 20 s auf der Zeitachse ausfällt und die einstufige Aufbringung des Bremsmomentes als auch die 20 zweistufige Aufbringung des Bremsmomentes kurz darauf nach etwa einer Viertelsekunde einsetzen.

25

Dabei zeigt Figur 6, dass die dynamische Belastung bei einstufiger Abbremsung deutlich höher ist, wenn die gestrichelte Kurve mit der durchgezogenen Kurve verglichen wird. Die durchgezogene Kurve zeigt dabei den Fall, wenn mit einer zweistufigen Erhöhung des Bremsmomentes gearbeitet wird, wobei zunächst für die halbe Frequenzperiode der Eigenschwingung, nämlich für 0,25 s das halbe Bremsmoment angelegt wird und nach diesen 0,25 s das volle Bremsmoment aufgebracht wird.

30

Dabei geht deutlich das Überschwingen, wie es die durchgezogene Kurve zeigt, zurück, so dass eine Überlastung des Antriebstranges selbst bei schwächerer Dimensionierung des Antriebstranges nicht auftritt. Sobald die Rotorblätter zum Stillstand gekommen sind und ihre Segel- bzw. Fahnenstellung erreicht haben, ist nach etwa 6 s der Bremsvorgang beendet und die Bremse kann wieder stufenweise gelöst werden.

Bezugszeichenliste

	1	Windenergieanlage
	2	Antriebsstrang
5	3	Abbremsvorrichtung
	4	Rotorblätter
	5	Fahnenstellung
	6	Steuerventil
	7	Bremsscheibe
10	8	Abbremssteuereinheit
	9	Steuergerät
	10	Bremsbacke
	11	Bremsbacke
	12	Bremsscheibe
15	13	Übersetzungsgetriebe
	14	Rotorwelle
	15	Rotor
	16	Generator
	17	Frequenzumformer
20	18	Turm
	19	Gondel
	20	Getriebeabtriebswelle
	21	Drehzahlsensor
	22	Hydraulikleitung

Patentansprüche

1. Verfahren zum Abbremsen eines Antriebstranges (2) einer Windenergieanlage (1) mittels einer Abbremsvorrichtung (3), das folgende Verfahrensschritte aufweist,
 - Drehen von Rotorblättern (4) eines Rotors (15) in eine Fahnenstellung (5);
 - Ansteuern von elektrisch steuerbaren Steuerventilen (6), mittels einer Abbremssteuereinheit (8) in einem Steuergerät (9), wobei die Steuerventile (6) mittels Bremsbacken (10, 11) Bremsmomente auf eine Brems-scheibe (7) der Abbremsvorrichtung (3) des Antriebstranges (2) unter stufenweiser Erhöhung der Bremsmomente in mindestens zwei Stufen aufbringen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei als Steuerventile (6) elektrisch einstellbare Hydraulikventile eingesetzt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei als Steuerventile (6) elektrisch einstellbare Pneumatikventile eingesetzt werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Abbremssteuereinheit (8) den Antriebstrang (2) in einer ersten Abbremsstufe mit einem halben zulässigen Bremsmoment beaufschlagt und in einer zweiten Abbremsstufe das volle zulässige Bremsmoment aufbringt.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Abbremssteuereinheit (8) mindestens drei Abbremsstufen ausführt, wobei in einer ersten Abbremsstufe 1/3 des zulässigen Bremsmomentes, in einer zweiten Abbremsstufe 2/3 des zulässigen Bremsmomentes und in einer dritten Abbremsstufe das volle zulässige Bremsmomente aufgebracht wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Abbremssteuereinheit (8) für ein stufenweises Aufbringung eines Bremsmomentes mit einer Wertetabelle arbeitet, welche berücksichtigt, dass die zulässigen Torsionsmomente des Antriebstranges von dem Rotor bis zum Getriebe nicht überschritten werden.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in Abhängigkeit von einer niedrigsten Eigenfrequenz (f_e) des Antriebstranges (2) die Abbremssteuereinheit (8) die Zeitdauer (Δt) des stufenweise Erhöhens des Bremsmomentes einstellt.

- 5 8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die Zeitdauer Δt des stufenweise Erhöhens des Bremsmomentes mit der Anzahl i der Stufen und der niedrigsten Eigenfrequenz f_e mit nachfolgender Beziehung

$$\Delta t = 1/(f_e \cdot i)$$

ermittelt wird.

10

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei beim Hochfahren der Windenergieanlage (1) Lastmomente eines Generators (16) stufenweise erhöht werden, so dass die Windenergieanlage (1) nicht unter voller Generatorlast hochgefahren wird.

15

10. Verfahren zum Lösen einer Abbremsvorrichtung (3) eines Antriebstranges (2) einer Windenergieanlage (1), das folgende Verfahrensschritte aufweist,
- Ansteuern von elektrisch steuerbaren Steuerventilen (6), mittels einer Abbremssteuereinheit (8) in einem Steuergerät (9), und
 - 20 - stufenweises Vermindern von Bremsmomenten auf eine Bremsscheibe (7) des Antriebstranges (2) mittels der Steuerventile (6) über Bremsbacken (10, 11) bis zur völligen Freigabe der Bremsscheibe (7).

20

25

11. Windenergieanlage mit einer Abbremsvorrichtung (3), wobei in einem Antriebstrang (2) aus Rotor (15), Rotorwelle (14) und Übersetzungsgetriebe (13) die Abbremsvorrichtung (3) nach dem Übersetzungsgetriebe (13) angeordnet ist, und mindestens eine Bremsscheibe (7) mit Bremsbacken (10, 11) aufweist, wobei die Bremsbacken (10, 11) mittels Federn in Offenstellung gehalten sind und für einen Abbremsfall in eine Schließstellung gepresst werden, und wobei ein Steuergerät (9) der Windenergieanlage (1) elektrisch steuerbare Steuerventile (6) in einem Abbremsfall aktiviert, dadurch gekennzeichnet,
- 30 dass das Steuergerät (6) eine Abbremssteuereinheit (8) aufweist, die eine stufenweise Erhöhung eines Bremsmomentes für die Bremsscheibe (7) in Abhängigkeit von einer zulässigen Drehmomentbelastbarkeit des Antriebstranges (2) steuert.

30

12. Windenergieanlage nach Anspruch 10, wobei die Abbremsvorrichtung (3) zur Steuerung des Bremsmomentes für die Bremsscheibe (7) elektrisch steuerbare Hydrauliksteuerventile aufweist.

5

13. Windenergieanlage nach Anspruch 10, wobei die Abbremsvorrichtung (3) zur Steuerung des Bremsmomentes für die Bremsscheibe (7) elektrisch steuerbare pneumatische Steuerventile aufweist.

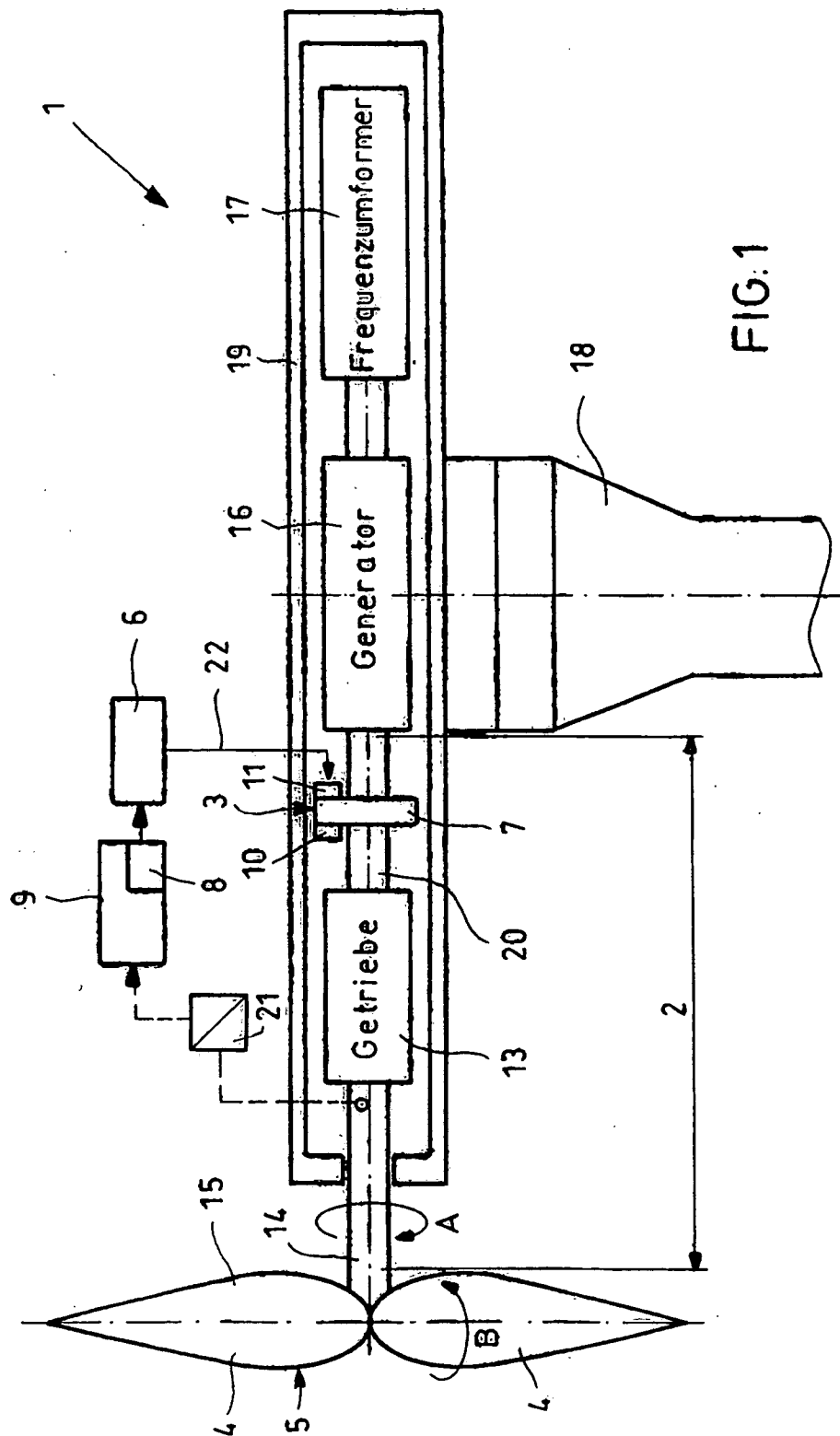


FIG. 2

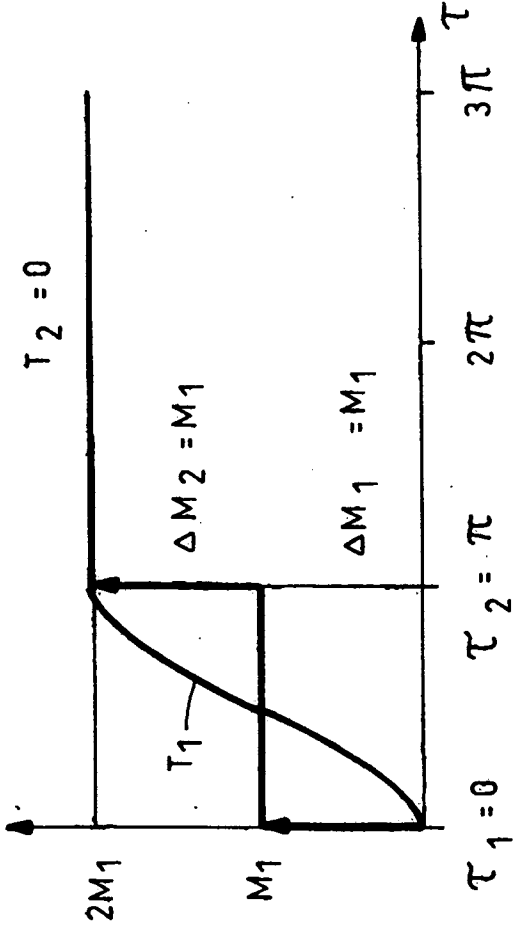


FIG. 2b

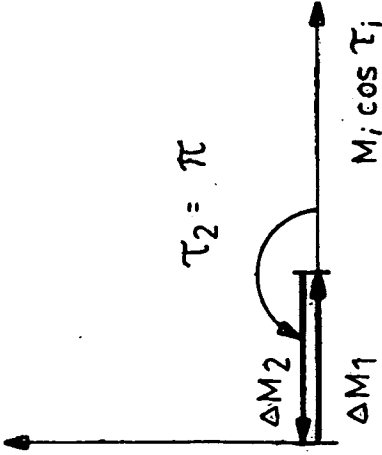


FIG. 2a

FIG.3

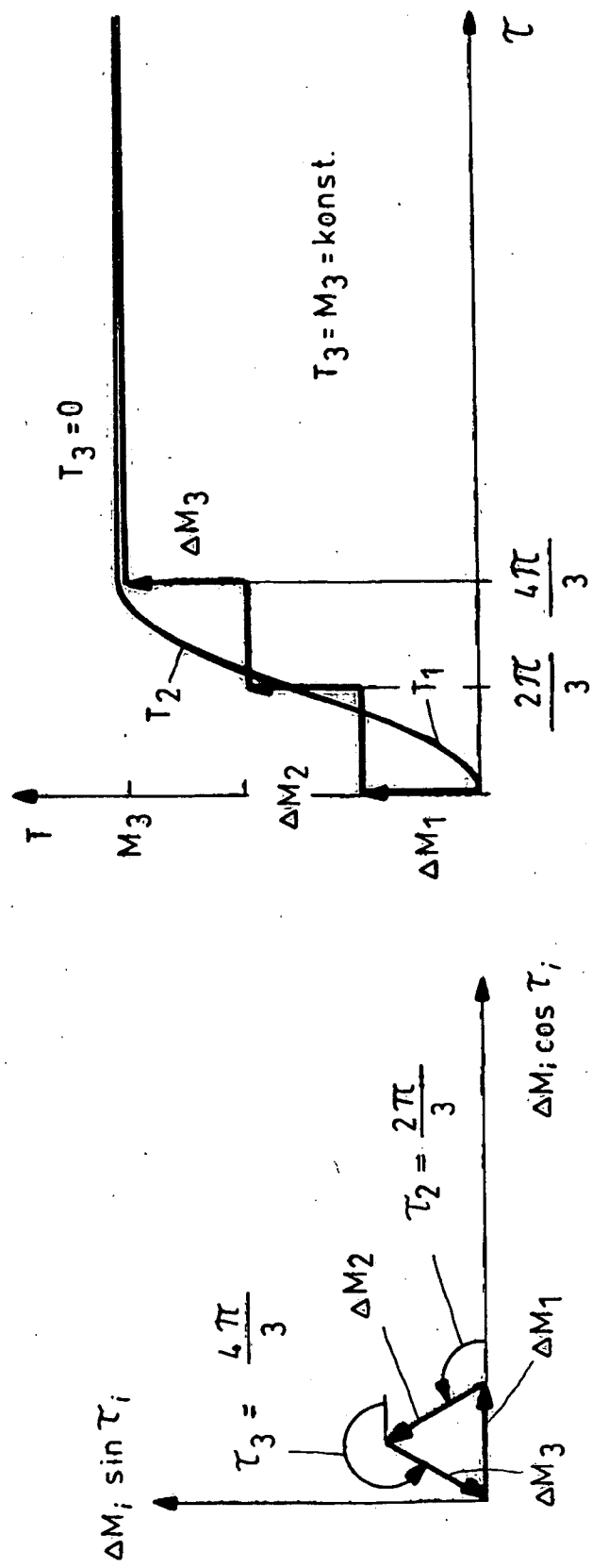


FIG.3b

FIG.3a

4/6

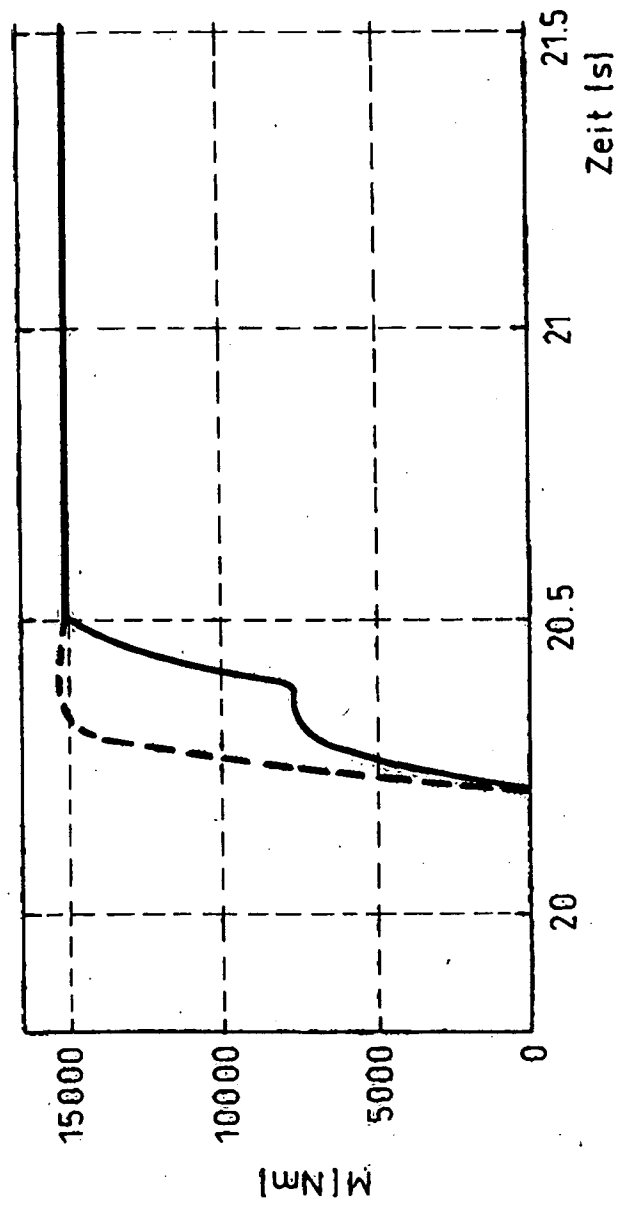


FIG. 4

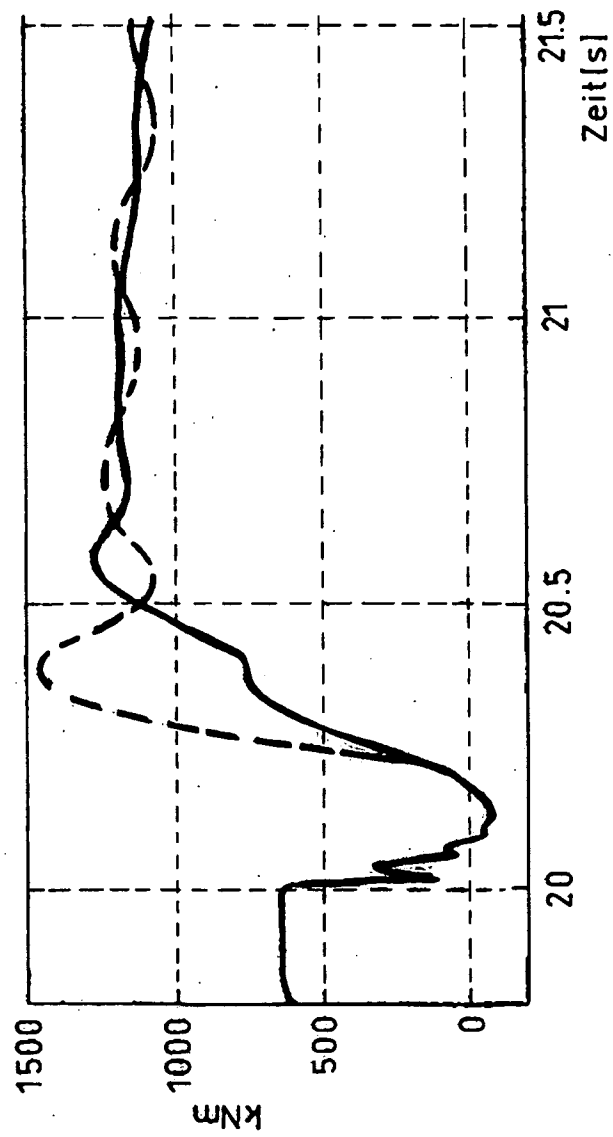


FIG.5

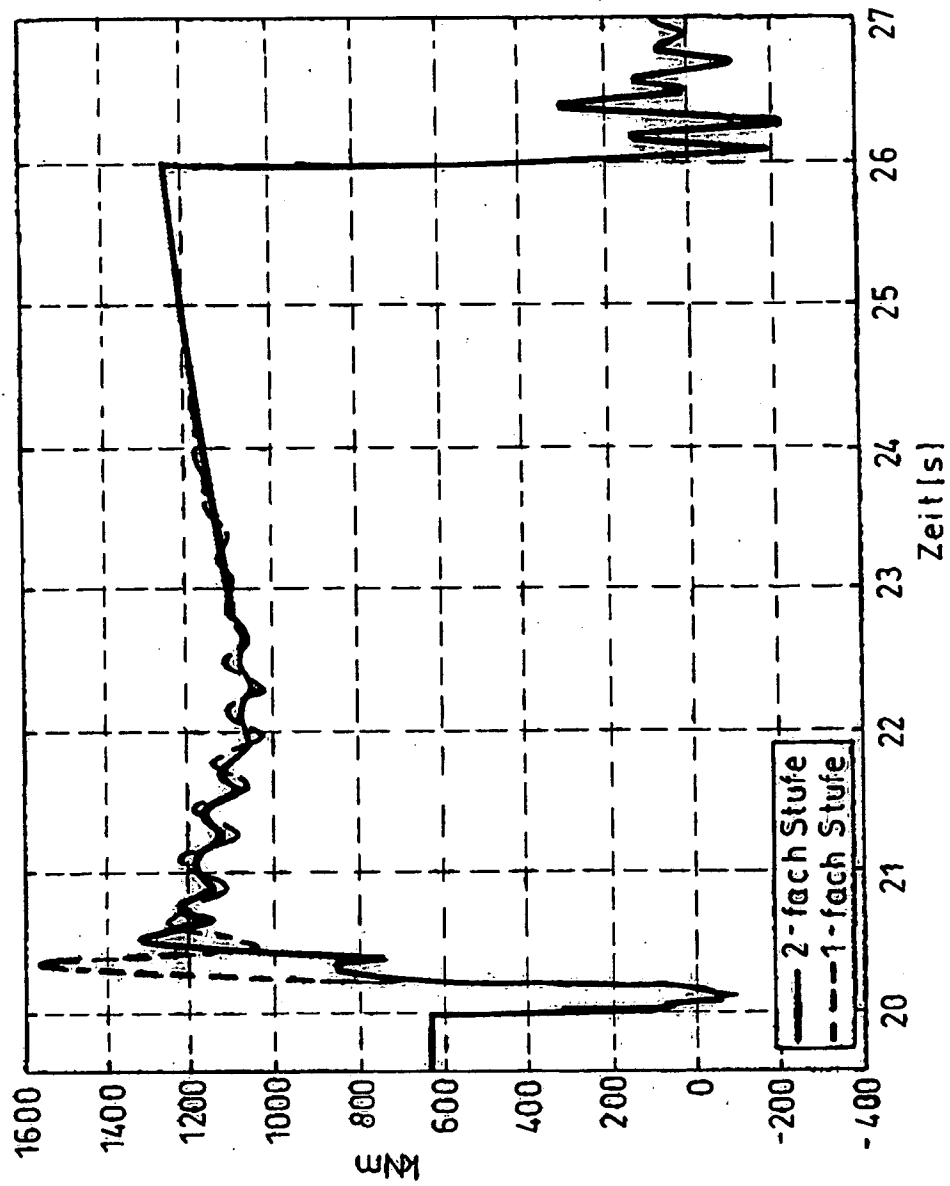


FIG.6