

TU Bergakademie Freiberg
Institut für Elektrotechnik



Doppelt-gespeiste Asynchronmaschine als drehzahlvariabler Windenergiegenerator und ihre feldorientierte Regelung

Skriptum für Nichtelektrotechniker

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Beckert

Datum: Januar 2008

1. Doppelt-gespeiste Asynchronmaschine als drehzahlvariabler Windenergiegenerator

Um den Wind mit seiner schwankenden Geschwindigkeit stets die maximale Leistung entnehmen zu können, muss man die Rotordrehzahl der Windenergieanlage (WEA) an die Windgeschwindigkeit anpassen können, s. *Bild 1*.

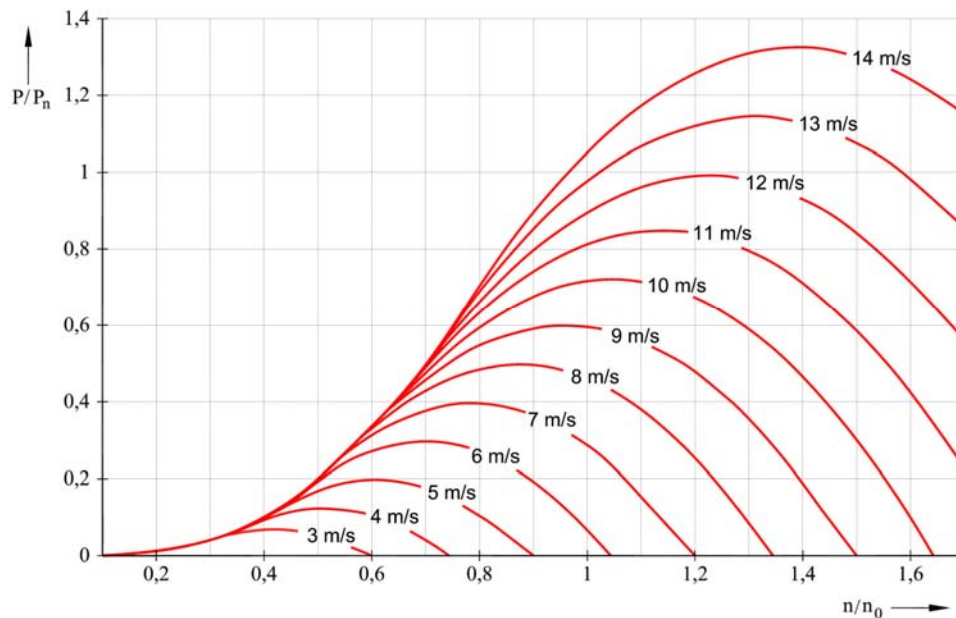


Bild 1: Charakteristisches Leistungs-Kennfeld eines Windenergieconverters

Das heißt, man muss ein drehzahlvariables Generatorprinzip wählen. Bei Windenergieanlagen großer Leistung ($> 1,5 \text{ MW}$) konkurrieren auf diesem Gebiet die umrichter-gespeiste Synchronmaschine und die doppelt-gespeiste Asynchronmaschine (DGAM), s. *Bild 2*.

Bei der Synchronmaschine ist bekanntlich die Ständerfrequenz f_1 fest mit der Läuferdrehzahl n_s über die Polpaarzahl p gekoppelt:

$$f_1 = p n_s \quad (1)$$

Der zur Entkopplung von variabler Drehfrequenz und fester Netzfrequenz f_N erforderliche Frequenzumrichter liegt zwischen Ständerwicklung und Netz. Über ihn fließt die gesamte Generatorleistung.

Beim Generatorkonzept mit der DGAM ist die Asynchronmaschine ständerseitig direkt mit dem Netz verbunden. Der zur Entkopplung von variabler Drehfrequenz und fester Netzfrequenz erforderliche Frequenzumrichter liegt im Läuferkreis. Er braucht nur die Läufercheinleistung S_2 liefern. Diese ist dem Schlupf

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

proportional. Beschränkt man sich auf einen schmalen Drehzahl-Arbeitsbereich von z.B. $\pm 20\%$ um die synchrone Drehzahl n_s , so beträgt die Umrichterscheinleistung nur einen Bruchteil der Generatorscheinleistung.

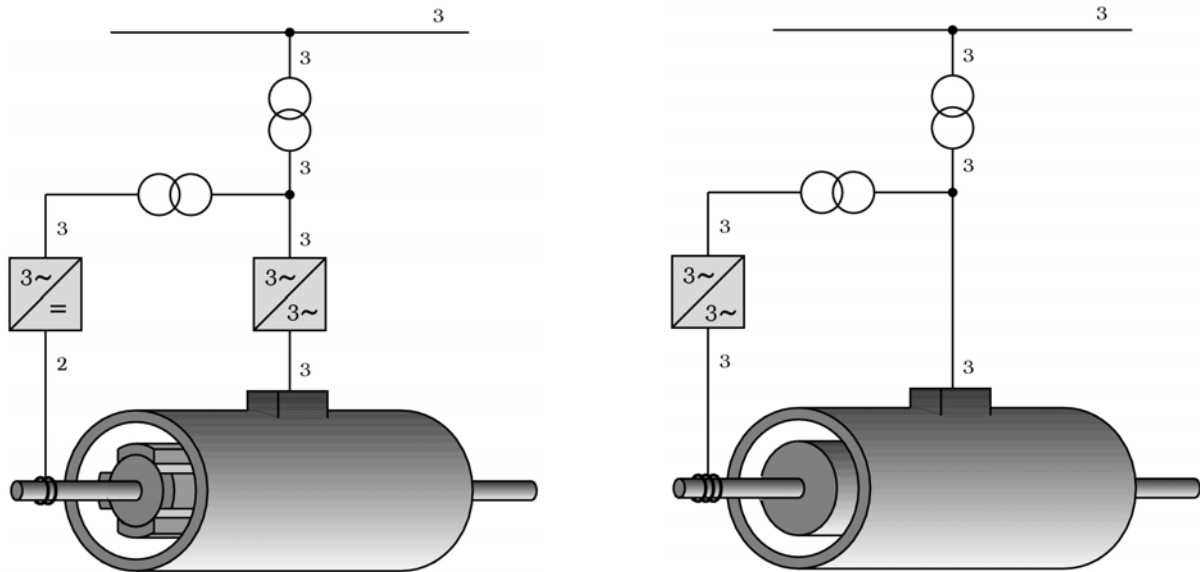


Bild 2: Gegenüberstellung der drehzahlvariablen Generatorkonzepte mit konventioneller Synchronmaschine und mit doppelt gespeister Asynchronmaschine

In *Bild 3* ist die Umrichterscheinleistung S_2 bezogen auf die Ständerennscheinleistung S_{1n} in Abhängigkeit vom Schlupf s bei generatorischem Betrieb mit Nennwirkleistung für unterschiedliche Werte der dabei zu erzeugenden Blindleistung. $Q_1 = -Q_n$ entspricht dem Betrieb mit kapazitiver Blindleistung vom Betrag der Nennblindleistung. $Q_1 = 0$ entspricht dem Betrieb mit dem Leistungsfaktor 1.

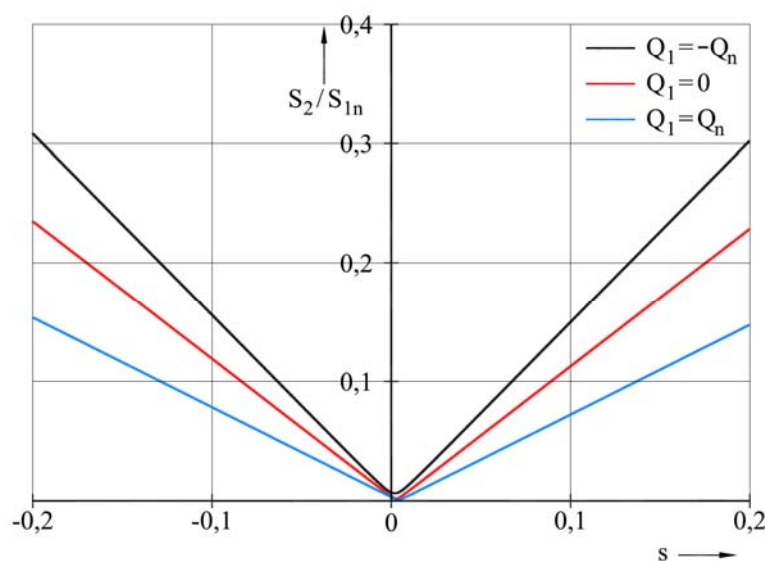


Bild 3: Umrichterscheinleistung als Funktion des Schlupfes bei generatorischem Betrieb mit Nennwirkleistung

Bild 4 zeigt den Leistungsfluss im übersynchronen und im untersynchronen generatorischen Betrieb der DGAM.

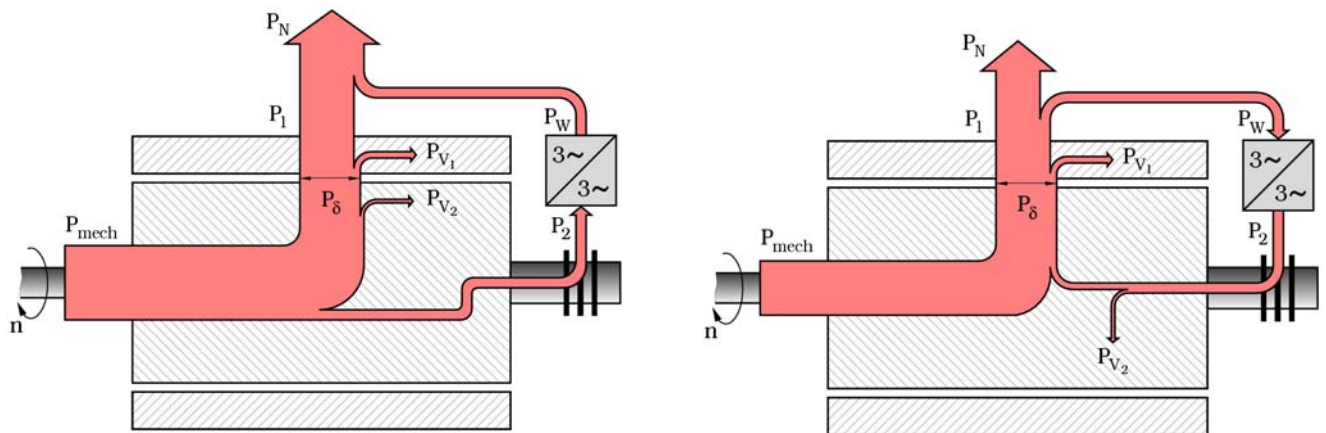


Bild 4: Leistungsfluss im über- und untersynchronen generatorischen Betrieb

Die DGAM bietet außerdem den Vorteil, dass im generatorischen Betrieb Wirk- und Blindleistung unabhängig voneinander und vollständig entkoppelt von der Drehzahl durch je eine Läuferstromkomponente geregelt werden können. Dazu muss die gesamte Regelung am rotierenden Drehfeld orientiert werden.

Im Folgenden wird gezeigt, dass diese feldorientierte Regelung (FOR) der DGAM nahezu vollständig analog zur gut bekannten feldorientierten Regelung des Käfigläuferasynchronmotors ist. Es können fast alle Beziehungen für die Regelstrecken und die Reglereinstellungen übernommen werden, wenn die Indizes für Ständer (1) und Läufer (2) vertauscht werden.

2. Die feldorientierte Regelung der DGAM

Bild 5 zeigt das Ersatzbild der Asynchronmaschine mit einer schematischen Darstellung der Wicklungen. Es ist zweckmäßig, drei Koordinatensysteme (Bild 5) einzuführen:

- das ständerfeste Koordinatensystem α, β ,
- das läuferfeste Koordinatensystem d, q und
- das am Ständerflussraumzeiger $\underline{\psi}_1$ orientierte und mit $n_k = \omega_1$ rotierende Koordinatensystem x, y .

Die FOR erfolgt im Koordinatensystem x, y .

Die FOR erfordert mehrere Koordinatentransformationen. In Bild 6 werden exemplarisch am Läuferstromraumzeiger \underline{i}_2 die Transformationsbeziehungen zwischen dem α, β - und dem x, y -System abgeleitet:

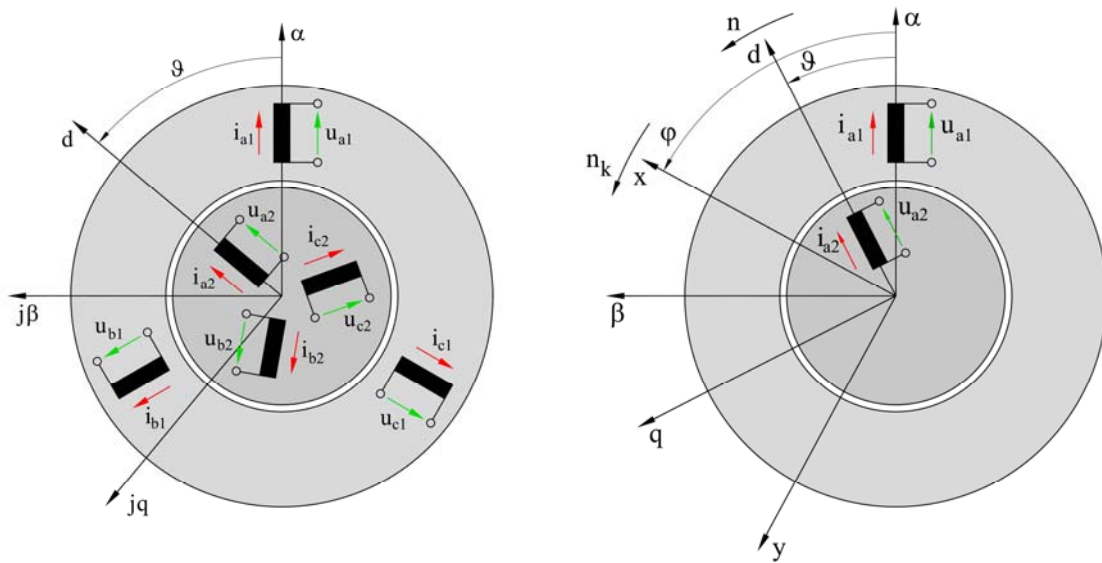


Bild 5: Ersatzbild der Asynchronmaschine und Koordinatensysteme

Im α, β -System gilt

$$\underline{i}_2(\alpha, \beta) = i_{2\alpha} + j i_{2\beta} = |\underline{i}_2| e^{j\gamma_{2i}} \quad (3)$$

Im mit ω_1 rotierenden Koordinatensystem x, y gilt für den Läuferstromraumzeiger

$$\underline{i}_2(x, y) = i_{2x} + j i_{2y} = |\underline{i}_2| e^{j\delta} \quad (4)$$

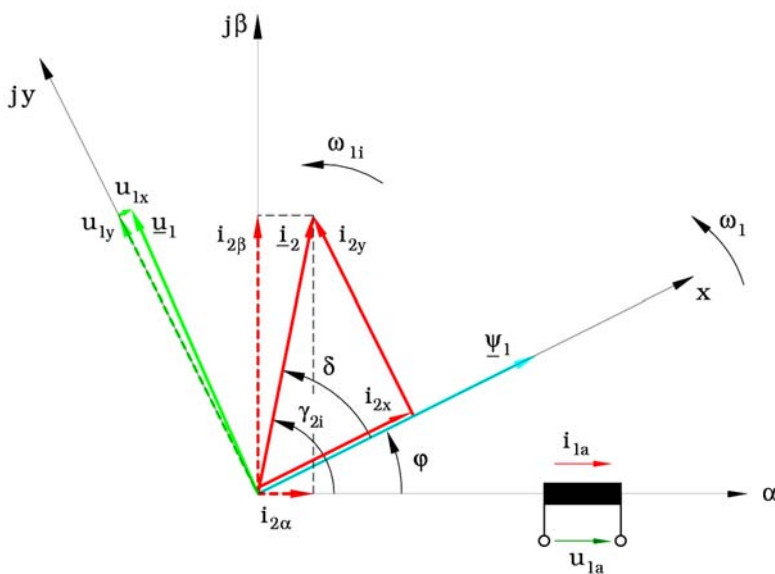
Durch Kombination beider Beziehungen erhält man unter Beachtung von

$$\gamma_{2i} = \varphi + \delta \quad (5)$$

(s. Bild 6) die folgenden Transformationsbeziehungen:

$$\underline{i}_2(\alpha, \beta) = \underline{i}_2(x, y) e^{j\varphi} \quad (6)$$

$$\underline{i}_2(x, y) = \underline{i}_2(\alpha, \beta) e^{-j\varphi}$$



$$p_1 \approx -\frac{X_h}{X_1} u_1 i_{2y}$$

$$p_1 \sim i_{2y}$$

$$q_1 \approx \frac{X_h}{X_1} u_1 \left(\frac{u_1}{X_h} - i_{2x} \right)$$

$$q_1 \sim i_{2x}$$

Bild 6: Zerlegung des Läuferstrom-Raumvektors in eine drehmoment- und flussbildende bzw. wirk- und blindleistungsbestimmende Komponente

Ausgangspunkt für die mathematische Formulierung der feldorientierten Regelung bildet das bekannte Gleichungssystem, das das dynamische Verhalten der Asynchronmaschine in einem mit n_k rotierenden Koordinatensystem beschreibt:

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \underline{u}_1 - R_1 \underline{i}_1 - j n_k \underline{\psi}_1 \quad (7)$$

$$\frac{d\underline{\psi}_2}{dt} = \underline{u}_2 - R_2 \underline{i}_2 - j (n_k - n) \underline{\psi}_2 \quad (8)$$

$$\underline{\psi}_1 = X_1 \underline{i}_1 + X_h \underline{i}_2 \quad (9)$$

$$\underline{\psi}_2 = X_h \underline{i}_1 + X_2 \underline{i}_2 \quad (10)$$

$$m_i = \underline{\psi}_1 \times \underline{i}_1 = \frac{X_h}{X_2} (\underline{\psi}_2 \times \underline{i}_1) \quad (11)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{T_A} (m_i - m_w) \quad (12)$$

Alle vorkommenden Variablen und Parameter sind normiert, wobei die üblichen Bezugsgrößen (Index B) verwendet werden:

$$\begin{aligned}
 f_B &= f_{1n} & U_B &= \sqrt{2}U_{1n} \\
 n_B &= \frac{f_{1n}}{p} & I_B &= \sqrt{2}I_{1n} \\
 \omega_B &= \omega_{1n} = 2\pi f_{1n} & R_B &= X_B = \frac{U_B}{I_B} \\
 t_B &= \frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{2\pi f_{1n}} & \psi_B &= \frac{U_B}{\omega_B} = \frac{\sqrt{2} U_{1n}}{2\pi f_{1n}} \\
 M_B &= \frac{P_B}{\omega_B/p} = \frac{3p U_{1n} I_{1n}}{2\pi f_{1n}}
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$T_A = \omega_B \frac{J \omega_B / p}{M_B} \tag{14}$$

ist die bezogene Anlaufzeitkonstante.

Im Gegensatz zur Regelung des Käfigläuferasynchronmotors ist bei der DGAM die Läufer Spannung nicht Null, sie muss also in der Läufer Spannungsdifferentialgleichung berücksichtigt werden.

Wie schon oben erwähnt, erfolgt bei der DGAM die gesamte Regelung in dem am Ständerflussraumvektor $\underline{\psi}_1$ orientierten Koordinatensystem x, y:

Es gilt also

$$n_k = \omega_1 \tag{15}$$

$$\underline{\psi}_1 = \psi_{1x} \quad \psi_{1y} = 0 \quad \frac{d\psi_{1y}}{dt} = 0 \tag{16}$$

Unter Berücksichtigung der Gln. (9) und (10) erhält man für die läuferstromgespeiste feldorientiert betriebene Asynchronmaschine

$$\frac{d\psi_{1x}}{dt} + \frac{R_1}{X_1} \psi_{1x} = u_{1x} + X_h \frac{R_1}{X_1} i_{2x} \tag{17}$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_1 = \frac{u_{1y}}{\psi_{1x}} + X_h \frac{R_1}{X_1} \frac{i_{2y}}{\psi_{1x}} \tag{18}$$

$$m = -\frac{X_h}{X_1} \psi_{1x} i_{2y} \quad (19)$$

mit der Bewegungsgleichung

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{T_A} (m - m_w) \quad (20)$$

Für die Verdrehung des Läufers gegenüber dem Ständer gilt wieder

$$\frac{d\vartheta}{dt} = n. \quad (21)$$

3. Stationärer Betrieb

Im stationären Betrieb erscheinen alle in das mit dem Ständerflussraumvektor rotierende Koordinatensystem transformierten Wechselgrößen als Gleichgrößen. Es gilt dann:

Es gilt dann

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = 0 \quad (22)$$

$$\omega_1 = 1 \quad (\text{nichtnormiert: } \omega_1 = \omega_{1n}). \quad (23)$$

Aus der normierten Ständerspannungsgleichung

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \underline{u}_1 - R_1 \underline{i}_1 - j \omega_1 \underline{\psi}_1 \quad (24)$$

folgt zunächst

$$\underline{u}_1 = R_1 \underline{i}_1 + j \underline{\psi}_1 \quad (25)$$

Unter Beachtung von Gl. (10)

$$\underline{\psi}_1 = \psi_{1x} \quad \psi_{1y} = 0$$

führt die Ständerspannungsgleichung schließlich auf:

$$u_{1x} = R_1 i_{1x} \quad (26)$$

$$u_{1y} = R_1 i_{1y} + \psi_{1x} \quad (27)$$

$$u_{1x} \ll u_{1y} \approx u_1 \quad (28)$$

$$\psi_{1x} \approx u_{1y} \approx u_1 \quad (29)$$

D.h. die Raumzeiger der Ständerspannung \underline{u}_1 und der Ständerflussverkettung $\underline{\psi}_1$ stehen nahezu senkrecht aufeinander (Abweichung $\approx 2^\circ$) und haben (normiert) etwa den gleichen Betrag.

4. Wirk- und Blindleistung

Für die von der Asynchronmaschine aufgenommene Wirk- und Blindleistung gilt in nichtnormierter Form:

$$p_1 = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\underline{u}_1 \cdot \underline{i}_1^* \right] \quad (30)$$

$$q_1 = \frac{3}{2} \operatorname{Im} \left[\underline{u}_1 \cdot \underline{i}_1^* \right] , \quad (31)$$

Erläuterung: Für stationären Betrieb lassen sich die Gl. (30) und (31) in die bekannten Ausdrücke für die Wirk- und Blindleistung bei Drehstrom

$$P = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad Q = 3 U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

überführen: Im stationären Betrieb gilt:

$$\underline{u}_1 = \hat{U}_1 e^{j\omega_1 t}$$

$$\underline{i}_1 = \hat{I}_1 e^{j(\omega_1 t - \varphi_1)}$$

$$\underline{i}_1^* = \hat{I}_1 e^{-j(\omega_1 t - \varphi_1)}$$

$$p_1 = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\underline{u}_1 \cdot \underline{i}_1^* \right] = \frac{3}{2} \hat{U}_1 \hat{I}_1 \operatorname{Re} \left[e^{j\varphi_1} \right] = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$q_1 = \frac{3}{2} \hat{U}_1 \hat{I}_1 \operatorname{Im} \left[e^{j\varphi_1} \right] = 3 U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

In normierter Form gilt dann

$$p_1 = \operatorname{Re} \left[\underline{u}_1 \cdot \underline{i}_1^* \right] = u_{1x} i_{1x} + u_{1y} i_{1y} \quad (32)$$

$$q_1 = \operatorname{Im} \left[\underline{u}_1 \cdot \underline{i}_1^* \right] = u_{1y} i_{1x} - u_{1x} i_{1y} \quad (33)$$

Unter Berücksichtigung von

$$u_{1x} \ll u_{1y}$$

vereinfachen sich die Gln. (32) und (33) auf:

$$p_1 \approx u_{1y} i_{1y} \approx u_1 i_{1y} \quad (34)$$

$$q_1 \approx u_{1y} i_{1x} \approx u_1 i_{1x} \quad (35)$$

Berücksichtigt man noch, dass wegen

$$\underline{\psi}_1 = X_1 \underline{i}_1 + X_h \underline{i}_2$$

$$\psi_{1x} = X_1 i_{1x} + X_h i_{2x}$$

$$0 = X_1 i_{1y} + X_h i_{2y}$$

zwischen den Ständer- und Läuferströmen im ständerflussbezogenen Koordinatensystem der Zusammenhang

$$i_{1x} = \frac{\psi_{1x}}{X_1} - \frac{X_h}{X_1} i_{2x} \approx \frac{u_1}{X_1} - \frac{X_h}{X_1} i_{2x} \quad (36)$$

$$i_{1y} = -\frac{X_h}{X_1} i_{2y} \quad (37)$$

besteht, so erhält man schließlich für die Ständerwirk- und Ständerblindleistung

$$p_1 \approx -\frac{X_h}{X_1} u_1 i_{2y} \quad (38)$$

$$q_1 \approx \frac{X_h}{X_1} u_1 \left(\frac{u_1}{X_h} - i_{2x} \right) \quad (39)$$

Die Beziehungen Gl.(38) und (39) zeigen die vollständige Entkopplung von Ständerwirk- und Ständerblindleistung bei der doppelt-gespeisten Asynchronmaschine. Beide Größen können durch jeweils eine Läuferstromkomponente direkt gesteuert werden.

$$p_1 \sim i_{2y}$$

$$q_1 \sim i_{2x}$$

Der erste Term in Gl.(39)

$$\frac{u_1^2}{X_1}$$

entspricht der Magnetisierungsblindleistung der konventionell am Drehstromnetz betriebenen Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer.

5. Struktur der FOR

Bild 7 zeigt das Strukturbild der FOR der DGAM mit den äußeren Regelkreisen für die Wirk- und die Blindleistung und den unterlagerten Regelkreisen für die x- und y-Komponente des Läuferstromraumzeigers. Gemessen und berechnet werden zunächst

- die α, β -Komponenten des Ständerstrom- und den Ständerspannungsraumzeigers,
- die d, q -Komponenten des Läuferstromraumzeigers sowie
- der Läuferpositionswinkel ϑ mittels eines inkrementalen Gebers.

Mit Hilfe eines Maschinenmodells werden aus den gemessenen Größen die Istwerte für die Wirk- und Blindleistung p und q sowie der für die Koordinatentransformationen benötigte Winkel $(\varphi - \vartheta)$ berechnet. Wie in der Antriebstechnik üblich, werden alle vier Regler als PI-Regler ausgeführt.

Die Sollwerte sind stets mit * gekennzeichnet, z.B. p^* .

Bild 8 zeigt zum Vergleich das gut bekannte Strukturbild der FOR eines Käfigläuferasynchronmotors.

6. Läuferstromregelkreis und Entkopplung

Für die Einstellung der Läufer-Stromregelkreise ist die Kenntnis ihrer Regelstrecken notwendig. Durch Eliminieren des Läuferflusses und des Ständerstromes erhält man aus den Systemgleichungen:

$$u_{2x} = R_0 i_{2x} + \sigma X_2 \frac{di_{2x}}{dt} - \frac{X_h}{X_1} \frac{R_1}{X_1} \psi_{1x} - \sigma X_2 \omega_2 i_{2y} + \frac{X_h}{X_1} u_{1x} \quad (40)$$

$$u_{2y} = R_0 i_{2y} + \sigma X_2 \frac{di_{2y}}{dt} - \frac{X_h}{X_1} n \psi_{1x} + \sigma X_2 \omega_2 i_{2x} + \frac{X_h}{X_1} u_{1y} \quad (41)$$

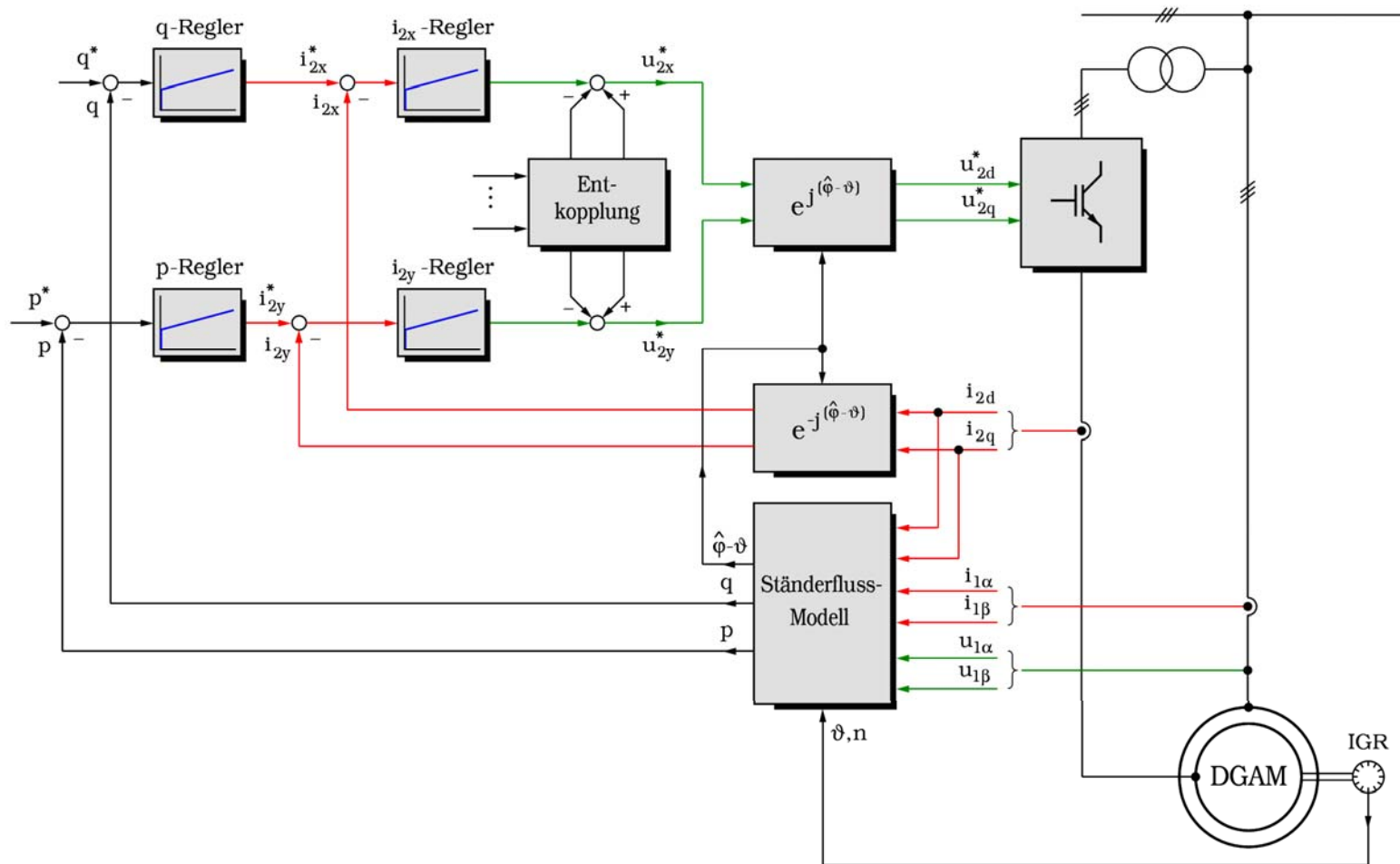


Bild 7: Struktur der Wirk- und Blindleistung der DGAM

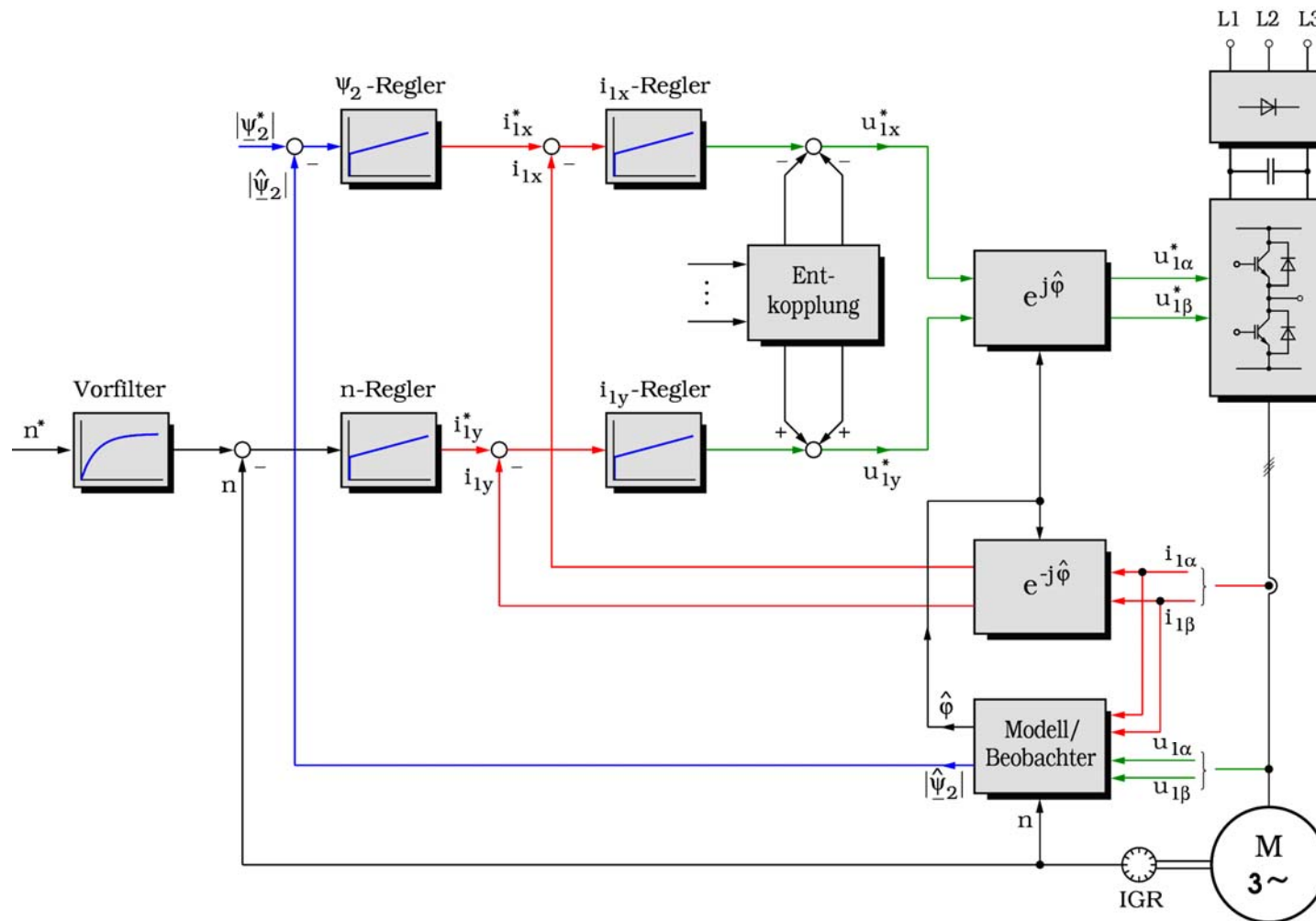


Bild 8: Klassische Struktur der feldorientierten Drehzahlregelung eines Käfigläufer-Asynchronmotors

wobei hier

$$R_0 = \left(\frac{X_h}{X_1} \right)^2 R_1 + R_2 \quad (42)$$

und

$$\omega_2 = \omega_1 - n$$

Die Kreuzkopplungsterme werden wie bei der feldorientierten Regelung des Asynchronmotors durch Aufschalten der entsprechenden Größen mit umgekehrten Vorzeichen kompensiert, so dass man für beide Regelstrecken die gleiche Struktur erhält:

$$u_{2x} = R_0 i_{2x} + \sigma X_2 \frac{di_{2x}}{dt} \quad (43)$$

$$u_{2y} = R_0 i_{2y} + \sigma X_2 \frac{di_{2y}}{dt} \quad (44)$$

$$F_s(p) = \frac{i_{2x}(p)}{u_{2x}^*(p)} = \frac{i_{2y}(p)}{u_{2y}^*(p)} = \frac{1/R_0}{(1+pT_u)(1+p\sigma X_2/R_2)} \quad (45)$$

Der Umrichter ist dabei als Verzögerungsglied 1. Ordnung mit der Zeitkonstanten T_u nachgebildet worden. Für die Reglerparameter erhält man bei der Einstellung nach dem Betragsoptimum:

$$T_N = \sigma X_2 / R_0 \quad (46)$$

$$k_R = \frac{1}{2} \frac{\sigma X_2}{T_u} \quad (47)$$

Bild 9 zeigt die Läuferstromregelkreise mit der Entkopplung.

Zum Vergleich: Bei der feldorientierten Regelung des Käfigläuferasynchronmotors erhält man für die Strom-Regelstrecken die Differentialgleichungen

$$u_{1x} = R_0 i_{1x} + \sigma X_1 \frac{di_{1x}}{dt} - \frac{X_h}{X_2} \frac{R_2}{X_2} \psi_{2x} - \sigma X_1 \omega_1 i_{1y} \quad (48)$$

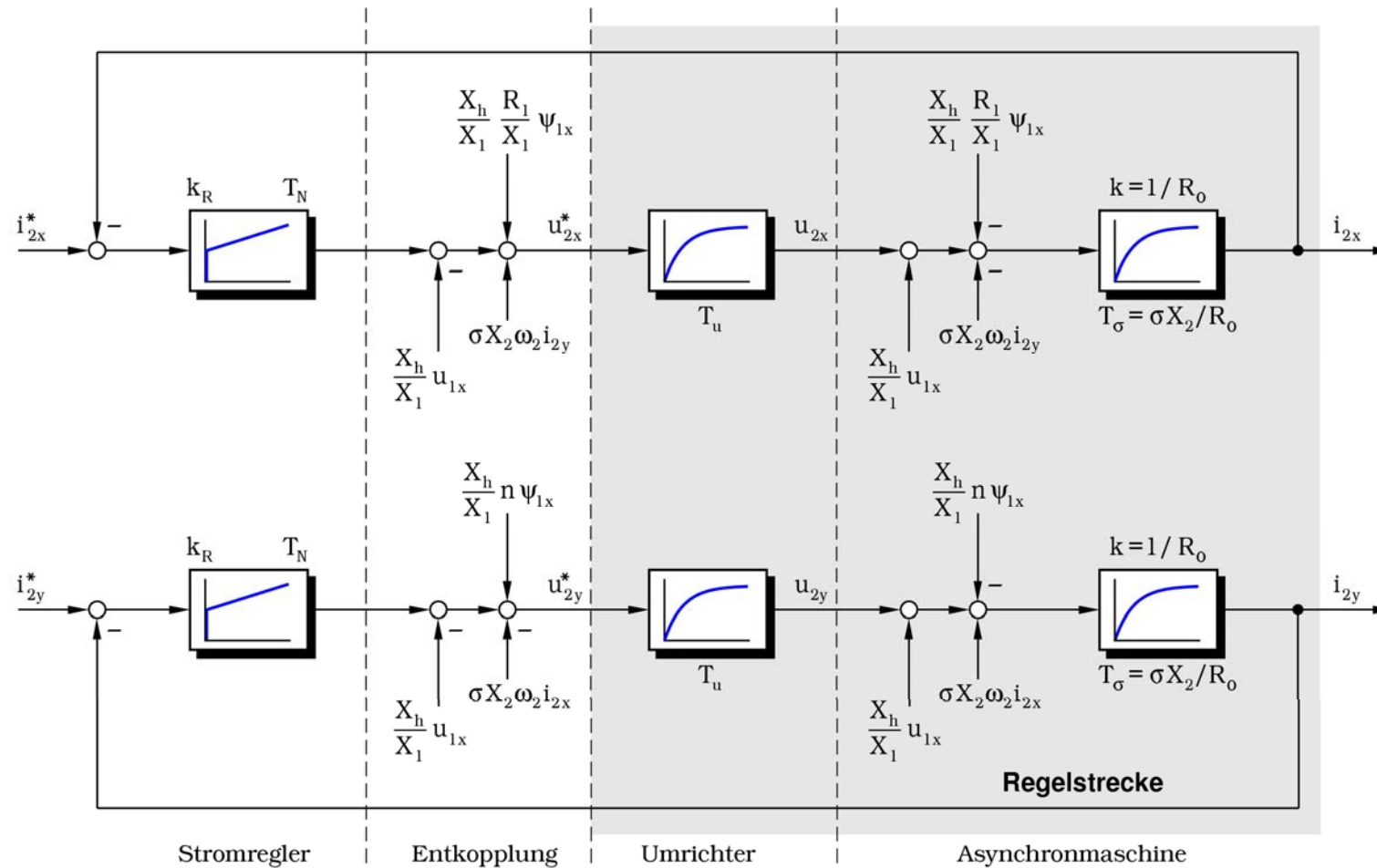


Bild 9: Läuferstromregelkreise mit Entkopplung

$$u_{1y} = R_0 i_{1y} + \sigma X_1 \frac{di_{1y}}{dt} + \frac{X_h}{X_2} n \psi_{2x} + \sigma X_1 \omega_1 i_{1x} , \quad (49)$$

Nach der Kompensation der Kreuzkopplungsterme erhält man schließlich als Übertragungsfunktion der Stromregelkreise

$$F_s(p) = \frac{i_{1x}(p)}{u_{1x}^*(p)} = \frac{i_{1y}(p)}{u_{1y}^*(p)} = \frac{1/R_0}{(1+p T_u)(1+p \sigma X_1/R_0)} , \quad (50)$$

wobei hier für R_0 gilt:

$$R_0 = R_1 + \left(\frac{X_h}{X_2} \right)^2 R_2 \quad (51)$$

D.h., vertauscht man die Indizes für Ständer (1) und Läufer (2), so kann man für die feldorientierte Regelung der DGAM die bekannten Beziehungen von der feldorientierten Regelung des Käfigläuferasynchronmotors übernehmen !

7. Wirk- und Blindleistungsregelkreise

Bild 7 zeigt die Kaskadenstruktur der Wirk- und Blindleistungsregelkreise mit den unterlagerten Läuferstromregelkreisen.

Bei der Analyse und Optimierung der Wirk- und Blindleistungsregelung kann das Führungsverhalten der betragsoptimal eingestellten Läuferstromregelkreise jeweils durch ein Verzögerungsglied 1. Ordnung mit der doppelten Verzögerungszeit des Umrichters nachgebildet werden:

$$F_i(p) = \frac{i_{2x}(p)}{i_{2x}^*(p)} = \frac{i_{2y}(p)}{i_{2y}^*(p)} = \frac{1}{1+p 2 T_u} \quad (52)$$

Gemäß der Gln. (38) und (39) stellen die Zusammenhänge jeweils ein P-Glied dar:

$$F_p(p) = \frac{p(p)}{i_{2y}(p)} = -\frac{X_h}{X_1} u_1 \quad (53)$$

$$F_q(p) = \frac{q(p)}{i_{2x}(p)} = -\frac{X_h}{X_1} u_1 \quad (54)$$

Bemerkenswert ist noch, dass der Magnetisierungsstrom

$$i_{\mu} = \frac{u_1}{X_1}$$

eine Störgröße im Blindleistungsregelkreis darstellt. Da er im ungestörten Betrieb, d.h. bei starrer Netzspannung, nahezu konstant ist, braucht er nicht durch eine Entkopplung dynamisch kompensiert zu werden. *Bild 10* zeigt das Blockschaltbild der Wirk- und Blindleistungsregelung.

Die Einstellung der Leistungsregler erfolgt grundsätzlich nach dem Betragsoptimum. Im Gegensatz zur Stromregelung ist hier bei Sollwertänderungen kein Überschwingen der Leistungswerte zulässig. D.h., die Reglerauslegung muss so erfolgen, dass der geschlossene Regelkreis eine relative Dämpfung größer gleich 1 besitzt, während bei den Stromregelkreisen eine Dämpfung von $\sqrt{2}/2$ angestrebt wurde.

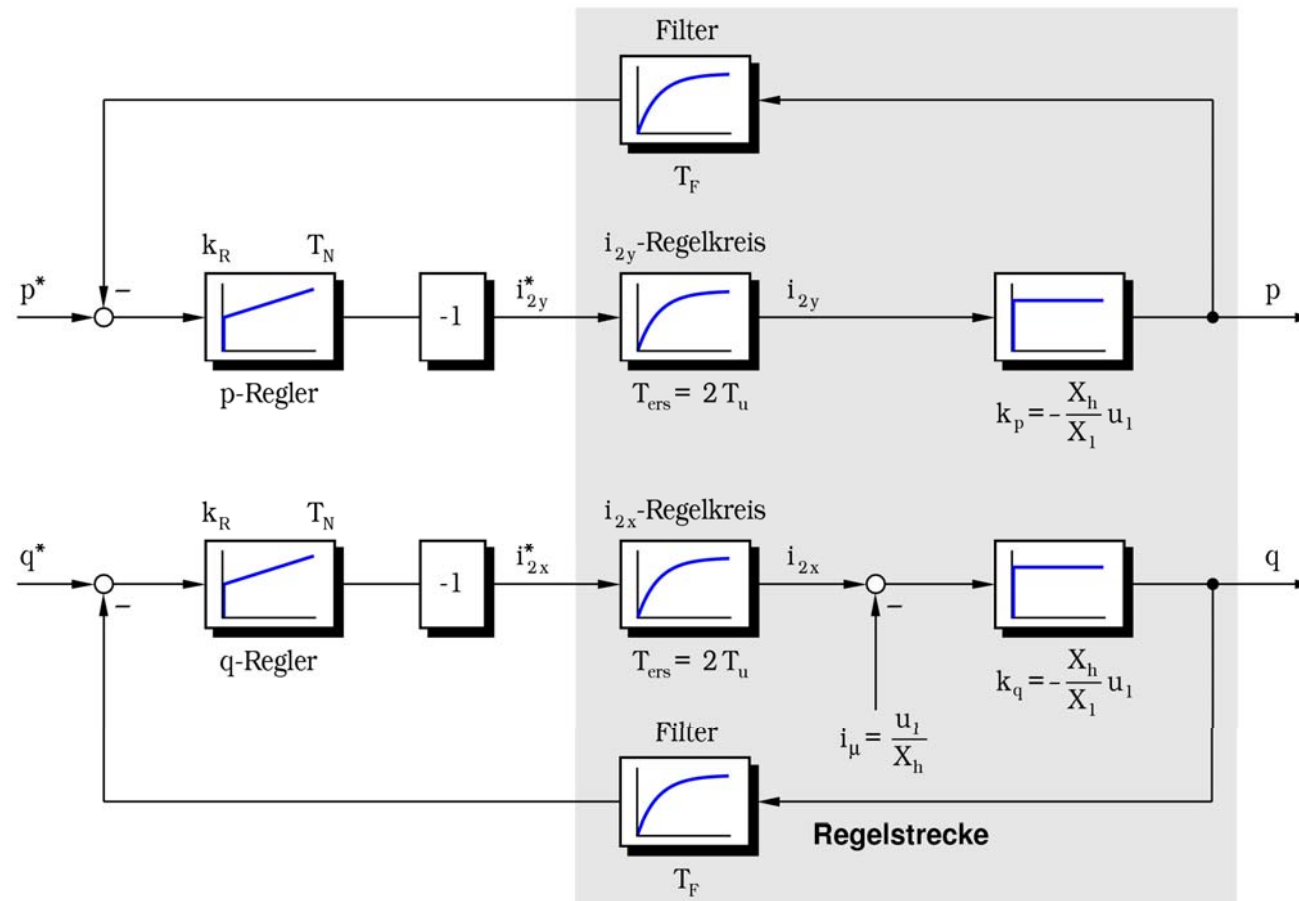


Bild 10: Wirk- und Blindleistungsregelkreise

8. Daten der weltgrößten Windenergieanlage

Im November 2004 ist in der Nähe von Brunsbüttel die mit einer Nennleistung von 5 MW weltgrößte Windenergieanlage in Betrieb genommen worden. Ihre Abmessungen sind gewaltig. Mit einem Durchmesser von 126m beschreibt der Rotor eine Fläche, in der ein komplettes Fußballfeld Platz findet, s. *Bild 11*. Die Gondel allein (ohne Rotor) wiegt 290 Tonnen.

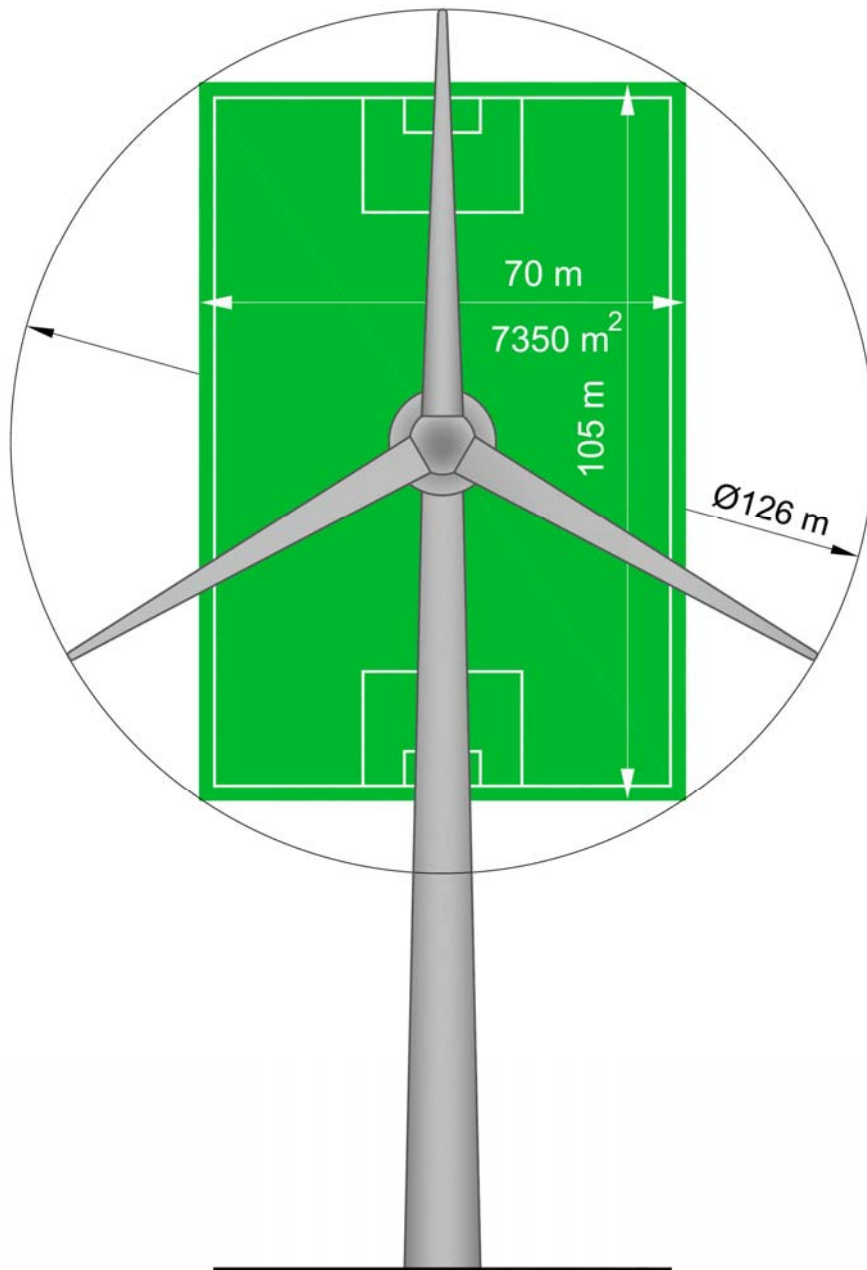


Bild 11: 5 MW-WEA

Hauptparameter der WEA:

Nennleistung	5000 kW
Einschalt-Windgeschwindigkeit	3,5 m/s
Nenn-Windgeschwindigkeit	13 m/s
Abschalt-Windgeschwindigkeit	30 m/s (offshore)
Masse der Gondel	290 t
Masse des Rotors	120 t
Rotor-Drehzahlbereich	6,9 – 12,1 min ⁻¹
Getriebe	kombinierte Planeten-Stirnrad-Getriebe
Getriebeübersetzung	$i \approx 97$
Masse des Getriebes	63 t

Der Generator vom Prinzip DGAM wurde vom VEM Sachsenwerk Dresden geliefert.

Hauptparameter des Generators:

Nennleistung	5400 kW
Nennscheinleistung	5684 kVA
Nenndrehzahl	1170 min ⁻¹
Drehzahlbereich	670 ... 1339 min ⁻¹
Polpaarzahl	3
Ständernennspannung (Leitersp)g)	950 V
Ständernennstrom	3019 A
Läuferstillstandsspannung (Leitersp)g)	1920 V
Läuferennstrom	1696 A
Läuferleiterquerschnitt (h x b)	30 x 18 mm ²
Maschinenlänge	4000 mm
Masse	17 t