

Windkraftanlage Marschenhof Wremen

Als Kooperationsvorhaben dreier Partner wurde im Herbst 1986 in Wremen nördlich von Bremerhaven eine Windkraftanlage errichtet. Betreiber ist die Marschenhof Wremen GmbH, eine Schulungs- und Erholungsstätte der Arbeiterkammer Bremen. Regionaler technischer Partner und Energieberater ist die Ingenieur- und Beratungsgesellschaft IBEK GmbH, Bremen. Projektleiter, Hersteller der Windkraftanlage und Aufsteller der Meßanlage ist die Südwind GbR in Berlin. Das Projekt wird von der Europäischen Gemeinschaft aus dem Etat für „Demonstrationsvorhaben Energie 1986“ unterstützt.

Der Marschenhof wurde Mitte des letzten Jahrhunderts als Bauernhaus erbaut. Heute ist er Gaststättenbetrieb mit 50 Gästezimmern und 20 000 Übernachtungen im Jahr. Die energetische Situation des Marschenhofes wurde Anfang 1985 von der IBEK eingehend untersucht. Die elektrische Anlage des Gesamtkomplexes ist für eine Leistung von 75 kW ausgelegt. Der für den Bereitstellungspreis maßgebliche Spitzenwert lag im betrachteten Zeitraum sogar bei 79 kW. Die typische Grundlast beträgt auch nachts 15 bis 25 kW. Diese Eckdaten lassen im Rahmen des Projektes einen betriebswirtschaftlich lohnenden Einsatz der Windkraftanlage erwarten, da mit dem – schlecht bezahlten – Rückspeisebetrieb nur ausnahmsweise zu rechnen ist.

Die Windkraftanlage, eine dreiflügelige, leeläufige Anlage mit horizontaler Achse, verfügt über einen sogenannten Schlaggelenkrotor, dessen Rotorblätter gelenkig an der Nabe angebracht sind. Diese an die Konstruktion von Hub-schrauberrotoren angelehnte Bauweise verringert die Biegebelastungen im Flügelfuß erheblich und gewährleistet so

den problemlosen Betrieb des Rotors auf der Leeseite des Turmes. So ist eine passive Windnachführung ohne Windfahne oder Yaw-Motor möglich.

Die Anlage ist regelungstechnisch mit konventionellen dänischen Windkraftanlagen vergleichbar. Die Drehzahlführung des Rotors wird durch starre Kopplung eines zweistufigen Asynchrongenerators an das Netz des regionalen Energieversorgungsunternehmens erreicht. Die Begrenzung der Leistungsaufnahme geschieht bei konstanter Rotordrehzahl durch den auftretenden Strömungsabrieb am Flügel.

Der Maschinensatz, ein zweistufiges Stirnradgetriebe mit angeflanschem polumschaltbarem Asynchrongenerator, ist in Gummielementen gelagert, um störende Zahneingriffsgeräusche sowie etwaige Schaltstöße weitgehend von der tragenden Struktur fernzuhalten. Über eine elastische Gummikupplung ist die Rotorhauptwelle an die Getriebeeingangswelle gekoppelt; rotorseitig ruht sie in einem Pendelrollenlager.

Direkt hinter dem Rotor sitzt auf der Hauptwelle eine Scheibenbremse als Notbremssystem. Die erforderlichen Bremskräfte werden durch einen pneumatisch gelüfteten Federspeicherzylinder aufgebracht. Bremsauslösende Fehlfunktionen sind Erschütterungen, Überdrehzahl oder Übertemperatur am Generator.

Die Anlage steht auf einem dreiteiligen, in vier Richtungen abgespannten Rohrmast. Sie wurde komplett am Boden montiert und ohne Kran mit Hilfsbaum und einem Greifzug aufgerichtet. Die Koppelung an das Netz des Energieversorgungsunternehmens geschieht vollautomatisch durch eine prozessorgesteuerte Schaltanlage, die sämtliche Funktionen, wie leistungsbezogene Auswahl der Generatorstufe,



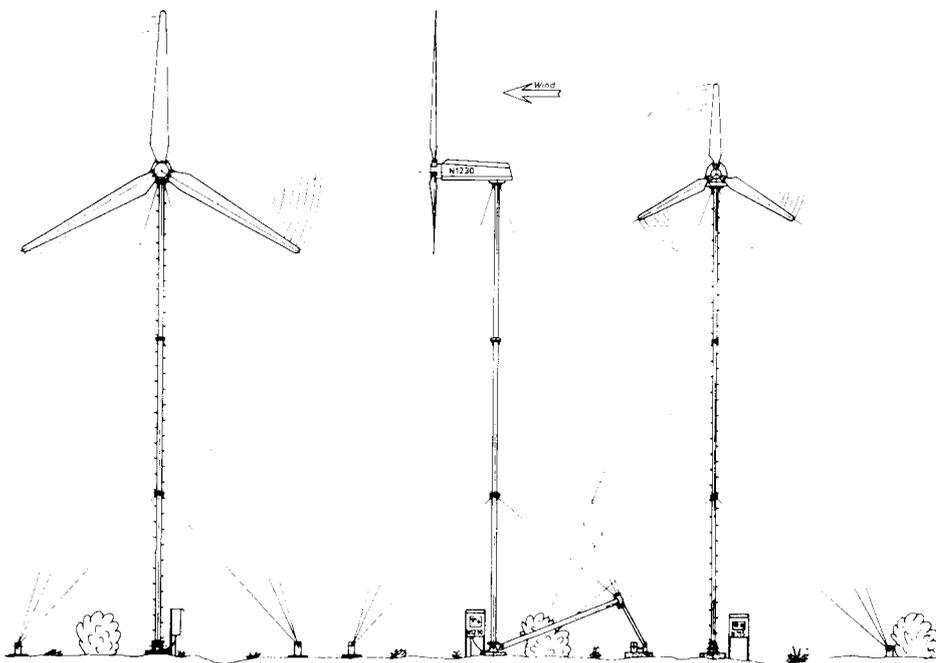
Windenergieanlage Südwind N 700 mit 15 kW Generatorleistung auf dem Marschenhof Wremen

weiche Ankoppelung an das Netz und Netzabwurf der Windkraftanlage bei zu geringem Windangebot sowie sämtliche sicherheitsrelevanten Parameter wie Schiefelast, Überspannung, Leistungsüberschreitung, Generator-temperatur und Funktion des Bremssystems steuert und überwacht.

Wie die Firma Südwind auf der Hannover-Messe dazu ergänzend mitteilte, wird im Herbst dieses Jahres im norddeutschen Küstengebiet eine Anlage des größeren Typs N 1200 mit 12,5 m Rotordurchmesser und einer Generatorleistung von 6/30 kW aufgestellt.

Vermessung

Zur Windkraftanlage auf dem Marschenhof Wremen, die ja eine Demonstrationsanlage ist, gehört eine umfangreiche Meßanlage. Über diese und erste Meßergebnisse referierten die Diplomingenieure Hermann Harders und Axel Weidner, beide Mitarbeiter der Firma Südwind Windkraftanlagen, Köpenicker Straße 145, 1000 Berlin 36, Ende März auf einer Windenergietagung an der Universität Oldenburg. Etwas gekürzt veröffentlichen wir ihren Vortrag auf den folgenden Seiten. Dabei ließen sich an einigen Stellen Wiederholungen gegenüber dem voranstehenden Text nicht ganz vermeiden. Sie dürften aber zur weiteren Verdeutlichung der Funktion dieser originellen Windkraftanlage beitragen. Zu Beginn ihres Beitrages beschreiben die Autoren eingehender die maschinentechnische Ausführung der Anlage und deren Kopplung an das Netz des örtlichen Energieversorgungsunternehmens.



Südwind-Windkraftanlagen; rechts der Typ N 715, wie er in Wremen aufgestellt wurde. links der Typ N 1230.

Vermessung der Windkraftanlage „Südwind N 715“

Die Windkraftanlage, eine dreiflügelige, leeläufige Anlage mit horizontaler Achse, verfügt als Neuerung über einen sogenannten Schlaggelenkrotor, dessen Rotorblätter gelenkig an der Nabe angebracht sind. Diese an die Konstruktion von Hubschrauberrotoren angelehnte Bauweise verringert die Biegebelastungen im Flügelfuß erheblich und gewährleistet so einen problemlosen Betrieb des Rotors auf der Leeseite des Turmes. Auf diese Weise ist eine passive Windnachführung ohne Windfahne oder Yaw-Motor möglich.

Die Anlage ist regelungstechnisch mit konventionellen dänischen Windkraftanlagen vergleichbar. Die Drehzahlführung des Rotors geschieht durch starre Koppelung eines zweistufigen Asynchrongenerators an das Netz des regionalen Energieversorgungsunternehmens. Die Leistungsaufnahme wird bei konstanter Rotordrehzahl durch den auftretenden Strömungsabrieb am Flügel (Stall) begrenzt.

Maschinensatz, Netzkopplung

Der Maschinensatz, ein zweistufiges Stirnradgetriebe mit angeflanschem polumschaltbaren Asynchrongenerator, ist in Gummielementen gelagert, um störende Zahneingriffsgeräusche sowie etwaige Schaltstöße weitgehend von der tragenden Struktur fernzuhalten. Über eine elastische Gummikupplung ist die Rotorhauptwelle an die Getriebeingangswelle gekoppelt; rotorseitig ruht sie in einem Pendelrollenlager. Direkt hinter dem Rotor sitzt auf der Hauptwelle eine Scheibenbremse als Notbremssystem. Die erforderlichen Bremskräfte werden durch einen pneumatisch gelüfteten Federspeicherzylinder aufgebracht. Bremsauslösende Fehlfunktionen sind Erschütterungen, Überdrehzahl oder Übertemperatur am Generator.

Die Kopplung an das Netz des EVU's geschieht vollautomatisch durch eine prozessorgesteuerte Schaltanlage, die sämtliche Funktionen, wie leistungsbezogene Auswahl der Generatorstufe, weiche Ankoppelung an das Netz und Netzabwurf der Windkraftanlage bei zu geringem Windangebot sowie sämtliche sicherheitsrelevanten Parameter, wie Schiefelast, Überspannung, Leistungsüberschreitung, Generator-temperatur und die Funktion des Bremssystems, steuert und überwacht.

Projektphasen

Ziel des 1985 formulierten Demonstrationsprojektes ist der exemplarische Betrieb der Windkraftanlage, um Daten über die technische und wirtschaftliche Durchführbarkeit dieser Technologie zu sammeln. Zu diesem Zweck wurde das Gesamtprojekt in drei einzelne Abschnitte aufgeteilt: Errichtungsphase, Kurzzeitmessung, Langzeitmessung.

In der Kurzzeit-Meßphase wird die Leistungscharakteristik der Windkraftanlage untersucht. In Anlehnung an den 1982 formulierten Standard der International Energy Agency (IEA) wird die Ermittlung der Leistungskurve in Form von 10-Minuten-Mittelwerten vorgenommen. Im Vorfeld dieser Meßreihen sind bislang einige Messungen im Sekunden- bzw. 10-Sekundentakt vorgenommen worden, die zur Grobabschätzung des Leistungsverhaltens der Windkraftanlage sowie zu ersten Aussagen über die Funktion der Meßanlage herangezogen werden können.

Kernstück der Meßanlage ist ein mehrkanaliger Datenlogger, der an einen Meßwertrechner koppelbar ist. Im Loggerbetrieb werden über einen wählbaren Zeitraum Meßdaten gesammelt, gegebenenfalls gemittelt und im RAM-Bereich (24 K RAM) des Datenloggers

dienen zwei Meßstellen für Lufttemperatur und Luftdruck.

Am Maschinensatz der Windkraftanlage ist ein einkanaliges Telemetriesystem montiert, das mit Dehnungsmeßstreifen und mitrotierendem Meßmodul das Drehmoment an der Hauptwelle der Windkraftanlage sowie deren Drehzahl erfaßt und daraus die mechanische Leistung des Rotors ermittelt.

Um die elektrische Leistung der Windkraftanlage sowie die jeweilige Netzanschußleistung des Marschenhofes zu registrieren, wurden zwei Wirkleistungs-Meßmoduln an der Schnittstelle Windkraftanlage Verbraucher sowie Verbraucher öffentliches Netz installiert, die aus Strom, Spannung und Phasenwinkel einen zur aktuellen elektrischen Leistung proportionalen Meßstrom erzeugen.

Da auf Grund der begrenzten Abtastrate von 1 bis 2 Hz je Kanal die zeitliche Auflösung der Meßwerte auf etwa 0,5 bis 1 Hz begrenzt ist (Shannon-Theorem), wurde der Datenlogger einseitig mit Tiefpaßfiltern beschaltet, sofern die verwendeten Meßwandler bzw. Sensoren nicht schon eine entsprechende Tiefpaßcharakteristik zeigen.

Steuerung via PC

Die Steuerung des gesamten Meßvorganges läuft softwaregestützt vom PC aus, der den Benutzer über verschiedene Menüs durch die möglichen Meßroutinen führt. Die Software wurde in Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule Bremerhaven in den Programmiersprachen Basic und TurboPascal erstellt. Ein typischer Arbeitsgang sieht folgendermaßen aus:

- Laden von Betriebssystem und Menüroutinen (automatisch beim Einschalten des Rechners von Diskette)
- Auswahl des Vorganges „Initialisierung des Datenloggers“ im Menü; automatischer Start des Meßvorganges
- menügeführter Abbruch des Meßvorganges zum gewünschten Zeitpunkt mit einem Unterprogramm „Auslesen der Daten“; dabei automatische Kalibrierung, Plausibilitätsprüfung und speichergerechte Formatierung
- Auf Wunsch Ausdruck der Daten in Tabellenform
- Auf Wunsch Aufbereitung der Daten zu Dateien für die grafische Auswertung
- Im Grafikprogramm ist die freie grafische Korrelation aller gemessenen Parameter möglich.

Im Rahmen des Projektes traten verschiedenen Probleme im Zusammenhang mit Windkraftanlage und Meßanlage auf: Zunächst machte die Anpassung der erstmals eingesetzten Steuerung Schwierigkeiten, da die mitgelieferte Software für die größeren dänischen Anlagen mit rund 55 kW und mehr konzipiert war. Weil andere Drehzahlen, Leistungen, Generatorstufungen und



Windkraftanlage Südwind N 715

abgespeichert. Diese Daten können über eine serielle Schnittstelle (RS 232) in den Meßwertrechner übertragen werden, wo die Daten endgültig gespeichert und aufbereitet werden.

Folgende Meßwerte werden erfaßt:

Maximal drei Windgeschwindigkeiten; davon zwei auf Meßmasten ungefähr in Nabenhöhe der Windkraftanlage (Abstand zum Rotor etwa 3 bis 4 Durchmesser), ein weiteres Anemometer ist direkt auf der Windkraftanlage montiert.

Die aktuelle Windrichtung wird auf einem der beiden Meßmasten von einer Windfahne mit einer Winkelauflösung von 22,5 Grad erfaßt.

Zur Kompensation der variierenden Luftdichte (Energiegehalt des Windes)

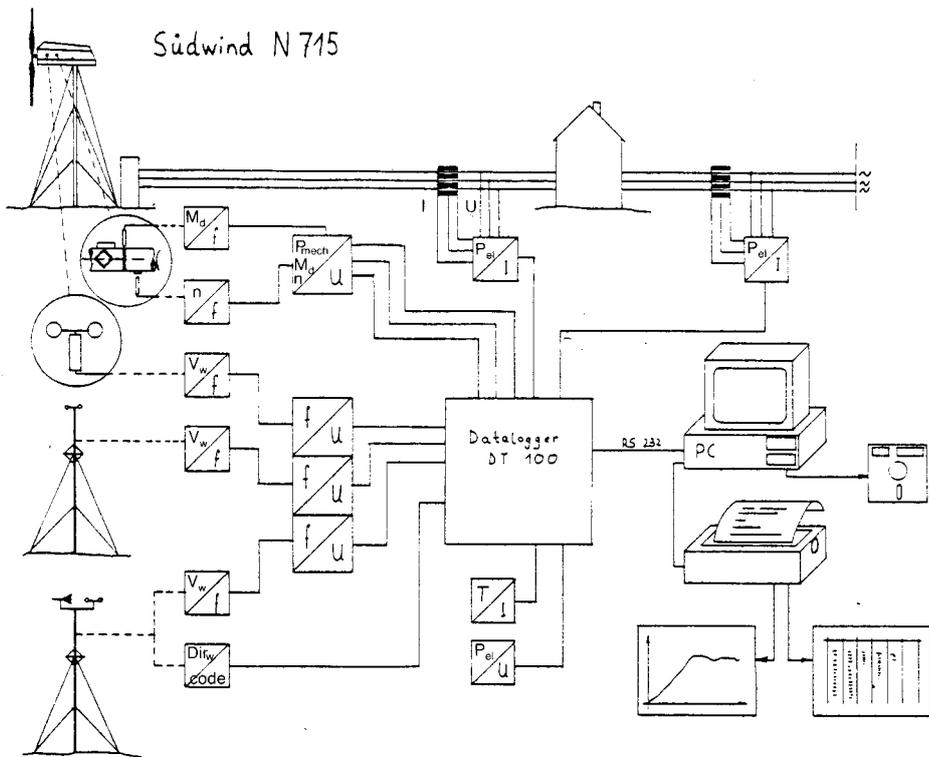
Trägheitsmomente im Standarddatensatz Verwendung fanden, mußten zunächst Anpassungsläufe der Windkraftanlage durchgeführt werden.

Das pneumatische Bremsssystem der Windkraftanlage barg anfangs einige Schwierigkeiten; der Sekundärkreis des Auslösesystems konnte auf Grund zu großer Leitungslängen den nötigen Durchsatz nicht immer gewährleisten. Deshalb traten Verzögerungen bei der als Redundanzkreis für die elektrische Auslösung installierten, direkten mechanischen Bremsauslösung auf. Der Umbau auf einen größeren Nenn Durchmesser der Druckleitungen konnte die Auslösezeit der Bremse um 75 Prozent senken, was zu guten Ergebnissen im Ansprechen führte.

Während einer Pause im Meßbetrieb über die Weihnachtsfeiertage mit teilweiseem Stillstand der Windkraftanlage traten Vereisungsprobleme an dem zunächst verwendeten Druckluftkompressor auf. Sie konnten durch Austausch des Aggregats gegen ein anderes Fabrikat behoben werden.

Weitere Verzögerungen traten auf, weil die ursprünglich schon für den Herbst 1986 geplante Kurzzeit-Meßphase auf Grund von Terminverschiebungen bei der Projektbewilligung durch die EG und Verzögerungen bei Bau- und Netzanschlußgenehmigung in den windarmen Zeitraum von Dezember 1986 bis April 1987 verschoben werden mußte. Aus diesen Gründen konnte bis Anfang 1987 lediglich der untere Leistungsbereich der Windkraftanlage bis zu einer Windgeschwindigkeit von etwa 10 m/s hinreichend aussagekräftig vermessen werden. Die gewonnenen Ergebnisse decken sich in etwa mit der prognostizierten Leistungskurve.

Im Bereich unterhalb von 1,5 kW ergeben sich leichte Abweichungen nach unten, was vermutlich auf wegen geringer Außentemperaturen zu zähflüssigen Getriebeöls sowie auf die während der ersten Messungen noch nicht eingelaufenen Wellendichtringe zurückzuführen sein dürfte. Erste Abschätzungen zeigen auch, daß der Unterschied im



Schaltplan zur computergetriggerten Meßanlage

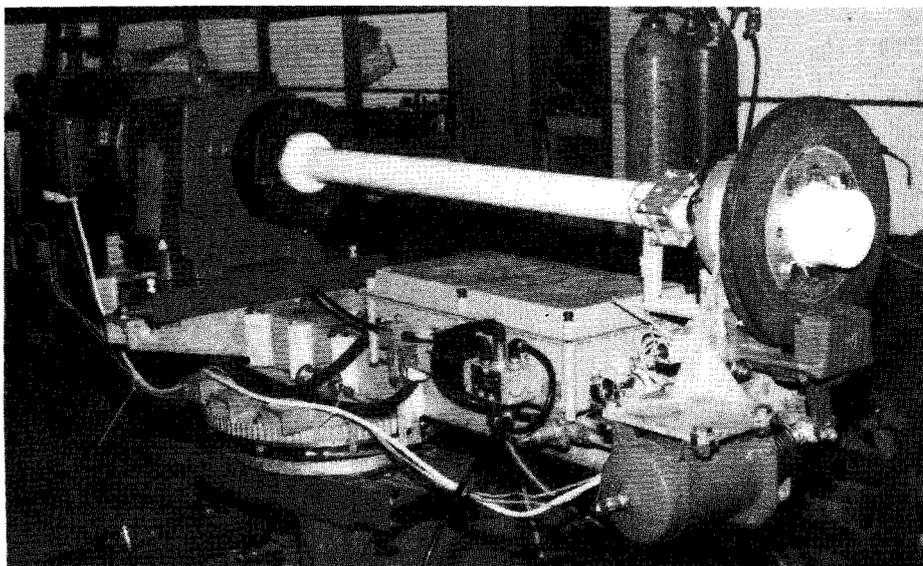
Kurvenverlauf zwischen großer (1500 U/min) und kleiner (1000 U/min) Drehzahl des polumschaltbaren Generators sehr gering ausfällt. Möglicherweise muß zu einem späteren Zeitpunkt zu einem Generator mit größerer Leistungsstufe als dem jetzt realisierten Leistungsverhältnis von 1 : 3 übergegangen werden.

Vergleichende Messungen zeigten, daß sich die erzielbare zeitliche Korrelationsgüte zwischen gemessener Windgeschwindigkeit und elektrischer Leistung erheblich verbessern läßt, wenn ein Anemometer direkt auf der Windkraftanlage eingesetzt wird. Auf Grund des Strömungsrückstaus in der Nähe des Rotors zeigt sich jedoch im unteren Windgeschwindigkeitsbereich (< 7 m/s) eine Abweichung zwischen den Lei-

stungskurven aus den verschiedenen Windgeschwindigkeitsmeßstellen. Es ist geplant, die Meßstelle für Windgeschwindigkeit auf der Windkraftanlage weiter vom Rotor entfernt anzubringen, um bei guter zeitlicher Korrelation ohne Beeinflussung durch den Rückstau des Rotors messen zu können.

Erstmals meßtechnisch nachweisen ließ sich eine Sonderfunktion der Steuerung: Bei schwachem Wind nahe der Einschaltgrenze der Windkraftanlage 'pulst' die Steuerung die in den rotierenden Massen des Systems gespeicherte kinetische Energie in das Netz. Hierzu wird der Generator zunächst vollständig vom Netz abgekoppelt, so daß weder Erregerleistung in der Maschine noch Schaltleistung in den Thyristoren verbraucht wird. Die Windkraftanlage läuft im Leerlauf und erhöht ihre Drehzahl bis in den übersynchronen Bereich. Danach wird sie solange im Phasenanschnitt weich an das Netz gekoppelt, bis wieder die synchrone Drehzahl zuzüglich Generatorschlupf erreicht ist. Dieser Vorgang wiederholt sich zyklisch je nach Windgeschwindigkeit alle paar Sekunden.

Mit dem Abschluß der Langzeitmessung in 1988 wird in der Rückschau eine abschließende ökologische und ökonomische Bilanz dieses Demonstrationsprojektes zur Nutzung der Windenergie möglich sein. – Das hier beschriebene Konzept einer neuartigen Windkraftanlage mit Schlaggelenken wird von Südwind weiter verfolgt. 1987 ist die Aufstellung weiterer Anlagen der Baureihe 700 (7 m Rotordurchmesser) fest geplant, für Herbst 1987 die Vorstellung der neuen Baureihe 1200 (12,5 m Rotordurchmesser) vorgesehen.



Maschinensatz der Windkraftanlage

A. Weidner, H. Harders