



Nils Johannsen

Fuzzy- statt PD-Regelung

Die Blattwinkelregelung von Windrädern basiert heute auf PD- beziehungsweise PID-Reglern. Aufgrund des nicht-linearen Verhaltens der Anlagen ist die Auslegung dieser Regler üblicherweise eine sehr zeitintensive Angelegenheit. Ein schnelleres und effizienteres Vorgehen verspricht der künftige Einsatz von Fuzzy-Reglern.

Moderne Windenergieanlagen (WEA) regeln die aus dem Wind entnommene Leistung durch die Änderung des Blattwinkels. Der Wind erzeugt an den Rotorblättern eine Auftriebskraft und versetzt den Rotor in eine Drehbewegung. Ab einer Windgeschwindigkeit von etwa 12 m/s – dies entspricht einer Windstärke von 6 Beaufort (Bft) – wäre die dadurch vom Rotor aufgenommene Leistung jedoch größer als die Nennleistung der WEA und muss folglich begrenzt werden. Hierzu wird der Anströmungswinkel des Windes durch Verstellen der Rotorblätter verändert und so die aufgenommene Rotorleistung verringert. Der bei dieser Drehzahlregelung über den Blattwinkel wirksame Regelkreis – meist Blattwinkelregelung genannt – ist extrem nicht-linear, vorrangig bedingt durch das aerodynamische Verhalten der Rotorblätter. Daher wird bei heutigen WEA der verwendete PID-Regler üblicherweise durch Filter und weitere Zusatzfunktio-

nen wie Gain-Scheduling ergänzt. Die Vor-Auslegung der Reglerparameter erfolgt im Rahmen der Lastenberechnung für eine WEA. Ein rechnerisches Anlagenmodell wird hierbei in Simulationsläufen genormten Windprofilen ausgesetzt. Bei der Auslegung des Reglers sind jedoch konkurrierende Optimierungskriterien wie geringe Drehzahl-Abweichung und hoher Energie-Ertrag bei geringen Lasten zu berücksichtigen.

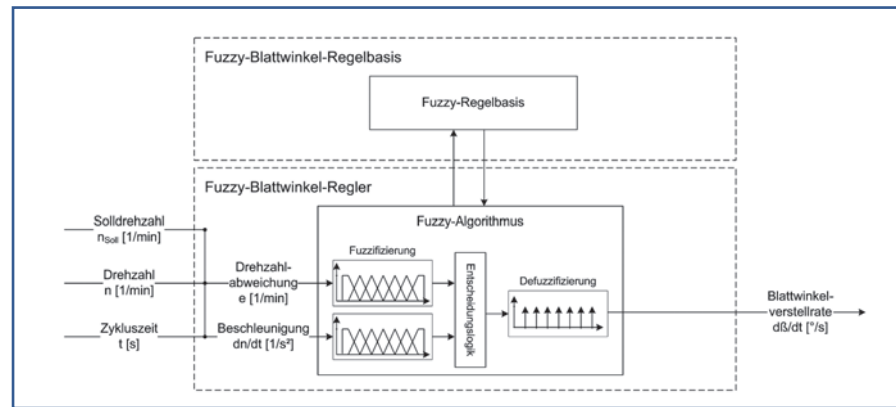
Der Optimierungsprozess kann sich daher aufwendig und langwierig gestalten, da sich das Optimum erst durch mehrere Iterationsschleifen herausarbeiten lässt. Bei diesem Optimum handelt es sich auch lediglich um einen bestmöglichen Kompromiss. Zusätzlich zu dieser Vor-Auslegung ist bei der Inbetriebnahme der Anlage im Feld in der Regel eine Nachoptimierung der in der Simulation ermittelten Parameter erforderlich. Diese kann sich als langwierig erweisen, da die hierzu erforderlichen

Windgeschwindigkeiten nicht auf Abruf verfügbar sind und zudem – abhängig vom Standort des Windrades – nur zeitlich begrenzt auftreten. Kurzum: PID-Regler basieren auf dem Modell der Anlage, an dem sich die Parameter orientieren. Sollte sich das Modell verändern, verringert sich automatisch die Regelgüte.

Fuzzy-Regler hingegen basieren auf Regeln. Auch wenn sich das Modell stark verändern würde, wäre der grundsätzliche Prozess noch der gleiche und die Regeln immer noch voll gültig. Auf Basis dieser Regeln wird der Stellwert berechnet, weshalb auch keine genauen Informationen über das System vorhanden sein müssen. Mit anderen Worten: Der Regler spiegelt das menschliche Verhalten des Experten wieder, der diese Regeln entworfen hat, und ermöglicht es, auf jeden Zustand individuell zu reagieren. Dadurch sind Fuzzy-Regler wesentlich robuster gegenüber Änderungen der Anlage, des

(Bilder: Beckhoff)

Bild 1. Genereller Aufbau des Fuzzy-Blattwinkel-Reglers: Als Eingang dient die Rotordrehzahl, aus der sich die Drehzahl-Abweichung und Beschleunigung berechnen lassen. Diese Werte werden fuzzifiziert und den Bändern zugeordnet. Die Regeln aus der Regelbasis werden in der Entscheidungslogik abgearbeitet und über das Defuzzifizieren die Blattwinkel-verstellrate ermittelt.



Sollwerts oder Störungen. Außerdem ist die Parametrierung wesentlich vereinfacht, denn es wird kognitives und nicht mathematisches Wissen benötigt. Nicht zuletzt sind Fuzzy-Regler im Gegensatz zu den heute vorwiegend eingesetzten PID-Reglern bereits nicht-lineare Zustandsregler. Aus anderen Anwendungen mit ähnlichen Randbedingungen (zum Beispiel Inverses Pendel) ist bereits bekannt, dass bei stark nicht-linearen Systemen der Einsatz von Fuzzy-Reglern zu besseren Regелеigenschaften führt.

Als Nachteil von Fuzzy-Reglern werden häufig die schwierige Stabilitätsüberprüfung und das fehlende systematische Entwurfsverfahren angesprochen. Zum Prüfen der Stabilität würde ein Modell benötigt, welches dann wiederum zum Einstellen eines PID-Reglers verwendet werden könne. Jedoch benötigt der Fuzzy-Regler nur ein unscharfes und kein detailliertes mathematisches Modell. Bei Windkraftanlagen ist das Modell immer nur eine Nachbildung, da sich die realen Verhältnisse des Windes, die Verwirbelungen und die Aerodynamik immer nur näherungsweise betrachten lassen. Änderungen der Luftdichte, der Rotorblätter sowie Änderung der Trägheit im Antriebsstrang können hier bereits starke Änderungen des aerodynamischen Verhaltens des Rotors bewirken.

Bild 2. Die Definition der Drehzahlbänder: Um die Drehzahl-Abweichung werden die drei Drehzahlbänder gelegt. Kleine Abweichungen befinden sich im ersten Band, größere werden dann dem zweiten und dritten Drehzahlband zugeordnet. Die Breite der Bänder wird durch die Parameter bestimmt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen hat Beckhoff für die Automatisierungssoftware TwinCAT einen Fuzzy-Regler entworfen, um den Blattwinkel und somit die Rotordrehzahl effektiver zu regeln. Durch dessen Einsatz verspricht man sich außerdem eine Verringerung des Aufwandes bei der Auslegung des Reglers. Da das Verständnis für den Regler wesentlich vereinfacht wird, lässt sich die benötigte Zeit zur Optimierung deutlich verkürzen. Außerdem soll ein Regler ohne Änderung für verschiedene Anlagen verwendbar sein, unabhängig von Rotordurchmesser oder Turmhöhe. Da der Fuzzy-Regler ein Mehrgrößenregler ist, kann damit wesentlich flexibler auf die verschiedenen Zustände der Anlage reagiert werden. Diese Vorteile kommen jedoch nur dann zum Tragen, wenn die Regelgüte sowie der Energie-Ertrag vergleichbar sind und die Anlagenlasten dadurch nicht erhöht werden. Ließen sich die Lasten wiederum verringern, erweist sich der Fuzzy-Regler als wesentlich effizienter.

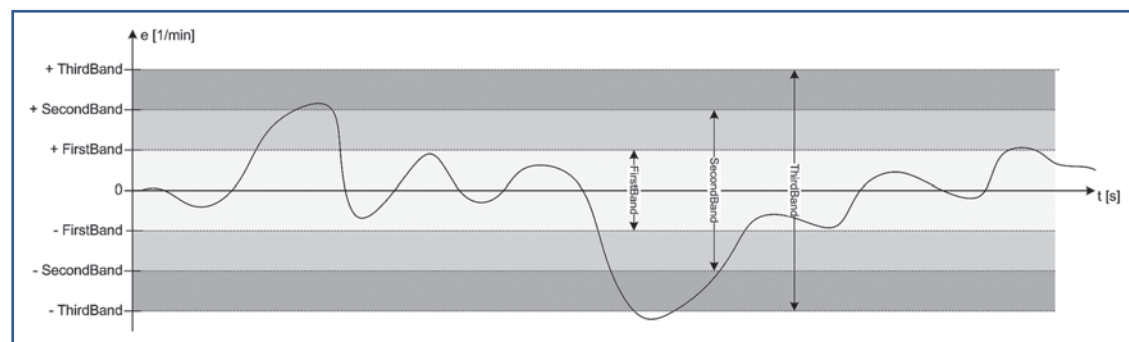
Aufbau des Fuzzy-Reglers

Der Fuzzy-Blattwinkel-Regler überwacht grundsätzlich die Rotordrehzahl und gibt eine Blattwinkelverstellrate aus (siehe Bild 1). Intern erfolgt eine Berech-

nung der Drehzahl-Abweichung zum Sollwert sowie der Beschleunigung des Rotors. Die beiden Eingänge werden Fuzzy-Mengen zugeordnet, auch Fuzzifizierung genannt. Diese Zuordnung geschieht über Bänder, die um den jeweiligen Eingang (Drehzahl-Abweichung und Beschleunigung) gelegt werden. Eine Drehzahl-Abweichung von Null entspräche dem Mittelpunkt, eine leichte Abweichung würde dem ersten Drehzahlband zugeordnet werden und höhere Abweichungen dann jeweils dem höheren Drehzahlband (siehe Bild 2).

Insgesamt werden drei Bänder für den jeweiligen Eingang verwendet. Dabei wird zwischen negativer und positiver Abweichung unterschieden und ermittelt, ob der Wert gegebenenfalls außerhalb der definierten Bänder liegt. Für den Ausgang, sprich für die Blattwinkelverstellrate, werden wiederum drei Bänder angelegt – von langsamer bis zur maximalen Verstellrate, jeweils positiv und negativ. Die Festlegung der Breite dieser Bänder erfolgt über Parameter. Daraus ergeben sich jeweils drei Parameter für jeden Eingang (Drehzahl-Abweichung, Beschleunigung) sowie drei weitere Parameter für den Ausgang (Verstellrate).

Auf Basis dieser Fuzzy-Mengen beziehungsweise Drehzahlbänder erfolgt



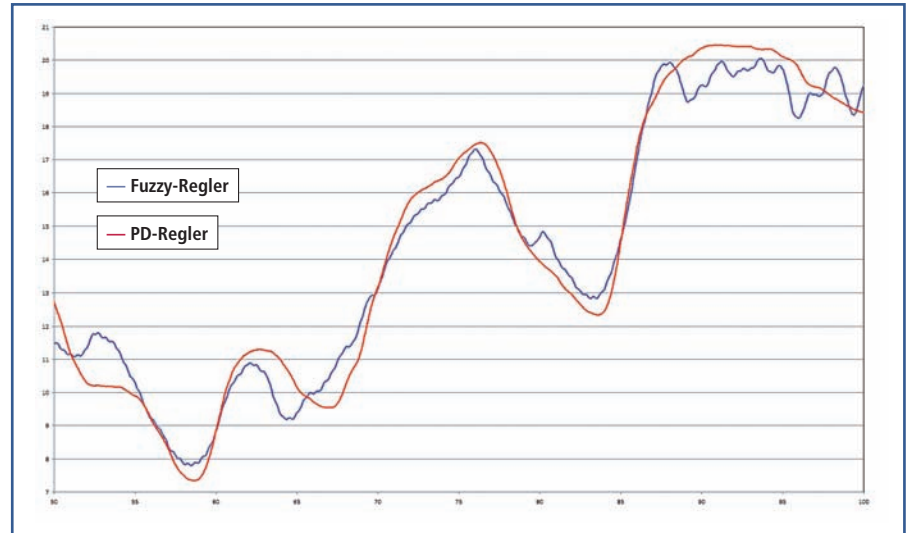


Bild 3. Vergleich des Blattwinkels vom PD- und Fuzzy-Regler: Zu erkennen ist, dass sich der Blattwinkel vom Fuzzy-Regler wesentlich schneller verändert, dadurch jedoch wesentlich früher eine Drehzahl-Abweichung ausregeln kann.

anschließend die Auswertung der Regeln. Insgesamt wurden 49 Regeln angelegt – eine zu jedem möglichen Zustand. Die Definition dieser Regeln geschieht auf Basis der Zuordnung zu den jeweiligen Bändern der Eingänge sowie des verwendeten Ausgangs. Eine Regel könnte beispielsweise lauten: Wenn die Drehzahl-Abweichung im ersten positiven Band ist und die Beschleunigung im zweiten negativen Band, setze die Blattwinkelverstellrate auf die erste negative Rate. Eine negative Blattwinkelverstellrate würde bedeuten, das Rotorblatt in den Wind zu drehen und den Leistungsbeiwert zu erhöhen.

An dieser Regel lässt sich die Flexibilität des Fuzzy-Reglers erkennen: Ein P-Regler hätte bei positiver Drehzahl-Abweichung nur eine positive Verstellrate ausgegeben. Da der Rotor jedoch bereits eine negative Beschleunigung aufweist – die Drehzahl sich also verringert – würde der Rotor weiter gebremst. Folge der Unterdrehzahl wäre schließlich eine Verringerung des Energie-Ertrages. Die Regel des Fuzzy-Reglers hingegen geht auf die negative Beschleunigung ein. Anstatt die Rotordrehzahl weiter zu verringern, versucht der Regler gegen die Beschleunigung zu wirken, um eine Unterdrehzahl zu vermeiden. Damit soll gezielter auf Nenndrehzahl geregelt und der Energie-Ertrag somit erhöht werden.

Durch die Auswertung aller Regeln, deren Bedingungen erfüllt sind, werden gewichtete Ausgänge ermittelt und die Blattwinkelverstellraten berechnet. Dieser Vorgang nennt sich Defuzzifizierung. Um zu schnelle Stellwert-Änderungen zu vermeiden, erfolgt noch eine Glättung der Blattwinkelverstellrate über einen Filter erster Ordnung.

Eingangsmengen, Regeln und Ausgangsmengen stellen gemeinsam die Wissensbasis des Reglers dar. Die Regeln sind fest implementiert und nicht änderbar, da sie für die Stabilität des Reglers sorgen und das Expertenwissen über den Prozess beinhalten. Die Eingangs- und Ausgangsmengen lassen sich über die Bänder ändern und somit, falls nötig, an den verwendeten Rotor anpassen. Je kleiner die Drehzahlbänder, desto stärker reagiert der Regler. Äquivalent verhält sich der Regler für die anderen Bänder. Damit ist die Wissensbasis sehr einfach gestaltet und auch für Nicht-Regelungstechniker nachvollziehbar.

Verifizierung des Reglers in der Praxis

Die Verifizierung des entworfenen Fuzzy-Reglers erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Windnovation aus Berlin. Anhand eines vorhandenen Anlagen-Modells wurde in der Konstruktionssoftware „Bladed“ von der Firma GL Garrad Hassan der Fuzzy-Blattwinkel-Regler mit einem konventionellen PD-Regler verglichen.

Windnovation hatte zuvor bereits die vollständige Lastenrechnung und Auslegung des PD-Reglers für diese Anlage durchgeführt. Somit waren die Ergebnisse uneingeschränkt miteinander vergleichbar.

Um den PD-Regler so zu parametrieren, dass sich die Rotordrehzahl stabil regeln ließ, benötigten die Experten von Windnovation mehrere Tage! Anschließend gingen weitere Wochen ins Land, um die optimalen Regelparameter zu ermitteln. Zum Vergleich wurde schließlich der Fuzzy-Regler in diese Lastenrechnung implementiert und mit einem Standard-Regelsatz verwendet. Ergebnis war: Die Rotordrehzahl ließ sich sofort stabil regeln und der Parametersatz wurde für die folgenden Lastenrechnungen nicht mehr verändert. Die verwendeten, 69 Lastfälle zur Simulation wurden nach den Richtlinien zur Zertifizierung von Windenergieanlagen vom Germanischen Lloyd erzeugt und enthielten Windprofile mit Windgeschwindigkeiten von 3 bis 25 m/s nach der Windklasse IIA. Diese Zeitreihen wurden jeweils für den konventionellen Regler und den Fuzzy-Regler simuliert, die Regelgüte, Extremlasten sowie Betriebsfestigkeitslasten ausgewertet und untereinander verglichen. Die Ermittlung der Regelgüte erfolgte dabei durch Auswertung der Rotordrehzahl, der elektrischen Leistung und der Blattwinkelverstellung. Über alle Lastfälle wurden schließlich die Mittelwerte und Abweichungen zu den Sollwerten berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter Verwendung des Fuzzy-Reglers die durchschnittliche Abweichung der Rotordrehzahl vom Sollwert um etwa 40 % geringer ist. Außerdem hat sich die durchschnittliche Rotordrehzahl um etwa 0,2 % und die elektrische Leistung um etwa 0,4 % erhöht. Dazu benötigt der Fuzzy-Regler eine erhöhte Aktivität der Blattwinkelverstellung (ungefähr 16 %; Durchschnitt der Blattwinkelstellrate – siehe Bild 3). Die Extremlasten erreichten bei beiden Reglern vergleichbare Werte. Gleiches gilt für die Belastungen auf den Rotorblättern. Die Auswertung der Betriebsfestigkeitslasten hat ergeben, dass diese unter Verwendung des Fuzzy-Reglers reduziert werden. Davon ausgenommen sind die Lasten, welche auf den Turm wirken.

Konkret konnten die Lasten auf Antriebsstrang und Rotor durchschnittlich um 4 %, teilweise sogar um bis zu 13 % verringert werden. Trotz der gesteigerten Blattwinkelverstellung ergab sich auch eine Verringerung der Lasten auf Nabe, Rotorblatt und Blattwurzel.

Noch genügend Raum für weitere Optimierung

In Summe lässt sich festhalten: Der Fuzzy-Regler lieferte vergleichbare und teilweise sogar bessere Ergebnisse, obwohl keine Optimierung der Parameter stattgefunden hat. Das Einstellen der Parameter wird aufgrund der verständlichen Wissensbasis vereinfacht und der Aufwand wesentlich verringert. Zusätzliche Optimierungen anhand der jeweiligen Anlage würden sicherlich zu weiteren Verbesserungen führen. Mit anderen Worten: Selbst bei einer Grobauslegung der Parameter hat der Fuzzy-Regler die Erwartungen erfüllt und sich für den Einsatz zur Blattwinkelregelung als optimal erwiesen.

Jetzt gilt es, die Ergebnisse in weiteren Lastenrechnungen zu verifizieren. Zudem muss sich der Regler auf einer realen Anlage bewähren. Darüber hinaus ist es möglich, den Regler mittels Filter zu erweitern und zu optimieren.

Durch die Auswertung zusätzlicher Eingänge könnte auf etwaige Umstände eingegangen und vorausschauend reagiert werden. So könnte zum Beispiel die Turmschwingung als zusätzlicher Eingang verwendet werden, um adaptiv zu regeln, die Schwingung zu dämpfen und die Turmlasten zu reduzieren. Zusätzliche Ausgänge könnten den Regler mit mehr Funktionen ausstatten und ihm ermöglichen, noch tiefer in den Prozess einzugreifen. Last but not least würde die Kombination mit einem neuronalen Netz – auch Neuro-Fuzzy-System genannt – ein automatisches Optimieren der Parameter ermöglichen. gh



Nils Johannsen

ist in der Beckhoff-Niederlassung in Lübeck im Bereich Applikationssoftware für Windkraftanlagen tätig.