

Ein Konzept zur Betriebsführung von Wind-Diesel-Systemen mit Kurzzeitenergiespeichern

A Concept for the Operation Control of Wind/Diesel-Systems with Short-Time Storages

Lukas, Peter; Schöne, Armin, Institut für Meß-, Regelungs- und Systemtechnik, Universität Bremen

Summary

Due to the fluctuations in wind power, which commonly do not correlate with the power demand, it is indispensable to employ storage capacities in an isolated grid. The presented paper suggests to use electrically coupled fly wheel as storage units in wind diesel systems that are able to absorb and deliver large quantities of energy within short periods of time. A fuzzy logic based operating system is shown to be easily expandable in order to satisfy the demands, posed on the operating system when including storage media into the isolated grid. Simulations with varying storage capacities have been carried out in order to investigate the performance of such a wind diesel system in terms of fuel consumption, energy losses, number of diesel engine starts and time of operation. The results show that the power output of such a system can be levelled to a certain degree. However, too large storage capacities lead to considerable energy losses. Thus, for future work, the authors suggest to include battery storage in the wind diesel system as well.

1. Einleitung

Zur dezentralen Versorgung kleiner Verbrauchergruppen mit elektrischer Energie fernab der öffentlichen, zentralen Stromversorgung werden meist Dieselsysteme eingesetzt. Eine derartige dezentrale Energieversorgung ist überall dort notwendig, wo es entweder nicht möglich oder zu teuer ist, eine zentrale Energieversorgung mit größeren Kraftwerkseinheiten durchzuführen. Dies tritt vor allem in ländlichen, schwach besiedelten Gegenden, auf Inseln und häufig auch in Entwicklungsländern auf. Viele Standorte von entsprechenden dezentralen Energieversorgungssystemen sind durch ihre Windverhältnisse sehr gut für den zusätzlichen Einsatz von Windkraftanlagen geeignet. Durch die Verwendung von Windkraftanlagen zur elektrischen Energiegewinnung sollen vor allem die Stromerzeugungskosten gesenkt sowie der Dieselmotorkraftstoffverbrauch und somit der Schadstoffausstoß verringert werden. Es ist aber nicht möglich, die bestehenden Dieselsysteme einfach durch Windkraftanlagen zu ersetzen, da bei den Windkraftanlagen die abgegebene Leistung von der Windgeschwindigkeit abhängt, die stark schwankt und nicht beeinflussbar ist. Das fluktuierende Windenergieangebot korreliert im allgemeinen nicht mit den ebenfalls stark schwankenden Verbraucheranforderungen in Inselnetzen, weswegen es unumgänglich ist, zusätzlich zu den Windkraftanlagen Systeme einzusetzen, die die Differenz zwischen Verbraucheranforderungen und zur Verfügung gestellter Windenergie ausgleichen können. Deshalb greift man auf Dieselsysteme zurück und betreibt Inselnetze mit einer entsprechenden Kombination aus Windkraftanlagen und Dieselsystemen.

Hinsichtlich des technischen Aufbaus und der Betriebsführung von Wind-Diesel-Systemen werden unterschiedliche Konzepte verfolgt. Bei den einfachsten Konzepten erfolgt die Energieerzeugung nur mit einer Kombination aus Windkraftanlage und Dieselgenerator [1]. Hierbei ist aber der Verschleiß des Dieselmotors recht groß, da der Dieselmotor entweder oft ein- und ausgeschaltet wird oder aber häufig in Bereichen niedriger Leistungen läuft, was einen schlechten Wirkungsgrad des Dieselgenerators zur Folge hat.

Um diese Nachteile von reinen Wind-Diesel-Systemen zu vermindern, werden in anderen Konzepten Speicher eingesetzt, die in einer Übergangszeit die Differenz zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung übernehmen können. Als Energiespeicher sind Batteriesysteme heute weit verbreitet und sie werden bei bestehenden Wind-Diesel-Systemen auch eingesetzt. Diese Systeme sind entweder so ausgelegt, daß sie eine mittlere Verbraucherleistung über mehrere Stunden zur Verfügung stellen können, das heißt als Langzeitspeicher eingesetzt werden [2], oder aber daß sie als Kurzzeitspeicher dienen und somit die mittlere Verbraucherleistung nur über wenige Minuten zur Verfügung stellen

können [3]. Die Batteriespeicher müssen aber so ausgelegt werden, daß sie auch größere Energiemengen kurzzeitig aufnehmen beziehungsweise abgeben können, damit zum Beispiel Windböen oder auch das Zu- und Abschalten größerer Verbraucher durch die Speicher abgepuffert wird. Dies setzt im allgemeinen eine entsprechend größere Dimensionierung der Batteriespeicher voraus.

Für die Aufnahme beziehungsweise Abgabe größerer Energiemengen während kürzerer Zeitintervalle eignen sich spezielle Rotationsspeicher. Diese werden nicht mechanisch sondern elektrisch gekoppelt, d.h. die elektrische Energie wird in mechanische Energie, die von einem Schwungrad gespeichert wird, umgewandelt. Vorgeschlagen wurde bislang einerseits die direkte Ankopplung des Schwungrades an die mechanische Welle zwischen Dieselmotor und Synchrongenerator [4]. Im folgenden wird die Möglichkeit betrachtet, den Rotationsspeicher mit einem eigenen Motor/Generator zu betreiben und ihn direkt elektrisch mit dem elektrischen Energieversorgungsnetz zu koppeln [5]. Aus der Sicht der Regelung und Betriebsführung bietet dieses Konzept grundsätzliche Vorteile. Vor allem läßt sich der oder lassen sich die Rotationsspeicher bei rasch wechselnden und hohen Drehzahlen betreiben, die unabhängig von den Drehzahlen von Dieselmotor und Windkraftanlage sind.

Ein verkoppeltes System, das aus unterschiedlichen Teilsystemen zur Energieerzeugung sowie Energiespeichern zusammengesetzt ist, benötigt eine Betriebsführung, die einen sicheren Betrieb des Gesamtsystems und eine ausreichende Versorgungssicherheit gewährleistet. Die Konzepte für die Betriebsführung von Wind-Diesel-Systemen mit Energiespeichern, die bisher benutzt werden, sind meistens sehr einfach gehalten und basieren entweder auf statistischen Methoden [6] oder speziell entwickelten Regelsystemen, bei denen nur einige ausgewählte Betriebszustände berücksichtigt werden [2],[3]. In der vorliegenden Arbeit soll für die Betriebsführung ein verallgemeinertes Konzept verwendet werden, bei dessen Entwurf Fuzzy-Algorithmen zugrunde gelegt werden [7]. Der Systemaufbau ist so konzipiert, daß sich die Betriebsführungssysteme recht einfach erweitern und auf andere Anlagenkonfigurationen übertragen lassen.

2. Energieversorgungssysteme für Inselnetze

Zur Untersuchung des Betriebsführungskonzeptes soll als Beispiel ein Inselsystem betrachtet werden, das aus einer Windkraftanlage, einem Dieselgenerator, einem Rotationspeicher und Belastungswiderständen besteht (Abb. 2.1).

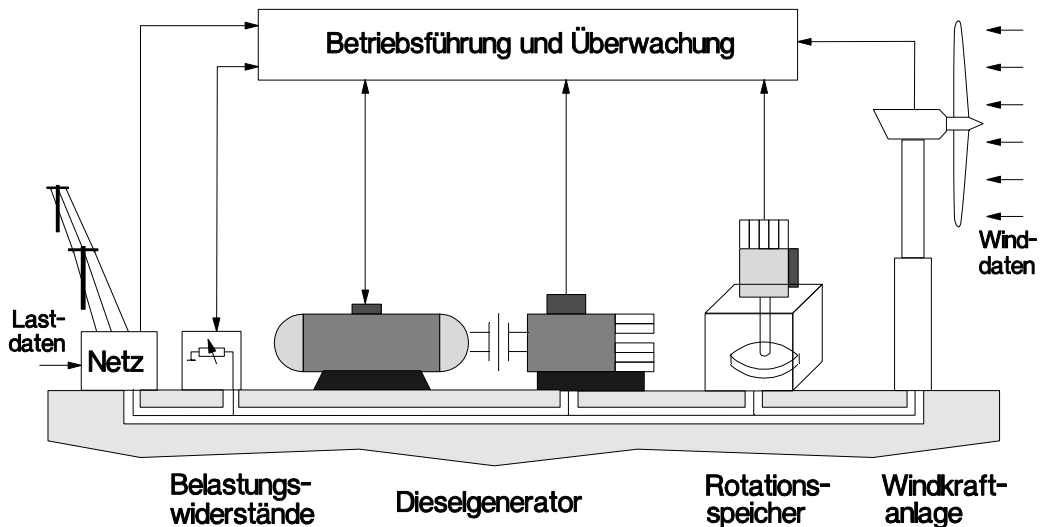


Abb. 2.1: Energieversorgungssystem für ein Inselnetz

Fig. 2.1: Energy Supply System for an Isolated Grid

Für dieses System wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das es gestattet, die entworfenen Betriebsführungsstrategien an einem Digitalrechner zu erproben. Bei solchen rechnergestützten Untersuchungen kommt es in erster Linie darauf an, Aussagen über das Langzeitverhalten des Gesamtsystems zu machen. Typische Simulationszeiträume sind hierbei einige Tage bis zu einem Jahr. Um die gesamte Simulation mit einem erträglichen Zeitaufwand durchführen zu können, wurden bei der Modellbildung der einzelnen Teilsysteme sogenannte Langzeitmodelle verwendet [8]. Bei diesen mathematischen Modellen werden hauptsächlich die Energieflüsse im Gesamtsystem betrachtet und weniger eine genaue mathematische Nachbildung der Einzelkomponenten angestrebt. Dementsprechend konnte eine Sekunde als Zeitinkrement der Rechenschritte gewählt werden. Hierdurch werden nur langsame Vorgänge, zum Beispiel Einschaltverzögerungen, berücksichtigt, und schnelle Vorgänge, zum Beispiel die transienten oder subtransienten Vorgänge in den elektrischen Generatoren, bleiben unberücksichtigt.

Anhand solcher Langzeitsimulationen ist es nun möglich, Aussagen über den Kraftstoffverbrauch des Dieselmotors, die geeignete Speichergröße und die Ausnutzung des Gesamtsystems zu machen. Möchte man aber zusätzliche Informationen über die Frequenz- und Spannungsstabilität haben, ist es unumgänglich, Kurzzeitsimulationen durchzuführen, bei denen die hier vernachlässigten transienten Vorgänge ebenfalls berücksichtigt werden. Solche Kurzzeitsimulationen werden aber nur für Simulationszeiträume im Sekunden- oder Minutenbereich durchgeführt, da hier aufgrund der komplizierten dynamischen nichtlinearen Modelle die Rechenzeiten sehr groß werden. Als Grundlage der Untersuchung der Betriebsführung durch Langzeitsimulationen genügen im allgemeinen die im folgenden dargestellten mathematischen Modelle.

2.1 Windkraftanlage

Das Verhalten der Windkraftanlage kann für die Langzeitsimulation durch ein nichtlineares statisches Modell in Form einer Leistungskennlinie, die meistens von den Herstellern zur Verfügung gestellt wird [9], sowie einem dynamischen Übertragungsglied, das die Anfahrtdauer wiedergibt, beschrieben werden. Die Leistungskennlinie erfaßt direkt das statische Ein-Ausgangsverhalten des Windkraftanlagenmodells. Einganggröße ist die Windgeschwindigkeit, Ausganggröße ist die von der Windkraftanlage zur Verfügung gestellte elektrische Leistung. Nach einem Stillstand, zum Beispiel bei Windstille, muß die Windkraftanlage, bevor sie wieder auf das Stromversorgungsnetz aufgeschaltet werden kann, zunächst mit dem Stromversorgungsnetz synchron arbeiten. Die Verzögerung, die hierdurch entsteht, wird mit der Anfahrtdauer beschrieben, die im verwendeten mathematischen Modell ebenfalls berücksichtigt wird.

2.2 Dieselgenerator

Eingangsgröße des Dieselgenerators ist die gewünschte Sollleistung, die von der Betriebsführung vorgegeben wird. Der Dieselgenerator stellt inklusive der Regeleinrichtung zur Leistungsregelung einen geschlossenen Regelkreis dar. Dieser wird als Verzögerungsglied modelliert. Zusätzlich wird auch hier wie bei der Windkraftanlage das Umschalten auf das Netz nach einem Stillstand durch ein Totzeitglied beschrieben. Ferner wird berücksichtigt, daß der Dieselgenerator eine Mindestzeit eingeschaltet sein muß. Ausgangsgrößen des Dieselgenerators sind die tatsächliche Leistung, die der Dieselgenerator an das Stromversorgungsnetz abgibt, sowie der Kraftstoffverbrauch des Dieselgenerators, der in erster Näherung als eine lineare Funktion in Abhängigkeit der Leistung des Dieselgenerators approximiert werden kann [10].

2.3 Rotationsspeicher

Der Rotationsspeicher wird im wesentlichen dadurch beschrieben, daß über die ihm zufließenden und die von ihm abgegebenen Energieströme integriert wird. Zusätzlich werden die Energieverluste durch die Lade-Entladezyklen sowie die vom Ladegrad abhängigen Verluste berücksichtigt. Begrenzungskennlinien sorgen dafür, daß zum einen die maximal zulässige Lade- bzw. Entladeleistung und zum anderen der Maximalwert der Energie, die in ihm gespeichert werden kann, nicht überschritten werden.

2.4 Belastungswiderstände

Die Belastungswiderstände werden durch eine Leistungskennlinie modelliert. Hierbei wird im Modell berücksichtigt, daß der Belastungswiderstand jeweils nur um ganz bestimmte Werte erhöht oder erniedrigt werden kann. Zum Beispiel kann alle 1kW eine Leistungsstufe zu- bzw. abgeschaltet werden. Die von den Belastungswiderständen aufgenommene Leistung wird vollständig in Wärme umgewandelt und ist damit komplett als Verlustleistung anzusehen. Um diese Verlustleistung zu verkleinern, kann man sich vorstellen, diverse Verbraucher anzuschließen, die auch längere Zeit ausgeschaltet sein können und die nur dann eingeschaltet werden, wenn genügend elektrische Energie erzeugt wird.

3. Systemeingangsdaten

Beim Betrieb von Wind-Diesel-Systemen in Inselnetzen sind die Windgeschwindigkeit und der elektrische Energieverbrauch unabhängige Systemeingangsgrößen, die auf das System einen erheblichen Einfluß haben, selber aber nicht beeinflussbar sind. Bei Simulationen von Inselnetzen müssen zeitliche Verläufe der Werte dieser Größen realitätsnah erzeugt und vorgegeben werden. Dies wird im folgenden etwas näher betrachtet.

3.1 Winddaten

Von realen Windmessungen erhält man typischerweise Mittelwerte über einen Zeitraum von jeweils 10 Minuten. Es besteht zwar die Möglichkeit, Windmeßdaten mit Abtastraten von 5 bis 20 Hz zu erhalten, diese sind dann aber nur für kurze Zeiträume, zum Beispiel für Zeiträume von maximal 500 Sekunden Dauer, vorhanden. Für die Simulation eines Systems, wie es in dieser Arbeit beschrieben wird, sind Abtastraten von ca. 1 Hz über einen längeren Zeitraum, zum Beispiel mehrere Monate, notwendig. Da diese Daten nicht zur Verfügung stehen, müssen synthetisierte Winddaten erstellt werden, die es ermöglichen, anhand vorhandener gemessener Mittelwerte die gewünschten Daten unter Berücksichtigung stochastischer Schwankungen zu erhalten. Hierzu wurde ein aus der Literatur bekanntes Simulationsmodell verwendet [11], bei dem sich die Windgeschwindigkeit aus dem zeitlichen Verlauf unterschiedlicher Einzelwindgeschwindigkeitskomponenten zusammensetzt. Die Windgeschwindigkeitskomponenten sind so definiert, daß sich die Windgeschwindigkeit $v_{\text{Wind}}(t)$ aus Gleichung (3.1) ergibt.

$$v_{\text{Wind}}(t) = v_y(t) + v_l(t) + v_h(t) + v_t(t) . \quad (3.1)$$

Die einzelnen Windgeschwindigkeitskomponenten werden bei der Simulation mit unterschiedlichen Frequenzen abgetastet. Die Summe der letzten Abtastwerte der Geschwindigkeitskomponenten ergibt den jeweils gültigen Wert $v_{\text{Wind}}(t)$.

Die typischen Abtastzeiten sowie die Zeitintervalle der einzelnen Anteile der Windgeschwindigkeit lassen sich wie folgt darstellen:

Anteil	Zeitintervall	Abtastzeit im Modell
$v_y(t)$	2 Monate bis 1 Jahr	1 Monat
$v_l(t)$	10 Stunden bis 2 Monate	4 Stunden
$v_h(t)$	20 Minuten bis 10 Stunden	10 Minuten
$v_t(t)$	10 Sekunden bis 20 Minuten	1 Sekunde

Die Bestimmung der einzelnen Teilgeschwindigkeiten $v_l(t)$, $v_h(t)$ und $v_t(t)$ erfolgt über teilweise stochastische Modelle, wobei die Parameter in Abhängigkeit der Jahreszeit schwanken können. Für die Teilgeschwindigkeit $v_y(t)$ werden jahreszeitliche Mittelwerte verwendet, die nahezu für jeden Standort bekannt sind.

Durch diese Aufteilung der Windgeschwindigkeit besteht die Möglichkeit, die synthetisierten Teile sehr einfach teilweise durch reale Winddaten zu ersetzen. Sind zum Beispiel über einen längeren Zeitraum 10 Minuten-Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Einzelmessungen bekannt, kann das Winddatenmodell aus diesen realen Daten und dem mittelwertfreien Anteil $v_t(t)$ zusammengesetzt werden.

3.2 Lastdaten

Zur Simulation des genauen Betriebsverhaltens eines Energieversorgungssystems ist es ferner erforderlich, Daten über den Verlauf der von den Verbrauchern benötigten Leistungen zu erhalten, und zwar ebenso wie bei den Winddaten mit einer Abtastrate von ca. 1 Hz. Die aufgrund üblicher Messungen des Verbrauchs zur Verfügung stehenden Lastdaten sind Mittelwerte über einen Zeitraum von jeweils 15 Minuten. Diese Lastdaten sind reale Daten einer kleinen Gemeinde, die von einem Energieversorgungsunternehmen zur Verfügung gestellt wurden. Für die Zwecke einer möglichst realitätsnahen Simulation werden kurzzeitige Schwankungen im Sekundenbereich dadurch erzeugt, daß den 15 Minuten Mittelwerten der realen Leistungsverläufe ein stochastischer Prozeß überlagert wird.

4. Betriebsführungskonzept auf Basis der Fuzzy-Logik

Zur Betriebsführung von Wind-Diesel-Systemen wurde ein Konzept entworfen, das von seiner Struktur her Analogien zu konventionellen regelbasierten Betriebsführungssystemen aufweist, das aber vollständig auf den Grundlagen der Fuzzy-Logik aufbaut. Zur näheren Erläuterung dieses Konzeptes ist es zunächst erforderlich, auf Zadehs Fuzzy-Logik einzugehen.

4.1 Zur Theorie der Fuzzy-Logik

Grundlage der bekannten Digitaltechnik oder auch der zweiwertigen Entscheidungslogik ist die Definition von Variablen, von denen jede nur zwei verschiedene Werte annehmen kann. Diese Werte sind für alle Variablen einheitlich festgelegt und werden z.B. durch die Elemente 0 und 1 bezeichnet. In der Digitaltechnik werden Beziehungen zwischen solchen Variablen mittels der Schaltalgebra formuliert, einer Booleschen Algebra. Die Fuzzy-Logik nach Zadeh [12] beruht darauf, daß die angeführte Definition von Variablen ganz wesentlich verallgemeinert wird. Diese allgemeinere Definition von Variablen entspricht eher derjenigen, die bei der menschlichen Wissensverarbeitung üblich ist [13].

Im folgenden soll die Anwendung der Fuzzy-Logik speziell für regelungstechnische Größen erläutert werden. Eine solche regelungstechnische Größe ist die Regeldifferenz x_d . Sie liege als stetige Größe vor, die jeden beliebigen Wert zwischen -1 und +1 annehmen kann. Diese stetige Größe x_d kann man gemäß Abb.4.1 in eine Fuzzy-Variable transformieren, deren Werte mittels Fuzzy-Elementen E_i sowie Zugehörigkeiten zu diesen Fuzzy-Elementen $\mu_{x_d}(E_i)$ ausgedrückt werden.

In Abb.4.1 werden der Regeldifferenz x_d je nach ihrem Wert die Fuzzy-Elemente "Negativ", "Null" oder "Positiv" zugeordnet. Ist zum Beispiel die Regeldifferenz $x_d=-0.4$, so wird der Wert der zugehörigen Fuzzy-Variablen durch das Fuzzy-Element "Null" mit einer Zugehörigkeit $\mu_{x_d}(\text{Null})=0.2$ und das Fuzzy-Element "Negativ" mit einer Zugehörigkeit $\mu_{x_d}(\text{Negativ})=0.8$ angegeben.

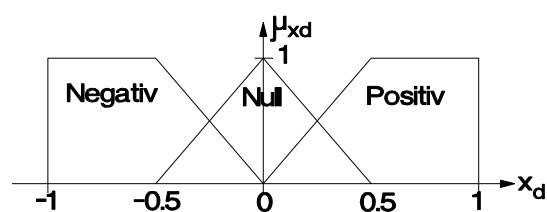


Abb. 4.1: Zuordnung einer Fuzzy-Variablen mit drei Elementen und entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen zur stetigen Größe Regeldifferenz x_d

Fig. 4.1: Fuzzy Variable Comprising Three Elements as Function of the System Deviation

Die mengentheoretischen Grundlagen der Verknüpfung verschiedener Fuzzy-Variablen wurden von Zadeh [12] entworfen. Hierbei stellen die Booleschen Algebren einen Spezialfall der Fuzzy-Logik dar.

Mamdani verwendete die Fuzzy-Logik zum ersten Mal auch für Regelungsaufgaben [14]. Der Reglerentwurf nach Mamdani ist in Abb.4.2 als Blockschaltbild dargestellt.

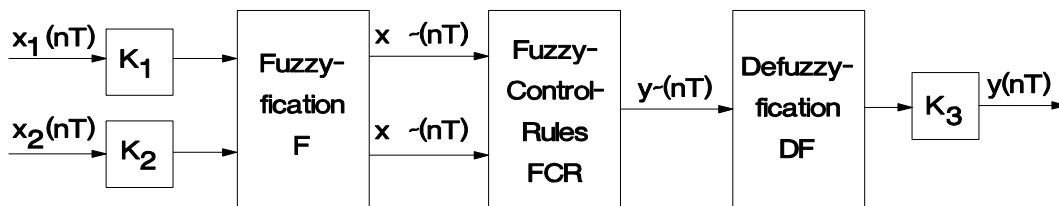


Abb. 4.2: Fuzzy-Regelungskonzept nach Mamdani
 Fig. 4.2: Fuzzy Control Scheme According to Mamdani

In der Fuzzyfication werden, wie in Abb.4.1 bereits beispielhaft dargestellt, die mit K_1 bzw. K_2 gewichteten Werte $x_1(nT)$ bzw. $x_2(nT)$ von zwei Reglereingangsgrößen in den Zeitpunkten $t=nT$ in Fuzzy-Variable $x_1\sim(nT)$ bzw. $x_2\sim(nT)$ umgewandelt. Die Zuordnung der Elemente der Fuzzy-Variablen der Eingangsgrößen zu den Elementen der Fuzzy-Variablen $y\sim(nT)$ der Ausgangsgröße erfolgt in den Fuzzy-Control-Rules. Diese Zuordnung erfolgt in den meisten Fällen in Form von Regeln, zum Beispiel *Wenn* Element der Eingangsgröße 1 Null *und* Element der Eingangsgröße 2 Negativ *dann* Element der Ausgangsgröße Positiv. Hierdurch hat man bei diesem Teil des Fuzzy-Reglers nun die Möglichkeit, gezielt das Wissen über die zu regelnde Strecke in den Regelalgorithmus mit einzubeziehen. Zuletzt wird in der Defuzzyfication aus dem jeweiligen "Wert" der Fuzzy-Variablen der Ausgangsgröße, der durch bestimmte Elemente und bestimmte Zugehörigkeiten zu diesen Elementen gegeben ist, über eine mathematische Verknüpfung, zum Beispiel eine Schwerpunktsbestimmung, ein Wert für die stetige Ausgangsgröße $y(nT)$ gebildet.

Dieses Konzept kann auch auf der übergeordneten Betriebsführungsebene angewendet werden, da gerade bei Betriebsführungsstrategien das Wissen eines Experten eine überaus wichtige Rolle spielt und die Fuzzy-Logik sich zur Beschreibung der menschlichen Wissensverarbeitung eignet [13].

4.2 Einsatz der Fuzzy-Logik bei der Betriebsführung

Zur Betriebsführung komplexer Prozesse, zu denen auch ein Wind-Diesel-System zählt, werden immer mehr regelbasierte Systeme eingesetzt, wie sie allgemein in Abb.4.3 dargestellt sind [15].

Im Programmteil "Prozeßzuordnung" werden die Meßgrößen in eine bestimmte Form gebracht, die von der Regelverarbeitung interpretiert werden kann. Diese Form besteht beim vorgestellten Konzept aus Fuzzy-Elementen und deren Zugehörigkeiten, wie sie in Abschnitt 4.1 erläutert wurde, unabhängig davon, ob es sich um kontinuierliche Meßgrößen oder um Schaltzustände handelt. Ferner werden aus den Eingangsgrößen zusätzliche Zwischengrößen berechnet, die für die Auswertung des Prozeßzustandes von Bedeutung sind. Die Regelverarbeitung verknüpft nun die so aufbereiteten Eingangsgrößen sowie die berechneten und aufbereiteten Zwischengrößen miteinander zu den Ausgangsgrößen, wobei die auszuführenden Regeln aus der Regelbasis geholt werden. Die Ausgangsgrößen werden zum Schluß in der Prozeßzuordnung wieder so aufbereitet, daß sie als Stellsignale auf den Prozeß gegeben werden können. Hierbei werden für die Generierung der kontinuierlichen Stellgrößen die üblichen Verfahren der Defuzzyfication verwendet. Für die Schaltvariablen werden spezielle Verfahren angewendet, mit denen es möglich ist, über die Fuzzy-Variablen eine Konfliktbehandlung bei sich ausschließenden Schaltvorgängen durchzuführen.

In der Regelbasis ist also das gesamte Wissen über die Betriebsführung in Form von Regeln gespeichert. Dieses Wissen setzt sich zusammen aus den Regeln einer optimierten Betriebsführungsstrategie und den Regeln für die Einhaltung der gesamten Randbedingungen, die zur Aufrechterhaltung einer gesicherten Stromversorgung notwendig sind. Ferner können hier auch Regeln gespeichert sein, die zum Beispiel Unregelmäßigkeiten des Betriebes und damit eventuell verbundene Störungen auswerten und protokollieren. Zur Auswertung, Anzeige und Protokollierung von Störungen sind zusätzlich die Dialog- und die Erklärungskomponente erforderlich (in Abb. 4.3 gestrichelt gezeichnet), die so gestaltet sein müssen, daß sie von der eigentlichen Betriebsführung entkoppelt sind und die deshalb hier nicht näher betrachtet werden müssen. Ebenfalls nicht näher betrachtet wird die Regelgenerierungskomponente, mit der es möglich ist, das Wissen über den Prozeß in Form von strukturierten Regeln in die Regelbasis zu integrieren.

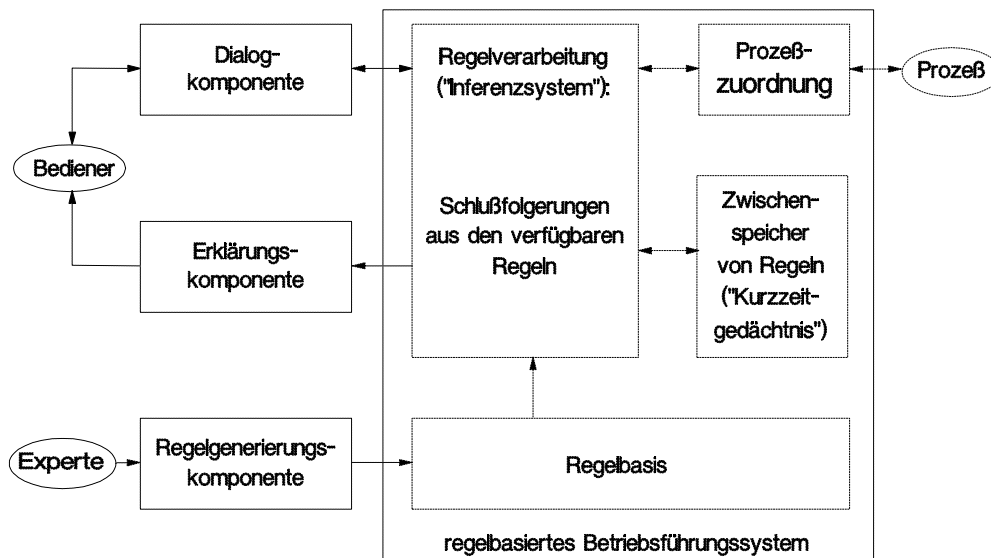


Abb. 4.3: Allgemeines regelbasiertes Betriebssystem
 Fig. 4.3: Operating System Based on Fuzzy Control

Für die folgenden Simulationen wurden als Eingangsgrößen die Schaltzustände und Leistungsverläufe der einzelnen Anlagen sowie der Ladezustand des Rotationsspeichers berücksichtigt. Hieraus wurden zusätzliche Zwischengrößen, zum Beispiel die Änderungen der Leistungsverläufe oder des Energieinhaltes des Rotationsspeichers, gebildet. Die Anzahl der Fuzzy-Elemente für jede Eingangs- bzw. Zwischengröße schwankt zwischen zwei und sieben. Die Regelbasis besteht momentan aus 65 Regeln. Als Stellsignale dienen die Schalter für den Dieselgenerator und die Belastungswiderstände sowie die Sollwertvorgaben dieser beiden Anlagen. Die Sollwertvorgaben erfolgen in der Weise, daß die Stromversorgung der Verbraucher gesichert ist und daß außerdem die Rotationsspeicher in zweckmäßiger Weise aufgeladen oder entladen werden.

5. Simulationsergebnisse

Um die Auswirkungen der Anzahl der Rotationsspeicher bzw. des Maximalwertes der Kapazität des Energiespeichers auf verschiedene relevante Parameter zu untersuchen, wurden Simulationen des Wind-Diesel-Systems mit unterschiedlichen Speichergrößen durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten jeweils für den Zeitraum von einer Woche, wobei für jede Speichergröße zwei unterschiedliche Windverläufe simuliert wurden, und zwar ein Schwachwindverlauf mit einem Wochenmittelwert von ca. 5m/s sowie ein Starkwindverlauf mit einem Wochenmittelwert von ca. 9.5 m/s. Der Mittelwert der elektrischen Last beträgt ca. 41 kW, ihr Maximalwert 60 kW. Als Windkraftanlage wurde eine Anlage mit einer Nennleistung von 80 kW bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s gewählt. Der Dieselgenerator hatte eine Nennleistung von 60 kW. Als größte Leistungsaufnahme der Belastungswiderstände wurden 80 kW, als zu- oder abschaltbare Stufen jeweils 1 kW angenommen.

Ein Rotationsspeicher kann die maximale Last von 60 kW 30 Sekunden lang aufnehmen beziehungsweise abgeben. Daraus ergibt sich für einen Rotationsspeicher eine maximale Speicherenergie von 1800 kW_s (=1.8 MJ). Die Speichergröße wird in derartigen Systemen auf die maximale Last bezogen, so daß die daraus resultierende Speicherzeit auch bei dem ungünstigsten Lastverlauf mindestens gewährleistet werden kann. Verwendet man im vorliegenden Fall zum Beispiel 4 Rotationsspeicher mit je 1800 kW_s speicherbarer Energie, so beträgt die relative Speichergröße:

$$\frac{4 \cdot 1800 \text{ kW}_s}{60 \text{ kW}} = 120 \text{ s} = 2 \text{ min}$$

Abb.5.1 zeigt den Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Speichergröße bezogen auf den Kraftstoffverbrauch eines reinen Dieselsystems. Man sieht hier deutlich, daß der Kraftstoffverbrauch sein Minimum bei wenigen Speicherminuten hat. In der Schwachwindphase ist der Kraftstoffverbrauch des Wind-Diesel-Systems bei der günstigsten Speichergröße etwa 30% niedriger als der Kraftstoffverbrauch beim Einsatz eines reinen Dieselsystems. Erheblich niedriger ist der Verbrauch in der Starkwindphase. Hier beträgt der Kraftstoffverbrauch etwa 20% des Verbrauchs eines reinen Dieselsy-

stems. Der Anstieg des Kraftstoffverbrauchs schon nach wenigen Speicherminuten ist auf die spezielle Art des Speichers zurückzuführen, da die laufenden Verluste der Rotationsspeicher durch die Rotation der Schwungmasse und die damit verbundene Reibung nicht vernachlässigbar sind. Die Kurven zeigen aber auch deutlich, daß bei einem entsprechend höheren Anteil an regenerativer Energie die Speichergröße ohne eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs bis zu einer relativen Speichergröße von einigen Minuten erhöht werden kann, weil die Verluste der Rotationsspeicher durch die überschüssige Leistung der Windkraftanlage, die diese kostenlos erzeugt, kompensiert werden.

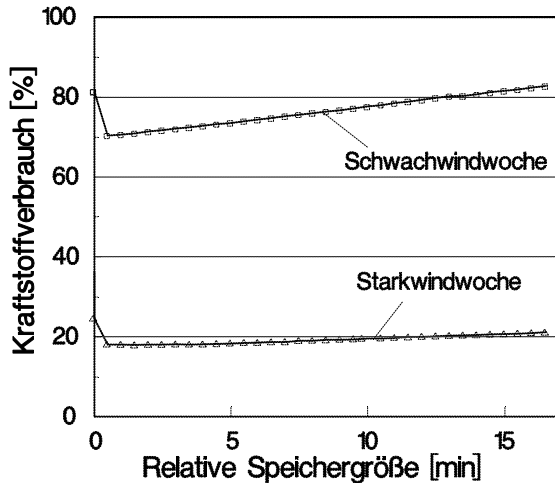


Abb. 5.1: Kraftstoffverbrauch bezogen auf den Kraftstoffverbrauch eines reinen Dieselsystems in Abhängigkeit von der relativen Speichergröße für eine Schwach- und Starkwindwoche

Fig. 5.1: Relative Fuel Consumption as a Function of Relative Storage Capacity for High and Low Wind Speeds.

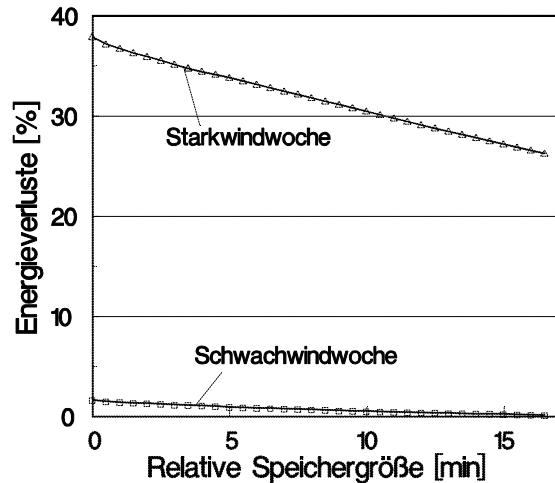


Abb. 5.2: Energieverluste in den Belastungswiderständen in Abhängigkeit von der relativen Speichergröße für eine Schwach und Starkwindwoche

Fig. 5.2: Energy losses as a Function of Relative Storage Capacity for High and Low Wind Speeds.

Ergänzend könnte man bei den Simulationen die installierte Leistung der Windkraftanlage variieren. Dann müßten bei den Simulationen aber auch die Investitionskosten für die Windkraftanlage berücksichtigt werden. Dies war unter den bisher den Simulationen zugrunde gelegten Annahmen nicht notwendig.

Abb. 5.2 zeigt, daß die Belastungswiderstände in der Schwachwindphase erheblich weniger Energie umwandeln müssen als in der Starkwindphase. Es ist aber auch deutlich zu sehen, daß mit zunehmender Speichergröße die Energieabfuhr durch die Belastungswiderstände geringer wird.

Die Abhängigkeit der Zahl der Einschaltungen (Abb. 5.3) sowie der relativen Einschaltzeit des Dieselmotors (Abb. 5.4) von der relativen Speichergröße werden, wie zu erwarten war, durch monoton fallende Kurven dargestellt. Den größten Gewinn erhält man bei beiden Größen, wie auch beim Kraftstoffverbrauch, durch den Einsatz der ersten Speicherstufe der relativen Speichergröße 30s. Hinsichtlich der Kraftstoffeinsparung lohnen sich weitere Speicher nicht. Andererseits kann man die Anzahl der Einschaltungen des Dieselmotors durch Verwendung sehr großer Speicher noch erheblich reduzieren, was man wiederum mit langsam zunehmendem Kraftstoffverbrauch bezahlen muß!

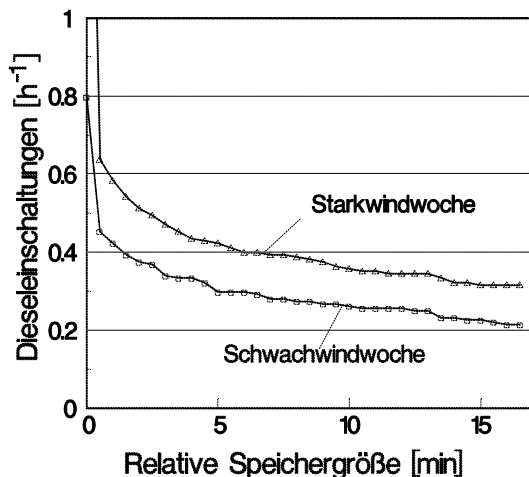


Abb. 5.3: Dieseleinschaltungen pro Stunde in Abhängigkeit von der relativen Speichergröße für eine Schwach- und Starkwindwoche.

Fig. 5.3: Number Diesel Engine Starts as a Function of Relative Storage Capacity for High and Low Wind Speeds.

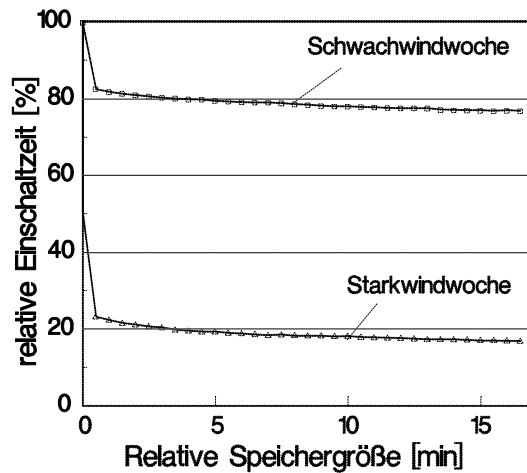


Abb. 5.4: Einschaltzeit bezogen auf den Simulationszeitraum in Abhängigkeit von der relativen Speichergröße für eine Schwach und Starkwindwoche.

Fig. 5.4: Relative Time of Operation as a Function of Relative Storage Capacity for High and Low Win Speeds.

6. Zusammenfassung

Durch das eingesetzte Betriebsführungskonzept für Wind-Diesel-Systeme mit elektrisch gekoppelten Rotationsspeichern konnte das Versorgungsnetz während des gesamten Simulationszeitraumes im Gleichgewicht gehalten werden, das heißt, die Last konnte zu jedem Zeitpunkt durch die Energieerzeuger sowie die Speicher gedeckt, beziehungsweise die überschüssige Energie durch die Speicher und die Belastungswiderstände aufgenommen werden. Es ist möglich, die Betriebsführung auf recht einfache Weise zu erweitern, da die linguistischen Formulierungen eines Anlagenführers direkt in die Regelbasis der Betriebsführung übertragen werden können. Die hohen Anforderungen, die durch den möglichen Einsatz unterschiedlicher Speichermedien an die Betriebsführung gestellt werden, können mit dem vorgestellten System ebenfalls gelöst werden.

Rotationsspeicher eignen sich zum Einsatz in Wind-Diesel-Systemen als Kurzzeitspeicher zur Speicherung der maximalen Last bis zu einigen Minuten. Trotz dieser zeitlichen Begrenzung ist es möglich, mit ihnen die fluktuierenden Verläufe der Windgeschwindigkeit und der Last in gewissen Grenzen zu glätten. Wenn man hingegen die Rotationsspeicher in Bezug auf die maximale Last sehr groß wählt, so werden ihre Verluste erheblich, wie die durchgeführten Simulationsrechnungen zeigen. Daher soll in weiteren Untersuchungen die Kopplung von Rotationsspeichern mit Batteriespeichern in Wind-Diesel-Systemen simuliert werden, da in einer Kombination der beiden Speicherarten möglicherweise Vorteile liegen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Saulnier, B., A.O. Barry, B. Dube, R. Reid: Design and development of a Regulation and Control System for the high Penetration No-Storage Wind/Diesel scheme. EWEC 1988. S.530-535.
- [2] Cramer, G., R. Grebe: Weiterentwicklung des Modularen Systems zur autonomen elektrischen Energieversorgung sowie Auswertung von Betriebserfahrungen. Wind/Diesel/Batteriesystem auf Cape Clear/Irland. Statusbericht 1990, BMFT Forschungsvorhaben 03E-8536-B.
- [3] Beyer, H.G., T. Degner, H. Gabler, A. Stöcklein: Analyse des Betriebsverhaltens von Wind-Diesel-Systemen mit Kurzzeitspeichern. DEWEK 1992, S.147-151.
- [4] Infield, D.G.: An Assessment of Flywheel Energy Storage as Applied to Wind/Diesel Systems. Wind Engineering 14 (1990) Nr.2, S.47-61.
- [5] Bleijs, J.A.M., L.L. Freris, et al.: A wind/diesel system with variable speed flywheel storage. WEC 1992. S.147-151.

- [6] Knudsen, T.: Evaluation of diesel Start/stop strategies in a wind/diesel system by simulation. WEC 1987, S.187-194.
 - [7] Lukas,P.: Systeme zur Betriebsführung von zusammengesetzten Anlagen auf der Grundlage der Wissensverarbeitung mittels Fuzzy-Konzepten. Tagungsband DFMRs Jahrestagung 9./10.Sept.1993, Bremen. In Vorbereitung.
 - [8] Skarstein,O., U.Kjetil: Design Considerations with respect to Longterm Diesel Saving in Wind/Diesel Plants. BWEA/EWEA/IEE Workshop on Wind-Diesel Systems 1989.
 - [9] Seebode,E.: Windkraftanlagen. Marktübersicht 91/92. Interessenverband Windkraft Binnenland 1991.
 - [10] Reiniger,K., T.Schott, A.Zeidler: Optimization of hybrid stand-alone systems. EWEC 1986, S.275-279.
 - [11] Knudsen,T.: A Stochastic Wind Model Covering Periods Ranging from a Fortnight to a Second. Wind Engineering Vol.14 (1990) No.6, S.387-404.
 - [12] Zadeh,L.A.: Fuzzy sets. Information and Control 8 (1965), S.338-353.
 - [13] Schöne,A., P.Lukas: Zur Anwendung der Fuzzy-Logik bei der Simulation der Wissenverarbeitung. Informatik-Bericht 92/6 Fortschritte der Simulation in Medizin, Biologie und Ökologie, S.2-22.
 - [14] Mamdani,E.H., S.Assilian: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. Int.J.Man-Mach. Studies Vol.7, No.1, S.1-13, 1975.
 - [15] Fittler,H.: Anwendung von Expertensystemen in der Prozeßautomation. Automatisierungstechnische Praxis 33 (1991) 4, S.199-205.
-

