

Von der Frequenzregelung mit Schwungmassen (netzstützende Maßnahmen) zur Winkelregelung mit Umrichtern (netzbildende Maßnahmen)

From frequency control with inertia to angle control with converters

Prof. Dr.-Ing. Harald Weber, Universität Rostock, Deutschland, harald.weber@uni-rostock.de

Kurzfassung

Im Zuge der Energiewende wird mehr und mehr elektrische Energie von Wind- und PV-Anlagen erzeugt. Diese Energie wird in großen chemischen Speichern gespeichert (Speicherkraftwerk). Diese neuen Player werden mit Umrichtern an das Drehstromnetz angeschlossen und weisen systembedingt keine Schwungmassen mehr auf. Die konventionellen Kraftwerke dagegen werden in ihrer Anzahl zurückgehen. Deshalb müssen die Speicherkraftwerke alle Aufgaben der konventionellen Kraftwerke übernehmen. Das kann mit konventioneller Frequenzregelung oder aber mit neuartiger Winkelregelung geschehen.

Abstract

With the change of electrical power systems more and more energy will be supplied by renewable sources like wind and photovoltaics. This energy, if not consumed immediately, has to be stored in huge chemical storages (Storage Power Plants). This new type of power plants will be connected by converters to the grid and do not provide any inertia. But more and more conventional power plants will go out of operation. Therefore the new Storage Power Plants have to serve like conventional power plants concerning system services. They are able to do this either in frequency control or in a new angle control mode.

1 Einleitung

Mit der Ablösung der Dampfmaschinen durch Turbinen war zwar deren pulsierendes Drehmoment verschwunden, aber an der prinzipiellen Wirkungsweise der drehzahl- oder frequenzorientierten Regelung durch Momentan- und Primärreserveleistung hat sich nichts geändert, da ja auch das Schwungrad in Form des Turbinen-Generator-Satzes weiter vorhanden ist. Selbst in der modernen elektrischen Energieversorgung sind diese Netzregel-Prinzipien bis heute gültig, wobei allerdings im Europäischen Verbundnetz eine sprungförmige Verbraucheränderung an einem Ort zu einer europaweiten Ausspeicherung von Momentanreserve und anschließender – ebenfalls europaweiter – Bereitstellung von Primärregelleistung führt. Damit wird bei jeder Störung auch eine europaweite Lastflussverschiebung ausgelöst, da ja aufgrund der solidarischen Leistungsbereitstellung aller Erzeuger jede punktuell auftretende Störleistung von allen Kraftwerken des Netzes anteilig ausgeglichen wird.

Dampfmaschine und Dampfturbine werden hauptsächlich von fossilen Energieträgern angetrieben, was auch schon die Problematik der zukünftigen Energieversorgung umreißt. Durch den CO₂-Ausstoß sowie die Endlichkeit dieser Energieträger ist ein Umstieg auf regenerative Energien zukünftig unausweichlich notwendig. Hier kommen in Deutschland Wind und Sonne infrage. Da diese aber nicht planbar zur Verfügung stehen, müssen deren geerntete

Energien in absehbarer Zeit in größerem Umfang gespeichert werden. Als ernsthafte Speicher kristallisieren sich hierbei immer mehr elektrische und chemische Speicher heraus. Die drei neuen Player in der Energieversorgung Wind, Sonne und Speicher haben eines gemein: Sie besitzen keine Schwungräder oder andere rotierende Massen mehr, da alle drei über leistungselektronische Umrichter an das Netz angeschlossen werden. Heutzutage stehen noch wenige Umrichter vielen Kraftwerken gegenüber, sodass sich die Umrichter an die Schwungmassen und deren Frequenz anpassen müssen. Das geschieht durch synthetische Erzeugung von Momentanreserve- und Primärregelleistung. Dazu müssen die Umrichter aber den von den Kraftwerken vorgegebenen Spannungswinkel am Anschlusspunkt messen, um ihre frequenzorientierte Regelung auch richtig einspeisen zu können. Damit verhalten sich diese neuen Elemente dann ebenfalls wie Kraftwerke und können in das System integriert werden.

Zukünftig aber wird sich das Verhältnis umkehren: Einer Vielzahl durchaus leistungsstarker schwungmassefreier Umrichter bei Wind- und PV-Anlagen sowie bei Speichern und Gleichstromleitungen werden immer weniger – oder auch bald keine – konventionellen Kraftwerke mehr gegenüber stehen. Damit ist die Anpassung der Umrichter an die Welt der rotierenden Schwungmassen obsolet und eine neue Art der Netzregelung kann eingeführt werden: die winkelorientierte Netzregelung.

2 Das neue „konventionelle“ Kraftwerk oder Speicherkraftwerk

Die Grundprinzipien der Elektrischen Energieversorgung sowie der Netzregelung sind universell und müssen für alle Arten der Erzeugung, der Übertragung und Verteilung sowie des Verbrauchs wie folgt eingehalten werden:

1. Weiträumige und feinverteilte Energieversorgung benötigt ein Drehstromnetz [1].
2. Plötzliche Laständerungen müssen instantan durch Momentanreserveleistung gespeist werden.
3. Die Speicher der Momentanreserveleistung müssen im Sekundenbereich durch die Primärregelung entlastet und wieder aufgefüllt werden. Dazu werden Primärregelleistungs- Speicher benötigt [2].
4. Die Primärregelleistung muss im Minutenbereich durch die Sekundärregelung abgelöst werden. Dabei ist dann auch deren Speicher wieder aufzuladen.
5. Anschließend treten Fahrplanänderungen in Kraft, welche alle Regler wieder „auf null“ stellen.
6. In einer voll-regenerativ versorgten Energieversorgung kommt noch folgende Aufgabe hinzu: Gewisse Mengen der geernteten Energie müssen für Prognosefehler sowie „Dunkelflauten“ gespeichert werden.

Bislang wurden diese Aufgaben von konventionellen Kraftwerken wahrgenommen, welche dazu aus einer Systemkette bestehend aus unterschiedlich schnellen Speichern sowie Umwandlern/Anpassern aufgebaut sind. In Bild 1b ist dazu beispielhaft die Systemkette eines Kohlekraftwerks dargestellt. Dessen Funktionsweise soll anhand einer sprungförmigen Leistungsanforderung an den Generatorklemmen dargestellt werden:

1. **Umwandlung/Anpassung:** Die sprungförmige elektrische Leistungsanforderung wird vom Generator bei noch konstanter Drehzahl instantan in eine sprungförmige Erhöhung des Luftspalt-Moments und damit der mechanischen Leistung umgesetzt.
2. **Speicher:** Der Turbosatz bestehend aus Turbine-Generator-Erreger speichert instantan kinetische Energie aus und liefert diese mechanische Leistung. Dadurch sinkt die Drehzahl ab, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet.
3. **Umwandlung/Anpassung:** Der Primärregler greift über das Turbinenventil auf den Frischdampfpeicher (Trommel- oder Benson-Kessel) zu, wodurch im Sekundenbereich der Dampfstrom erhöht wird. Damit steigt das Turbinenmoment an und füllt den Drehzahl-Speicher wieder auf.
4. **Speicher:** Durch den erhöhten Dampfstrom sinkt der Dampfdruck ab, welcher hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet.

5. **Umwandlung/Anpassung:** Der Brennstoffregler erhöht die Feuerung, um den Druck auszuregeln. Dabei wird mehr Kohle C mit Sauerstoff O₂ zu CO₂ umgewandelt. Im Verdampfer wird mehr Dampf erzeugt. Mit dem erhöhten Dampfstrom wird der Druck-Speicher wieder aufgefüllt.
6. **Speicher:** Der Brennstoffregler greift im Minutenbereich auf die Kohlehalde zu und erhöht den Brennstoff-Massenstrom. Die Kohlemasse der Halde wird weniger, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet. Hier findet keine Wiederaufladung durch das Kraftwerk selbst statt.

Durch das zunehmende Vorhandensein regenerativer Energiequellen aus Wind und Sonne muss das konventionelle Kraftwerk zu gewissen Zeiten seine Leistung stark reduzieren, um diesen Erzeugern Platz zu schaffen. Dazu muss die Mindestleistung abgesenkt und die Regelgeschwindigkeit erhöht werden. In dieser Anforderung stehen heute alle fossilen Erzeuger [3,4].

Um die o. g. Versorgungs- und Netzregelaufgaben auch weiterhin in einer voll-regenerativen Welt realisieren zu können, braucht es neue „konventionelle“ Kraftwerke, welche Energie bei „Dunkelflauten“ nicht nur liefern, sondern in Überschuss-Situationen auch speichern können. Dabei müssen diese neuen Anlagen für eine Übergangszeit auch noch in einer schwingmasse-orientierten Energieversorgung mit konventionellen Kraftwerken funktionieren. In einer rein umrichter-orientierten Energieversorgung können sie dann auch entweder netzbildend oder aber netzstützend bei konstanter Netzfrequenz betrieben werden, was den Übergang zur Winkelregelung bedeutet.

In Bild 1a ist die Systemkette dieses neuen, schwingmassefreien Kraftwerks dargestellt, welches im netzbildenden Modus arbeiten kann. Auch hier soll die Wirkungsweise wieder anhand einer sprungförmigen Leistungsanforderung am DC/AC-Umrichter dargestellt werden:

1. **Umwandlung/Anpassung:** Die sprungförmige elektrische Leistungsanforderung führt beim Umrichter bei konstant gehaltenem Netz-Spannungswinkel (netzbildend) zu einer instantanen Erhöhung des Drehstroms und damit auch zu einer instantanen Erhöhung des Gleichstroms auf der Gleichstromseite.
2. **Speicher:** Der Super-Capacitor speichert instantan elektrische Energie aus und liefert diese Leistung. Dadurch sinkt seine Spannung ab, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet. Dieses Verhalten entspricht der Momentanreserve des konventionellen Kraftwerks.
3. **Umwandlung/Anpassung:** Die Regelung des nachgeschalteten DC/DC-Umrichters soll die Kondensatorspannung konstant halten. Dazu greift sie auf die Batterie zu, wodurch im Sekundenbereich der Batteriestrom erhöht wird. Damit steigt der Kondensator-Ladestrom an und füllt den Spannungs-Speicher wieder auf. Dieses Ver-

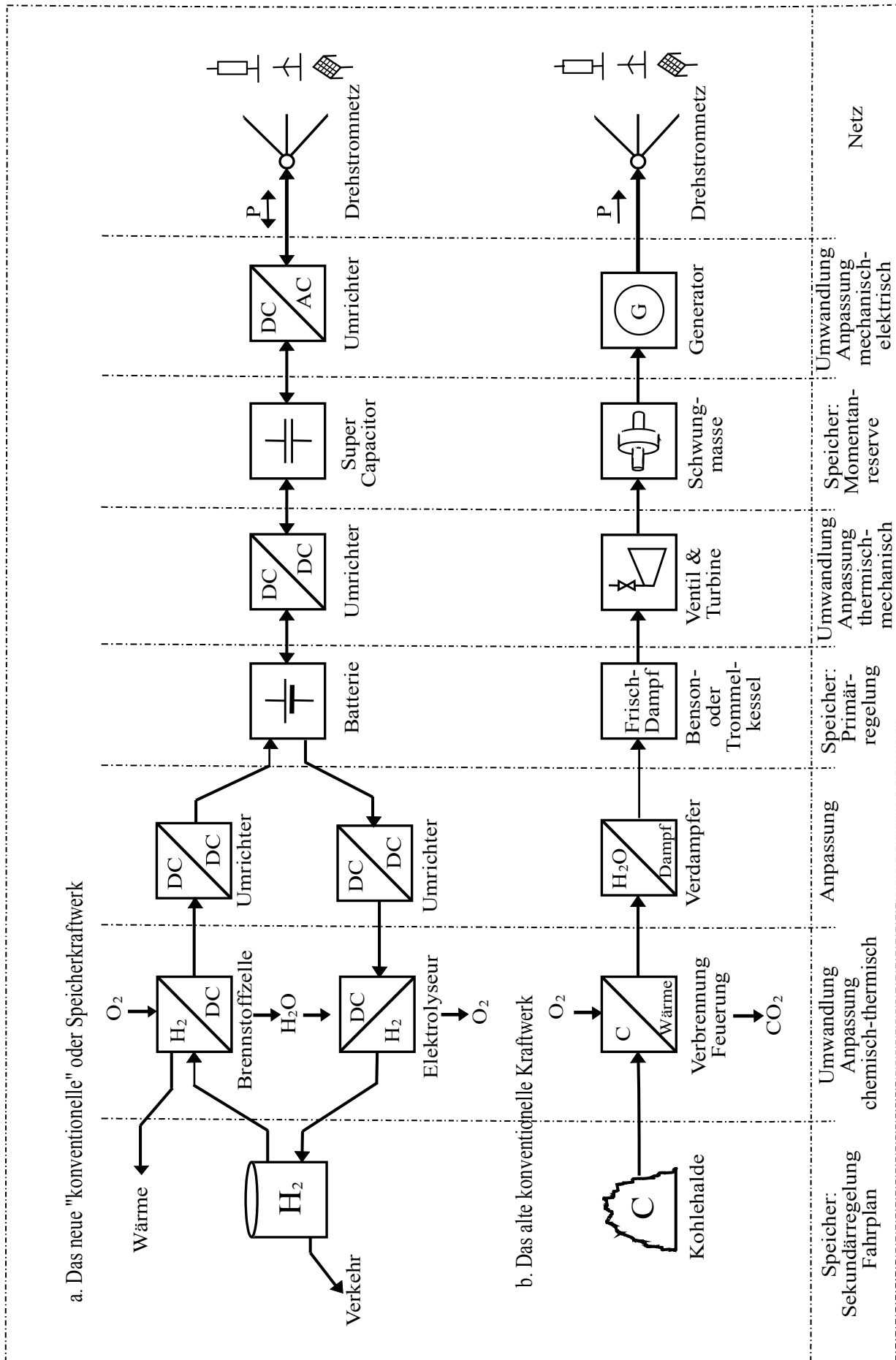


Bild 1: Das neue "konventionelle" oder Speicher-Kraftwerk

halten entspricht der Primärregelung des konventionellen Kraftwerks.

4. **Speicher:** Durch den erhöhten Batteriestrom sinkt die Batteriespannung ab, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet.
5. **Umwandlung/Anpassung:** Der Brennstoffzellen-Regler erhöht die Aktivität der Brennstoffzelle, um die Batterie zu laden und die Batteriespannung auszuregeln. Dabei wird mehr Wasserstoff $2H_2$ mit Sauerstoff O_2 zu H_2O umgewandelt. Der DC/DC-Umrichter passt dabei die Spannungen an. Mit dem erhöhten Batteriestrom-Ladestrom wird der Spannungs-Speicher wieder aufgefüllt.
6. **Speicher:** Der Brennstoffzellenregler greift im Minutenbereich auf den Wasserstoffspeicher zu und erhöht den Brennstoff-Massenstrom. Die Wasserstoff-Masse des Speichers wird geringer, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet. Hier kann Wiederaufladung stattfinden.

Im Gegensatz zum alten konventionellen Kraftwerk, welches seine Leistungsabgabe nur bis zu einer Mindestleistung verringern kann, kann das neue konventionelle Kraftwerk seine Leistung auch umkehren. Dazu wird bei Produktionsüberschuss aus den regenerativen Quellen stoßfrei von Brennstoffzellen- auf Elektrolyseur-Betrieb umgeschaltet. Der zugehörige Umrichter passt wieder die Spannung an und der Elektrolyseur erzeugt Wasserstoff passenden Drucks. Das neue konventionelle Kraftwerk kann somit als Speicherkraftwerk bezeichnet werden.

3 Frequenz geregelter Betrieb des Speicherkraftwerks

Um im bestehenden frequenzgeregelten Energieversorgungssystem alle Versorgungs- und Regelaufgaben wahrnehmen zu können, muss das Speicherkraftwerk auf die Netzfrequenz und deren Ableitung mit der Lieferung von Primärregel- und Momentanreserveleistung reagieren können. Dazu wird es im modifizierten netzstützenden Betrieb gefahren, welcher sich aus zwei Komponenten zusammensetzt (Alle Werte außer Winkel in bezogenen Größen):

Momentanreserve: Das Speicherkraftwerk fährt eine Soll-Leistung $p_{S0} = p_{S0, \text{Fahrplan}} + p_{S0, \text{sekundär}} + p_{S0, \text{primär}}$ und gibt eine Netzspannung $u_S = u_S \cdot e^{j\varphi_U}$ fest vor. Damit wird automatisch im ersten Moment jede Momentanreserve-Anforderung erfüllt. Die momentan abgegebene Leistung p_S wird gemessen. Mit der synthetischen Bewegungsgleichung

$$\Delta \dot{\omega}_S = -\frac{1}{T_S} \cdot (p_S - p_{S0}) \quad (1)$$

wird bei Veränderung der momentan abgegebenen Leistung p_S eine Drehzahlveränderung simuliert, welche dann mit

$$\Delta \dot{\varphi}_U = \Omega_0 \int \Delta \dot{\omega}_S \cdot dt \quad \text{oder}$$

$$\Delta \varphi_U = \Omega_0 \int \Delta \omega_S \cdot dt \quad \text{und} \quad \Omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (2)$$

zu einer integralen Verstellung des Spannungswinkels φ_U durch den DC/AC-Umrichter dahingehend führt, dass wieder gilt

$$(p_S - p_{S0}) = 0 \quad (3)$$

Damit wird mit der Zeitkonstanten T_S Momentanreserve-Leistung aus dem Super-Capacitor ausgespeichert. Primärregelung: Die Gleichungen (1) – (3) wirken in ihrem Zusammenwirken wie eine PLL-Schaltung, welche die Netzfrequenz $\Delta \omega_S$ misst. Mit einer vorgegebenen Kraftwerksstatik σ_S lässt sich dann die Kraftwerksleistung p_{S0} , gemäß

$$p_{S0} = p_{S0, \text{Fahrplan}} + p_{S0, \text{primär}} = p_{S0, \text{Fahrplan}} - \frac{1}{\sigma_S} \cdot \Delta \omega_S \quad (4)$$

so verstellen, dass die Primärregel-Aufgabe mit der nötigen Regelgeschwindigkeit über den DC/AC-Umrichter erfüllt werden kann. Hierbei wird der zuerst immer in Anspruch genommene Super-Capacitor mittelfristig wieder über die Batterie aufgeladen. Mit abnehmender Batteriespannung wird die Inanspruchnahme des Wasserstoff-Speichers über die Brennstoffzelle in Gang gesetzt. Damit wird auch die Primärregelleistung langfristig aus dem Wasserstoff-Speicher gedeckt. Die Batterie wird dabei wieder aufgeladen.

Falls das Speicherkraftwerk an der Sekundärregelung teilnimmt, wird nun die Sekundärregel-Leistung $p_{S0, \text{sekundär}}$ des DC/AC-Umrichters solange erhöht, bis der Area-Control-Error ACE der Regelzone zu Null geworden ist und die Netzfrequenz wieder ihren Sollwert von 50 Hz erreicht hat.

Soll nur Primärregelleistung, aber keine Momentanreserve geliefert werden, so muss gelten: $T_S \rightarrow 0$. Damit lautet dann das Regelgesetz:

$$\Delta \omega_S = -\sigma_S \cdot (p_S - p_{S0}) \quad (5)$$

Eine derartige Primärregel-Kennlinie ist z.B. im 5-MW-Batteriespeicher „Schwerin“ als sogenannte „Droop-Regelung“ realisiert.

4 Winkel geregelter Betrieb des Speicherkraftwerks

In einer Energieversorgung mit überwiegend Speicherkraftwerken und nur noch wenigen oder gar keinen konventionellen Kraftwerken mit Schwungmasse mehr, kann auf die „Watt'sche Drehzahlregelung“ verzichtet und das Drehstromnetz mit einer konstanten Frequenz von z.B. $f_0 = 50$ Hz betrieben werden. Die Aufgaben der Netzregelung wie Momentanreserve und Primärregelleistung können dann über den Spannungswinkel am Anschlusspunkt des Speicherkraftwerks realisiert werden. Das Netz selbst

fungiert nun mit seinen Admittanzen und Spannungswinkeln als koordinierende Einheit und stellt mit seinem sich jeweils einstellenden Lastfluss alle nötigen Informationen zur Verfügung. Die Speicherkraftwerke können dabei entweder netzbildend, als sogenannte Slack-Kraftwerke (Spannungseinspeisung), oder aber netzstützend, als sogenannte PV-Kraftwerke (Stromeinspeisung), betrieben werden. Dieses Verhalten ist auch den noch verbliebenen konventionellen Kraftwerken mit einer gewissen Zeitverzögerung über entweder eine integrale Winkelregelung (Slack-Verhalten) oder eine integrale Wirkleistungsregelung (PV-Verhalten) möglich. Dazu müssen alle Kraftwerke den momentanen Spannungswinkel an ihrem Anschlusspunkt sowie über eine ganggenaue Funk-Quarzuhr das 50-Hz-Winkelnormal ihrer Regelzone kennen. Diese Uhr kann einmal täglich über den Zeitzeichensender DCF77 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig synchronisiert werden.

Die Funktionsweise dieser neuen Art von Netzregelung lässt sich am besten anhand eines Beispiels erläutern. In Bild 2 ist exemplarisch ein 110-kV-25-Knoten-Netz dargestellt. Die Admittanzen zwischen den Knoten sind alle gleich groß und rein reaktiv, wobei von einer Leitungslänge zwischen den Knoten von 50 km ausgegangen wird. An den Knoten angeschlossen sind fünf Slack-Speicherkraftwerke (Generator-Symbol), sechs PV-Kraftwerke (Windkraft-Symbol) und 14 PQ-Verbraucher (Verbraucher-Symbol). Anfänglich wird ein Lastfluss eingestellt, bei welchem alle 11 Kraftwerke die Verbraucherleistung des Netzes von $\sum P_V = 14 \cdot 10 \text{ MW} = 140 \text{ MW}$ gleichmäßig mit je $140 \text{ MW} / 11 = 12,72 \text{ MW}$ decken. Knoten 25 soll hierbei der Slack-Knoten für die Anfangs-Lastflussrechnung sein. Die Blindleistungsabgabe der Erzeuger wird gleichmäßig so eingestellt, dass alle in etwa denselben Betrag liefern.

In den Bildern 3, 4 und 5 sind jeweils die sich nach der Lastflussrechnung einstellenden Spannungszeiger für die Slack-Speicherkraftwerke, die PV-Kraftwerke und die

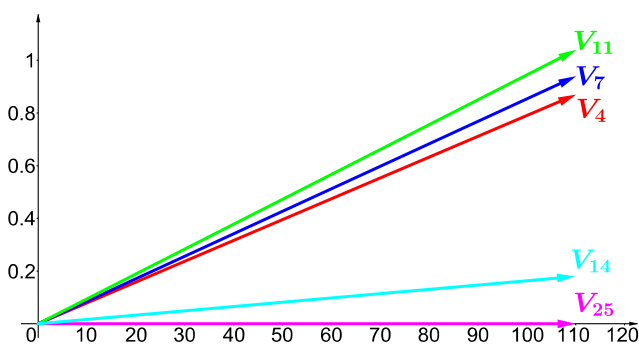


Bild 3: Spannungszeiger der Slack-Generatoren (Anfangs-Lastflussrechnung)

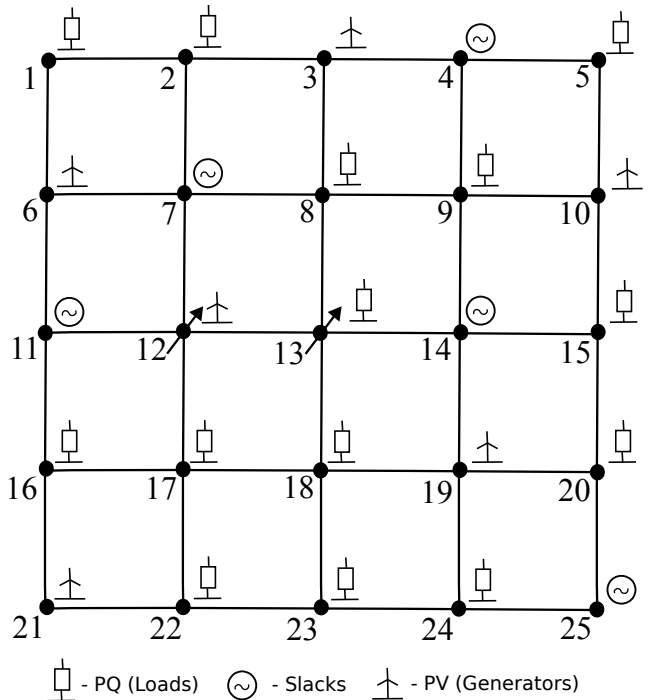


Bild 2: 25-Knoten-Beispielnetz (Slack-, PV- und PQ-Knoten)

PQ-Verbraucher dargestellt. Wie man den Bildern entnimmt, eilen die PQ-Verbraucher-Spannungszeiger ihren sie umgebenden Slack- und PV-Erzeuger-Spannungszeigern nach, womit ein Lastfluss von den Erzeugern zu den

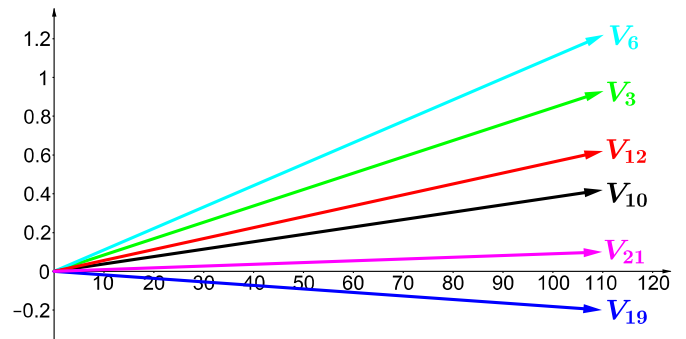


Bild 4: Spannungszeiger der PV-Generatoren (Anfangs-Lastflussrechnung)

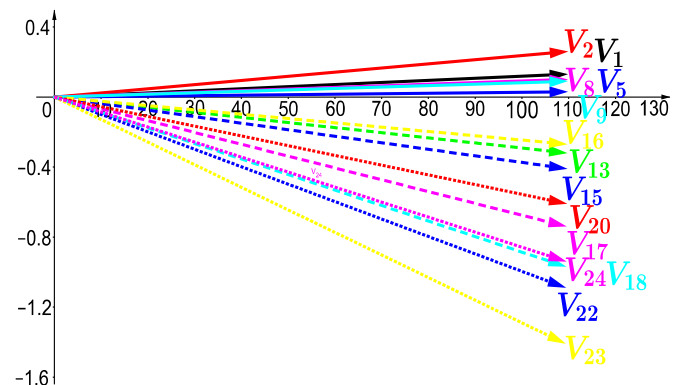


Bild 5: Spannungszeiger der PQ-Verbraucher (Anfangs-Lastflussrechnung)

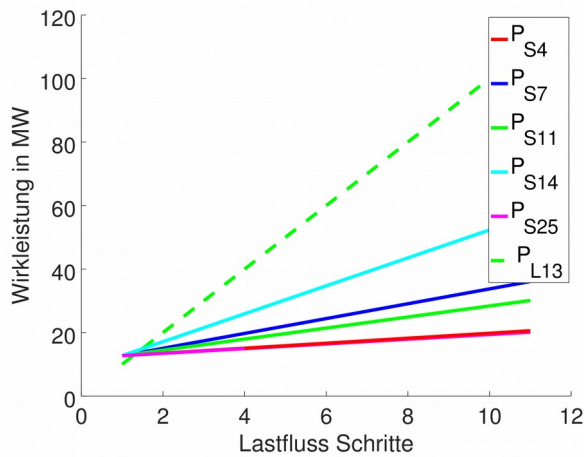


Bild 6: Leistungsverlauf Verbraucher Knoten 13 und Slack-Speicherkraftwerke

Verbrauchern gewährleistet ist. In dieser Darstellung ist der besseren Deutlichkeit halber die imaginäre Achse stark überdehnt gezeichnet, da sonst die einzelnen Winkel nicht gut genug erkennbar wären. Erhöht man nun in 10-MW-Schritten die Verbraucherleistung am Knoten 13 von 10 MW auf 110 MW und führt dabei jeweils wieder eine Lastflussrechnung durch, so verdrehen sich alle Winkel bis auf diejenigen der fünf Slack-Speicherkraftwerke. Bei dieser Lastflussrechnung werden alle Knoten mit Slack-Speicherkraftwerken als Slack-Knoten behandelt, wobei die Spannungen aus der Anfangs-Lastflussrechnung mit nur einem Slack-Knoten übernommen werden. Das bedeutet für die netzbildenden Umrichter der Slack-Speicherkraftwerke, dass sie ihre Spannungen nach Betrag und Winkel konstant halten können, was ja gerade

einem Slack-Knoten (eingepreiste Spannung) entspricht.

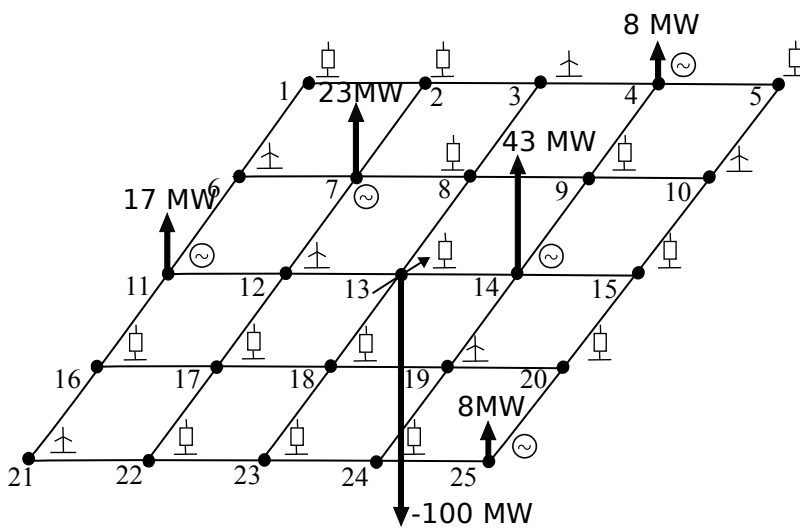


Bild 7: Verbraucherzunahme Knoten 13: Anteil der Slack-Kraftwerke an der Leistungsbereitstellung

In Bild 6 ist der Leistungsanstieg des Verbrauchers am zentralen Knoten 13 sowie die Reaktion der spannungseinprägenden Slack-Speicherkraftwerke darauf dargestellt. Wie man dem Bild entnimmt, teilen sich die Slack-Speicherkraftwerke die benötigte Leistungsabgabe auf, und zwar entsprechend ihrer elektrischen Nähe zum Verbraucher. So übernimmt das Slack-Speicherkraftwerk am Nachbarknoten 14 mit 43 MW die Hauptlast der zusätzlich benötigten Erzeugung, gefolgt vom Slack-Speicherkraftwerk am Knoten 7 mit 23 MW. Danach folgt das Slack-Speicherkraftwerk am Knoten 11 mit 17 MW und zum Schluss die beiden gleich weit entfernten Slack-Speicherkraftwerke an den Knoten 4 und 25 mit jeweils 8 MW. Dieses Verhalten entspricht vollständig der Primärregelung, wobei Momentanreserve und Primärregelung ineinander übergehen. Allerdings ist diese Primärregelung lastflussorientiert, da die näher liegenden Speicherkraftwerke mehr in Anspruch genommen werden als die weiter entfernt liegenden. Das führt dazu, dass bei einer Störung der Lastfluss hauptsächlich in der Nähe des Störortes entsteht und ferne liegende Speicherkraftwerke nicht mit zur Leistungserbringung herangezogen werden.

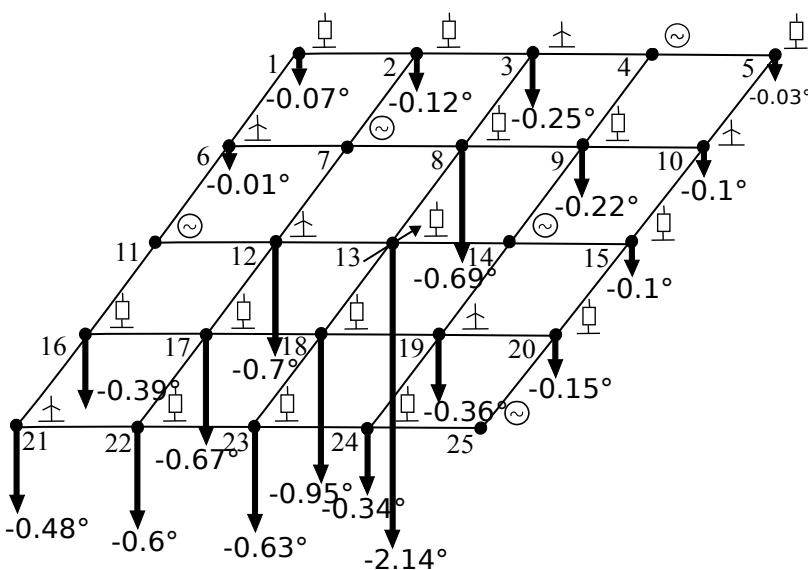


Bild 8: Verbrauchszunahme Knoten 13: Spannungszeigerwinkeländerung der PV-Kraftwerke und PQ-Lasten

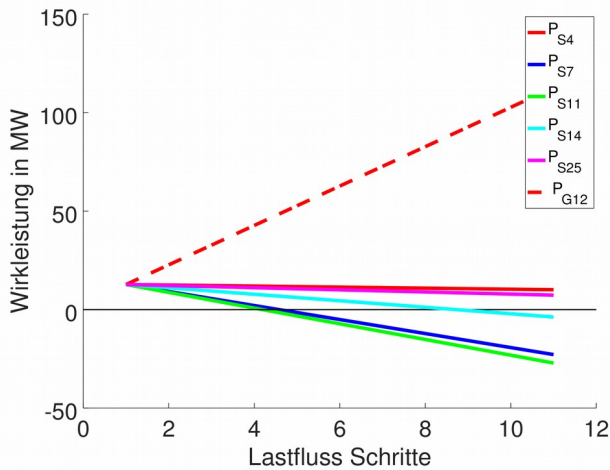


Bild 9: Leistungsverlauf PV-Kraftwerk (Windpower) Knoten 12 und Slack-Speicherkraftwerke

In Bild 7 sind diese maximalen Leistungszuwächse des Verbrauchers und der Slack-Speicherkraftwerke übersichtlich als Balken dargestellt, wobei die Verbraucherleistung negativ (Senke) und die Erzeugerleistung positiv (Quelle) gepfeilt sind. Aus diesem Bild wird besonders deutlich, wie die elektrische Nähe zum Verbraucher am zentralen Knoten 13 die Leistungsentbindung beeinflusst. Bei der winkelgestützten Primärregelung produzieren also die störungsnahen Kraftwerke mehr Primärregel-Leistung als die störungsfernen, was dem vernünftigen Prinzip der verbrauchernahen Erzeugung entspricht.

In Bild 8 ist die Winkelverwindung des Beispielnetzes bei diesem Vorgang dargestellt. Hierzu sind alle Winkeländerungen vom Arbeitspunkt der Nicht-Slack-Knoten (PV-Erzeuger und PQ-Verbraucher) dargestellt. Der Spannungszeigerwinkel des Lastknotens 13 eilt dabei maximal um $-2,14^\circ$ nach (Verbrauch). Aus dieser Darstellung ist auch die vollständige Winkelverwindung des Netzes bei diesem Lastzuwachs ersichtlich, welche benötigt wird, um den Zusatzverbrauch von den Slack-Kraftwerken decken zu lassen. Die Winkel der Slack-Kraftwerke selbst bleiben dabei natürlich auf den Ausgangswerten der ersten Lastflussrechnung gemäß Bild 3 unverändert stehen.

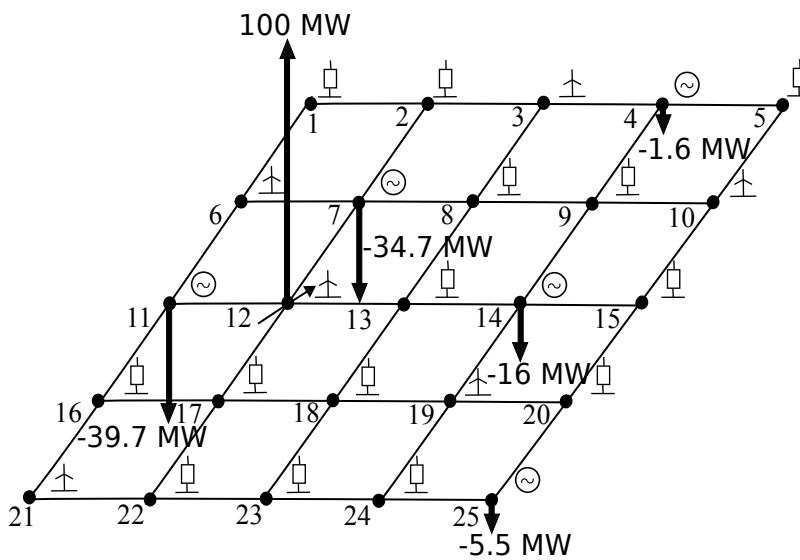


Bild 10: Erzeugungszunahme Knoten 12: Anteil der Slack-Kraftwerke an der Leistungsaufnahme

Im nächsten Beispiel wird die Leistung des PV-Kraftwerks am Knoten 12 in zehn 10-MW-Schritten erhöht, was z.B. der Leistungszunahme eines Windparks entspricht. In Bild 9 ist dargestellt, wie der Leistungszunahme am Knoten 12 jetzt eine Leistungsabnahme der Slack-Kraftwerke gegenübersteht. Das bedeutet, dass die zusätzlich erzeugte Leistung des Windparks durch die winkelorientierte Regelung automatisch entsprechend den Admittanzverhältnissen im Netz auf die Slack-Kraftwerke verteilt wird. Ab dem vierten Lastflussschritt ist hierbei diese zusätzlich erzeugte Leistung so hoch, dass die Nachbar-Slack-Kraftwerke an den Knoten 7 und 11 automatisch vom Erzeugerbetrieb in den Verbraucherbetrieb umwechseln und deshalb jetzt damit beginnen, ihren Wasserstoffspeicher aufzuladen. D.h., die Ausbalancierung und

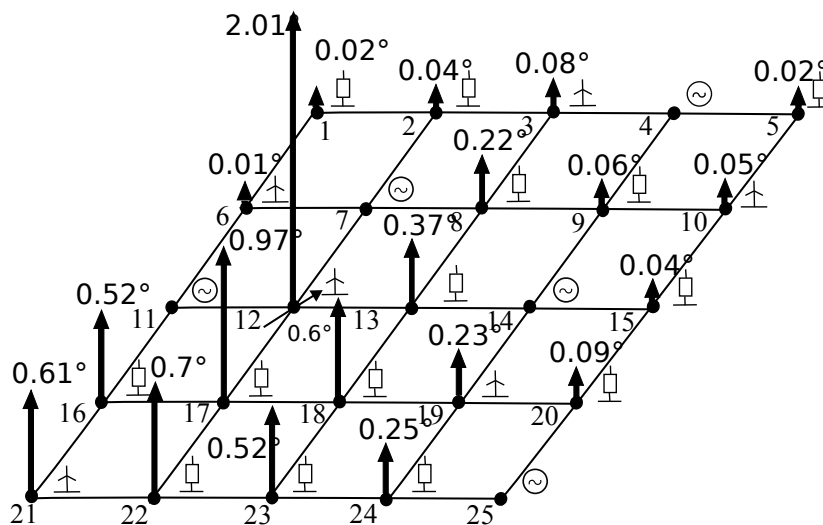


Bild 11: Erzeugungszunahme Knoten 12: Spannungszeigerwinkeländerung der PV-Kraftwerke und PQ-Lasten

Speicherung der jetzt zusätzlich erzeugten Windleistung ist automatisch gewährleistet, das System befindet sich jederzeit in einem ausgeglichenen und sicheren Zustand. Ab dem neunten Lastflussschritt geht auch das nächste nahegelegene Slack-Kraftwerk 14 in den Verbraucherbetrieb über und speichert Energie ein, während die weiter entfernten Slack-Kraftwerke an den Knoten 4 und 25 noch im Erzeugerbetrieb verbleiben, aber ihre Leistungen stark verringern.

In Bild 10 sind die Veränderungen der Leistungen des PV-Windparks und der Slack-Kraftwerke wieder als Balken dargestellt. Hier ist sehr gut ersichtlich, wie der Windpark am Knoten 12 automatisch seine nächstgelegenen Slack-Kraftwerke entsprechend den Netzdmittanzen auflädt.

In Bild 11 ist dazu wieder die Winkelverwindung des Netzes vom Arbeitspunkt aus dargestellt, welche benötigt wird, um diese Lastflussverteilung zu erreichen. Der Spannungszeiger-Winkel des Windpark-Knotens 12 eilt jetzt um $2,01^\circ$ vor (Erzeugung). Auch hier bleiben die Winkel der Slack-Kraftwerke auf den Ausgangswerten der ersten Lastflussrechnung gemäß Bild 3 unverändert stehen, wodurch die in Bild 10 dargestellte Leistungsaufnahme möglich wird.

Aus diesen Beispielen wird deutlich, dass bei der winkelorientierten Netzregelung die Slack-Kraftwerke „automatisch“ auf Last- oder Einspeiseänderungen reagieren und entweder Arbeit ausspeichern oder einspeichern. Dabei ist aber gewährleistet, dass die Slack-Kraftwerke in allen Arbeitspunkten unverändert alle nötigen Netzdienstleistungen wie Momentanreserve und Primärregelleistung immer zur Verfügung stellen, auch im Falle der Arbeitseinspeicherung in die Speicher. Das Netz wird also in allen Fällen vollumfänglich geregelt und benötigt keine zusätzlichen „netzdienstlichen Dienste“ aus z.B. volatilen Windkraft- oder PV-Anlagen. Auf die mühsame Herstellung von doch immer unzureichender Regelfähigkeit aus diesen Anlagen kann somit getrost verzichtet werden.

5 Zusammenfassung

Mit dem Einsatz von schwungmassefreien Speicherkraftwerken mit moderner und leistungsstarker Umrichtertechnik kann sowohl in frequenz- als auch in winkelgeregelten Netzen vernünftig Netzregelung betrieben werden. In frequenzgeregelten Netzen mit noch vorhandenen konventionellen Schwungmassen agieren diese neuen Anlagen wie normale Kraftwerke und können alle Netzregelaufgaben wie Momentanreserve, Primär- und Sekundärrege-

lung sowie Fahrplanbetrieb abdecken. Zusätzlich können sie aber auch Energie aus regenerativen Quellen einspeichern, was Redispatch-Aktionen überflüssig machen kann.

In zukünftig winkelgeregelten Netzen ohne physische Schwungmasse können diese Kraftwerke als Slack-Speicherkraftwerke arbeiten, was die Einhaltung einer konstanten Netzfrequenz ermöglicht. Hierzu ist allerdings die genaue Messung der Winkel sowie eines Winkelnormals notwendig.

Somit sind alle zukünftigen Anwendungsfälle abdeckbar, was auch in Zukunft den weiteren sicheren Ausbau einer regenerativen Energieversorgung ermöglicht. Allerdings sind bis zur vollständigen wissenschaftlichen Darstellung dieser Methode noch umfangreiche weitere Forschungsarbeiten notwendig.

6 Literatur

- [1] A. Holst, P. Kertscher, H. Weber: Netzintegration der Regenerativer Energien in M-V, VDI-Fachtagung Energieland 2020 - die zukünftige Energieversorgung in Mecklenburg-Vorpommern, 02.09.2009, Rostock.
- [2] I. Nassar, S. Alali, H. Weber: Effects of Increasing Intermittent Generation on the Frequency Control of the European Power System, 19th World Congress "IFAC 2014", Cape Town, South Africa
- [3] C. Ziems, H. Weber: Auswirkungen zunehmender Windenergieeinspeisung auf den Kraftwerksbetrieb in Deutschland, VGB PowerTech, Ausgabe 6/2009
- [4] S. Meinke, C. Ziems, E. Hassel, J. Nocke, H. Weber: Thermodynamische Simulation eines Steinkohleblocks unter Einbezug der Regelungstechnik mit Modelica, 42. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, 12.-13. Oktober 2010Dresden