

6 Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung

Der Leistungstransport in den Verbundleitungen und die Leistungseinspeisungen von großen Kraftwerken liegen bei 100 MW und mehr. Fallen Betriebsmittel aus, z. B. Leitungen oder Kraftwerke, wird das Leistungsgleichgewicht um diesen Betrag gestört. Bei Netzen, die nach dem *n-1-Prinzip* geplant sind, darf dadurch keine Versorgungsunterbrechung auftreten. Das Netz muss sich nach derartigen Störungen stabil verhalten. Es muss also so gebaut und betrieben werden, dass beim Leitungsausfall genügend *Übertragungskapazität* und beim Kraftwerksausfall genügend *Leistungsreserve* vorhanden ist. Zeigen Studien, dass dies nicht der Fall ist, müssen Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung, die dauerhaft die Übertragungskapazität oder die Leistungseinspeisung erhöhen, ergriffen werden. Neben den Störungen mit Langzeitcharakter, wie dem Ausfall einer Leitung, gibt es kurzzeitige Störungen, beispielsweise ein Kurzschluss, der rasch wieder geklärt wird, sodass sich im Idealfall derselbe Zustand wie vor dem Fehler einstellt. Hier wird für eine relativ kurze Zeit die Übertragung gestört. Maßgebend für die Schwere der Störung ist die Energie, die sich aus nicht übertragener Leistung und Kurzschlusszeit ergibt. Da ein Kurzschluss die Spannung in einem größeren Gebiet absenkt, wird in der Regel die Leistungsübertragung von mehreren Leitungen gestört. Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung erfordern viel Leistung, die aber nicht unbedingt dauerhaft bereitgestellt wird.

Nach Störungen verlaufen Ausgleichvorgänge fast ausschließlich in Form von Schwingungen. Deshalb ist darauf zu achten, dass diese gedämpft werden. Bei einer Pendelperiode von 1 s entsprechend der *Pendelfrequenz* von 1 Hz muss dem System über 0,5 s Energie entzogen werden, die in den nächsten 0,5 s wieder eingespeist werden kann. Oder es muss die in der Schwingung enthaltene Energie über mehrere Perioden vernichtet werden. Auch hier ist beträchtliche Energie umzusetzen, die allerdings um eine Größenordnung – mitunter auch zwei Größenordnungen – unter derjenigen liegen kann, die bei Kurzschlüssen zu erwarten ist.

Schließlich muss für den stationären Betrieb die statische Stabilität sichergestellt werden. Hierzu ist es notwendig, das Netz in einem stabilen Betriebsbereich zu betreiben bzw. durch regelungstechnische Maßnahmen stabil zu halten. Die Ausgleichvorgänge nach kleinen Störungen sind genauso zu dämpfen wie die nach größeren. Die Maßnahmen zur *Stabilitätsverbesserung* basieren auf folgenden Prinzipien:

- Erhöhung der Leistungsbereitstellung
- Erhöhung der Übertragungskapazität
- Verbesserung der Pendeldämpfung

Diese sollen nun der Reihe nach diskutiert werden.

6.1 Wirkleistungsbereitstellung

Es wird von einem Netz ausgegangen, das sich in einem stabilen Betrieb befindet. Die *Erzeugerleistung* und der *Verbrauch* sind ausgeglichen. Durch eine Störung kann ein *Leistungsungleichgewicht* entstehen.

- A Ein *Kraftwerksausfall* oder die Zuschaltung einer großen Last führen zu einem *Leistungsdefizit*
- B Eine *Lastabschaltung* führt zu einem Leistungsüberschuss
- C Die Abtrennung von Teilnetzen führt zu einem Leistungsdefizit bzw. Leistungsüberschuss
- D Ein *Leitungsausfall* führt zu Problemen im Leistungstransport, z. B. zur Überlastung von anderen Leitungen

In den Fällen A, B und C muss die Kraftwerksleistung erhöht oder gedrosselt werden. Im Fall D kommen netzseitige Maßnahmen infrage, die später behandelt werden, oder es ist eine Verlagerung der Leistungserzeugung vorzunehmen. Dabei werden Kraftwerke in der Nähe der Engpassstelle heruntergefahren und solche an anderer Stelle hochgefahren. Diese Maßnahme ist nicht sehr beliebt, weil sie im Allgemeinen die Verlagerung der Erzeugung auf unwirtschaftliche Kraftwerke bedeutet. Wie dem auch sei, in allen Fällen geht es darum, die Leistungserzeugung in den Kraftwerken zu erhöhen oder zu verringern. Im Rahmen der Planung bedeutet dies den Bau zusätzlicher Kraftwerke, eine einfache, aber teure Maßnahme. Alle Lastvarianten, einschließlich der Störfälle, werden untersucht und daraus die notwendigen Kraftwerkskapazitäten an den Standorten bestimmt. Bei der Planung des Betriebs ist darauf zu achten, dass der Leistungsfluss im Netz stabil sichergestellt ist. Diese Stabilität muss auch vorhanden sein, wenn eine Störung erfolgt. Hier kommt die Dynamik ins Spiel, die Gegenstand des Buchs ist.

6.1.1 Dynamik der Kraftwerksblöcke

Wenn ausreichend Kraftwerkskapazitäten im Netz vorhanden sind, um für jeden Last- und Störfall den Leistungsbedarf zu decken, geht es nur noch darum, die Kraftwerke genügend rasch von einem Betriebspunkt in einen nun gewünschten zu fahren. An dieser Stelle werden dabei die Kraftwerke als Stellorgane angesprochen. Die zweite Frage ist die Ansteuerung des Kraftwerks durch den Regler. Hierzu zählt auch das Verhalten eines nicht geregelten Kraftwerks bei Änderungen im Netz. Wie in der Regelungstechnik üblich, wird auch hier zwischen dem Kleinsignal- und Großsignalverhalten unterschieden.

Als wichtige Gruppen unterteilt man die Kraftwerke in thermische Kraftwerke, Wasserkraftwerke und regenerative Kraftwerke. Dabei ist klar, dass Wasserkraftwerke auch zu den regenerativen gehören. Wegen ihres unterschiedlichen Verhaltens und ihrer Bedeutung werden sie jedoch gesondert behandelt.

6.1.2 Thermische Kraftwerke

Als Beispiel für *thermische Kraftwerke* soll ein *Kohlekraftwerk* beschrieben werden. Nach dem Wirkungsprinzip wird das dynamische Verhalten der *Turbinen*, *Stellorgane* und *Regler* erläutert. Schließlich soll ein Ausgleichvorgang nach einer Lastzuschaltung diskutiert werden.

6.1.2.1 Prinzip des Kohlekraftwerks

Bei einem Kohlekraftwerk wird die in der Kohle *chemisch gebundene Energie* durch Verbrennen in *Wärme* umgesetzt. Diese bindet sich in Wasser, das unter Druck steht. Es wird von Wasserdampf und dementsprechend von *Dampfkraftwerken* gesprochen, obwohl das Wasser im *Kessel* überkritisch ist, sodass man nicht zwischen flüssig und gasförmig unterscheiden kann. Der Dampf entspannt sich in der Turbine. Dadurch entsteht kinetische Energie, die in dem Generator zu elektrischer Energie umgewandelt wird. Der Dampfkreislauf ist in **Bild 6.1** dargestellt. Einige dort eingezeichnete Komponenten werden später erklärt.

Die Kohle ist in diesem Fall Primärenergie. Sie soll im Folgenden stellvertretend für alle fossilen Energieträger genannt werden: Steinkohle, Braunkohle, Erdöl und Erdgas. Biogas als regenerative Energiequelle wird nach dem gleichen Prinzip eingesetzt, ebenso die Kernenergie. Für unsere dynamischen Betrachtungen ist wichtig, dass am Eingang des Prozesses ein beliebig großer Energiespeicher bereitsteht. Bei der solarthermischen Stromerzeugung läuft der gleiche Prozess ab, jedoch ohne Energiespeicher.

Es wurde das Kohlekraftwerk als Beispiel für Dampfkraftwerke bzw. Dampfturbinenkraftwerke gewählt. Zu den thermischen Kraftwerken gehören ebenfalls

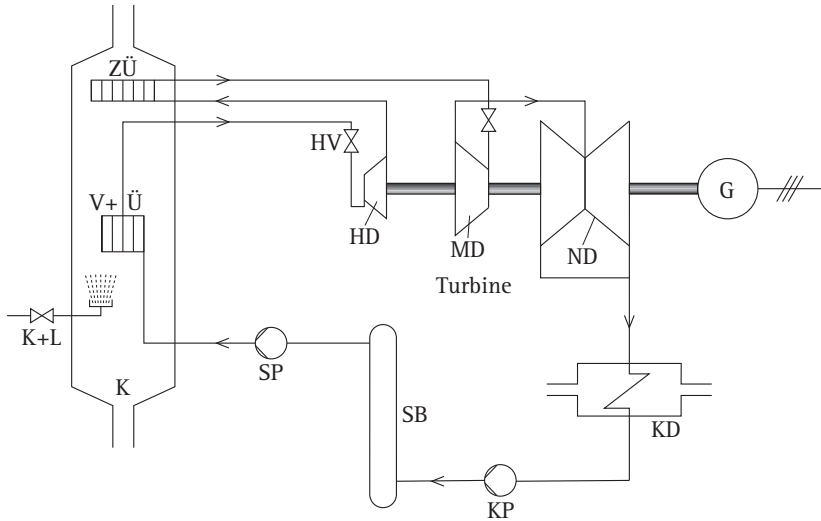


Bild 6.1 Dampfkreislauf am Beispiel des Kohlekraftwerks

K: Kessel; K+L: Kohlenstaub- u. Luftzufuhr; SB: Speiswasserbehälter;
 SP: Speiswasserpumpe; V+Ü: Verdampfer und Überhitzer; ZÜ: Zwischenüberhitzer;
 HD, MD, ND: Hoch-, Mittel-, Niederdruckturbine; HV, MV: Hoch-, Mitteldruckventil;
 KD: Kondensator; KP: Kondensatorpumpe; G: Generator

die *Gasturbinenkraftwerke*. Bei ihnen wird die Primärenergie in ein unter Druck stehendes Gas verwandelt, das direkt in die Turbine einströmt. So wird der Umweg über den Wasserdampf eingespart. Deshalb sind Gasturbinenkraftwerke kostengünstiger und schneller zu steuern. Ihr Nachteil besteht im schlechteren Wirkungsgrad. Moderne Gaskraftwerke werden mit kombinierten Gasturbinen und Dampfturbinenprozessen (GuD) betrieben, auf die hier nicht eingegangen werden soll. Brennstoffe für Gasturbinen sind Erdgas, Erdöl und Biogas. Bei kleinen Leistungen unter 1 MW tritt häufig ein Gasmotor an die Stelle der Gasturbine. Eine gute Übersicht über die thermischen Kraftwerke ist in [58] gegeben.

6.1.2.2 Dynamisches Verhalten der Komponenten

Nach der Diskussion der Technologie kommt die Beschreibung des Steuerverhaltens am Beispiel des Kohlekraftwerks in Bild 6.2 [59]. Um die Leistungsabgabe des Kraftwerks zu erhöhen, werden die Dampfventile HV am Eingang der Hochdruckturbine weiter geöffnet. Dabei wird zunächst vorausgesetzt, dass der Frischdampfdruck d_{FD} des Kessels konstant bleibt. (Um Verwechslungen mit der Leistung p zu vermeiden, wird der Druck entgegen der Norm mit d bezeichnet.) Es strömt mehr Dampf in die Hochdruckturbine, die sich mit der Verzögerungszeitkonstante τ_{HD} füllt und entsprechend ihr Drehmoment m_{HD} und damit ihre Leistungsabgabe erhöht.