
Andreas Heier
Thomas Hiller
Markus H. Zink

Praxishandbuch Blindleistungs- management



ANDREAS HEIER

Ist gelernter Elektriker und studierte Energietechnik und Anlagenautomatisierung an der heutigen OTH Regensburg. Während seiner mehrjährigen Tätigkeit bei Energieversorgern absolvierte er nebenberuflich ein Masterstudium zum Netzingenieur an der Hochschule Trier. Seit über 15 Jahren befasst er sich als Führungskraft mit Netzplanung und -entwicklung im Verteilnetz und war mehrere Jahre auch Technische Führungskraft.

Sein Interesse liegt insbesondere in der wissenschaftlichen Untersuchung elektrotechnischer Zusammenhänge im Orts- und Verteilnetz.

Nebenberuflich hält er Seminare für Fachpublikum zu Lastprognosen, Netzberechnungen und Netzbetrieb. Dazu ist er beim FNN engagiert und der BDEW Landesgruppe Nord.

Dr.-Ing. THOMAS HILLER

Studierte nach dem Abitur Elektrotechnik an der TU Chemnitz, Fachrichtung Elektrische Energietechnik. Seit 1998 ist er in der Energieversorgungsbranche tätig. Er arbeitete bei der Energieversorgung Südsachsen AG und der EnBW Regional AG auf den Gebieten Planung, Bau, Betrieb und Management elektrischer Verteilungsnetze. Begleitend zu seiner Berufstätigkeit promovierte er an der TU Dresden zum Thema «Optimierung des Störungsmanagements in Verteilungsnetzen». Nach der Promotion war er bei Unternehmensberatungen und kommunalen Versorgungsunternehmen als Führungskraft tätig. Seit 2018 ist er Technischer Leiter der Stadtwerke Schwabach GmbH.

Dr. Thomas Hiller ist Experte für Technisches Sicherheitsmanagement beim Forum Netztechnik Netzbetrieb (FNN) im VDE und Lehrbeauftragter an den Hochschulen für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt und Ansbach.

Prof. Dr.-Ing. MARKUS H. ZINK

Nach seiner Ausbildung zum Industriekaufmann studierte Prof. Zink Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Elektrische Energietechnik, zunächst im Diplom- und später im Masterstudiengang an der Technischen Hochschule Würzburg-Schweinfurt (THWS). In seiner Industriezeit war er im Bereich der supraleitenden Magnetspulen, u. a. für Anwendungen in der Kernfusion, zunächst als Laborleiter im Forschungszentrum Karlsruhe und anschließend als Projektleiter und Entwicklungsingenieur bei der Babcock Noell GmbH tätig. Während dieser Zeit war er auch Lehrbeauftragter an der THWS im Bereich der Kerntechnik und veröffentlichte 2009 sein Fachbuch „Kerntechnik“ im Vogel-Verlag. 2010 wechselte er zur EnBW Kernkraft und forschte im Bereich der Zustandsbewertung von elektrischen Isoliersystemen. 2013 wurde er zum Dr.-Ing. promoviert und auf eine Professur an der THWS berufen.

Professor Zink vertritt dort die Lehrgebiete Elektrische Energietechnik sowie Hochspannungstechnik. Seit 2019 ist er Leiter des Instituts für Energie- und Hochspannungstechnik und des Hochspannungslabors. Er forscht im Bereich der Zustandsbewertung elektrischer Isoliersysteme und den dielektrischen Eigenschaften von Isolierwerkstoffen.

Vorwort

Die Energiewende bedeutet einen zunehmenden Wegfall von konventionellen (Groß-) Kraftwerken und einen Ausbau der Erneuerbaren in der Fläche. Dies verändert die Energieflüsse grundlegend und bringt immense Veränderungen in der Struktur der elektrischen Energienetze mit sich. Für diese Aufgaben müssen die Netze entsprechend ertüchtigt werden. Die meisten Bürgerinnen und Bürger nehmen v. a. die Veränderungen in den Höchstspannungsnetzen wahr, z. B. die Großprojekte im Bereich der Hochspannungs-Gleichstromübertragung wie SuedLink, SuedOstLink oder SuedWestLink. Mindestens von gleicher Bedeutung für die Energiewende ist aber die Ertüchtigung der Verteilnetze in der Mittelspannung aufgrund der hohen dort installierten Leistung erneuerbarer Energien und der zunehmenden Verbraucher im Bereich Wärme und Mobilität. Man schätzt, dass die Substituierung fossiler Energieträger durch elektrische Energie den Strombedarf in den kommenden 20 Jahren etwa um den Faktor 2 erhöhen wird.

Oft wird bei diesen Überlegungen nur die Übertragung von Wirkleistung thematisiert. Dabei ist aber auch das Blindleistungsmanagement der Stromnetze von zentraler Bedeutung, denn dadurch wird die Aufrechterhaltung der Netzspannung sichergestellt. Bisher haben insbesondere die zentral betriebenen Kraftwerke die Blindleistungsregelung übernommen. Durch deren Wegfall und den sich ändernden Blindleistungsbedarf muss das Blindleistungsmanagement überdacht werden. Dies war die Motivation, dieses Buch zu verfassen und neben den Grundlagen auch praktische Hinweise für das Blindleistungsmanagement im Netz aufzuzeigen. Der Schwerpunkt der Betrachtungen ist das Verteilnetz, vor allem die Mittelspannung, jedoch sind die hier enthaltenen Ansätze auch auf andere Spannungsebenen übertragbar.

Der Begriff Blindleistung ist erfahrungsgemäß schwer zu greifen. Zur Erläuterung wird sie gerne mit dem Schaum auf dem Bier verglichen, was zwar anschaulich zu sein scheint, aber wenig zum Verständnis beiträgt. Deshalb wurde in diesem Buch versucht, besonders bei der Darstellung der Grundlagen auf die Verständlichkeit zu achten und die verwendeten Gleichungen ausführlich und anschaulich herzuleiten. Somit sind die Inhalte auch einem breitem Fachpublikum zugänglich. Das Buch richtet sich an Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bei Netzbetreibern, Ingenieurbüros und Fachbetrieben ebenso wie an Studierende und Auszubildende.

April 2024

Andreas Heier, Thomas Hiller und Markus H. Zink

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	6
1 Einführung	
2 Physikalische Grundlagen	
2.1 Wirkleistung im ohmschen Verbraucher bei Gleichspannung	12
2.2 Wirkleistung im ohmschen Verbraucher bei Wechselspannung ...	12
2.3 Blindleistung im kapazitiven Blindwiderstand	15
2.4 Blindleistung im induktiven Blindwiderstand	17
2.5 Blindleistungskompensation	19
3 Betriebsverhalten der elektrischen Leitung	
3.1 Beschreibung der elektrischen Leitung	25
3.1.1 Ersatzschaltbild einer einphasigen Leitung	25
3.1.2 Ersatzschaltbild einer Drehstromleitung	27
3.2 Ströme auf der elektrischen Leitung	29
3.2.1 Kapazitiver Blindstrom (lastunabhängiges Verhalten)	30
3.2.2 Induktiver Blindstrom und Wirkstrom (lastabhängiges Verhalten)	32
3.2.3 Blindleistung einer Leitung	33
3.2.4 Natürlicher Strom	35
3.2.5 Thermischer Grenzstrom	37
4 Einfluss der Blindleistung auf den Betrieb der Verteilnetze	
4.1 Grundlegende Betrachtungen, P - Q -Diagramm	39
4.2 Spannungshaltung und -änderung	49
4.2.1 Phasenwinkel δ	55
4.2.2 Netzimpedanzwinkel Ψ	59
4.2.3 Praxisbeispiele: Anschluss von Drosselspulen	64
4.3 Netzverluste	66
4.4 Lastfluss und Netzstabilität	71
4.5 Fluktuierender Austausch von Leistung	79
4.6 Statistische Auswertung	82

5	Rechtliche und regulatorische Vorgaben zum Blindleistungsmanagement	
5.1	Vorgaben für Verbraucher an Verteilnetzen	90
5.2	Vorgaben für Einspeiser	91
5.3	Regelungen für den Blindleistungsaustausch zwischen Netzbetreibern	95
5.4	Vorgaben für die Blindleistungsbeschaffung von Netzbetreibern	96
6	Blindleistung als Systemdienstleistung	
6.1	Überblick Systemdienstleistungen	97
6.2	Bepreisung und Abrechnung von Blindleistung	99
6.3	Blindleistung als Produkt und Blindleistungsmarkt	100
6.4	Blindleistungsmarkt	103
7	Statische Spannungshaltung und Blindleistungsregelung	
7.1	Einleitung	107
7.2	Beeinflussung durch das Verteilnetz	113
7.3	Beeinflussung durch Erzeugungsanlagen	114
7.4	Auswirkungen im Verteilnetz	118
7.5	Technisches Blindleistungsmanagement	128
8	Anhang	
8.1	Blindleistungsbetrachtung mit komplexen Größen	133
8.2	Zusätzliche Anmerkungen zu Leitungen	137
8.3	Blindleistungsbedarf eines Transformators	140
	Literaturverzeichnis	145
	Stichwortverzeichnis	149

Einführung

1

Die Versorgung unserer Gesellschaft mit nachhaltiger, klimafreundlicher und vor allem günstiger Energie ist eine der zentralen Herausforderungen unserer Zeit. Auch die durch den Krieg in der Ukraine ausgelöste Energiekrise hat verdeutlicht, wie abhängig unsere Gesellschaft von zuverlässig verfügbarer und bezahlbarer Energie ist. Nicht erst seitdem ist der Begriff *Energiewende* in aller Munde. So schreitet der für die Dekarbonisierung erforderliche Ausbau der erneuerbaren Energieträger voran und ist deutlich wahrnehmbar. Der elektrischen Energie kommt dabei eine immer größere Bedeutung zu – es ist im Zusammenhang mit der Substitution fossiler Energieträger in allen Sektoren sogar von der Entwicklung hin zu einer „All-Electric-Society“ die Rede. Durch den Wegfall großer zentraler Kraftwerke und den vermehrten Ausbau der dezentralen Erzeugungsanlagen insbesondere im ländlichen Raum und auf den unteren Spannungsebenen werden die elektrischen Verteilnetze mehr und mehr zur Stütze der Energiewende.

Dies bewirkt eine Verschiebung der klassischen Aufgaben von Stromnetzbetreibern. Während bislang der Energiefluss „von oben nach unten“ erfolgte, also von den Großkraftwerken im Verbundnetz zu den Verbrauchern, nimmt heute die im Verteilnetz in der Nieder- und Mittelspannung angesiedelte Energieerzeugung immer mehr Einfluss auf das Übertragungsnetz.

Diesen Veränderungen muss mit technischen Maßnahmen begegnet werden, um die Wirkleistungsflüsse z. B. durch Zubau von Übertragungskapazität, aber auch von Speichern in einer wirtschaftlichen und nachhaltigen Art und Weise zu steuern. Ferner gilt es, die mit der veränderten Erzeugungs- und künftig auch Laststruktur einhergehenden Blindleistungsbedarfe zu decken.

Schon heute führen unterschiedliche regionale und lokale Anforderungen an den Austausch von Wirk- und Blindleistung zwischen vor- und nachgelagerten Netzbetreibern zu teilweise neuen Aufgabengebieten und erfordern klare Abstimmungen hinsichtlich der netzdienlichen Systemdienstleistungen. Zum einen spielt die Spannungshaltung im Netz eine Rolle, die eine eigene Betrachtung in Bezug auf Blindleistung erfordert, zum anderen ist der Austausch von Blindleistung mit dem vorgelagerten Netzbetreiber ein der Spannungshaltung zum Teil widerstrebender Prozess.

So erwächst durch die Dezentralisierung der Energieerzeugung auch ein Interessenkonflikt: Einige Anlagenbetreiber erbringen einige Systemdienstleistungen

kostenlos. Systemdienstleistungen sollen aber die Wirtschaftlichkeit nicht gefährden und im Idealfall noch Zusatzeinnahmen generieren. Netzbetreiber hingegen haben ein Interesse an obligatorischen Systemdienstleistungen, denn für sie bedeuten Systemdienstleistungen ebenfalls erst einmal nur Zusatzkosten, die über ein Netzentgelt refinanziert werden sollen. Dieser Zielkonflikt wird angegangen werden müssen.

In diesem Buch wird dazu speziell auf den Austausch von Blindleistung eingegangen. Es behandelt Fragen wie beispielsweise:

- Was ist Blindleistung und wie entsteht sie?
- Welche Auswirkungen hat Blindleistung im Verteilnetz und wie kann mit Blindleistung gerechnet werden?
- Welche Eigenschaften hat das nur regional sinnvoll einsetzbare Dienstleistungsprodukt und wie kann es gezielt vermarktet werden?

i

Ist in diesem Buch von Blindleistung die Rede, ist ausschließlich die Grundswingungsblindleistung gemeint und auch nur diese wird betrachtet. Oberswingungsblindleistung, auch Verzerrungsleistung genannt, ist ein Phänomen aus dem Bereich der Spannungsqualität (Power Quality).

In Kapitel 2 werden zunächst die physikalischen Grundlagen behandelt. Es werden durch die Betrachtung einzelner Verbraucher an Gleich- und Wechselspannung die Begriffe Blindleistung, Blindströme und Blindleistungskompensation erläutert. Aufbauend auf diese Grundlagen wird in Kapitel 3 zunächst das Ersatzschaltbild einer einphasigen Leitung und anschließend einer Drehstromleitung hergeleitet, sodass damit auch das Betriebsverhalten der elektrischen Leitung untersucht und Begriffe wie der natürliche Strom eingeführt werden können. Kapitel 4 geht dann spezieller auf einzelne technische Aspekte beim Betrieb der Verteilnetze ein. Die Kapitel 5 und 6 geben Hinweise zu rechtlichen und regulatorischen Vorgaben zum Blindleistungsmanagement sowie zur Verwendung von Blindleistung als Systemdienstleistung. In Kapitel 7 wird aufgezeigt, welche Möglichkeiten der Netzbetreiber hat, um auf die Blindleistung im Netz Einfluss zu nehmen, insbesondere auch im Hinblick auf die Verwendung und die Relevanz der zunehmend dezentralen Erzeugungsanlagen.

Physikalische Grundlagen

2

Auf die Frage „Was ist Blindleistung?“ bekommt man manchmal die scherzhafte Antwort: „Das ist der Schaum auf dem Bier“. Dieser Vergleich ist zugegebenermaßen sehr anschaulich, wenn auch nicht ganz korrekt, wie am Ende von Abschnitt 2.4 genauer ausgeführt. Vielleicht soll durch diese Antwort aber manchmal auch verschleiert werden, dass der Antwortgebende selbst den Sachverhalt nicht genau erklären kann. In diesem Kapitel wird daher erläutert, was Blindleistung bzw. Blindstrom ist und wie Blindleistung grundsätzlich auf der elektrischen Leitung wirkt. Bei der Darstellung wird versucht, durch einfache Schaltbilder und die Betrachtung der Verläufe von Strom und Spannung im Zeitbereich das Thema Blindleistung möglichst anschaulich zu vermitteln.

Zur Beschreibung der Leistung wird im Folgenden von einem einfachen Stromkreis ausgegangen (Bild 2.1). Für die Erläuterungen in den Abschnitten 2.1 bis 2.4 werden Verbraucher und Quelle dieses Stromkreises variiert. Abschnitt 2.5 zeigt abschließend auf, wie das gegensätzliche Verhalten von Induktivität und Kapazität grundsätzlich für eine Blindleistungskompensation genutzt werden kann. Im nächsten Kapitel 3 wird dann die hier zunächst als ideal angenommene Leitung zwischen Quelle und Verbraucher mit ihren elektrischen Ersatzelementen eingeführt, sodass auch die Blindleistungsphänomene auf der Leitung verstanden werden können.

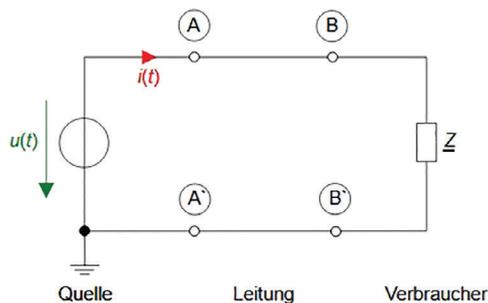


Bild 2.1 Stromkreis mit Quelle und Verbraucher sowie einer zwischen dem Einspeiseknotenpunkt A und dem Ausspeiseknotenpunkt B befindlichen Leitung, die zunächst als ideal angenommen wird.

2.1 Wirkleistung im ohmschen Verbraucher bei Gleichspannung

Im Stromkreis nach Bild 2.1 sei der Verbraucher Z zunächst ein reiner ohmscher Widerstand mit $R = 2 \Omega$. Als Spannungsform der Quelle wird eine Gleichspannung $U_{\text{DC}} = 10 \text{ V}$ verwendet. Dadurch stellt sich im Kreis ein Strom von

$$I = \frac{U}{R} = 5 \text{ A} \quad (2.1)$$

ein. Die im Verbraucher umgesetzte Augenblicksleistung ergibt sich aus dem Produkt der Augenblickswerte von Spannung und Strom zu jedem Zeitpunkt:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2.2)$$

Die Wirkleistung ist definiert als Mittelwert der Augenblicksleistung und trägt die Einheit Watt [W]. Da in diesem Beispiel beide Größen zeitunabhängig sind, ist auch die Leistung eine konstante Größe und somit eine reine Wirkleistung:

$$P = \overline{p(t)} = U \cdot I = 50 \text{ W} \quad (2.3)$$



Das Einsetzen von Gleichung (2.1) in Gleichung (2.3) führt zu den ebenfalls für die Leistung gebräuchlichen Ausdrücken

$$P = \frac{U^2}{R} = R \cdot I^2 \quad (2.4)$$

2.2 Wirkleistung im ohmschen Verbraucher bei Wechselspannung

Nun wird der Fall betrachtet, wenn im gleichen Stromkreis (Bild 2.1) die Quelle eine Wechselspannung liefert:

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ mit } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.5)$$

Daraus folgt mit dem ohmschen Gesetz aus Gleichung (2.1) auch für den Strom im Kreis ein zeitabhängiger Verlauf:

Betriebsverhalten der elektrischen Leitung

3

Basierend auf den im vorigen Kapitel vorgestellten Grundlagen über Blindleistung und das elektrische Verhalten von kapazitiven und induktiven Elementen wird nun das Betriebsverhalten der elektrischen Leitung untersucht. Dazu wird in Abschnitt 3.1 zunächst das Ersatzschaltbild der elektrischen Leitung erläutert, bevor in 3.2 auf einzelne Betriebszustände eingegangen wird.

3.1 Beschreibung der elektrischen Leitung

3.1.1 Ersatzschaltbild einer einphasigen Leitung

Eine elektrische Leitung dient dazu, Energie von einem Einspeiseknotenpunkt A zum Verbraucher am Ausspeiseknotenpunkt B zu transportieren. Für die Leitung, die im Stromkreis nach Bild 2.1 noch als ideal angenommen wurde, sollen im Folgenden die Ersatzelemente zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens hergeleitet werden.

Der Energietransport von der Quelle zum Verbraucher findet bei einer bestimmten elektrischen Spannung statt, mit der die Leitung betrieben wird. Dadurch stellt sich je nach Höhe der Verbraucherimpedanz ein gewisser Strom auf der Leitung ein.

Damit die Energieübertragung effizient, also mit möglichst wenig Verlusten erfolgt, wird die Spannung auf der Leitung erhöht, sodass bei gegebener zu übertragender Leistung der Strom kleiner wird. Aus Gl. 2.4 geht hervor, dass am ohmschen Verbraucher die Verluste proportional zum Quadrat des Stromes sind, das gilt also auch am ohmschen Widerstand der Leitung. Durch die Anhebung der Übertragungsspannung lässt sich damit die Effizienz der Übertragung enorm steigern.

Einfluss der Blindleistung auf den Betrieb der Verteilnetze

4

4.1 Grundlegende Betrachtungen, P - Q -Diagramm

Früher waren Netze geprägt von induktivem Verhalten, das sich vor allem aus dem reinen Bezug von Energie und auch aus den überwiegend aufgebauten Freileitungsnetzen ergab. Heute hingegen ist durch den hohen Verkabelungsgrad und wegen der zunehmenden Anzahl an leistungselektronischen Verbrauchern für Bezug und Einspeisung von Energie in das Netz ein kapazitives Verhalten beobachtbar. Für die statische Spannungshaltung und die dynamische Netzstützung wird in Übertragungs- und Verteilnetzen Blindleistung benötigt.

In Übertragungsnetzen ist ein weiterer wichtiger Einsatzbereich von Blindleistung der Transport von elektrischem Strom über weite Entfernungen. In Verteilnetzen steht die Kompensation und die Deckung des lokalen Bedarfes an Blindleistung im Vordergrund. In den folgenden Kapiteln wird der Einfluss von Blindleistung im Netz betrachtet. Wie verhält sich Blindleistung zur Spannung oder welchen Einfluss hat sie auf den Lastfluss? Die Betrachtung der Blindleistung aus unterschiedlichen Gesichtspunkten bildet die Grundlage für ein tieferes Verständnis der Materie.

Die im Verteilnetz auftretende Blindleistung hat zum einen ihre Ursache in den Netzbetriebsmitteln selbst und zum anderen in den angeschlossenen dezentralen Erzeugungsanlagen und Verbrauchern.

Je nach Auftreten der Blindleistungsflüsse im Netz haben sie unterschiedliche Auswirkungen. Dieses Kapitel beschreibt vor allem qualitativ den Einfluss der Blindleistung im Netz. Damit soll eine Vorstellung zu den Auswirkungen erreicht werden und daraus auch zu den Möglichkeiten, diesen Auswirkungen zu begegnen.

Zukünftig werden eine Reihe von Faktoren sich merkbar auf den Blindleistungshaushalt auswirken: die Zunahme der dezentralen Erzeugungsanlagen, der damit einhergehende Netzausbau und neue Lasten wie Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge oder Wärmepumpen. So wird der Netzbetreiber mehr denn je gefordert sein, die vorhandenen Möglichkeiten auszuschöpfen und die Bewirtschaftung der Blindleistung im Netz als Systemdienstleistung mitzubedenken.

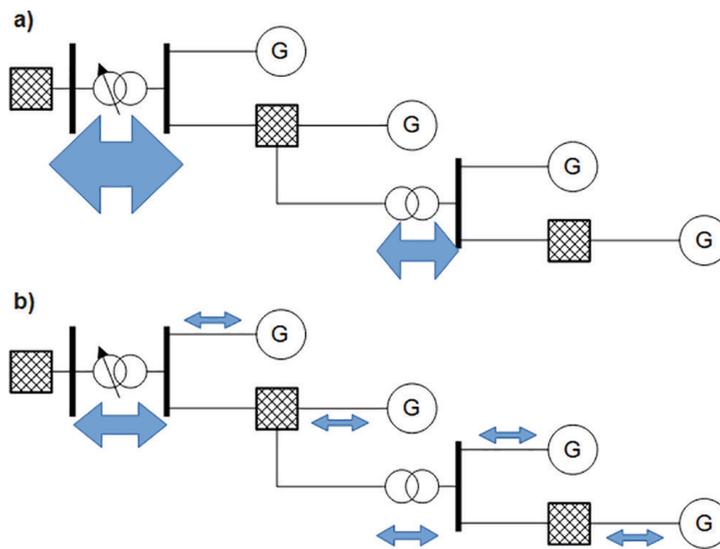


Bild 4.1 Blindleistungsaustausch im Netz a) ohne und b) mit Beeinflussung

Die verfügbare Blindleistung lässt sich weiter unterteilen in:

- Spannungshaltungs-Q
dient der Spannungshaltung im eigenen Netz
- Eigen-Bilanz-Q
Bewirtschaftung des eigenen Netzes mit Blindleistung, um den Austausch von Blindleistung mit dem vorgelagerten Netzbetreiber in den vorgegebenen Grenzen zu halten
- Fremd-Bilanz-Q
bilateral vereinbarter Austausch von Blindleistung mit dem vorgelagerten Netzbetreiber, unter Umständen auch außerhalb der vorgegebenen Grenzen

Verbraucherzählpeilsystem (VZS)

In der Energieversorgung wird überwiegend das Verbraucherzählpeilsystem verwendet. Bei diesem wird erzeugte Wirkleistung negativ (Vorzeichen minus) und bezogene Wirkleistung positiv (Vorzeichen plus) gezählt. Bei Blindleistung ist kapazitives Verhalten negativ und induktives Verhalten positiv. Die Definition von „positiv“ und „negativ“ kommt, wie in Abschnitt 2.3 angemerkt, von der Definition der Phasenverschiebung und hat keine tiefere Bedeutung im Sinne von „gut“ oder „schlecht“.

Bei Wirkleistung gilt, völlig unabhängig vom verwendeten Zählpeilsystem:

- Ein Wirkleistungserzeuger wandelt andere Energiearten, z. B. thermische Energie (Turbogenerator) oder Strahlungsenergie (Fotovoltaik) in elektrische Energie um.
- Ein Wirkleistungsverbraucher wandelt elektrische Energie in Nutzenergie (z. B. Strahlungsenergie bei Beleuchtung, mechanische Energie bei Antrieben) um.
- Bei Wirkleistungstransporten fließt die Energie immer vom Erzeuger zum Verbraucher.

Rechtliche und regulatorische Vorgaben zum Blindleistungsmanagement

5

Für das Blindleistungsverhalten von Einspeisern und Verbrauchern in Stromnetzen gibt es Vorgaben aus Rechtsverordnungen und technischen Regeln.

Maßgebend sind in Mitgliedsländern der Europäischen Union die Network Codes, die vom europäischen Verband ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity, Europäischer Verband der Strom-Übertragungsnetzbetreiber) erarbeitet wurden. Eine Übersicht dieser Codes ist in Bild 5.2 zu sehen.



Bild 5.1
Logo des Verbandes ENTSO-E

Connection	Operations	Market
Demand Connection Code	Emergency & Restoration	Electricity Balancing
Requirements for Generators	System Operations	Forward Capacity Allocation
HVDC Connections		Capacity Allocation & Congestion Management

Bild 5.2 Übersicht über die EU Network Codes

Die EU Network Codes werden durch das Forum Netztechnik Netzbetrieb, einen regelsetzenden Ausschuss des VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik) in das nationale deutsche Regelwerk umgesetzt.



Bild 5.3
Logo des FNN

Die Anforderungen des Demand Connection Codes (kurz DCC) an das Blindleistungsverhalten von Netznutzern sind in Bild 5.4 aufgeführt. Sie gelten nur für Netzkunden, die direkt am Übertragungsnetz (380 oder 220 kV) angeschlossen sind.

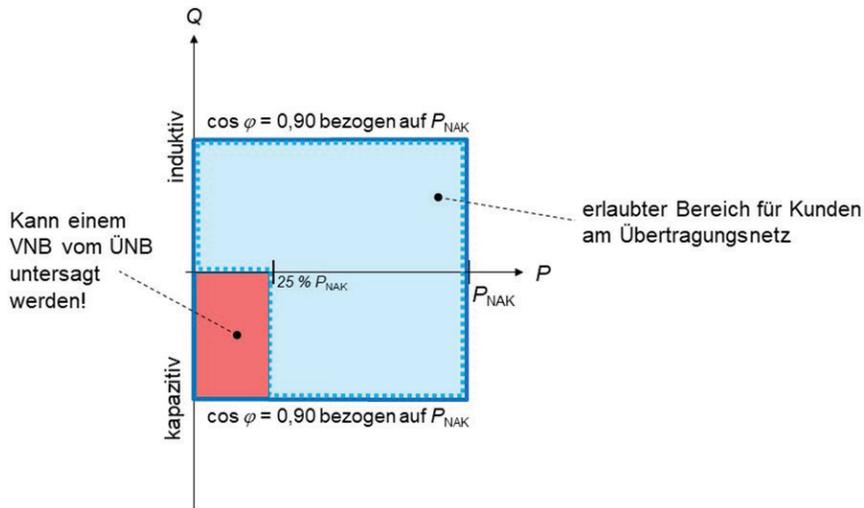


Bild 5.4 Anforderungen des Demand Connection Codes (kurz DCC) an das Blindleistungsverhalten von Netznutzern am Übertragungsnetz

5.1 Vorgaben für Verbraucher an Verteilnetzen

Für Kunden der Netzebenen 6 und 7 (d. h. Versorgung mit Niederspannung 400 V) gilt die Strom-Netzanschlussverordnung (NAV). Die NAV gibt es seit 2007, ihr Vorläufer war die Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Elektrizitätsversorgung von Tarifkunden (AVBEltV) von 1979. Hier $\cos \varphi$ bis zu 0,8 induktiv. Die sieben Netzebenen, in die das Stromversorgungsnetz in Deutschland, Österreich und der Schweiz gegliedert ist, sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Tabelle 5.1 Netzebene des Stromverteilungsnetzes

Netzebene	Erläuterung
1	Leitungsnetz Höchstspannung (380 oder 220 kV)
2	Umspannung Höchst-/Hochspannung
3	Leitungsnetz Hochspannung (110 kV)
4	Umspannung Hoch-/Mittelspannung
5	Leitungsnetz Mittelspannung (20 oder 10 kV)
6	Umspannung Mittel-/Niederspannung)
7	Leitungsnetz Niederspannung (400/230 V)

Blindleistung als Systemdienstleistung

6.1 Überblick Systemdienstleistungen

Systemdienstleistungen sind Leistungen, die der Netzbetreiber erbringt, um einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb zu ermöglichen und zu gewährleisten. Da im weiteren Verlauf hierauf immer wieder Bezug genommen wird, sollen sie kurz vorgestellt werden. Bereits im TransmissionCode 2007 [36] wurden Systemdienstleistungen ausführlich beschrieben. Bild 6.1 zeigt eine Übersicht der Systemdienstleistungen.

In jeder Spannungsebene muss die Spannung innerhalb vorgegebener Grenzen eingehalten werden. Früher waren dafür die großen Kraftwerke im Phasenschieberbetrieb eingesetzt, um über die Blindleistung die Spannung in Grenzen zu halten. Heute haben dezentrale Erzeuger einen wesentlichen Einfluss auf die Spannungshaltung in Mittel- und Niederspannung. So haben sich im Laufe der Zeit einige der typischen Systemdienstleistungen der Übertragungsnetzbetreiber auf die Verteilnetzbetreiber übertragen.

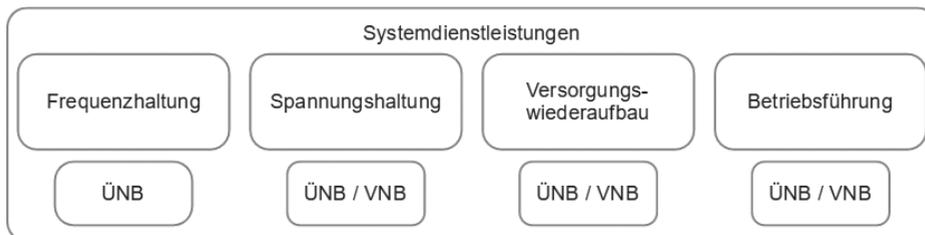


Bild 6.1 Übersicht über die Systemdienstleistungen

Frequenzhaltung

Übertragungsnetzbetreiber sind für die Frequenzhaltung zuständig. Dazu sind Erzeugung und Verbrauch stets im Gleichgewicht zu halten. Das ist zugleich die wesentliche Voraussetzung für einen stabilen Netzbetrieb. Für die Einhaltung einer konstanten Frequenz wird die Momentanreserve benutzt. Dies ist eine dem Energiesystem

Statische Spannungshaltung und Blindleistungsregelung

7

7.1 Einleitung

Lange war es üblich, dass Blindleistung durch den Übertragungsnetzbetreiber ausgeregelt wurde, doch fallen diese Möglichkeiten heute zunehmend weg. Der vertikale Austausch zwischen dem vor- und nachgelagerten Netzbetreiber ist zudem stark von den Gegebenheiten vor Ort abhängig. Dazu kommt noch ein Paradigmenwechsel durch die Energiewende und die in zunehmender Anzahl im Verteilnetz anzutreffenden Erzeugungsanlagen. Es muss also das Zusammenspiel der dezentralen Erzeugungsanlagen mit dem Netz, das die Wirkleistung zu den Verbrauchern transportiert, betrachtet werden. Dazu muss untersucht werden, welche gegenseitigen Beeinflussungsmöglichkeiten von Erzeugungsanlagen und Netz es gibt und wie diese zusammenspielen können.

Die Netzplanung umfasst im Wesentlichen Netzberechnungen, die auf Annahmen oder Messwerten beruhen. Daneben gibt es noch zwei weitere Möglichkeiten, um auf die Spannung einzuwirken: zum einem mit Spannungsregelungskonzepten und zum anderen über Lastmanagement. Hier soll der Schwerpunkt auf dem Einfluss der Blindleistung liegen. Zur Reduzierung von Netzverlusten und Minimierung der übertragenen Scheinleistung ist die wesentliche Einflussgröße die Blindleistung. Dazu kommt die statische Spannungshaltung, die ohne Blindleistung nicht möglich ist. Die statische Spannungshaltung ist von der dynamischen Netzstützung abzugrenzen. Die dynamische Spannungshaltung adressiert schnelle Spannungsänderungen, in der Regel Spannungseinbrüche im Netz. Statische Spannungshaltung meint im weiteren Sinne das regelungstechnische Verhalten am Netz.

Spannungsstabilität und Spannungshaltung

Eine Spannungsstabilität liegt dann vor, wenn an allen Sammelschienen im Netz während oder nach einer Störung wieder eine stabile Spannung anliegt. Die Spannungshaltung dagegen bedeutet, dass die Spannung jederzeit und an jedem Netzknoten innerhalb der zulässigen Grenzen gehalten wird. In beiden Fällen stehen diese Netzeigenschaften direkt mit einer ausreichenden Deckung der Blindleistung im Zusammenhang.

Ergänzend werden die blindleistungsunabhängigen Möglichkeiten kurz beschrieben. Bereits an der Quelle, dem Umspanntransformator oder dem regelbaren Ortsnetztransformator, ergeben sich zwei Möglichkeiten: die Stufung in Abhängigkeit von der Netzlast und somit der Spannung an der Sammelschiene (Steuerung lastabhängig, zentral) und alternativ dazu eine spannungsabhängige Stufung, die die Zustände im Netz berücksichtigt (Steuerung spannungsabhängig, dezentral). Dazu ist allerdings auch eine Messwerterfassung im Netz erforderlich. Dabei geht es um die Anpassung der Spannung im Netz unabhängig vom Lastfluss über den Umspanntransformator. Das mag auf den ersten Blick etwas undurchsichtig erscheinen. Jedoch ist es heute bereits so, dass der dezentral erzeugte Strom nicht mehr zwingend das Netz verlassen muss. Diesem Umstand kann so Rechnung getragen werden. Dazu können Längsregler im Netz eingesetzt werden, um punktuell größere Potentialdifferenzen auszugleichen.

Grundsätzlich geht die Spannungshaltung mit der Bereitstellung ausreichend lokaler Blindleistung einher. Dazu kommt die ausreichende Bereitstellung von Kurzschlussleistung, um die Spannungssteifigkeit zu gewährleisten.

Die Kurzschlussleistung wird sich auf absehbare Zeit nur unwesentlich ändern. Sie wird sich anders aufteilen. Wenn konventionelle Kraftwerke nach und nach vom Netz gehen, verlagert sich die Kurzschlussleistung aufgrund des zunehmenden Netzausbaus in die Fläche. Während früher die Kurzschlussleistung an der Quelle zur Verfügung stand, liegt sie heute auch an Netzknoten innerhalb des Verteilnetzes an.

Grundsätzlich bieten sich in einem künftig dezentral organisierten Erzeugungsumfeld für den Verteilnetzbetreiber folgende Optionen an:

- Blindleistungsbewirtschaftung im eigenen Netz (dazu mehr in den folgenden Kapiteln)
- Prognose der Kurzschlussbeiträge aus den Erzeugungsanlagen und den sich vergrößernden Kurzschlussbeiträgen wegen des Netzausbaus (Leitungen, Transformatoren)
- Untersuchung der Auswirkungen auf die Schutzkonzepte im Hinblick auf die Kurzschlussleistung

Netzstabilität

Netzstabilität wird durch unterschiedliche Mechanismen erreicht. Die bekanntesten Verfahren für Lastmanagement sind heute sicherlich das Einspeisemanagement bzw. der Redispatch und das Netzsicherheitsmanagement wegen drohender Netzüberlastung. Für den Verteilnetzbetreiber jedoch weitaus näher liegend ist die Beeinflussung der Blindleistung oder die gezielte Laststeuerung. Die Laststeuerung ist allerdings nicht Thema dieses Buches.

Die Stabilität von energietechnischen Systemen wird in drei Bereiche (mit weiterer Unterteilung) eingeordnet (Bild 7.1):

- Frequenzstabilität
 - Kurzzeit
 - Langzeit
- Polradwinkelstabilität
 - statisch/Kleinsignal
 - transient/Großsignal

- Spannungsstabilität
 - statisch/Kleinsignal
 - dynamisch/Großsignal

Frequenzstabilität bedeutet, den Synchronismus zwischen allen Erzeugungsanlagen im Netz zu erhalten. Für Erzeugungsanlagen im Netz, die Leistung zum Ausgleich des aktuellen Verbrauchs bereitstellen, dient die Polradwinkelstabilität. Diese beiden Stabilitätsaspekte finden vor allem im Übertragungsnetz Anwendung. Für den Verteilnetzbetreiber ist die Spannungsstabilität insgesamt wichtig, also die Frage, wie die Netzspannung in den zulässigen Grenzen gehalten werden kann.

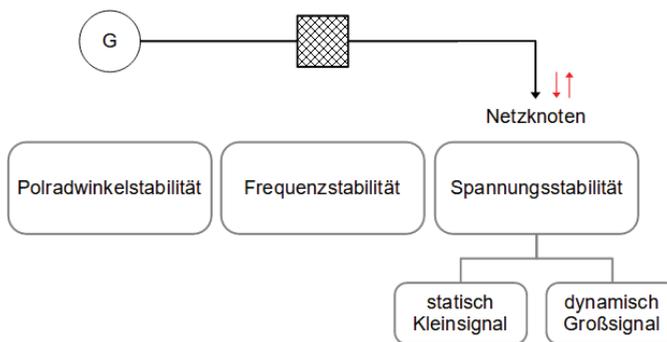


Bild 7.1 Übersicht Stabilitätsaspekte

Um das regelungstechnische Verhalten am Netz für einzelne Stabilitätsaspekte besser zu überblicken, liefert Bild 7.2 eine Gegenüberstellung dazu, in welchen Zeitspannen welche Maßnahmen für den Netzbetrieb ergriffen werden können.

Dynamische Spannungshaltung

Das Netz während einer schnellen Spannungsänderung zu stützen, etwa während eines Fehlers oder bei Schaltvorgängen, ist das Thema der dynamischen Stabilität. Hier werden Großsignalstörungen behandelt, die von Ausgleichs- oder Einschwingvorgängen begleitet werden können. Großsignalstörungen führen zu wesentlichen Veränderungen im Lastfluss oder der lokalen Spannung im Netz.

Für die Anschlussbeurteilung und den Betrieb werden Parameter für die dynamische Netzstützung vorgegeben oder berechnet, dies ist in den Technischen Anschlussregeln beschrieben.

Statische Spannungshaltung

Die statische Spannungshaltung hat eine Kleinsignalstabilität zum Ziel, darunter wird der Ausgleich von Lastschwankungen während des normalen Netzbetriebes verstanden.