

Unterrichtsmaterialien für die Sekundarstufe 2

Elektrische Energieversorgung



Inhalt

1	Elektrische Energieversorgung	Seite 3
1.1	Energie-Übertragung	Seite 3
1.2	Hochspannungsdrehstromübertragung (HDÜ)	Seite 4
1.3	Netzformen	Seite 6
1.4	Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)	Seite 7
2	Betriebsmittel der Energieversorgung	Seite 9
2.1	Generatoren	Seite 9
2.1.1	Funktionsprinzip	Seite 9
2.1.2	Synchrongeneratoren	Seite 10
2.1.2.1	Außenpolmaschine	Seite 10
2.1.2.2	Innenpolmaschine	Seite 10
2.1.2.3	Drehstrom-Synchrongeneratoren	Seite 10
2.1.3	Betriebsverhalten des Synchrongenerators	Seite 10
2.1.3.1	Leerlauf	Seite 10
2.1.3.2	Belastung	Seite 11
2.1.3.3	Ausgangsspannung	Seite 12
2.2	Transformatoren	Seite 13
2.2.1	Funktionsprinzip	Seite 13
2.2.2	Ersatzschaltbild	Seite 14
2.2.3	Betriebsverhalten	Seite 14
2.2.3.1	Leerlauf	Seite 14
2.2.3.2	Kurzschluss	Seite 15
2.3	Leitungen, Kabel	Seite 16
2.3.1	Aufgaben	Seite 16
2.3.2	Kabel	Seite 16
2.3.3	Freileitungen	Seite 17
2.3.4	Gasisolierte Rohrleiter	Seite 18
2.3.5	Durchschlagmechanismen	Seite 18
2.3.5.1	Elektrischer Durchschlag	Seite 18
2.3.5.2	Wärmedurchschlag	Seite 19
2.3.5.3	Teilentladungsdurchschlag (Erosionsdurchschlag)	Seite 19

3	Planung elektrischer Netze	Seite 20
3.1	Planungskriterien	Seite 20
3.1.1	(n-1)-Kriterium	Seite 20
3.1.2	Probabilistische Netzplanung	Seite 21
3.2	Lastflussberechnung	Seite 21
3.2.1	Elementare Berechnung der Knotenspannungen	Seite 22
3.2.2	Berechnung mittels Matrizenrechnung	Seite 23
3.2.3	Modellierung realer Netze	Seite 24
3.3	Kurzschluss und Starklast	Seite 25
3.3.1	Kurzschluss	Seite 26
3.3.2	Beispiel für eine Installation im Niederspannungsnetz	Seite 28
3.3.2.1	Netzschaltplan	Seite 28
3.3.2.2	Daten der elektrischen Betriebsmittel	Seite 28
3.3.2.3	Berechnung der Mitimpedanzen der Hochspannungsseite (größte Kurzschlussströme)	Seite 29
3.3.3	Computergestützte Berechnung	Seite 31
	Zusammenfassung und Ausblick	Seite 31
	Literaturverzeichnis	Seite 32



1. Elektrische Energieversorgung

Neben qualifizierten Arbeitskräften, Kapital, Technologien und Rohstoffen ist die Energieversorgung eine wesentliche Voraussetzung für die wirtschaftliche Entwicklung eines Landes. So stieg mit dem Wirtschaftswachstum auch der Energiebedarf stark an. Bis Mitte der 70er Jahre verdoppelte sich der Energieverbrauch nahezu naturgesetzlich alle 10 Jahre. Dem raschen Lastzuwachs folgte die Kraftwerkstechnik mit stetiger Entwicklung hin zu größeren Leistungseinheiten, die möglichst nah an den Verbrauchsschwerpunkten gebaut wurden. Gleichzeitig wurden die elektrischen Übertragungs- und Verteilnetze an den steigenden Verbrauch angepasst, beispielsweise durch ein enger gebautes Netz oder durch den Ausbau höherer Spannungsebenen. Dabei müssen folgende physikalische Besonderheiten berücksichtigt werden:

- Die Verbindung zwischen Erzeugung (Kraftwerk) und Verbrauch ist ausschließlich über Leitungen möglich.
- Strom lässt sich, im Gegensatz zu den Energierohstoffen, wie z. B. Gas, Erdöl oder Kohle, nicht direkt speichern, zumindest nicht in nennenswertem Umfang. Im Vergleich zu den in der öffentlichen Stromversorgung benötigten Energiemengen ist die chemische Speicherung in Batterien bislang völlig unerheblich. Auch andere Speichertechnologien für sehr spezielle Anforderungen, wie z. B. Druckluftspeicher oder supraleitende Spulen sind wirtschaftlich oder technologisch noch nicht ausgereift. Einzig die Speicherung in Wasserkraft (Pumpspeicherkraftwerke) ist als wirtschaftliche und zuverlässige Speichertechnologie verfügbar.

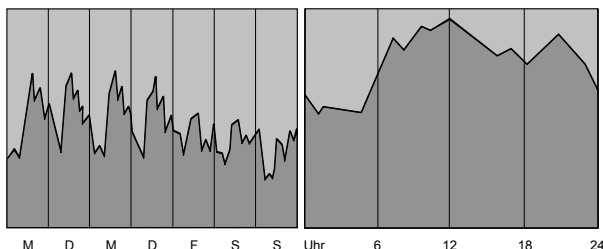


Abb. 1.1: Beispiel für ein Lastprofil

Der Strom muss also in dem Augenblick erzeugt werden, in dem er gebraucht wird. Der Verbrauch ist allerdings nicht immer gleich hoch. Er schwankt teilweise recht stark von Stunde zu Stunde, im Laufe eines Tages und je nach Wetter und Jahrestag. Beispielhaft für derartige Schwankungen ist in Abbil-

dung 1.1 das Lastprofil an einem Verbrauchsknoten für einen Tagesverbrauch bzw. für eine Woche dargestellt.

In industriell geprägten Ländern steigt mit der Aufnahme der industriellen Arbeiten der Strombedarf stark an und erreicht mittags die sogenannte „Kochspitze“. Am späten Nachmittag sinkt der Strombedarf wieder, um dann in den Abendstunden durch Beleuchtung und einen stärkeren privaten Verbrauch wieder anzusteigen. Die jeweiligen „Mittagsspitzen“ sind deutlich zu erkennen – auch die bereits am Freitag einsetzende Reduktion des Stromverbrauches durch abnehmende Fabrikationstätigkeit. Im Winter ist der Verbrauch durch elektrische Heizsysteme und Beleuchtung generell höher, in heißen Zonen, wie z. B. in Ländern des persischen Golfes, liegt dagegen die sogenannte Jahreshöchstlast, das ist die maximale, gleichzeitig abgenommene Leistung durch alle Verbraucher im Netz, in den heißen Sommermonaten (durch den hohen Anteil von Klimageräten). Auch in Deutschland ist hierdurch in den letzten Jahren ein Ansteigen der Sommerjahreshöchstlast zu beobachten.

Beispielsweise beträgt die Jahreshöchstlast in Deutschland ca. 76.300 MW bei einer abgesicherten Kraftwerksleistung (alle Kraftwerke, die zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehen) von etwa 83.000 MW.

1.1 Energie-Übertragung

Die von den Verbrauchern angeforderte elektrische Leistung muss von allen Kraftwerken über die Leitungen transportiert werden. Diese elektrische Leistung (Übertragungsleistung) ergibt sich rechnerisch für ein einphasiges System aus dem Produkt von Spannung und Strom.

$$P = U \cdot I \quad (1.1)$$

Damit stehen dem Energieversorgungsunternehmen zwei Einflussgrößen (Strom I und Spannung U) für die zu liefernde Leistung zur Verfügung. Da die Leitungen für den elektrischen Strom einen Widerstand (genauer: Impedanz) darstellen und die Verluste in den Leitungen dem Quadrat des Stromes proportional sind, sollte der Strom möglichst klein gehalten werden. Bei einer geforderten Übertragungsleistung sind demnach die Übertragungsspannungen so hoch wie technisch und wirtschaftlich möglich zu wählen. Dieser Zusammenhang gilt grundsätzlich für Drehstrom- und Gleichstromleitungen. Drehstromleitungen haben jedoch gegenüber Gleichstromleitungen ein schlechteres Übertragungsverhalten, das durch die Leiterinduktivitäten und Kapazitäten verursacht wird. Beispielsweise wird durch den Aufladevorgang der Leitungskapazitäten (insbesondere bei Kabeln)



2. Betriebsmittel der Energieversorgung

Die Energieversorgung basiert im Wesentlichen auf der Erzeugung elektrischer Energie (Generator), der Wandlung zwischen den verschiedenen Spannungsebenen (Transformator) und dem Transport bzw. der Verteilung zu den einzelnen Verbrauchern (über Freileitung und Kabel). Im Folgenden werden diese wesentlichen Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung näher beschrieben und ihre Wirkungsweise dargestellt.

2.1 Generatoren

2.1.1 Funktionsprinzip

Ein Generator wandelt mechanische Energie in elektrische Energie um. Er beruht auf dem folgenden Prinzip: Dreht man eine Leiterschleife der Fläche A im Magnetfeld eines Dauermagneten mit der magnetischen Flussdichte B , kommt es aufgrund der ständigen Änderung des magnetischer Flusses durch die Schleifenfläche zu einer elektromagnetischen Induktion in der Leiterschleife. Abb.2.1 zeigt das Prinzipbild eines Generators.

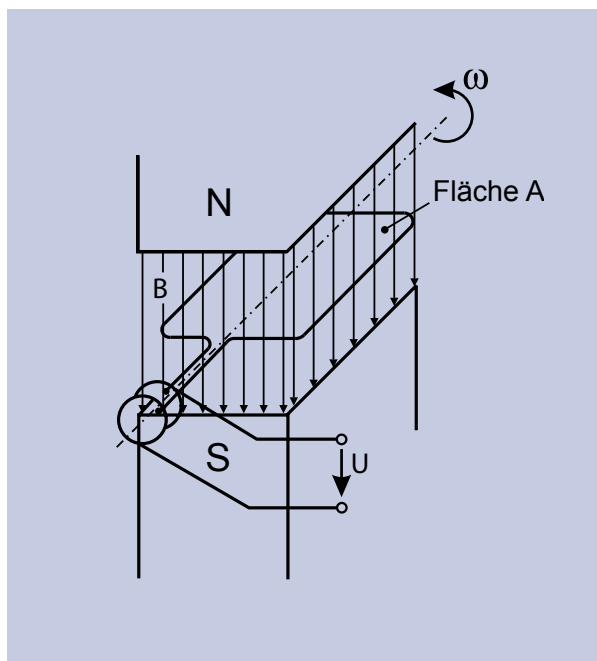


Abb. 2.1: Prinzipbild eines Generators

An den Enden des Leiters wird eine Spannung U erzeugt, für die gilt:

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

(Φ magnetischer Fluss durch die Leiterschleife, $-\frac{d\Phi}{dt}$ dessen zeitliche Änderung).

Für den magnetischen Fluss Φ ergibt sich:

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

(α spitzer Winkel zwischen der Richtung der magnetischen Induktion und der Normalen auf die Fläche A , B Betrag der magnetischen Flussdichte). Der Winkel α ist zeitabhängig. Dreht man die Leiterschleife mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit vom Betrag ω , so ist $\alpha = \omega \cdot t$. Daraus ergibt sich für den Magnetischer Fluss

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.3)$$

und damit für die Spannung

$$U = - \frac{d(B \cdot A \cdot \cos[\omega \cdot t])}{dt} \quad (2.4)$$

also

$$U = \omega \cdot B \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.5)$$

Bezeichnet man $\omega \cdot B \cdot A$ mit \hat{U} , so erhält man:

$$U = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.6)$$

Die induzierte Spannung wird also durch eine Sinuskurve beschrieben; es handelt sich damit um eine Wechselspannung. Ihre Frequenz ist gleich dem Quotienten aus der Anzahl der Umdrehungen der Leiterschleife und der dazu benötigten Zeit. Die Spannung schwankt zwischen den beiden Scheitelwerten \hat{U} und $-\hat{U}$, die der Fläche A der Leiterschleife und dem Betrag der magnetischen Flussdichte B proportional sind. In der Praxis werden Wechselspannungen erzeugt, indem man Spulen mit Eisenkern im Magnetfeld eines Elektromagneten rotieren lässt oder umgekehrt Elektromagnete innerhalb oder um eine ruhende Spule dreht. Die Generatoren in den Elektrizitätswerken erzeugen in Deutschland Wechselspannungen mit der Frequenz 50Hz oder 16,7Hz (Bahnstromversorgung).



3. Planung elektrischer Netze

Von der Elektrizitätsversorgung wird gefordert, dass elektrische Energie sicher, kostengünstig und in ausreichender Qualität bereitgestellt wird. Um diese Forderung erfüllen zu können, muss neben der ausreichenden Erzeugung genügend Übertragungskapazität vorhanden sein – und dieses zu jeder Zeit, damit immer ein Gleichgewicht zwischen dem Verbrauch und der Erzeugung herrscht, da elektrische Energie nur schwierig und teuer zu speichern ist. Bei diesen Überlegungen ist selbstverständlich zu berücksichtigen, dass der Leistungsbedarf sich während der Nutzungsdauer verändern kann (auch durch eine veränderte Einspeisestruktur, z. B. durch den Einsatz von dezentralen Stromerzeugern), und dass deshalb ein Aus- oder Umbau der Netze in Stufen notwendig wird, so dass weder Engpässe in der Versorgung z. B. durch Überlastung von Leitungsverbindungen oder Transformatoren entstehen noch unwirtschaftliche Investitionen vorgenommen werden. Zur Einhaltung dieser Forderungen sind Überlegungen zur Lastverteilung notwendig.

3.1 Planungskriterien

Im Rahmen der Netzplanung werden der Normalbetrieb und die Auswirkungen von Ausfällen und Maßnahmen zur Wiederversorgung im Netz nachgebildet. Mit Hilfe von Zuverlässigkeitsberechnungen lassen sich zudem Reserven, aber auch strukturelle Schwachstellen im Netzaufbau aufzeigen und unterschiedliche Ausbaumaßnahmen im Netz im Hinblick auf eine erwartete Versorgungszuverlässigkeit überprüfen.

Die deutschen Energieversorgungsnetze gehören zu den zuverlässigsten Netzen auf der Welt. Im Durchschnitt weisen diese Verteilnetze eine Verfügbarkeit von über 99,995 % auf, d. h. ein Verbraucher ist im Mittel pro Jahr weniger als eine halbe Stunde ohne elektrische Energie. Dabei ist zu berücksichtigen, dass allein das Verteilungsnetz in Deutschland (üblicherweise mit einer Versorgungsspannung unterhalb von 24.000 V) eine Leitungslänge von ungefähr 280.000 km Kabel und 180.000 km Freileitungen umfasst; sehr häufige Fehlerursachen sind dabei äußere Einflüsse, wie z. B. Tiefbauarbeiten („Baggerwirkung“).

3.1.1 (n-1)-Kriterium

Üblicherweise erfolgt die Planung und Auslegung eines Energieversorgungsnetzes nach dem sog. (n-1)-Kriterium. Dieses besagt, dass bei einem störungsbedingtem Ausfall eines beliebigen Betriebsmittels das Netz seine bestimmungsgemäße Aufgabe erfüllen muss. Bei der Netzplanung nach dem (n-1)-Kriterium wird untersucht, ob durch einen Ausfall eines Betriebsmittels eine Versorgungsunterbrechung an einem beliebigen Verbraucher entsteht. Hierbei wird auch berücksichtigt, dass der sich einstellende Stromfluss über andere, nicht fehlerbehaftete Leitungen keine unzulässigen Werte annimmt, d. h. andere Leitungen überlastet werden. Selbstverständlich wird auch überprüft, ob die Spannung im Energieversorgungsnetz (und nicht nur beim Verbraucher) auch innerhalb der zulässigen Grenzwerte liegt.

Bei Netzfehlern und einem dadurch veränderten Stromfluss kann es dazu kommen, dass einige Leitungen eine deutlich höhere Strombelastung tragen müssen. Dieser zusätzliche Stromfluss führt auf diesen Leitungen zu einem größeren Spannungsabfall, so dass am Ende der Leitung die Spannung zu niedrig sein kann. Das (n-1)-Kriterium und teilweise auch das (n-2)-Kriterium hat sich in Hoch- und Höchstspannungsnetzen bewährt. Die danach gebauten vermaschten Übertragungsnetze sind sehr zuverlässig, da die einzelnen Betriebsmittel zudem eine sehr geringe Ausfallhäufigkeit aufweisen (z. B. durchschnittlich ein Ausfall pro Betriebsmittel in 1.000 Jahren). Im Fehlerfall kann durch Schalthandlungen schnell ein Fehler freigeschaltet und der Stromfluss über andere Leitungen zu den Verbrauchern geleitet werden. Dies gilt auch bei großräumigen Systemen mit mehreren Spannungsebenen, also sehr vielen Komponenten mit dementsprechend erhöhter Wahrscheinlichkeit gleichzeitiger Ausfälle, da der Ausfallwirkungsbereich eines Netzelementes relativ eng begrenzt ist (Größenordnung 50–100 km im deutschen 380 kV-Netz).

In Verteilungsnetzen der unteren Spannungsebenen (Mittelspannung, Niederspannung) wird im Allgemeinen aus Kostengründen auf einen Netzausbau nach dem (n-1)-Kriterium verzichtet (z. B. Strahlennetz). Bei Ausfall eines Betriebsmittels erfolgt eine Unterbrechung der Stromversorgung bis der Fehlerort gefunden und freigeschaltet wurde. Dieses kann automatisiert erfolgen (Zeitdauer der Versorgungsunterbrechung: wenige Minuten) oder auch durch Störungsdienste des Netzbetreibers (Zeitdauer: bis zu 60 Minuten).

Dieses engagierte Projekt führt fundiert und praxisorientiert an das komplexe Thema der Energietechnik heran.

Auch wenn der Alltag ohne elektrische Energie nahezu undenkbar geworden ist, erschließt sich ein Gesamtüberblick über die elektrische Energieversorgung meist nur Fachleuten. In dieser Broschüre mit CD-ROM werden nicht nur physikalische Grundlagen dargestellt, sondern auch die Struktur und die Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung sowie die Planung elektrischer Netze erläutert.

Die CD-ROM beinhaltet neben zusätzlichen Texten, Abbildungen und Unterrichtsmaterialien (Arbeitsblätter, Aufgaben etc.) ein Netzsimulationsprogramm, das eine eigenständige Beschäftigung mit den Anforderungen und Problemen eines stabilen Netzaufbaus und -betriebs ermöglicht.

ETG VDE



Bestell-Nr. 674080