

Die elektrischen Maschinen – Eine Kurzgeschichte der elektrischen Energietechnik

Ein Blick aus einem Satelliten im Weltraum auf die Erde bei Nacht zeigt ungleichmäßig verteilt eine Unzahl von Lichtern. Zeichen dafür, in welchem Maß der Mensch von der Erde Besitz ergriffen hat. Hauptlichtquellen sind städtische Ballungsräume auf der Nordhalbkugel, Brandrodungen in Südamerika, das Abbrennen von Grasland in Afrika und das Abfackeln von Erdgas in Sibirien und am Persischen Golf. Der Segnungen der Zivilisation erfreuen sich vor allem die Menschen in den Ballungsräumen auf der Nordhalbkugel. Ihnen steht Tag und Nacht elektrische Energie zur Verfügung. In welchem Maß wir von dieser abhängig sind, ergibt sich daraus, daß in Deutschland für eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie eine Leistung von etwa $1,5\text{kW}$ pro Kopf der Bevölkerung bereitzuhalten ist. Bedenkt man daß der Mensch eine Dauerleistung von etwa 50W zu erbringen imstande ist, so sieht man, daß jeder von uns, könnte er seinen Leistungsbedarf nicht aus dem elektrischen Energienetz decken, sich 30 Sklaven halten müßte. Zur Verfügung gestellt wird die elektrische Energie durch ganze Kontinente überspannende elektrische Energienetze. Wesentlicher Bestandteil dieser Netze sind elektrische Maschinen: Generatoren, die die Netze speisen, und Transformatoren, die die Übertragung der Energie über große Entfernungen und deren Verteilung möglich machen. Auch die Verbraucher im Netz sind neben Beleuchtungsanlagen, Elektroöfen und Elektrolyseanlagen vor allem elektrische Maschinen, die als Antriebe u.a. in der Industrie, im Verkehr und im Haushalt eingesetzt werden. Die Annehmlichkeiten der elektrischen Energie stehen der Menschheit erst seit gut 100 Jahren zur Verfügung.

Beleuchtungsanlagen waren die ersten Verbraucher. Sie wurden von Batterien gespeist. Auf der Suche nach leistungsfähigeren Quellen, die in Parallelschaltung mit den Batterien das Netz speisen, wurde der Gleichstromgenerator erfunden. Die Auslastung der Kraftwerke war schlecht, da elektrische Energie nur in den Abendstunden gebraucht wurde. Das änderte sich mit einem Schlag mit der Entdeckung, daß die Gleichstrommaschine, wenn an ihre Klemmen Gleichspannung gelegt wird, als Motor arbeitet. Bisherige Antriebe waren Dampfmaschinen, Wasserräder und Windräder. Der Elektroantrieb trat seinen Siegeszug an. Die Kraftwerke waren jetzt gut ausgenutzt und arbeiteten infolgedessen wirtschaftlich.

Der Versorgungsradius der Kraftwerke lag in der Größenordnung eines Kilometers, da Gleichstrommaschinen nur bis zu Spannungen von etwa 3000V gebaut werden können und diese Spannung für eine wirtschaftliche Energieübertragung über größere Entfernungen nicht ausreicht. Im übrigen wäre auch eine höhere Spannung nicht hilfreich gewesen, da man sie aus Sicherheitsgründen dem Verbraucher nicht hätte zuführen können. Man war mit dem Gleichstrom in eine Sackgasse geraten.

Soll die Stromwärmeverlustleistung in den Energieübertragungsleitungen in erträglichen Grenzen bleiben, muß mit kleinen Leitungsströmen bei hohen Übertragungsspannungen gearbeitet werden. Als Faustformel bei der Wahl der Übertragungsspannung gilt: $1\text{kV}/1\text{km}$. Für eine 100km lange Übertragungsleitung ist demnach eine Übertragungsspannung in der Größenordnung von etwa 100kV zu wählen.

Der Transformator war erfunden. Für Wechselstrom jedoch gab und gibt es bis auf den heutigen Tag keinen mit vernünftigem Wirkungsgrad arbeitenden Motor. Auf der Suche nach einer geeigneten Maschine wurde ein Motor erfunden, der zu seinem Betrieb drei gleich große, um jeweils eine drittel Periodendauer gegeneinander zeitlich verschobene Wechselspannungen braucht. Er arbeitet mit gutem Wirkungsgrad, ist in der Einfachheit seines Aufbaus kaum zu überbieten und ist infolgedessen billig und robust. Die zu seinem Betrieb nötigen Spannungen liefert das Dreiphasen-Wechselstrom- oder Drehstromnetz. Der Motor ist der Dreiphasen-Wechselstrom- oder Drehstrom-Asynchronmotor. Wo immer man kann, setzt man diesen Motor ein. Er wird für Leistungen zwischen 1kW und 10MW und Spannungen bis zu einigen kV gebaut. Seinetwegen sind elektrische Energienetze weltweit vor allem Drehstromnetze. In Deutschland übliche Netzspannungen sind 400V , 10kV , 20kV , 30kV , 110kV , 220kV und 380kV . Bedarf für höhere Übertragungsspannungen als 380kV besteht in Deutschland nicht. In anderen Teilen der Welt, vor allem in Ländern, in denen bei der Erschließung von Wasserkraften in entlegenen Gebieten zur Nutzung in Ballungszentren große Entfernungen zu überbrücken sind, werden Übertragungsspannungen von zur Zeit bis zu 1200kV angewandt.

Die in den Kraftwerken arbeitenden, das Netz speisenden Generatoren sind Synchronmaschinen. Die größten von ihnen stehen in unseren Kernkraftwerken, haben eine Leistung von etwa 1500MVA und können eine Millionenstadt versorgen. Diese Maschinen können für Spannungen bis zu 30kV gebaut werden. In Deutschland liefern Kernkraftwerke etwa 30% der elektrischen Leistung, Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke etwa 60% und die übrigen, vor allem Wasserkraftwerke, etwa 10% der elektrischen Leistung.

Der Drehstrom-Asynchronmotor hat dem Gleichstrommotor zunächst keine Konkurrenz gemacht. Es bestand Aufgabenteilung. Der Asynchronmotor wurde überall da eingesetzt, wo man im Betrieb mit einer einzigen Drehzahl auskam. Das traf für die meisten Anwendungsfälle zu. Mußte jedoch die Drehzahl während des Betriebes in weiten Grenzen ständig geändert werden, nahm man den Gleichstrommotor, da sich bei ihm die Drehzahl in einfacher Weise über die Spannung steuern läßt. Beim Asynchronmotor hätte dazu eine Spannung mit variabler Frequenz zur Verfügung gestellt werden müssen, was auf wirtschaftliche Weise nicht möglich war. Inzwischen jedoch stehen durch die Entwicklung von Halbleiterbauelementen Frequenzumrichter zur Verfügung, die es erlauben, die Asynchronmaschine mit variabler Frequenz wirtschaftlich zu betreiben. Dadurch bedingt nimmt der Anteil der drehzahlvariablen Antriebe mit Asynchronmaschine zu. Der Gleichstrommaschine ist auf diese Weise ein mächtiger Konkurrent erwachsen und es ist von Fall zu Fall nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu entscheiden, ob die eine oder die andere Maschine eingesetzt wird.

Technische und wirtschaftliche Gründe haben dazu geführt, daß sich unsere elektrischen Energieversorgungsnetze aus Gleichstromnetzen zu Dreiphasenwechselstrom- oder Drehstromnetzen entwickelt haben. Doch auch der Anwendung des Wechselstroms sind Grenzen gesetzt. Bei sehr großen Übertragungsentfernungen, d.h. bei Leitungslängen von etwa 1000km Länge an aufwärts, treten bei der Energieübertragung mit Wechselstrom Schwierigkeiten im Hinblick auf die Stabilität der Energieübertragung auf. Die Verhältnisse sind ähnlich denen bei einer mechanischen Kupplung, die aus zwei Stäben besteht, die sich um eine gemeinsame Achse mit konstanter Winkelgeschwindigkeit drehen und deren Enden durch eine Feder miteinander verbunden sind. Der eine Stab sei der antreibende, der andere der bremsende. Solange keine Leistung übertragen wird, ist der Winkel zwischen den Stäben Null. Mit wachsender Leistung wächst der Winkel. Bei einem Winkel von 90° ist die maximal übertragbare Leistung erreicht. Wird der Versuch gemacht, eine noch größere Leistung zu übertragen, so wird das System instabil. Im mechanischen Analogon wird mit abnehmender Federsteifigkeit, im Fall der Leitung mit zunehmender Leitungslänge die maximal übertragbare Leistung kleiner. Die geschilderten Schwierigkeiten treten bei der Energieübertragung mit Gleichstrom nicht auf. Deswegen kehrt man bei sehr großen Übertragungsentfernungen wieder zum Gleichstrom zurück, mit dem man ursprünglich begonnen hat. Das speisende Drehstromnetz am Anfang der Leitung wird mit dieser über einen Gleichrichter verbunden, das Leistung aufnehmende Drehstromnetz am Ende der Leitung ist mit dieser über einen Wechselrichter verbunden. Bei dieser Hochspannungsgleichstromübertragung HGÜ arbeitet man mit Übertragungsspannungen bis zu etwa $+/- 750\text{kV}$. HGÜ ist auch bei Seekabelverbindungen wegen der bei Wechselstrom auftretenden hohen Ladeströme und dielektrischen Verlustleistung üblich, des weiteren bei der Kupplung von Netzen unterschiedlicher Frequenz oder mit unterschiedlichem Frequenzregelungskonzept.

Aus wirtschaftlichen Gründen besteht ein Anreiz, Kraftwerke mit möglichst großer Leistung zu bauen, da mit zunehmender Maschinengröße der Wirkungsgrad steigt und die auf die Leistung bezogenen Kosten sinken. Das bei großen Kraftwerken schwierige Problem der Reservehaltung wird in Deutschland dadurch gelöst, daß die Netze der verschiedenen Versorgungsunternehmen miteinander zu einem nationalen Verbundnetz verbunden werden, in dem im Bedarfsfall zwischen den Partnern ein Leistungsaustausch möglich ist. Darüberhinaus besteht aber auch ein internationaler Verbund nationaler Netze. In Europa gibt es beispielsweise ein westeuropäisches Verbundnetz, ein Verbundnetz der skandinavischen Länder, ein britisches Verbundnetz und ein Verbundnetz der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS). Diese Verbundnetze sind zum Teil wiederum miteinander verknüpft. Auf diese Weise ist aus kleinen Anfängen ein großes komplexes Netz entstanden, daß sich vom Nordkap bis nach Sizilien und vom Atlantik zum Ural erstreckt.

Ein ungestörter Netzbetrieb setzt voraus, daß die von den Verbrauchern in Anspruch genommene Leistung stets in dem Augenblick bereitgestellt wird, in dem sie gebraucht wird, andernfalls kommt es zu Störungen. Indikator für eine ausgeglichene Wirkleistungsbilanz ist die Frequenz. Frequenzabfall zeigt Leistungsmangel,

Frequenzanstieg Leistungsüberschuß an. Neben der Frequenz ändert sich nach Laständerungen auch die zum Zwecke der Abrechnung nach Höhe und Zeitdauer vertraglich festgelegte Austauschleistung zwischen den Teilnetzen. Durch eine Regelung werden die Einspeiseleistungen der Generatoren so geändert, daß Frequenz und Austauschleistung nach einer Laständerung wieder ihre Sollwerte annehmen.

Die Planung und sichere Betriebsführung von Netzen der geschilderten Größe verlangt vom Ingenieur hohes technisches Können und wirkungsvolle technische Hilfsmittel. Dazu zählen leistungsfähige Rechner. Sie werden in der Netzplanung und Netzbetriebsführung eingesetzt. In der Planung lassen sich alle denkbaren Betriebsfälle im normalen und gestörten Zustand des Netzes durchspielen, wobei die Größe des Netzes diesen Rechnungen keine Grenze setzt. Die Betriebsführung wird durch Rechner automatisiert, die kritische Netzzustände erkennen und geeignete Maßnahmen einleiten, ohne daß es nachfolgend zu Folgestörungen kommt. Bei den Elektroantrieben ist eine ähnliche Entwicklung zu beobachten. Auch hier werden in zunehmendem Maße Rechner eingesetzt. Sie haben die Aufgabe zu regeln und zu steuern. Auf diese Weise wird auch hier die Automatisierung vorangetrieben.



<http://www.springer.com/978-3-642-00884-9>

Elektrische Maschinen

Eine Einführung

Spring, E.

2009, X, 435 S., Softcover

ISBN: 978-3-642-00884-9