Kapitel 2
Elektrotechnische Grundlagen

2.1 Drehstrom, Drehstromleistung

Die für die Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie verwendete Stromform ist im Normalfall der Drehstrom, da er, wie nachstehend ausgeführt, gegenüber Einphasenwechselstrom und Gleichstrom wesentliche Vorteile bietet. Einphasenwechselstrom wird nur in Bahnnetzen eingesetzt (Abschn. 1.1). Gleichstrom wird für die Kurzkupplung von Drehstromnetzen verschiedener Frequenz oder Frequenzqualität verwendet, ferner für Seekabelverbindungen und Hochleistungs-Fernübertragungen mit Freileitungen (> 500 km) dort, wo der Wechselstrom an seine Übertragungsgrenzen stösst (Abschn. 9.5.4).

2.1.1 Wechselstrom versus Gleichstrom

Vorteile des Wechselstroms:

- Spannung leicht veränderbar und somit optimale Anpassung an Leistung und Übertragungsentfernung.
- Lässt sich wesentlich leichter abschalten.
- Vorteile in den Anwendungen (z. B. bei Motoren).

Nachteile des Wechselstroms:

- Die Blindleistung muss übertragen oder kompensiert werden.
- Die Wirkleistungsübertragung kann zu Stabilitätsproblemen führen.

Die Vorteile überwiegen. Eine Ausnahme bilden die Fernübertragungen; billige Leistungselektronik verschiebt hier die Grenzen mehr und mehr zugunsten des Gleichstroms. Dazu Näheres in Bd. 3, Kap. 7 und 8.

Untersuchungen am Ende des 19. Jahrhunderts führten zur Wahl einer optimalen Frequenz von 50 Hz in Europa und 60 Hz in Nordamerika.

V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung 1*,
DOI 10.1007/978-3-662-45985-0_2

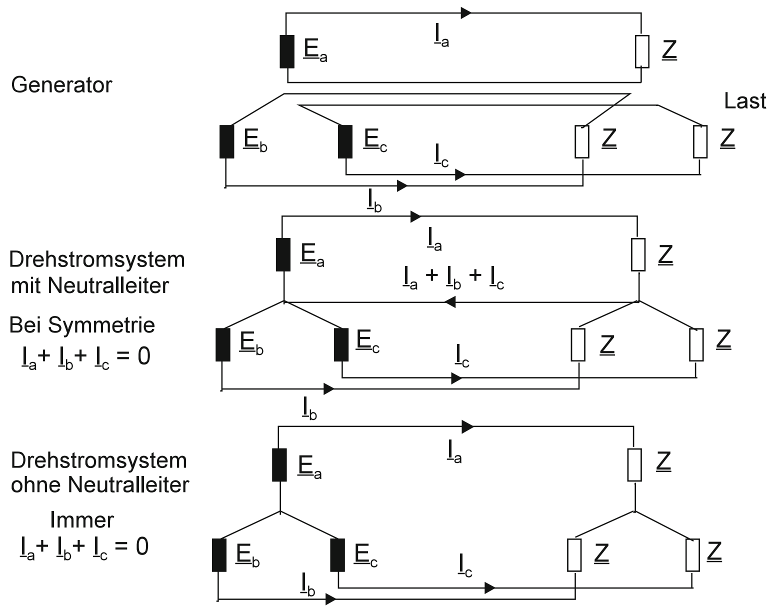

Abb. 2.1 Entstehung eines Drehstromsystems mit und ohne Neutralleiter aus drei um je 120° phasenverschobenen Einphasensystemen

2.1.2 Drehstrom

Ein Dreiphasen- oder Drehstromsystem entsteht in natürlicher Weise aus drei um je 120° phasenverschobenen Einphasensystemen (Abb. 2.1). Es kann mit oder ohne Neutralleiter (auch Nulleiter genannt) betrieben werden. Als *Phase* versteht man den aus *Phasenleiter* und (reellem oder fiktivem) *Neutralleiter* gebildeten Stromkreis. Beim Neutralleiter kann es sich um einen Kupferleiter handeln, der geerdet wird (Niederspannungsnetz), oder um die Erde selbst (Hoch- und Höchstspannungsnetz). In letzterem Falle werden die Transformatormittelpunkte in der Regel niederohmig geerdet. Mittelspannungsnetze (genaue Def. s. Kap. 3) werden ohne Neutralleiter oder mit Erdschlusslöschspulen betrieben (Abschn. 14.1). Abbildung 2.2 veranschaulicht die wichtigsten Begriffe und Grössen des Drehstromsystems.

Definitionen zu Abb. 2.2:

$\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ = *Stern- oder Phasen- oder Leiter-Erd-Spannungen, bei Symmetrie*: $|\underline{U}_a| = |\underline{U}_b| = |\underline{U}_c| = U$

$\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$ = *Aussenleiterspannungen oder verkettete Spannungen, bei Symmetrie*: $|\underline{U}_{ab}| = |\underline{U}_{bc}| = |\underline{U}_{ca}| = U_\Delta$

$\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ = Leiter- oder Phasenströme, bei Symmetrie: $|\underline{I}_a| = |\underline{I}_b| = |\underline{I}_c| = I$

$\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$ = Dreieck- oder Strangströme, bei Symmetrie: $|\underline{I}_{ab}| = |\underline{I}_{bc}| = |\underline{I}_{ca}| = I_\Delta$.

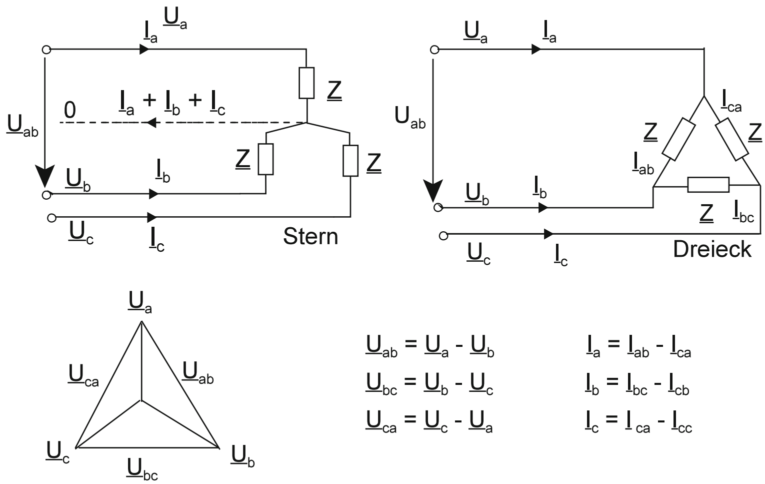

Abb. 2.2 Ströme und Spannungen des Dreiphasensystems

Wenn man von „Spannung des Dreiphasensystems" spricht, meint man in der Praxis immer die *Aussenleiterspannung* (*verkettete Spannung*). Sie ist die einzige in jedem Fall direkt messbare Spannung.

Symmetrie bedeutet, dass das Drehstromsystem symmetrisch gebaut ist und symmetrisch belastet wird. Die weiteren Überlegungen in diesem und in Abschn. 2.3 sowie in Kap. 4 bis 9 setzen Symmetrie voraus. Unsymmetrisch belastete Drehstromnetze und andere Unsymmetrien werden in Kap. 10 behandelt.

2.1.3 Drehstrom versus Einphasenwechselstrom

Gemäss Abb. 2.1 genügen bei Drehstrom 4 oder gar 3 Leiter, um die gleiche Leistung zu übertragen, die mit drei Einphasensystemen 6 Leiter erfordert. Auch Transformatoren und Motoren können bei Drehstrom billiger gebaut werden (s. z. B. Abschn. 4.1); Drehstrommotoren haben ausserdem gegenüber Einphasenwechselstrommotoren den Vorteil, dass sie ein zeitlich konstantes statt ein mit doppelter Frequenz pulsierendes Drehmoment erzeugen (s. Abschn. 2.1.6).

2.1.4 Scheinleistung, Wirkleistung, Blindleistung im Drehstromkreis

Zwischen den Effektiv werten von Spannungen, Strömen und der *Scheinleistung* bestehen bei Symmetrie und in Abwesenheit von Oberschwingungen folgende Beziehungen

$$\begin{aligned} U_\Delta &= \sqrt{3}U \\ I_\Delta &= \frac{1}{\sqrt{3}} I \\ S &= 3UI = 3U_\Delta I_\Delta = \sqrt{3} U_\Delta I. \end{aligned} \tag{2.1}$$

Allgemeiner definiert man für Systeme ohne Oberschwingungen folgende *komplexe Scheinleistung* des Dreiphasensystems

$$\underline{S} = \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^*.$$

Drückt man Spannung und Strom polar aus, folgt bei Symmetrie

$$\begin{aligned} \underline{S} &= U e^{j\vartheta} I e^{-j(\vartheta-\varphi)} + U e^{j(\vartheta-120^\circ)} I e^{-j(\vartheta-120^\circ-\varphi)} \\ &\quad + U e^{j(\vartheta-240^\circ)} I e^{-j(\vartheta-240^\circ-\varphi)} \\ &= 3UIe^{j\varphi} = 3UI(\cos\varphi + j\sin\varphi) = P + jQ \end{aligned}$$

$$\underline{S} \begin{cases} P = \sqrt{3} U_\Delta I \cos\varphi = \textit{Wirkleistung} \\ \\ Q = \sqrt{3} U_\Delta I \sin\varphi = \textit{Blindleistung}. \end{cases} \tag{2.2}$$

2.1.5 Momentane Phasenleistung

Wird ein *linearer Stromkreis* mit der Wechselspannung

$$u(t) = \hat{U} \cos\omega t$$

gespeist, fliesst ein Strom

$$i(t) = \hat{I} \cos(\omega t - \varphi).$$

Der Energietransfer pro Zeiteinheit wird durch die *momentane Leistung* bestimmt

$$p(t) = u(t)\, i(t) = \hat{U}\ \hat{I}\ \cos\omega t \quad \cos(\omega t - \varphi).$$

Es folgt

$$\begin{aligned} p(t) &= \hat{U}\ \hat{I}\ \cos\omega t\ (\cos\omega t\ \cos\varphi + \sin\omega t\ \sin\varphi) \\ &= \hat{U}\ \hat{I}\ \cos\varphi \cos^2\omega t + \hat{U}\ \hat{I}\ \sin\varphi\ \sin\omega t\ \cos\omega t. \end{aligned}$$

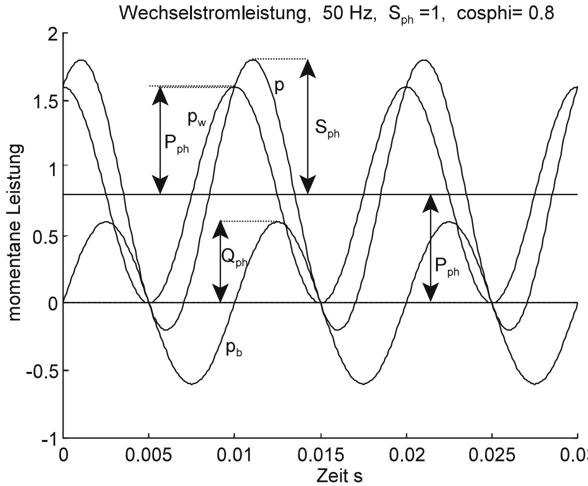

Abb. 2.3 Momentane Wechselstromleistung und ihre Komponenten

Durch Anwendung der trigonometrischen Sätze $2\cos^2\omega t = 1 + \cos 2\omega t$, $2\sin\omega t \cos\omega t = \sin 2\omega t$ und Ersatz der Scheitelwerte durch die Effektivwerte $\hat{U}\hat{I} = 2\,U I erhältman$

$$p(t) = U I \cos\varphi\,(1 + \cos 2\omega t) + U I \sin\varphi \sin 2\omega t$$
$$= U I \cos\varphi + U I \cos\varphi \cos 2\omega t + U I \sin\varphi \sin 2\omega t$$

oder mit Hilfe von Wirk-, Blind- und Scheinleistung

$$p(t) = P_{ph} + P_{ph}\cos 2\omega t + Q_{ph}\sin 2\omega t = p_w(t) + p_b(t)$$
$$oder$$
$$p(t) = P_{ph} + S_{ph}\cos(2\omega t - \varphi). \tag{2.3}$$

Die *Wirkleistung* P_{ph} ist die mittlere Leistung der Phase und bestimmt somit den Energietransfer.

Die weiteren Terme der Gl. (2.3) sind:

$$\begin{array}{ll} \textit{die Wechselleistung} & S_{ph}\cos(2\omega t - \varphi) \\ \textit{die Wirkwechselleistung} & P_{ph}\cos 2\omega t \\ \textit{die Blindwechselleistung} & Q_{ph}\sin 2\omega t. \end{array} \tag{2.4}$$

Abbildung 2.3 zeigt den Verlauf von p(t) und ihrer Komponenten.

Die *Scheinleistung* lässt sich auch als *Amplitude der Wechselleistung* interpretieren. Die Wechselleistung schwingt mit der doppelten Netzfrequenz. In Anwesenheit von Blindleistung wird die momentane Leistung zeitweise negativ.

Die *Wechselleistung* mit Amplitude S_{ph} kann in zwei um 90° phasenverschobene Komponenten zerlegt werden, die als Wirk- und Blindwechselleistung bezeichnet werden können.

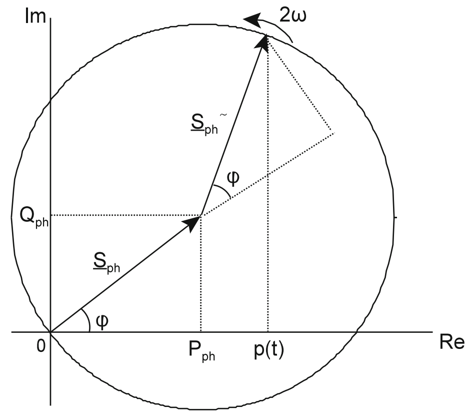

Abb. 2.4 Wechselstromleistungen in der komplexen Zahlenebene

Die *Wirkwechselleistung* tritt auch in rein ohmschen Kreisen auf. Deren Amplitude ist die Wirkleistung P_{ph}.

Die *Blindwechselleistung* tritt nur in Anwesenheit von Induktivitäten oder Kapazitäten auf. Deren Amplitude ist die Blindleistung Q_{ph}.

Gleichung (2.3) kann auch folgendermassen geschrieben werden

$$p(t) = Re(\underline{S}_{ph} + S_{ph}\ e^{j(2\omega t - \varphi)}) = Re(\underline{S}_{ph} + \underline{S}_{ph}^{\sim}). \tag{2.5}$$

$\underline{S}_{ph}$ nennt man *komplexe Leistung* und $\underline{S}_{ph}^{\sim}$ *komplexe Wechselleistung*. Daraus folgt die von Abb. 2.4 veranschaulichte Interpretation in der komplexen Zahlenebene.

2.1.6 Momentane Drehstromleistung

Im symmetrischen Dreiphasenbetrieb sind die Wechselleistungen der drei Phasen um je 240° phasenverschoben und heben sich in ihrer Wirkung auf. Die *momentane Drehstromleistung ist konstant* und gleich der Summe der Wirkleistungen der drei Phasen

$$p(t) = 3\ Re(\underline{S}_{ph}) = 3\ P_{ph} = P. \tag{2.6}$$

Dies hat z. B. zur Folge, dass in Drehstrommotoren die erzeugte mechanische Leistung zeitlich konstant ist (konstantes Drehmoment).

Obwohl die Drehstromleistung insgesamt konstant ist, werden die drei Phasen weiterhin durch die Wechselleistung beansprucht. Es ist deshalb sinnvoll, auch im Dreiphasensystem eine Dreiphasenblindleistung zu definieren (in Einklang mit Definition (2.2)) als Summe der Phasenblindleistungen.

2.2 Nenngrössen, p.u. Systeme

Jedem Betriebsmittel werden *Nenngrössen* (auch *Bemessungsgrössen* genannt) zugeordnet. Diese Nenngrössen bilden ein einheitliches, klar definiertes System. Gegeben werden normalerweise: Nennspannung, Nennfrequenz, Nennleistung (evtl. Nenn-cos φ, Nenndrehzahl). Alle anderen Nenngrössen lassen sich daraus ableiten. International wird heute der Index r verwendet (engl. rated, früher n). Der Index n wird weiterhin für Netze verwendet, die viele Betriebsmittel einschliessen.

Die Bemessungsgrössen entsprechen meist, aber nicht immer der Dauerbelastbarkeit des Betriebsmittels.

Die Nenngrössen werden als *Bezugsgrössen* für die Definition von adimensionalen Parametern und Gleichungen verwendet (Normierung). Die Normierung liefert *normierte* oder *relative* oder *prozentuale* oder, nach amerikanischer Terminologie, die sich in der Praxis eingebürgert hat, *per unit* (*p.u.*) *Grössen*. Die p.u. Grössen sind also definiert als Verhältnis von effektiver Grösse zu Bezugsgrösse. Die normierten Grössen werden in der Praxis ausgiebig verwendet, da sie wesentlich aussagekräftiger sind als die dimensionsbehafteten Grössen. Auch bei Computerberechnungen und entsprechenden graphischen Darstellungen sind sie sehr bequem.

Nenngrössendefinition für Drehstrom-Betriebsmittel

$$\begin{aligned}
&\textit{Nennspannung} \quad && U_{\Delta r}(\textit{verkettet!}), \quad U_r = \frac{U_{\Delta r}}{\sqrt{3}} \\
&\textit{Nennstrom} && I_r \\
&\textit{Nennleistung} && S_r = 3U_r I_r = \sqrt{3} U_{\Delta r} I_r \\
& && P_r = S_r \cos \varphi_r \\
&\textit{Nennimpedanz} && Z_r = \frac{U_r}{I_r} = \frac{U_{\Delta r}}{\sqrt{3} I_r} = \frac{U_{\Delta r}^2}{S_r}.
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Ferner für elektrische Maschinen:

$$\begin{aligned}
&\textit{Nennflussverkettung} \quad \psi_r = \frac{U_r}{\omega_r} \qquad (\textit{bei Sternschaltung}), \\
&\textit{worin} \quad \omega_r = 2\pi f = \textit{Nennkreisfrequenz},
\end{aligned} \tag{2.8}$$

insbesondere für rotierende Maschinen (Synchron- und Asynchronmaschine):

$$\begin{aligned}
&\textit{Nenndrehmoment} \quad M_r = \frac{P_r}{\omega_m}, \quad \textit{Bezugsdrehmoment} \quad M_{Br} = \frac{S_r}{\omega_m}, \\
&\textit{worin} \quad \omega_m = \frac{\omega_r}{p} = \quad \textit{mechanische Kreisfrequenz} \\
&\textit{mit} \quad p = \frac{60 f}{n} = \textit{Polpaarzahl}, \quad n = \textit{Nenndrehzahl}\,(U/\mathrm{min}).
\end{aligned} \tag{2.9}$$

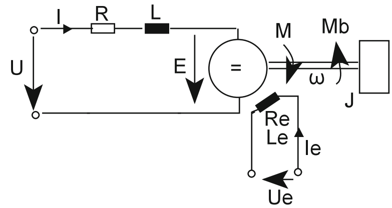

Abb. 2.5 Gleichstrommotor

Das Bezugsdrehmoment rotierender Maschinen wird mit der Nennscheinleistung und nicht mit der Nennwirkleistung definiert. Der Grund ist ein rein formaler: es ergeben sich einfachere p.u. Gleichungen.

Beispiel 2.1 Gegeben ist ein Drehstromgenerator von 100 MVA, 15 kV, 50 Hz, 1500 U/Min, cos $\varphi_r = 0.85$. Man bestimme Nennstrom, Nennimpedanz, Nennflussverkettung, Nennwirkleistung, Nenndrehmoment.

$$I_r = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3} = 3.85 \text{ kA}, \qquad Z_r = \frac{15^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^6} = 2.25\ \Omega$$

$$\psi_r = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50} = 27.6 \text{ Vs}, \qquad P_r = 100 \cdot 10^6 \cdot 0.85 = 85 \text{ MW}$$

$$M_r = \frac{P_r}{\omega_m} = \frac{85 \cdot 10^6}{\frac{2\pi \cdot 50}{2}} = 541 \text{ kNm}.$$

Beispiel 2.2 Gegeben ist ein Drehstromtransformator von 650 kVA, 10 kV/400 V, 50 Hz. Man bestimme Nennströme, Nennimpedanzen, Nennflussverkettungen.

$$I_{r1} = \frac{650 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 37.5 \text{ A}, \quad I_{r2} = \frac{650 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 938 \text{ A}$$

$$Z_{r1} = \frac{10^2 \cdot 10^6}{650 \cdot 10^3} = 154\ \Omega, \quad Z_{r2} = \frac{400^2}{650 \cdot 10^3} = 246 \text{ m}\Omega$$

$$\psi_{r1} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50} = 18.4 \text{ Vs}, \quad \psi_{r2} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50} = 0.735 \text{ Vs}.$$

Beispiel 2.3 Man definiere die Nenngrössen und bestimme die p.u. Gleichungen eines Gleichstrommotors (Abb. 2.5).

Der Motor sei fremderregt, mit exakt kompensierter Ankerrückwirkung, und man vernachlässige die mechanischen Verluste. Das Gleichungssystem (2.10) des Gleichstrommotors lässt sich aus Schaltbild Abb. 2.5 ableiten. Die Konstante K ist ein Kennwert des Motors (Ω s). Gegeben sei die Nennspannung U_r, die Nennleistung P_r sowie die mechanische Nennkreisfrequenz ω_r.

$$
\begin{aligned}
U &= E + RI + L\frac{dI}{dt} && \textit{Hauptwicklung}\\
E &= K\ \omega\ I_e && \textit{Induktionsgesetz}\\
U_e &= R_e\ I_e + L_e\frac{dI_e}{dt} && \textit{Erregerwicklung}\\
M &= K\ I\ I_e && \textit{Lorentzkraft}\\
M - M_b &= J\frac{d\omega}{dt} && \textit{Mechanik.}
\end{aligned}
\tag{2.10}
$$

Besonders einfache Verhältnisse erhält man durch die Einführung folgender Nenngrössen (die sich z. T. aus der stationären Betrachtung der Gl. (2.10) ergeben):

$$
I_r = \frac{P_r}{U_r}, \qquad R_r = \frac{U_r}{I_r}, \qquad M_r = \frac{P_r}{\omega_r},
$$
$$
I_{er} = \frac{U_r}{K\ \omega_r}, \qquad U_{er} = R_{er}\ I_{er} \quad mit \quad z.\ B. \quad R_{er} = R_{e20^\circ C}.
$$

Teilt man Gl. (2.10) durch die entsprechenden Nenngrössen, erhält man

$$
\begin{aligned}
\frac{U}{U_r} &= \frac{E}{U_r} + \frac{R\ I}{R_r\ I_r} + \frac{L}{R_r\ I_r}\ \frac{dI}{dt}\\
\frac{E}{U_r} &= \frac{K\ \omega\ I_e}{K\ \omega_r\ I_{er}}\\
\frac{U_e}{U_{er}} &= \frac{R_e\ I_e}{R_{er}\ I_{er}} + \frac{L_e}{R_{er}\ I_{er}}\ \frac{dI_e}{dt}\\
\frac{M}{M_r} &= \frac{K\ I\ I_e}{K\ I_r\ I_{er}}\\
\frac{M}{M_r} - \frac{M_b}{M_r} &= \frac{J}{M_r}\ \frac{d\omega}{dt}.
\end{aligned}
$$

Führt man die charakteristischen Zeitkonstanten der Wicklungen $T = L/R$ und $T_e = L_e/R_e$ sowie die Anlaufzeit des Motors $T_m = J\ \omega_r\ M_r^{-1}$ ein, folgen unmittelbar die p.u. Gl. (2.11).

$$
\begin{aligned}
u &= e + r\ i + r\ T\frac{di}{dt}\\
e &= n\ i_e\\
u_e &= r_e\ i_e + r_e\ T_e\frac{di_e}{dt}\\
m &= i\ i_e\\
m - m_b &= T_m\frac{dn}{dt}.
\end{aligned}
\tag{2.11}
$$

Es ist üblich, die p.u. Grössen mit dem der physikalischen Grösse entsprechenden Kleinbuchstaben zu schreiben (z. B. $i = I/I_r$, $r = R/R_r$ usw., Ausnahme $n = \omega/\omega_r$).

Folgende Eigenschaften der p.u. Gleichungssysteme sind beachtenswert:

- In p.u. Differentialgleichungen wird aus Dimensionsgründen eine Ableitung immer von einer Zeitkonstanten begleitet. Die für das dynamische Verhalten massgebenden Zeitkonstanten sind im p.u. Gleichungssystem unmittelbar ersichtlich.
- Die Anzahl der notwendigen Parameter ist in p.u. Gleichungen minimal. Im betrachteten Beispiel wird der Gleichstrommotor durch die 4 Parameter T, T_e, T_m, r bestimmt (r_e ist = 1, wenn man vom Temperatureinfluss absieht), während für das Gleichungssystem (2.10) 6 Parameter, nämlich R, L, K, R_e, L_e, J notwendig sind. Ausserdem sind die 4 p.u. Parameter wertmässig viel charakteristischer für den Gleichstrommotor als die 6 dimensionsbehafteten Grössen, d. h. sie ändern wenig mit der Leistung des Motors.

2.3 Symmetrische Dreiphasensysteme

Im einfachsten Fall kann ein Stromversorgungssystem als symmetrisch aufgebaut und als symmetrisch belastet angenommen werden. Wie nachfolgend gezeigt wird, lässt sich dann das dreiphasige System mit einem einphasigen Ersatzschaltbild beschreiben, was dessen Berechnung erheblich vereinfacht.

2.3.1 Ersatzschaltbild

Ungekoppelte Sternschaltung Das Drehstromsystem bestehe zunächst aus einer symmetrischen dreiphasigen Spannungsquelle mit Innenimpedanz Z_i und einer symmetrischen Last Z (Abb. 2.6a). Da die Phasen ungekoppelt sind, genügt es, die *Phase a* darzustellen. Es folgt das Ersatzschaltbild Abb. 2.6b. Der Index *a* wird der Einfachheit halber weggelassen. Die anderen Phasen erhält man durch Phasenverschiebung um 120° bzw. 240°.

Dreieckschaltung Ist die Last in Dreieck geschaltet (Abb. 2.7a), folgt durch Dreieck-Stern-Umwandlung das Ersatzschaltbild Abb. 2.7b. Zu beachten ist, dass Ersatzschaltbilder immer nur Phasengrössen (Sterngrössen, Leiter-Erd-Grössen) enthalten.

Induktive Kopplung Sind die Phasen induktiv gekoppelt (Abb. 2.8a), mit L Eigeninduktivität der Phase und M Koppelinduktivität, kann man folgende Phasengleichung für die Spannungsdifferenz schreiben:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a1} - \underline{U}_{a2} &= R\,\underline{I}_a + j\omega L\,\underline{I}_a + j\omega M\,\underline{I}_b + j\omega M\,\underline{I}_c \\ &= (R + j\omega(L - M))\underline{I}_a. \end{aligned} \tag{2.12}$$

http://www.springer.com/978-3-662-45984-3

Elektrische Energieversorgung 1
Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik
Crastan, V.
2015, XXXVI, 668 S. 579 Abb., Hardcover
ISBN: 978-3-662-45984-3