

HANSER



Leseprobe

zu

Grundlagen der Drehstrom-Antriebstechnik

von Josep Uphaus

ISBN (Buch): 978-3-446-45495-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-45697-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45495-8>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist zweifelsohne *die* Antriebsmaschine in der industriellen Umgebung, aber nicht nur dort. Dementsprechend häufig kommt der Elektrotechniker in seiner beruflichen Praxis mit dieser Maschine in Kontakt: bei der Wartung von Pumpen, Lüftern oder automatisierten Anlagen, bei der Reparatur von Maschinen und Anlagen, bei der Modernisierung oder dem Retrofit oder auch bei der Projektierung neu zu errichtender Maschinen und Anlagen.

In vielen Fällen besteht die Aufgabe darin, einen vorhandenen Motor zu ersetzen, um damit die Maschine oder Anlage schnell wieder in Betrieb nehmen zu können. Wichtig sind dann die auf dem Leistungsschild des „alten“ Motors angegebenen Kenn- oder Bemessungsdaten. Diese „äußeren“ Merkmale bestimmen die Verwendung des Motors. Genau aus diesem Grunde weicht die Reihenfolge der einzelnen Kapitel des Buches auch von der sonst üblichen ab.

Zunächst wird daher im 1. Kapitel dem Anwender die elektrische Energieversorgung mit dem Dreiphasen-Wechselspannungsnetz beschrieben. Das 2. Kapitel beginnt dann mit den Kenn- und Betriebsbedingungen, den „äußeren Daten“, bevor in den weiteren Kapiteln der „innere Aufbau“ und die Wirkungsweise erläutert werden.

Zu den „äußeren Kenndaten“ zählen u. a. heute besonders die Energieeffizienz, da hier normative Vorgaben zu beachten sind, bevor die Motoren in der betrieblichen Umgebung eingesetzt werden dürfen.

Es schließen sich im Kapitel 3 Berechnungshinweise zum Schutz des Motors und der Projektierung seiner Zuleitung unter Beachtung der jeweiligen Verlegesituation der elektrischen Leitungen an.

In den meisten Fällen erfolgt die Auswahl eines Antriebsmotors bezüglich seiner zu erbringenden Leistung und seines Drehmoments vom Konstrukteur. Dennoch sollte auch der Elektrotechniker Grundkenntnisse diesbezüglich haben, um einfache Auslegungen selbstständig durchführen zu können. Diese Hinweise erfährt der Leser im Kapitel 4.

Neben den klassischen Startvarianten folgt dann im Kapitel 5 eine Übersicht über die „modernen“ Motorstartmöglichkeiten bis zum Softstarter. Gerade in diesem Zusammenhang bieten die verschiedenen Hersteller heute Tools zur Auswahl geeigneter Softstarter an, von denen ein Tool (STS) beispielhaft beschrieben wird.

Da viele Antriebe drehzahlvariabel arbeiten müssen und dazu Frequenzumrichter Verwendung finden, werden diese im Kapitel 6 ausführlich dargestellt.

Mit dem häufigeren Einsatz der Frequenzumrichter kommt es vielfach in den Anlagen zu EMV-Problemen. Auch hierzu beinhaltet das Buch im Kapitel 7 Hintergrundinformationen, Normbezüge und Projektierungshinweise, mit denen der Leser in der Praxis auftretende Probleme verstehen und ihnen dadurch vorbeugen kann.

Trotz des breiten Spektrums der Inhalte erhebt das Buch nicht den Anspruch, umfassend über die Drehstrom-Antriebstechnik zu informieren. Gleichwohl soll der Leser einen Überblick gewinnen über die moderne Drehstrom-Antriebstechnik und anhand der vielen Beispiele und

Aufgaben in die Lage versetzt werden, Auswahl und Auslegung, Installation und den störungsfreien Betrieb unter Beachtung der aktuellen Normen zu realisieren. Die Lösungen zu allen Aufgaben stehen auf der Website des Hanser-Fachbuchverlages unter

www.hanser-fachbuch.de

kostenfrei zur Verfügung.

Das Buch richtet sich in erster Linie an die Auszubildenden in den Feldern Industrie- und Energieelektronik, die Studierenden der Fachschulen für Technik und die Erstsemester der Fachhochschulen.

Dem Carl Hanser Verlag danke ich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und insbesondere Herrn Manuel Leppert für die Betreuung des Projekts.

Ein besonderer Dank gilt allen Firmen, die mir die Möglichkeit gegeben haben, u. a. durch die Verwendung ihrer Abbildungen die beschriebenen Inhalte auch bildlich zu ergänzen und zu veranschaulichen.

Ich wünsche allen Lesern eine erfolgreiche Arbeit mit dem Buch.

Horstmar, im August 2018

Josef Uphaus

Inhalt

1	Dreiphasenwechselfeldspannung und -strom	13
1.1	Erzeugung und Beschreibungsformen	13
1.2	Verkettung	16
1.3	Komplexe Darstellung	20
1.4	Leistung im Wechselstromkreis	22
1.5	Symmetrische Belastung im Dreiphasen-System	27
1.6	Vergleich des Leitungsaufwands: Einphasen- und Dreiphasen-System	34
1.7	Wirkungsgrad	34
1.8	Aufgaben	36
2	Drehstrom-Asynchronmotor	39
2.1	Kenndaten und Betriebsbedingungen	40
2.1.1	Leistungsschild	41
2.1.2	Baugrößen, Bauformen, Aufstellungsarten und Klemmkasten-Lage (DIN EN 60034-7)	43
2.1.3	Schutzarten	44
2.1.4	Thermische Klassen/Wärme­klassen/Temperaturklassen	44
2.1.5	Kühlarten	46
2.1.6	Betriebsarten elektrischer Maschinen (DIN EN 60034-1)	47
2.1.7	Energieeffizienz	48
2.1.8	Drehsinn	51
2.1.9	Technische Anschlussbedingungen	52
2.1.10	Belastung beim Anlauf	53
2.1.11	Motorauswahl	54
2.1.12	Antriebsanalyse	55
2.1.13	Life Cycle Costs	57
2.1.14	Aufgaben	58
2.2	Aufbau und Wirkungsweise des Drehstrommotors	60
2.2.1	Entstehung des Drehfeldes	61
2.2.2	Drehfeldbestimmung	66
2.2.3	Läufer oder Rotor	67
2.2.4	Aufgaben	69

2.3	Entstehung der Drehbewegung	72
2.3.1	Grundgleichungen	75
2.3.2	Hochlaufkennlinie	76
2.3.3	Stromverdrängungsläufer	77
2.3.4	Aufgaben	80
2.4	Betriebsverhalten	84
2.4.1	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie	84
2.4.2	Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie	87
2.4.3	Ersatzschaltbild des Asynchronmotors	88
2.4.4	Betriebszustände	89
2.4.5	Leistungsbilanz	93
2.4.6	Bemessungsspannung und -frequenz	94
2.4.7	Aufgaben	97
2.5	Anlassverfahren: klassisch	99
2.5.1	Direktanlauf	100
2.5.2	Stern-Dreieck-Anlauf	101
2.5.3	Kusa-Schaltung	104
2.5.4	Anlasstransformator	106
2.5.5	Anlassdrosseln	106
2.5.6	Anlasswiderstände	107
2.5.7	Läuferanlasser	107
2.5.8	Aufgaben	109
2.6	Anlassverfahren: modern	115
2.6.1	Hybrid-Motorstarter	116
2.6.2	Softstarter	118
2.6.3	Frequenzumrichter	120
2.7	Drehzahländerung	122
2.7.1	Frequenz- und Schlupfvariation	122
2.7.2	Polumschaltung	122
2.7.3	Aufgaben	129

3 Projektierung des Motorabgangs 135

3.1	Motorschutz	135
3.1.1	Überlastschutz	136
3.1.2	Thermisches Überlastrelais (Motorschutzrelais)	142
3.1.3	Motorschutzschalter	144
3.1.4	Elektronisches Überlastrelais	149
3.1.5	Thermistorschutz (Motor-Vollschutz)	152
3.1.6	Motorschutz- und Schütz-Dimensionierung (Y- Δ -Schaltung)	153

3.1.7	Zusammenfassung	154
3.1.8	Aufgaben	155
3.2	Einbauanleitung und Inbetriebnahmeanleitung	162
3.3	Störungen – Ursachen – Beseitigung.....	163
3.4	Bremsen	164
3.4.1	Elektrische Bremsverfahren	164
3.4.2	Elektrische Bremsen mit Anbaukomponenten	166
3.4.3	Mechanische Bremse	171
3.4.4	Störungen an der Bremse	174
3.5	Drehrichtungsumkehr	175
3.5.1	Drehrichtungsumkehr – schützgesteuert	175
3.5.2	Drehrichtungsumkehr – elektronisch	177
3.5.3	Aufgaben	178
3.6	Motorzuleitung	180
3.6.1	Kurzschlusschutz	181
3.6.2	Überlastschutz.....	182
3.6.3	Projektierungsschritte	182
3.6.4	Auswahlkriterien für Niederspannungssicherungen.....	187
3.6.5	Leitungsschutzsicherungen	188
3.6.6	Leitungsschutzschalter	191
3.6.7	Leistungsschalter.....	193
3.6.8	Schutz von Motorstromkreisen mit Motorstartern	193
3.6.9	Aufgaben	194
3.7	Kompensation	197
3.7.1	Leistungsbetrachtung	197
3.7.2	Kompensationsarten	201
3.7.3	Ermittlung der erforderlichen Kompensationsleistung.....	204
3.7.4	Einzelkompensation von Motoren.....	206
3.7.5	Kompensation in einem Netz mit Oberschwingungen	207
3.7.6	Aufgaben	210
4	Auslegung nach Mechanik	213
4.1	Grundlagen.....	213
4.1.1	Lastmomente	215
4.1.2	Stabilität im Arbeitspunkt.....	217
4.1.3	Aufgaben	219
4.2	Aspekte der Antriebsauslegung.....	221
4.2.1	Statische Antriebsauslegung.....	221
4.2.2	Dynamische Antriebsauslegung	223

4.2.3	Getriebe	226
4.2.4	Umwandlung der Translation in Rotation	230
4.2.5	Thermische Antriebsauslegung	232
4.2.6	Positionierung	234
4.2.7	Aufgaben	236
4.3	Beschleunigung und Hochlaufzeiten	236
4.3.1	Berechnung von Hochlaufzeiten	237
4.3.2	Aufgaben	242
5	Softstarter	247
5.1	Grundlagen	247
5.2	Schaltungsarten	254
5.3	Sanftanlasser-Auswahl	255
5.4	Kurzbeschreibung: Einstellparameter	255
5.5	Projektierung	257
5.6	Auswahl-Tools für Sanftanlasser	260
5.7	Aufgaben	263
6	Frequenzumrichter	265
6.1	Übersicht	265
6.2	Frequenzumrichter-Arten	268
6.3	Stellbereich	277
6.4	87-Hz-Eckfrequenz	278
6.5	Auslegung	281
6.6	Boost	282
6.7	Bremswiderstand	282
6.8	Aufgaben	286
7	EMV – Elektromagnetische Verträglichkeit	289
7.1	Übersicht	289
7.2	Messen von Wechselgrößen	296
7.2.1	Arithmetischer Mittelwert	296
7.2.2	Gleichrichtwert	297
7.2.3	Quadratischer Mittelwert	298
7.2.4	Mischgrößen	299
7.2.5	Formfaktor	299
7.2.6	Scheitelfaktor	300
7.2.7	Grund- und Oberschwingungsgehalt	300
7.2.8	Aufgaben	301

7.3 Elektrische Antriebe als Störquelle	303
7.4 Netzqualitätskriterien	305
7.5 Messungen der Netzqualität	307
7.6 Die 3. Oberschwingung	311
7.7 Auswirkungen von Oberschwingungen	312
7.8 Normen: Grenzwerte für Oberschwingungsströme	313
7.9 Auswirkungen des FU-Betriebs auf den Motor	316
7.10 Filter und Drosseln	318
7.10.1 Filter	318
7.10.2 Netzdrossel	320
7.10.3 Motordrossel	321
7.10.4 Sinusfilter	322
7.10.5 Harmonic-/EMI-/EMV-Filter	323
7.10.6 du/dt -Filter	324
7.10.7 Zwischenkreisdrosseln	324
7.10.8 Passive und aktive Oberschwingungsfilter	325
7.11 Motorleitung	326
7.12 Schutzleiterstrom	327
7.13 EMV-verträgliche Installation	336
7.14 Aufgaben	340
8 Komplexaufgaben	343
A Anhang	349
A.1 Normen für „drehende elektrische Maschinen“	349
A.2 Auswahlhilfe für Elektromotoren (NORD)	351
A.3 Thermisches Überlastrelais (Motorschutzrelais)	352
A.3.1 Auswahltabelle	352
A.3.2 Kurzschlusschutz des thermischen Überlastrelais (Motorschutzrelais) ..	352
A.4 Motorschutzschalter	353
A.5 Kompensationstabelle	355
A.6 Sanftstarter	357
A.7 Frequenzumrichter	358
Bildquellen	359
Literatur und Tools	361
Index	365

1

Dreiphasenwechselfspannung und -strom

In den Anfängen der elektrischen Energieerzeugung bestand lange Zeit ein Wettstreit zwischen der „richtigen“ Form der Übertragung der elektrischen Energie: dem Gleichstrom- oder Wechselstromsystem, bei dem sich schon bald das Wechselstromsystem durchsetzen konnte.

In den folgenden Abschnitten wird das aktuelle Dreiphasen-Wechselspannungssystem von der Erzeugung, den Beschreibungsformen über die Verkettung bis hin zur symmetrischen und un-symmetrischen Belastung in komplexer Darstellungsform dargestellt.

■ 1.1 Erzeugung und Beschreibungsformen

Das heutige Dreiphasen-Wechselspannungssystem bildet die Hauptform der elektrischen Energieübertragung. Gegenüber dem Einphasen-Wechselspannungssystem oder dem Gleichspannungssystem besitzt es verschiedene Vorteile:

- einfache Erzeugung mit Drehstrom-Synchrongeneratoren
- gute Ausnutzung der Transportleitungen (Übertragungsleistung/Leitermaterialaufwand)
- zwei unterschiedliche Spannungen (Stern- und Leiterspannung)
- einfache Wandlung in Gleichspannung
- direkter Betrieb von Drehstrommotoren
- konstante Leistung bei symmetrischer Last: $p(t) = P$

Drehstrom-Synchrongeneratoren erzeugen in den drei Wicklungssträngen des Stators (Ständers) drei voneinander unabhängige sinusförmige Wechselspannungen (Bild 1.1)

In Bild 1.2 ist der 4-polige Läufer (Rotor) eines Drehstrom-Synchrongenerators dargestellt. Die drei Ständerwicklungen U , V und W des Stators sind räumlich in einem Winkel von 120° zueinander angeordnet. Bei gleichmäßiger Drehung des Rotors wird durch dessen Magnetfeld in den drei Wicklungen jeweils eine Spannung induziert, die von Wicklung zu Wicklung eine zeitliche Verschiebung (Phasenverschiebung) von ebenfalls 120° aufweisen.

Die Dreiphasenwechselfspannung kann auf verschiedene Arten dargestellt oder beschrieben werden:

- grafisch, als Zeigerbild oder im Liniendiagramm (Bild 1.3),
- mathematisch, als Funktions- oder Momentanwertgleichung oder
- als komplexe Gleichung.

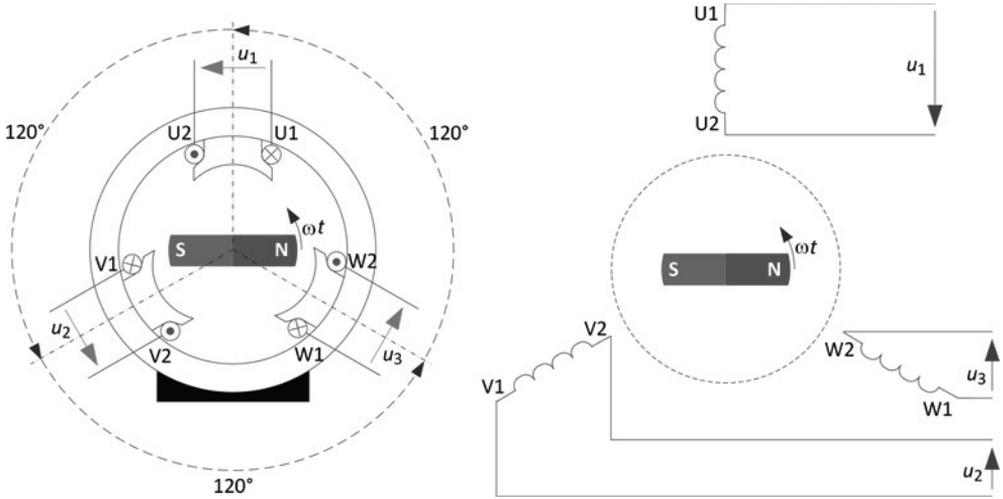


Bild 1.1 2-poliger Generator (links) und Schaltbild (rechts)



Bild 1.2 4-poliger Rotor/Läufer eines Drehstrom-Synchrongenerators (© ABB AG, 2018)

Zeigerbild und Liniendiagramm

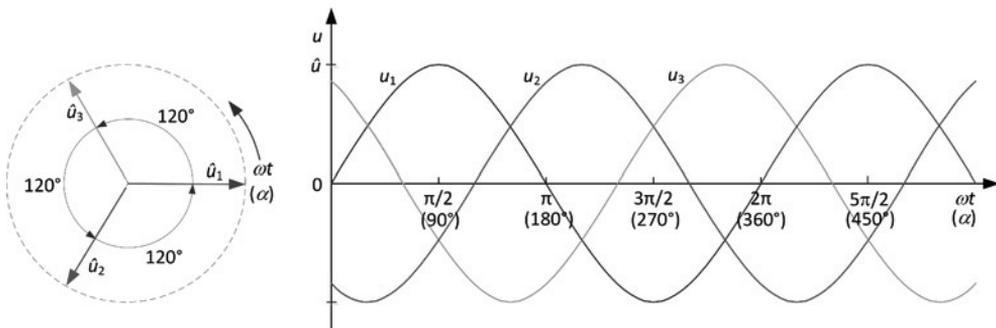


Bild 1.3 Zeigerbild (links) und Liniendiagramm (rechts)

Momentanwertgleichung (Sinusform)

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \hat{u}_1 \cdot \sin \omega t \\
 u_2 &= \hat{u}_2 \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 u_3 &= \hat{u}_3 \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Für die Sinusform gilt:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U \tag{1.2}$$

\hat{u} – Scheitel- oder Maximalwert

U – Effektivwert (quadratischer Mittelwert)

Damit gilt:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \sqrt{2} \cdot U_1 \sin \omega t \\
 u_2 &= \sqrt{2} \cdot U_2 \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 u_3 &= \sqrt{2} \cdot U_3 \sin(\omega t - 240^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Komplexe Schreibweise (Vektorform)

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_1 &= U_1 e^{j0^\circ} \\
 \underline{U}_2 &= U_2 e^{-j120^\circ} \\
 \underline{U}_3 &= U_3 e^{-j240^\circ}
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$



Die komplexe Darstellung bietet sich immer dann an, wenn bei Berechnungen nicht nur die Beträge, sondern auch die Winkel von Bedeutung sind. Da Spannungen und Ströme in Wechsel- und Drehstromsystemen immer neben den Beträgen auch eine Phasenlage besitzen, also eine zeitlich/räumliche Orientierung aufweisen, ist die einfache Betragsrechnung eher die Ausnahme.

Die Spannungen der drei Phasen werden mit U , V und W bezeichnet. Entspricht die Phasenfolge der in Bild 1.3 dargestellten,

- die Phase V eilt der Phase U um 120° nach und
- die Phase W eilt der Phase V um 120° nach,

also der Phasenfolge $U \rightarrow V \rightarrow W$, so entsteht in einem Dreiphasen-Wechselstrommotor ein Rechtsdrehfeld, d. h., der Motor läuft im Rechtslauf (positive Phasenfolge).

Durch Vertauschen von zwei Phasen kommt es zu einer Änderung der Drehrichtung im Drehstrommotor, und der Motor würde in Linkslauf betrieben (negative Phasenfolge).



Drehstrom-Steckvorrichtungen (Bild 1.4) müssen so angeschlossen werden, dass sich ein Rechtsdrehfeld ergibt, wenn man die Steckbuchsen von vorn im Uhrzeigersinn betrachtet (vgl. DIN VDE 0100-550:1988-04).

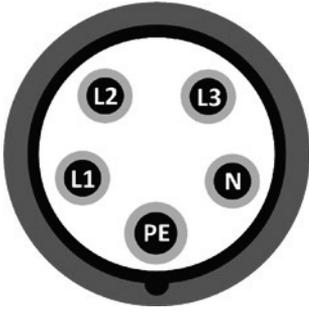


Bild 1.4 CEE-Steckbuchse

■ 1.2 Verkettung

Zur Leistungsübertragung mit dem offenen System würden sechs Leitungen benötigt. In der Praxis werden die drei getrennten Spannungen zu einem **Dreiphasen-System** verbunden oder verkettet. Unter dem Begriff **Verkettung** versteht man die Verbindung einzelner Stromkreise zu einem Stromkreis – hier zum Dreiphasen-Wechselspannungssystem oder zum Dreiphasen-Wechselstromsystem (Drehstrom).

Bei der Verkettung sind zwei Varianten möglich:

- Sternschaltung
- Dreieckschaltung

Werden die drei Wicklungsstränge des Generators so miteinander verbunden oder verkettet, wie in Bild 1.5 (links) dargestellt ist, so liegt die **Sternschaltung** (Y-Schaltung) vor.

Werden die drei Wicklungsstränge des Generators so miteinander verbunden oder verkettet, wie in Bild 1.5 (rechts) dargestellt ist, so liegt die **Dreieckschaltung** (Δ -Schaltung) vor.

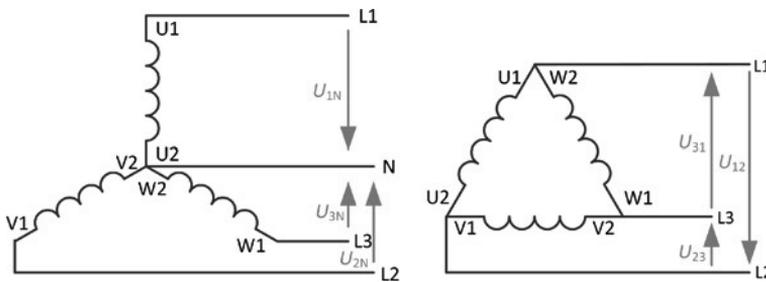


Bild 1.5 Sternschaltung (links) und Dreieckschaltung (rechts)

Leiter- und Spannungsbezeichnungen

Die spannungsführenden elektrischen Leiter, die die Versorgungsspannung, elektrische Betriebsmittel oder Geräte bilden, werden bei Gleichspannungsversorgung mit L+ und L–, im einphasigen Wechselspannungsnetz mit L1 und N und im dreiphasigen Wechselspannungsnetz mit L1, L2 und L3 (entsprechend der Phasenfolge) gekennzeichnet (Tabelle 1.1). Um bei Spannungsangaben ebenfalls eine Eindeutigkeit zu haben, werden diese entsprechend der beiden Punkte bezeichnet, zwischen denen die jeweilige Potenzialdifferenz oder Spannung gemessen wird. Tragen z. B. die beiden Punkte die Bezeichnungen L1 und N, so lautet die von Punkt L1 nach N gemessene Spannung U_{1N} oder zwischen den Außenleitern L1 und L2 U_{12} .

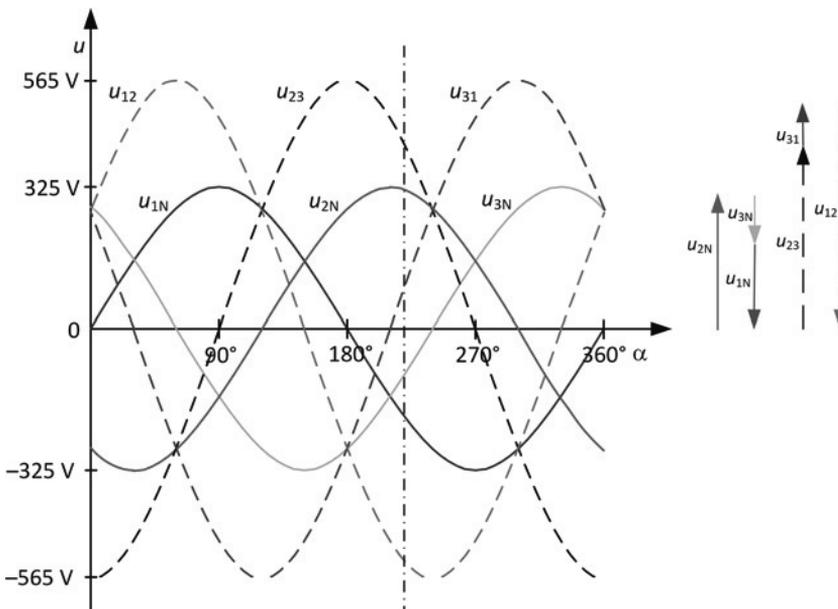
Tabelle 1.1 Leiter- und Spannungsbezeichnungen

Bezeichnungen	Erläuterungen
L1 L2 L3: Außenleiter	<ul style="list-style-type: none"> alte Bezeichnung: R – S – T am Betriebsmittel allgemein: U – V – W Farbkennzeichnung: grau – schwarz – braun
N: Neutraleiter	<ul style="list-style-type: none"> auch Sternpunkt- oder Mittelleiter (früher: MP) Farbkennzeichnung: hellblau
U_{12} U_{23} U_{31} : Außenleiterspannung	<ul style="list-style-type: none"> Leiterspannung oder Dreiecksspannung zwischen zwei Außenleitern mit zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen (Dreiecksspannungen)
U_{1N} U_{2N} U_{3N} : Sternspannung	<ul style="list-style-type: none"> Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunktleiter
U_{UV} U_{VW} U_{WU} : Strangspannung	<ul style="list-style-type: none"> Spannung zwischen den beiden Enden eines Strangs

Werden zwei Indizes verwendet, so entspricht die Reihenfolge der Indizes der Bezugsrichtung, z. B. U_{12} . Durch die Verkettung können zwei Spannungen bereitgestellt werden:

- **Leiterspannung** (Außenleiterspannung oder Dreiecksspannung) und
- **Sternspannung** (zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunkt gemessene Spannung)

Im Liniendiagramm (Bild 1.6) sind die Signal-Zeitverläufe der Sternspannungen (u_{1N} , u_{2N} , u_{3N}) und der Leiterspannungen (u_{12} , u_{23} , u_{31}) abgebildet. Aus dem Liniendiagramm ist erkennbar, dass die beiden Spannungen unterschiedliche Scheitelwerte und damit auch Effektivwerte (geometrische Mittelwerte) aufweisen.

**Bild 1.6** Liniendiagramm (links) und Augenblickswerte (rechts)

Für die Spannungen des symmetrischen Dreiphasen-Wechselspannungssystems gilt (wie zum Zeitpunkt der Strich-Punkt-Linie dargestellt):

$$\sum u = 0 \quad (1.5)$$

Der Scheitelfaktor $\sqrt{2}$ behält weiterhin seine Gültigkeit, da sich an der Sinusform der Spannungen nichts geändert hat. Die Sternschaltung (Bild 1.5 links) bildet ein 4-Leiter-System, bei dem neben den Sternspannungen auch die Leiterspannungen abgegriffen werden können (Bild 1.7). Für diese Spannungen gelten folgende Spannungsgleichungen, mit denen die Umrechnung von der Sternschaltung in die Dreieckschaltung u. U. erfolgen kann:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= \underline{U}_{1N} - \underline{U}_{2N} \\ \underline{U}_{23} &= \underline{U}_{2N} - \underline{U}_{3N} \\ \underline{U}_{31} &= \underline{U}_{3N} - \underline{U}_{1N} \end{aligned} \quad (1.6)$$

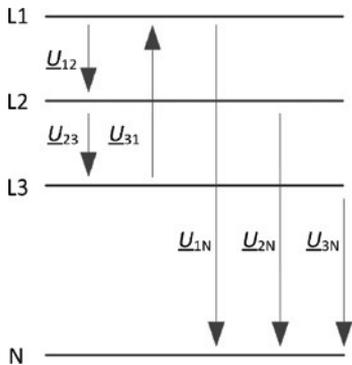


Bild 1.7 Leiterspannungen im 4-Leiter-System

Anhand des Zeigerbildes (Bild 1.8) kann dann die Umrechnung durchgeführt werden:

$$U_{12} = U_{1N} \cdot \cos 30^\circ + U_{2N} \cdot \cos 30^\circ \quad (1.7)$$

mit $U_{1N} = U_{2N}$

$$U_{12} = 2 \cdot U_{1N} \cdot \cos 30^\circ \quad (1.8)$$

mit $\cos 30^\circ = \frac{1}{2}\sqrt{3}$

$$U_{12} = \sqrt{3} \cdot U_{1N} \quad (1.9)$$

oder allgemein

$$U = \sqrt{3} \cdot U_{St} \quad (1.10)$$

oder: Leiterspannung = $\sqrt{3}$ · Sternspannung

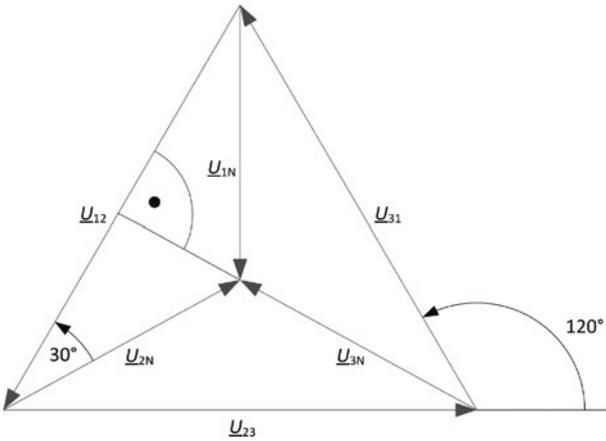


Bild 1.8 Verkettung

Im Dreiphasen-System wird der Faktor $\sqrt{3}$ auch als **Verkettungsfaktor** bezeichnet.

Bei symmetrischen Systemen gilt:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 &= 0 \\ \underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} &= 0 \end{aligned} \quad (1.11)$$

Für die Sternschaltung gilt:

$$U = \sqrt{3} \cdot U_{St} \quad (1.12)$$

U – Leiterspannung (z. B. U_{12})

U_{St} – Sternspannung (z. B. U_{1N})

Für die Dreieckschaltung gilt:

$$U = U_{St} \quad (1.13)$$

U – Leiterspannung (z. B. U_{12})

U_{St} – Strangspannung (z. B. U_{12})

Die im 4-Leiter-System verknüpften Spannungen lassen sich auch, wie in Bild 1.9 abgebildet, mit ihren jeweiligen Phasenlagen darstellen.

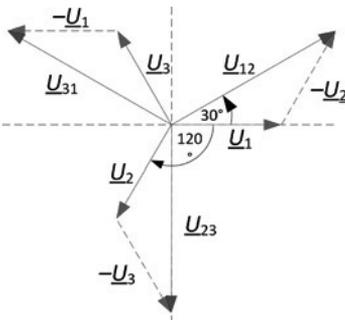


Bild 1.9 Spannungszeigerbild des 4-Leiter-Systems

■ 1.3 Komplexe Darstellung

Jede komplexe Zahl kann durch die Angabe von Realteil (Re) und Imaginärteil (Im) in der Gauß'schen Zahlenebene dargestellt werden (Bild 1.10).

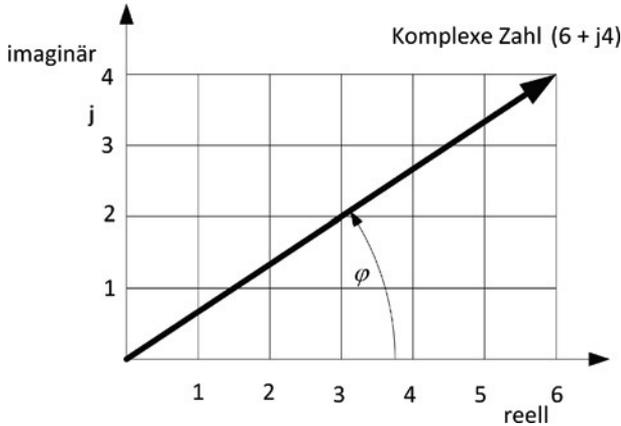


Bild 1.10 Komplexe Ebene

Die Kennzeichnung des Imaginärteils erfolgt durch den Buchstaben **j** (oder **i** für imaginäre Einheit).

Diese Darstellungsform ist auch bei Wechselspannungen und -strömen möglich, da auch sie einen Betrag und eine Phasenlage besitzen:

$$\hat{u} \cdot \sin(\omega t \pm \varphi) = \hat{u}_1 \sin \omega t \pm \hat{u}_2 \cos \omega t \quad (1.14)$$

Oder als komplexe Spannungsgleichung:

$$U = U_1 \pm jU_2 \quad (1.15)$$

Eine komplexe Größe wird durch einen Unterstrich am Formelzeichen gekennzeichnet:

$$\underline{U}$$

Alternativ wird die Vektordarstellung auch durch einen Pfeil über dem Formelzeichen der jeweiligen physikalischen Größe gekennzeichnet:

$$\vec{u}$$

Für die Darstellung komplexer Größen sind drei Schreibweisen entwickelt worden:

Normalform

$$\underline{U} = \underline{U}_1 \pm j\underline{U}_2 \quad (1.16)$$

Trigonometrische Form

$$\underline{U} = U(\cos \varphi \pm j \sin \varphi) \quad (1.17)$$

Die Umrechnung für den Betrag lautet:

$$|\underline{U}| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (1.18)$$

Für den Phasenwinkel gilt:

$$\tan \varphi = \frac{U_2}{U_1} \quad (1.19)$$

φ – Nullphasenwinkel

Exponentialform nach Euler

$$e^{\pm j\varphi} = \cos \varphi \pm j \sin \varphi \quad (1.20)$$

$$\underline{U} = U \cdot e^{\pm j\varphi} \quad (1.21)$$

U – Betrag

Die Darstellungsform einer komplexen Größe richtet sich nach ihrer Verwendung:

- Normalform: Addition und Subtraktion komplexer Größen
- Exponentialform: Multiplikation und Division komplexer Größen
- Trigonometrische Form: Umrechnung von der Normalform in die Exponentialform v. v.

**Beispiel 1.1**

Wandeln Sie die Spannung mit der Gleichung $u = 45,5 \text{ V} \sin(\omega t + 20,2^\circ)$ in die drei Darstellungsformen komplexer Größen um!

Lösung

Exponentialform: $\underline{U} = 32 \text{ V} e^{+j20,2^\circ}$

Trigonometrische Form: $\underline{U} = 32 \text{ V}(\cos 20,2^\circ + j \sin 20,2^\circ)$

Normalform: $\underline{U} = 30 \text{ V} + j11 \text{ V}$

■ 1.4 Leistung im Wechselstromkreis

Für die Berechnung der elektrischen Leistung muss berücksichtigt werden, ob es sich um den Betrieb an Gleichspannung, Wechselspannung oder Dreiphasen-Wechselspannung handelt. Bei Betrieb an Gleichspannung, die am Betriebsmittel einen Gleichstrom hervorruft, gilt mit $U = \text{konst.}$ und $I = \text{konst.}$:

$$P = U \cdot I \quad (1.22)$$

Diese elektrische Leistung wird dabei vollständig in thermische, chemische oder z. B. mechanische Energie umgewandelt, als Wirkleistung bezeichnet und in der Einheit Watt (W) angegeben.

Bei Betrieb an nicht konstanten Spannungen und den dadurch ebenso nicht konstanten Strömen kann nur der jeweilige Augenblickswert der elektrischen Leistung berechnet werden.

Da bei nicht konstanten Größen Kleinbuchstaben verwendet werden, gilt bei $U \neq \text{konst.}$ und $I \neq \text{konst.}$:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1.23)$$

Bei veränderlichen Werten von Spannung (u) und Strom (i) entspricht die Wirkleistung dem Gleichwert der Augenblicksleistung p :

$$P = \bar{p} = \bar{u} \cdot \bar{i} \quad (1.24)$$

Für periodische Spannungen und Ströme ist diese über eine Periode T zu mitteln:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u \cdot i dt \quad (1.25)$$

Bei sinusförmigen Spannungen und Strömen mit φ (Phasenverschiebungswinkel zwischen Spannung und Strom) gilt mit

$$\begin{aligned} u(t) &= \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \\ i(t) &= \hat{i} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (1.26)$$

somit:

$$p(t) = \hat{u} \sin \omega t \cdot \hat{i} \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.27)$$

Mit

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)) \quad (1.28)$$

gilt:

$$p(t) = \left(\frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)) \right) \quad (1.29)$$

Index

A

Ableitströme 327
Ableitstrom-Kompensation 336
Abschaltbedingung 185
Aluminiumgehäuse 66
Anbaubremsen 171
Anfangsspannung 255
Anlassdrosseln 106
Anlasstransformator 106
Anlasswiderstände 107
Anlaufmoment 76
Anlaufstrom 54, 76
Antriebsauslegung
– dynamische 223
– statische 221
– thermische 232
Anzugsmoment 84, 99
Anzugsstrom 99
Arbeitspunkt 218
– instabiler 218
– stabiler 218
Arbeitsstromprinzip 173
Asynchronmotor 74
Auslaufzeit 120
Auslöseklassen 138
Auslösestrom 145, 146
Auslöseverhalten 143
Außenleiter 17

B

Bauarten 188
Bauform 43
Baugröße 43
Belastungsdauer 233
Bemessungsdaten 41
Bemessungsleistung 42
Bemessungsmoment 53, 85
Bemessungspunkt 216

Bemessungsspannung 94
Bemessungsstrom 53
Berührstrom 328
Beschleunigung 215, 217
Beschleunigungsmoment 218
Betriebsart 47
Betriebsklasse 189
Blindleistung 24, 198, 292
– Grundschiwungs- 293
– Steuer- 294
– Verschiebungs- 293
– Verzerrungs- 293
Boost 282
Brandschutz 327
Bremsbetrieb 91
Brems-Chopper 283
Bremse
– mechanische 171
– Störungen 174
Bremsen 164
Bremswiderstand 282
– Dauerleistung 284
– Spitzenleistung 284
Bypass-Kontakte 119, 248

D

Dahlander-Schaltung 123
Delta-Schaltung 254
Differenzstromüberwachungsgerät 334
Direktanlauf 100
DOL-Schaltung 254
Doppelstaffelläufer 69
DO-System 188
Drehfeld 61
Drehfelddrehzahl 64, 73
Drehfeldprüfer 67
Drehmoment 75, 215
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie 84
Drehrichtung 51

Drehrichtungsumkehr
– elektronisch 177
– schützgesteuert 175
Drehsinn 51
Drehstrom-Synchrongeneratoren 13
Drehzahl 215
Drehzahlverstellung 122
Dreieckschaltung 16, 27, 63
Dreiphasen-Wechselspannungssystem 13
D-System 188

E

Echt-Effektivwert-Messer 298
Effektivwert 298
Effizienzklassen 48
Einbauanleitung 162
Einschaltdauer 232
Einzelkompensation 202
Elektromagnetische Schnellauslösung 145
Elektromagnetische Verträglichkeit 289
EMI-Filter 323
EMV 289
EMV-Filter 323
EMV-Gesetz 289
EMV-Richtlinie 289
Energieeffizienz 40, 48
Energieverbrauchsrelevante-Produkte-
Gesetz 40
ErP-Richtlinie 40
EUSAS-Motor 95
Exponentialform 21

F

Fahrtdiagramm 214
Fehlerschutz 327
Feldorientiertes Verfahren 276
Feldschwächebereich 277, 280
Filter 318
Filterkreisdrosseln 209
Formfaktor 299
Fourier-Analyse 291
Frequenzumrichter 120, 265
Funktions-Potenzialausgleich 333

G

Gegenstrombremsbetrieb 91
Gegenstrombremsung 166
Generatorbetrieb 90
Getriebe 226
Getriebemotor 55
Gleichrichter 267
Gleichrichtwert 297
Gleichstrombremsung 165
Gleichstromumrichter 267
Gaugussgehäuse 66
Grunddrehzahlbereich 280
Grundswingungsgehalt 295, 300
Grundswingungs-Leistungsfaktor 292
Grundstellbereich 277
Gruppenkompensation 202

H

Harmonic-Filter 323
Hochlaufkennlinie 84
Hochlaufzeit 119, 238
Hybrid-Motorstarter 116
Hysteresebremsen 168

I

Inbetriebnahmeanleitung 162
Inline-Schaltung 254
Inrushstrom 49
Isolierstoffklasse 45

K

Käfigläufer 68
Kickstart 256
Kippmoment 77, 85
Klemmkasten 61, 62
Kompensation 197
Kompensationsanlage
– unverdrosselt 207
– verdrosselt 208
Kompensationsarten 201
Konstantflussbereich 280
Konusanker-Bremsmotor 172
Kühlarten 46

Kurzschlussläufer 68
 Kurzschlussringe 68
 Kurzschlusschutz 145, 181
 Kurzschlussstrom 181
 Kusa-Schaltung 104

L

Lagergeräusch 317
 Lagerströme 317
 Lastmoment
 – konstant 215
 – linear ansteigend 215
 – quadratisch 215
 – umgekehrt proportional 216
 Lastwechsel 214
 Läufer 61
 Läuferanlasser-Verfahren 107
 Läuferblechpaket 61
 Läuferstabformen 78
 Läuferstillstandsspannung 73
 Lebenszykluskosten 57
 Leerlaufkennlinie 88
 Leichtanlauf 101
 Leistungsbilanz 93
 Leistungsfaktor 26
 – „totaler“ 294
 Leistungsschalter 193
 Leistungsschild 40, 41
 Leiterspannung 17
 Leitungsschutzschalter 191
 Lenz'sche Regel 72
 life cycle costs 57
 Linkslauf 15, 52, 65
 Losbrechmoment 222, 253

M

Magnetfeld 61
 Magnepulverbremse 169
 Mehrspannungsauslegung 95
 Messverfahren
 – Differenzstrom 330
 – direktes 330
 – Ersatzableitstrom 330

Mittelwert
 – Arithmetischer 296
 – Quadratischer 298
 Motorbetrieb 90
 Motordrossel 321
 Motorleitung 326
 Motorschutz 137
 Motorschutzschalter 141, 144
 Motor-Vollschutz 152

N

Nenndaten 41
 Nennmoment 85
 Netzdrossel 320
 Netzgleichrichter 270
 Netzqualität 290
 Netzurückwirkung 290, 292
 Neutralleiter 17
 Neutralleiterunterbrechung 312
 NH-System 189
 Normalanlauf 101, 255
 Normalform 21

O

Oberschwingungsfilter
 – aktiv 325
 Oberschwingungsgehalt 300
 Oberschwingungsspektrum 308
 Oberwellen 292

P

PAM 272
 PAM-Wicklung 128
 Pendelmomente 317
 PFC 305
 – aktiv 305
 – passiv 305
 Phasenanschnittsteuerung 119, 248
 Phasenfolge 15
 Polpaarzahl 65
 Polumschaltung 122
 Positionierung 234
 PWM 272

R

Rampenzeit
 – für den Auslauf 255
 – für den Start 255
 RCD 330
 Rechtslauf 15, 52, 65
 Reihenschaltung 254
 Rotor 61
 Ruhestromprinzip 173

S

Sattelmoment 84
 Scheinleistung 23, 198
 Scheitelfaktor 18, 300
 Schleifringläufermotoren 107
 Schlupf 73
 Schutzarten 44
 Schütz-Dimensionierung 153
 Schutzleiterstrom 327, 328
 Schutzleiterströme
 – dynamisch 330
 – statisch 329
 – transiente 330
 Schutz-Potenzialausgleich 333
 Schweranlauf 101, 255
 Senk- oder Nutzbremmung 164
 Sinusfilter 322
 Softstarter 118, 247
 spannungsumschaltbare Motoren 95
 Spannungsvektorverfahren 277
 Spannungszwischenkreis 270
 Spieldauer 232
 Staffelläufer 69
 Stahlgehäuse 66
 Ständer 61
 Ständerblechpaket 61
 Ständerwicklungen 13
 Startspannung 119, 256
 Startstoß 250
 Stator 61
 Stern-Dreieck-Umschaltung 101, 103
 Sternpunktverschiebung 312
 Sternschaltung 16, 30, 63
 Sternspannung 17
 Stopprampe 256

Störungen–Ursachen–Beseitigung 163
 Strangströme 63
 Stromrichter 267
 Stromvektorverfahren 277
 Stromverdrängung 78
 Stromverdrängungsläufer 77
 Stromzwischenkreis 270
 Synchrondrehzahl 64, 73
 Synchronmotor 67

T

Teilspannungsanlauf 101
 THD-Wert 309
 Thermische Bimetallauslösung 145
 thermische Klasse 45
 thermisches Überlastrelais
 (Motorschutzrelais) 141, 142
 Thermistoren 63, 152
 Thermistorschutz 152
 Trägheitsmoment 225
 Trigonometrische Form 21
 True-RMS-Messgerät 298
 Typenschild 40

U

U/f -Kennlinie 266
 U/f -Verfahren 276
 du/dt -Filter 324
 Überlastrelais
 – elektronisches 149
 Überlastschutz 182
 Übersetzung 226
 Überstromschutz 145, 180
 Umdrehungsfrequenz 67
 Umrichter 267

V

Verdrosselungsfaktor 209
 Verkettung 16
 Verkettungsfaktor 19
 Verlustleistung 43
 Verschiebeankermotor 171
 Verschiebungsfaktor 26, 292, 295

W

Wärmeklasse 45
Wechselrichter 267
Wechselstromumrichter 267
Weitbereichswicklungen 95
Wellenspannungen 317
Wendeschutzsteuerung 175
Wicklungsstränge 62
Wiederbereitschaftszeit 258
Winkelbeschleunigung 225
Winkelgeschwindigkeit 225
Wirbelstrombremsen 166
Wirkleistung 23, 197

Wirkungsgrad 35, 42
Wurzel-3-Schaltung 254

Z

Zentralkompensation 203
Zuordnungsart 1 193
Zuordnungsart 2 193
Zuordnungsarten 138
Zusätzlicher Schutz 327
Zustandsanalyse 135
Zwischenkreis 270
Zwischenkreisdrosseln 324
Zwischenkreisumrichter 269