

	DIN VDE 0530-25 (VDE 0530-25)	
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	
ICS 29.160.30 Ersatz für DIN CLC/TS 60034-25 (VDE V 0530-25):2006-01 Drehende elektrische Maschinen – Teil 25: Leitfaden für den Entwurf und das Betriebsverhalten von Drehstrommotoren, die speziell für Umrichterbetrieb bemessen sind (IEC/TS 60034-25:2007); Deutsche Fassung CLC/TS 60034-25:2008 Rotating electrical machines – Part 25: Guidance for the design and performance of a.c. motors specifically designed for converter supply (IEC/TS 60034-25:2007); German version CLC/TS 60034-25:2008 Machines électriques tournantes – Partie 25: Guide pour la conception et les qualités de performance des moteurs triphasés, spécifiquement conçus pour l'alimentation à convertisseur (CEI/TS 60034-25:2007); Version allemande CLC/TS 60034-25:2008 Gesamtumfang 77 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Das von CENELEC am 2008-07-18 angenommene CLC/TS 60034-25 gilt als DIN-Norm ab 2009-08-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN IEC 60034-25 (VDE 0530-25):2006-06.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 311 „Drehende elektrische Maschinen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 2 „Rotating machinery“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (maintenance result date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Änderungen

Gegenüber **DIN CLC/TS 60034-25 (VDE V 0530-25):2006-01** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Ersatz der ursprünglichen Einleitung durch eine kürzere Einleitung;
- b) Ausdehnung des Anwendungsbereichs, um alle umrichter gespeisten Motoren zu berücksichtigen und nicht nur Niederspannungs-Induktionsmotoren;
- c) geringe Änderungen, durchgehend in den Abschnitten 4 bis 9;
- d) Ergänzung der Unterabschnitte 4.3.4, 4.3.5, 5.4, 6.2.1, 8.6.3, 8.7 und 8.8 und Bild 7;
- e) Aufnahme der Unterabschnitte 4.4 und 4.5 in Anhang A;
- f) Ausdehnung des ursprünglichen Anhangs A, der zum Anhang B wird;
- g) Neuentwurf des Abschnittes 5;
- h) Umnummerierung von 6.1.4 in 6.3;
- i) Entfernen von Geräuschgrenzwerten aus dem normativen Text;
- j) Ergänzung der Verweise auf **EN 60034-9**;
- k) Ergänzung um Anhang C.

Frühere Ausgaben

DIN CLC/TS 60034-25 (VDE V 0530-25): 2006-01

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnichtsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
Normen der Reihe EN 60034	Normen der Reihe IEC 60034	Normen der Reihe DIN EN 60034 (VDE 0530)	Normen der Reihe VDE 0530
EN 60034-1	IEC 60034-1	DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1)	VDE 0530-1
–	–	DIN EN 60034-1 Ber 1:2007-09 (VDE 0530-1 Ber 1)	VDE 0530-1 Ber 1
EN 60034-2:1996 + A1:1996 + A2:1996	IEC 60034-2:1972 + IEC 60034-2A:1974 + A1:1995 + A2:1996	DIN EN 60034-2 (VDE 0530-2): 1998-09	VDE 0530-2
EN 60034-6	IEC 60034-6	DIN EN 60034-6 (VDE 0530-6)	VDE 0530-6
EN 60034-9 + A1	IEC 60034-9 modifiziert + A1	DIN EN 60034-9 (VDE 0530-9)	VDE 0530-9
–	–	DIN EN 60034-9 Ber 1 (VDE 0530-9 Ber 1)	VDE 0530-9 Ber 1
EN 60034-12 + A1	IEC 60034-12 + A1	DIN EN 60034-12 (VDE 0530-12)	VDE 0530-12
EN 60034-14 + A1	IEC 60034-14 + A1	DIN EN 60034-14 (VDE 0530-14)	VDE 0530-14
–	IEC/TS 60034-17	DIN VDE 0530-17 (VDE 0530-17)	VDE 0530-17
–	IEC/TS 60034-18-41	DIN IEC/TS 60034-18-41 (VDE V 0530-18-41)	VDE V 0530-18-41
–	IEC 60050-161 + A1, A2	–	–
–	IEC 60050-195/A1	–	–
Normen der Reihe EN 60079	Normen der Reihe IEC 60079	Normen der Reihe DIN EN 60079 (VDE 0170)	Normen der Reihe VDE 0170
–	IEC 61000-5-1	–	–
–	IEC/TR 61000-5-2	–	–
Normen der Reihe EN 61800	Normen der Reihe IEC 61800	Normen der Reihe DIN EN 61800 (VDE 0160)	Normen der Reihe VDE 0160
EN 61800-2	IEC 61800-2	DIN EN 61800-2 (VDE 0160-102)	VDE 0160-102
EN 61800-3	IEC 61800-3	DIN EN 61800-3 (VDE 0160-103)	VDE 0160-103
EN 61800-4	IEC 61800-4	DIN EN 61800-4 (VDE 0160-104)	VDE 0160-104
EN 61800-5-1	IEC 61800-5-1	DIN EN 61800-5-1 (VDE 0160-105-1)	VDE 0160-105-1
EN 61800-5-2	IEC 61800-5-2	DIN EN 61800-5-2 (VDE 0160-105-2)	VDE 0160-105-2
CLC/TR 61800-6	IEC/TR 61800-6	DIN V VDE V 0160-106 (VDE V 0160-106)	VDE V 0160-106

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60034 (VDE 0530) (Normen der Reihe), *Drehende elektrische Maschinen*

DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten*

DIN EN 60034-1 Berichtigung 1 (VDE 0530-1 Berichtigung 1):2007-09, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (IEC 60034-1:2004); Deutsche Fassung EN 60034-1:2004, Berichtigungen zu DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2005-04*

DIN EN 60034-2 (VDE 0530-2):1998-09, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades von drehenden elektrischen Maschinen aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge) (IEC 60034-2:1972 + IEC 60034-2A:1974 + A1:1995 + A2:1996) Deutsche Fassung EN 60034-2:1996 + A1:1996 + A2:1996*

DIN EN 60034-6 (VDE 0530-6), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 6: Einteilung der Kühlverfahren (IC-Code)*

DIN EN 60034-9 (VDE 0530-9), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 9: Geräuschgrenzwerte*

DIN EN 60034-9 Berichtigung 1 (VDE 0530-9 Berichtigung 1), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 9: Geräuschgrenzwerte*

DIN EN 60034-12 (VDE 0530-12), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 12: Anlaufverhalten von Drehstrommotoren mit Käfigläufer ausgenommen polumschaltbare Motoren*

DIN EN 60034-14 (VDE 0530-14), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 14: Mechanische Schwingungen von bestimmten Maschinen mit einer Achshöhe von 56 mm und höher – Messung, Bewertung und Grenzwerte der Schwingstärke*

DIN EN 60079 (VDE 0170) (Normen der Reihe), *Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche*

DIN EN 61800 (VDE 0160) (Normen der Reihe), *Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe*

DIN EN 61800-2 (VDE 0160-102), *Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 2: Allgemeine Anforderungen – Festlegungen für die Bemessung von Niederspannungs-Wechselstrom-Antriebssystemen mit einstellbarer Frequenz*

DIN EN 61800-3 (VDE 0160-103), *Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 3: EMV-Anforderungen einschließlich spezieller Prüfverfahren*

DIN EN 61800-4 (VDE 0160-104), *Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 4: Allgemeine Anforderungen – Festlegungen für die Bemessung von Wechselstrom-Antriebssystemen über 1 000 V AC und höchstens 35 kV*

DIN EN 61800-5-1 (VDE 0160-105-1), *Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl – Teil 5-1: Anforderungen an die Sicherheit – Elektrische, thermische und energetische Anforderungen*

DIN EN 61800-5-2 (VDE 0160-105-2), *Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl – Teil 5-2: Anforderungen an die Sicherheit – Funktionale Sicherheit*

DIN IEC/TS 60034-18-41 (VDE V 0530-18 41), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-41: Qualifizierung und Typprüfung elektrischer Isoliersysteme vom Typ I in drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsrichtern gespeist werden*

DIN VDE 0530-17 (VDE 0530-17), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 17: Umrichter gespeiste Induktionsmotoren mit Käfigläufer – Anwendungsleitfaden*

DIN VDE V 0160-106 (VDE V 0160-106), *Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl – Teil 6: Richtlinie zur Bestimmung von Lastspielarten und entsprechenden Strombemessungen*

– Leerseite –

**Drehende elektrische Maschinen –
Teil 25: Leitfaden für den Entwurf und das Betriebsverhalten von
Drehstrommotoren, die speziell für Umrichterbetrieb bemessen sind
(IEC/TS 60034-25:2007)**

Rotating electrical machines –
Part 25: Guidance for the design and
performance of a.c. motors specifically designed
for converter supply
(IEC/TS 60034-25:2007)

Machines électriques tournantes –
Partie 25: Guide pour la conception et les
qualités de performance des moteurs triphasés,
spécifiquement conçus pour l'alimentation à
convertisseur
(CEI/TS 60034-2:2007)

Diese Technische Spezifikation wurde von CENELEC am 2008-07-18 angenommen.

Die CENELEC-Mitglieder sind verpflichtet, das Vorhandensein dieser TS in der gleichen Weise wie bei einer EN anzukündigen und die TS auf nationaler Ebene unverzüglich in geeigneter Weise verfügbar zu machen. Es ist zulässig, entgegenstehende nationale Normen beizubehalten.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Vorwort

Der Text der Technischen Spezifikation IEC/TS 60034-25:2007, ausgearbeitet von dem IEC/TC 2 „Rotating machinery“, wurde der Abstimmung gemäß der Geschäftsordnung, Teil 2, Unterabschnitt 11.3.3.3 unterworfen und von CENELEC am 2008-07-18 als CLC/TS 60034-25 angenommen.

Diese Technische Spezifikation ersetzt CLC/TS 60034-25:2005.

CLC/TS 60034-25:2008 enthält gegenüber der CLC/TS 60034-25:2005 die folgenden wesentlichen technischen Änderungen:

- Ersatz der ursprünglichen Einleitung durch eine kürzere Einleitung;
- Ausdehnung des Anwendungsbereichs, um alle umrichter gespeisten Motoren zu berücksichtigen und nicht nur Niederspannungs-Induktionsmotoren;
- geringe Änderungen, durchgehend in den Abschnitten 4 bis 9;
- Ergänzung der Unterabschnitte 4.3.4, 4.3.5, 5.4, 6.2.1, 8.6.3, 8.7 und 8.8 und Bild 7;
- Aufnahme der Unterabschnitte 4.4 und 4.5 in Anhang A:
- Ausdehnung des ursprünglichen Anhangs A, der zum Anhang B wird;
- Neuentwurf des Abschnittes 5;
- Umnummerierung von 6.1.4 in 6.3;
- Entfernen von Geräuschgrenzwerten aus dem normativen Text;
- Ergänzung der Verweise auf EN 60034-9;
- Ergänzung um Anhang C.

Nachstehendes Datum wurde festgelegt:

spätestes Datum, zu dem das Vorhandensein der CLC/TS
auf nationaler Ebene angekündigt werden muss (doa): 2009-01-18

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Technischen Spezifikation IEC/TS 60034-25:2007 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Technische Spezifikation angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	8
4 Kenngrößen des Systems	10
4.1 Allgemeines	10
4.2 Erläuterungen zum System	10
4.3 Drehmoment-Drehzahl-Betrachtungen	10
4.4 Anforderungen an die Motoren	14
5 Verluste und ihre Auswirkungen (bei Induktionsmotoren mit Speisung durch U-Umrichter)	16
5.1 Allgemeines	16
5.2 Entstehungsort der zusätzlichen aufgrund von Umrichterspeisung entstandenen Verluste und Möglichkeiten ihrer Reduzierung	16
5.3 Umrichtermerkmale zur Verkleinerung der Motorverluste	17
5.4 Einsatz von Filtern zur Reduzierung zusätzlicher aufgrund von Umrichterspeisung entstandener Motorverluste	18
5.5 Temperatur und Lebenserwartung	18
5.6 Bestimmung des Motorwirkungsgrades	19
6 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	19
6.1 Geräusche	19
6.2 Schwingungen (außer Drehschwingungen)	22
6.3 Drehschwingungen	23
7 Elektrische Beanspruchung der Motorisolierung	23
7.1 Allgemeines	23
7.2 Gründe	23
7.3 Dielektrische Wicklungsbeanspruchung	26
7.4 Begrenzung der Isolierungsbeanspruchung	27
7.5 Verantwortlichkeiten	27
7.6 Umrichter-Eigenschaften	28
7.7 Möglichkeiten zur Verkleinerung der Spannungsbeanspruchung	29
7.8 Auswahl des Motors	29
8 Lagerströme	30
8.1 Ursachen von Lagerströmen in umrichtergespeisten Motoren	30
8.2 Erzeugung von hochfrequenten Lagerströmen	30
8.3 Common-Mode-Kreis	32
8.4 Streufeld-Kapazitäten	32
8.5 Auswirkungen von großen Lagerströmen	34

	Seite
8.6 Schutzmaßnahmen gegen Schäden durch hochfrequenten Lagerstrom	34
8.7 Zusätzliche Betrachtungen zu Lagerströmen bei umrichter gespeisten Hochspannungs- Motoren	37
8.8 Schutzmaßnahmen bei Lagern in Hochspannungsmotoren mit Speisung aus I-Umrichtern	38
9 Installation	38
9.1 Erdung, Potentialausgleich und Kabelführung	38
9.2 Drosseln und Filter	44
9.3 Kompaktmotoren (Motor und Antriebsmodule integriert)	45
10 Zusätzliche Betrachtungen zu permanentmagnetenerregten Synchronmotoren mit Speisung aus U-Umrichtern	46
10.1 Kenngrößen des Systems	46
10.2 Verluste und ihre Auswirkungen	46
10.3 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	46
10.4 Elektrische Beanspruchung der Motorisolierung	46
10.5 Lagerströme	46
10.6 Besondere Aspekte bei Permanentmagneten	47
11 Zusätzliche Betrachtungen zu Hochspannungs-Käfigläufermotoren mit Speisung aus U-Umrichtern	47
11.1 Allgemeines	47
11.2 Kenngrößen des Systems	47
11.3 Verluste und ihre Auswirkungen	48
11.4 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	49
11.5 Elektrische Beanspruchung der Motorisolierung	49
11.6 Lagerströme	51
12 Zusätzliche Betrachtungen zu Synchronmotoren mit Speisung durch U-Umrichter	51
12.1 Kenngrößen des Systems	51
12.2 Verluste und ihre Auswirkungen	51
12.3 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	51
12.4 Elektrische Beanspruchung der Motorisolierung	51
12.5 Lagerströme	52
13 Zusätzliche Betrachtungen zu Käfigläufermotoren mit Speisung aus Block-I-Umrichtern	52
13.1 Kenngrößen des Systems	52
13.2 Verluste und ihre Auswirkungen	53
13.3 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	53
13.4 Elektrische Beanspruchung der Motorisolierung	54
13.5 Lagerströme	54
13.6 Zusätzliche Betrachtungen für 6-strängige Käfigläufermotoren	54
14 Zusätzliche Betrachtungen für Synchronmotoren mit LCI-Versorgung	54
14.1 Kenngrößen des Systems	54
14.2 Verluste und ihre Auswirkungen	56

	Seite
14.3 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	56
14.4 Elektrische Beanspruchung der Motorisolierung	56
14.5 Lagerströme	56
15 Zusätzliche Betrachtungen zu Induktionsmotoren mit Versorgung durch I-Umrichter mit Pulsbreitenmodulation (PWM CSI)	56
15.1 Kenngrößen des Systems	56
15.2. Verluste und ihre Auswirkungen	57
15.3 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	57
15.4 Elektrische Beanspruchung der Motorisolierung	57
15.5 Lagerströme	57
16 Weitere Motor-/Umrichter-Systeme	58
16.1 Antriebe mit Versorgung aus Direktumrichtern	58
16.2 Induktionsmotoren mit Schleifringläufer mit Versorgung durch I-Umrichter im Läuferkreis	59
16.3 Induktionsmotoren mit Schleifringläufer mit Versorgung durch U-Umrichter im Läuferkreis	59
Anhang A (normativ) Umrichter-Kenngrößen	61
Anhang B (informativ) Frequenzspektra der Umrichter-Ausgangsspannung	65
Anhang C (informativ) Geräuschzunahme als Folge von Umrichterspeisung	68
Literaturhinweise	69
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	70
 Bild 1 – Drehmoment-Drehzahl-Verhalten	 11
Bild 2 – Umrichter-Ausgangsstrom	11
Bild 3 – Kennlinien der Umrichterausgangsspannung/Frequenz	13
Bild 4 – Beispiel der gemessenen Verluste P_L als Funktion der Frequenz f und der Versorgungsart	17
Bild 5 – Zusätzliche Verluste ΔP_L eines Motors (gleicher Motor wie in Bild 4) aufgrund des Umrichterbetriebs als Funktion der Schaltfrequenz f_p bei 50 Hz Drehfrequenz	18
Bild 6 – Lüftergeräusch in Abhängigkeit von der Lüfterdrehzahl	20
Bild 7 – Schwingungsformen	21
Bild 8 – Typische Spannungsstöße an den Klemmen eines aus einem PWM-Umrichter gespeisten Motors	24
Bild 9 – Typische Spannungsstöße in einer Phase an den Umrichter- und an den Motorklemmen (2 ms/Einheit)	25
Bild 10 – Einzelner Stoß aus Bild 9 mit kurzer Anstiegszeit (1 μ s/Einheit)	25
Bild 11 – Definition der Anstiegszeit t_T der Spannung an den Motorklemmen	26
Bild 12 – Spannung an der ersten Windung in Abhängigkeit von der Anstiegszeit	26
Bild 13 – Teilentladungsimpuls als Folge eines durch den Umrichter verursachten Spannungsstoßes an den Motorklemmen (100 ns/Einheit)	27
Bild 14 – Grenzkurven der Impulsspannung U_{pk} , gemessen zwischen den Motorklemmen von zwei Strängen, in Abhängigkeit der Anstiegszeit t_T	28
Bild 15 – Mögliche Lagerströme	31

	Seite
Bild 16 – Motor-Kapazitäten	33
Bild 17 – Kraterbildung durch EDM-Durchschläge (Kraterdurchmesser 30 µm bis 50 µm).....	34
Bild 18 – Querrillen durch hohen Lagerstrom.....	34
Bild 19 – Potentialausgleichslitze zwischen Klemmenkasten und Gehäuse eines Motors.....	39
Bild 20 – Beispiele für geschirmte Motorkabel und Verbindungen.....	40
Bild 21 – Parallele symmetrische Verkabelung von Umrichter und Motor hoher Leistung	41
Bild 22 – Umrichter-Verbindungen mit 360° HF Kabelstutzen, Demonstration des „Faraday-Käfigs“	42
Bild 23 – Motor-Endverschluss mit 360°-Verbindung.....	42
Bild 24 – Verbindung des Kabelschirms.....	43
Bild 25 – Eigenschaften von Schutzmaßnahmen	45
Bild 26 – Schema eines typischen Drei-Ebenen-Umrichters	47
Bild 27 – Ausgangsspannung und -strom eines typischen Drei-Ebenen-Umrichters	48
Bild 28 – Typische Spannung an der ersten Windung U (in Prozent der Leiter-Erde-Spannung) als Funktion von du/dt	49
Bild 29 – Materialien zur Isolierung von Mittelspannungs- und Hochspannungs-Formspulen und zum Schutz vor Spannungsbeanspruchungen	50
Bild 30 – Schema eines Block-I-Umrichters	52
Bild 31 – Strom und Spannungskurven von Block-I-Umrichtern	52
Bild 32 – Schema und Spannungs- und Stromkurven eines Synchronmotors mit Versorgung durch einen I-Umrichter.....	55
Bild 33 – Schema eines gepulsten I-Umrichters	56
Bild 34 – Spannungen und Ströme von gepulsten I-Umrichtern	57
Bild 35 – Schema eines Direktumrichters	58
Bild 36 – Kurvenformen von Spannung und Strom eines Direktumrichters.....	58
Bild A.1 – Auswirkungen der Schaltfrequenz auf die Motor- und die Umrichterverluste	63
Bild A.2 – Auswirkung der Schaltfrequenz auf das Geräusch.....	64
Bild A.3 – Auswirkungen der Schaltfrequenz auf Drehmomentschwankungen	64
Bild B.1 – Typische Frequenzspektra der Umrichter-Ausgangsspannung	65
Bild B.2 – Typische Frequenzspektra der Umrichter-Ausgangsspannung	65
Bild B.3 – Typische Spektra der Umrichter-Ausgangsspannung	66
Bild B.4 – Typische Zeitverläufe des Motorstroms.....	66
Bild B.5 – Typische Zeitverläufe des Motorstroms.....	67
Tabelle 1 – Alphabetische Querverweisliste mit Begriffen	8
Tabelle 2 – Maßgebliche Einflussfaktoren auf das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten	12
Tabelle 3 – Betrachtungen zum Motorentwurf	14
Tabelle 4 – Motoreigenschaften	15
Tabelle 5 – Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen gegen Lagerströme.....	35
Tabelle C.1 – Geräuschzunahmen.....	68

Einleitung

Die Betriebs-Kennlinien und -Kenngrößen von Antrieben mit umrichter gespeisten Motoren werden durch das Gesamtsystem beeinflusst, bestehend aus Versorgungsnetz, Umrichter, Verkabelung, Motor, mechanischem Wellenstrang und Steuereinrichtungen. Für jede dieser Komponenten gibt es mehrere technische Ausführungsformen. Deshalb stellen alle in diesem Fachbericht genannten Zahlenwerte Richtwerte dar.

In Anbetracht der vielfältigen technischen Wechselwirkungen innerhalb des Systems und der Vielzahl von Betriebsbedingungen liegt es außerhalb des Anwendungsbereiches und Zwecks dieses Leitfadens, Zahlen- oder Grenzwerte für alle Größen festzulegen, die beim Entwurf des Antriebes bedeutungsvoll sind.

In der Praxis bestehen die Antriebe in zunehmendem Maße aus Komponenten, die von verschiedenen Herstellern produziert wurden. Es ist das Ziel dieses Fachberichtes, so weit wie möglich die Kriterien für die Auswahl der Komponenten und für ihren Einfluss auf das Betriebsverhalten des Antriebes zu erläutern und zu quantifizieren.

Dieser Fachbericht behandelt Wechselstrommotoren, die speziell für Speisung durch Umrichter bemessen sind. Umrichter gespeiste Motoren innerhalb des Anwendungsbereiches von IEC 60034-12, die ursprünglich für Speisung aus dem Netz ausgelegt sind, werden durch IEC 60034-17 abgedeckt.

Die Abschnitte 5 bis 9 dieses Fachberichtes behandeln im Wesentlichen die Anforderungen an Niederspannungsmotoren mit Speisung aus Spannungs-Zwischenkreis-Umrichtern. Die Abschnitte 10 bis 16 enthalten Informationen zu weiteren Konfigurationen.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60034 beschreibt die Auslegungsmerkmale und Betriebseigenschaften von Wechselstrommotoren, die speziell für die Versorgung aus Umrichtern bemessen sind. Er legt auch die Verknüpfungsparameter und gegenseitigen Beeinflussungen zwischen Motor und Umrichter einschließlich eines Installations-Leitfadens als Teil eines Antriebssystems fest.

Für Motoren im Rahmen dieses Fachberichtes gelten ebenfalls die allgemeinen Anforderungen der relevanten Teile aus der Normenreihe IEC 60034.

ANMERKUNG 1 Für Motoren, die in möglicherweise explosionsfähiger Atmosphäre betrieben werden, sind zusätzliche Anforderungen zu erfüllen, die in der Reihe der IEC-Publikation 60079 beschrieben sind.

ANMERKUNG 2 Diese Technische Spezifikation ist nicht in erster Linie auf Sicherheitsaspekte ausgerichtet. Einige ihrer Empfehlungen können jedoch Einfluss auf die Sicherheit haben und sollten deshalb wo notwendig beachtet werden.

ANMERKUNG 3 Falls ein Umrichterhersteller spezielle Montageempfehlungen herausgibt, sollten diese Vorrang vor den Empfehlungen dieser Technischen Spezifikation haben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60034-1, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-2:1972, *Rotating electrical machines – Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles)*

IEC 60034-6, *Rotating electrical machines – Part 6: Methods of cooling (IC Code)*

IEC 60034-9, *Rotating electrical machines – Part 9: Noise limits*

IEC 60034-14, *Rotating electrical machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity*

IEC 60034-17, *Rotating electrical machines – Part 17: Cage induction motors when fed from converters – Application guide*

IEC 61000-5-1, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 1: General considerations – Basic EMC publication*

IEC 61000-5-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 2: Earthing and cabling*

IEC 61800-2, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 2: General requirements – Rating specifications for low voltage adjustable frequency a.c. power drive systems*

IEC 61800-3, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC product standard including specific test methods*

IEC 61800-5-1, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: Safety requirements – Electrical, thermal and energy*

IEC 61800-5-2, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: Safety requirements – Functional¹⁾*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

Tabelle 1 beinhaltet eine alphabetische Querverweisliste mit Begriffen.

Begriff	Begriff-Nr.	Begriff	Begriff-Nr.	Begriff	Begriff-Nr.
Anstiegszeit	3.7	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	3.5	Potentialausgleich	3.2
Antriebssystem	3.8	Feldschwächung	3.6	Schutzerdung	3.9
Ausblendbereich	3.10	Kopplungswiderstand	3.11	Umrichter	3.4
Common-Mode-Spannung (Strom)	3.3	Lagerspannungsverhältnis	3.1		

Tabelle 1 – Alphabetische Querverweisliste mit Begriffen

ANMERKUNG Innerhalb dieser technischen Spezifikation werden Verweise auf die folgenden Definitionen in Kursivdruck dargestellt.

3.1

Lagerspannungsverhältnis **BVR**

Verhältnis der kapazitiv eingekoppelten Lagerspannung zur Common-Mode-Spannung (Gleichtaktspannung)

3.2

Potentialausgleich

die elektrische Verbindung metallischer Teile einer Anlage untereinander und mit Erde

ANMERKUNG Bei der Anwendung dieses Teils von IEC 60034 vereinigt die Definition Elemente von IEC 195-01-10 (Potentialausgleich) und IEC 195-01-16 (Funktionspotentialausgleich).

¹⁾ Soll veröffentlicht werden.

3.3

Common-Mode-Spannung (Strom)

arithmetischer Mittelwert der Strangspannungen (Ströme) zur Erde

3.4

Umrichter

Funktionseinheit für die elektrische Energiewandlung, die eine oder mehrere elektrische Kenngrößen verändert und die aus einer oder mehreren elektronischen Schalteinrichtungen und zugehörigen Bauelementen besteht wie Transformatoren, Filter, Kommutierungshilfen, Steuer- und Regelungseinrichtungen, Schutzeinrichtungen und Hilfsausrüstungen, falls vorhanden (IEC 61800-2, 2.2.1, geändert)

ANMERKUNG Diese Definition ist aus IEC 61800-2 entnommen und schließt zum Zweck dieses Teils von IEC 60034 die Begriffe vollständiges Antriebsmodul (CDM, Complete Drive Module) und Antriebsgrundmodul (BDM, Basic Drive Module) entsprechend ihrem Gebrauch in den Normen der Reihe IEC 61800 ein.

3.5

Elektromagnetische Verträglichkeit

EMV

Fähigkeit einer Einrichtung oder eines Systems, in ihrer/seiner elektromagnetischen Umgebung zufrieden stellend zu funktionieren, ohne in diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, unzulässige elektromagnetische Störgrößen einzubringen

[IEV 161-01-07]

3.6

Feldschwächung

Betriebszustand des Motors mit einem Fluss, der geringer ist als der Bemessungsfluss

3.7

Anstiegszeit

Zeitintervall zwischen 10 % und 90 % des Spannungs-Scheitelwertes (siehe Bild 11)

3.8

Antriebssystem

PDS

ein System, bestehend aus dem Leistungsteil (zusammengesetzt aus Umrichter, Wechselstrommotor und anderen Einrichtungen wie z. B., aber nicht beschränkt auf, die Einspeiseeinrichtung) und den Regeleinrichtungen (zusammengesetzt aus der Regelung der Schaltaugenblicke – z. B. Ein/Aus –, der Spannung, der Frequenz- oder der Stromregelung, dem Zündsystem, dem Schutz, der Zustandsüberwachung, der Signalübertragung, den Prüfungen, der Diagnose, den Schnittstellen zum Prozess usw.)

3.9

Schutzerdung

PE

Erdung eines oder mehrerer Punkte in einem Netz, in einer Anlage oder in einem Betriebsmittel zum Zweck der elektrischen Sicherheit

[IEV 195-01-11, geändert]

3.10

Ausblend-Bereich

ein schmaler Bereich von Betriebsfrequenzen, in dem ein stationärer Betrieb des Antriebssystems unterdrückt wird

3.11

Kopplungswiderstand

Quotient der Spannung, die im inneren Leiter eines Koaxialkabels je Längeneinheit induziert wird, durch Stromstärke in dem äußeren Leiter des Koaxialkabels

[IEV 161-04-15]

4 Kenngrößen des Systems

4.1 Allgemeines

Obwohl die Schritte zur Kennzeichnung von Motor- und Umrichter-Eigenheiten für alle Anwendungen ähnlich sind, ist die endgültige Auswahl maßgeblich von der Anwendungsart beeinflusst. In diesem Abschnitt werden diese Schritte beschrieben und die Auswirkungen von je nach Anwendung verschiedenen Belastungsarten diskutiert.

4.2 Erläuterungen zum System

Eine vollständige Erläuterung der Anwendung, die die angetriebene Maschine, den Motor, den Umrichter und das Versorgungssystem einbezieht, ist der beste Weg, um das gewünschte Verhalten des Motors im System zu erreichen. Grundsätzlich sollte diese Erläuterung einschließen:

- die Leistungs- oder Drehmoment-Anforderungen bei unterschiedlichen Drehzahlen;
- den gewünschten Drehzahlbereich von Belastungsmaschine und Motor;
- die Anforderungen an die Beschleunigung und die Verzögerung des geregelten Prozesses;
- Anforderungen an den Anlauf einschließlich Häufigkeit des Anfahrens und eine Beschreibung der Belastung (Massenträgheitsmoment bezogen auf die Motordrehzahl, Belastungs-Drehmoment während des Anfahrens);
- ob die Anwendung aus einem kontinuierlichen Prozess oder einem Betriebszyklus von Anfahrvorgängen, Stillständen und Drehzahländerungen besteht (siehe IEC 60034-1, 3.1);
- eine grundsätzliche Beschreibung der Art der Anwendung einschließlich der Umwelt, in der die Komponenten des Antriebssystems betrieben werden;
- eine Beschreibung zusätzlicher Abläufe, die nicht nur Motor und Umrichter betreffen können (z. B. Überwachung der Motortemperatur, nötigenfalls Möglichkeit zur Überbrückung des Umrichters (Bypass-Betrieb), spezielle Ablaufsteuerungskreise oder Drehzahl-Eingangssignale zur Regelung des Antriebssystems);
- eine Beschreibung der verfügbaren elektrischen Leistungsversorgung und Verdrahtung. Die endgültige Ausführung kann durch die Anforderungen des ausgewählten Systems beeinflusst werden.

4.3 Drehmoment-Drehzahl-Betrachtungen

4.3.1 Allgemeines

Die typische Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines umrichter gespeisten Motors, die kennzeichnenden Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen sind in den Bildern 1, 2 und 3 dargestellt. Abhängig von den Anforderungen an das Betriebsverhalten des Antriebssystems sind verschiedene Motorauslegungen möglich, um eine Anpassung an die individuellen Grenzwerte vorzunehmen.

ANMERKUNG Die Bilder 1 bis 3 zeigen nicht mögliche Ausblend-Bereiche (siehe 4.3.7).

4.3.2 Drehmoment-Drehzahl-Verhalten

Bild 1 zeigt das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten eines umrichter gespeisten Motors. Das höchste verfügbare Drehmoment ist durch die Bemessung des Motors und die Strombegrenzung des Umrichters gegeben. Im Feldschwächbereich oberhalb der Frequenz f_0 und der Drehzahl n_0 kann der Motor bei konstanter Leistung mit einem Drehmoment proportional zu $1/n$ betrieben werden. Wenn bei Induktionsmotoren das kleinste Kippmoment (das proportional zu $1/n^2$ ist) erreicht ist, muss die Leistung weiter proportional zu $1/n$ reduziert werden, was zu einem Drehmoment proportional zu $1/n^2$ führt (erweiterter Bereich). Der erweiterte Bereich gilt nicht für Synchronmotoren. Die höchste verwendbare Drehzahl $n_{\max}$ ist sowohl begrenzt durch das aufgrund von Feldschwächung bei Drehzahlen über n_0 verminderte Drehmoment wie auch durch die mechanische Beanspruchung und Stabilität des Läufers, durch das Drehzahlvermögen des Lagersystems und durch andere mechanische Kenngrößen.

Bei niedrigen Frequenzen kann das verfügbare Drehmoment bei selbstgekühlten Motoren reduziert werden, um eine mögliche Überhitzung zu vermeiden.

In einigen Anwendungen kann möglicherweise eine kurzzeitige Drehmomentüberhöhung beim Anlauf verwendet werden.

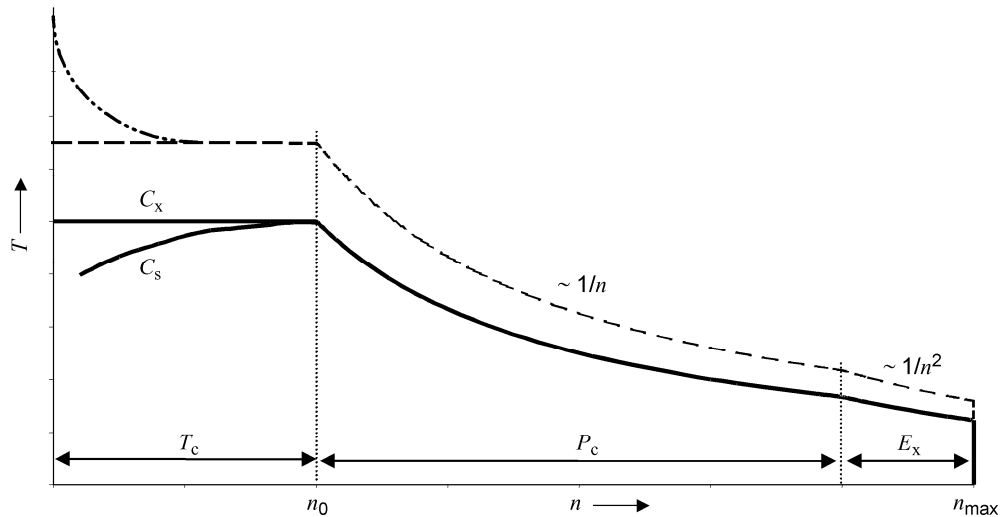


Bild 1 – Drehmoment-Drehzahl-Verhalten

Legende

—	Dauerbetrieb	T_c	Bereich mit konstantem Drehmoment	C_x	Fremdkühlung
- - - -	Kurzzeitbetrieb	P_c	Bereich mit konstanter Leistung	C_s	Selbstkühlung
- · - · -	Anlaufüberhöhung	E_x	Erweiterter Bereich (bei Induktionsmotoren)		

Bild 2 zeigt das zugehörige Verhalten des Umrichter-Ausgangsstromes (I).

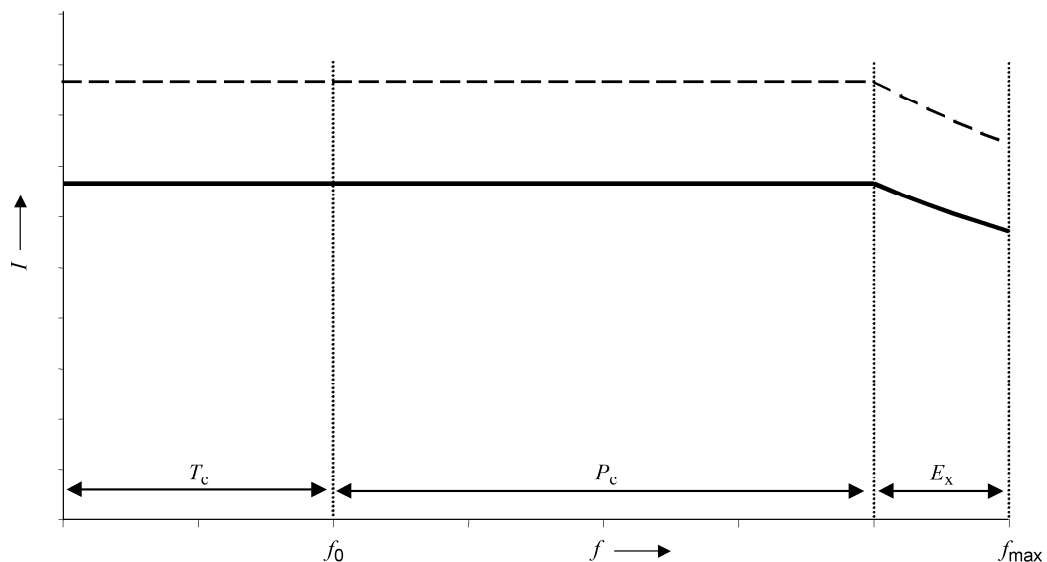


Bild 2 – Umrichter-Ausgangsstrom

4.3.3 Begrenzungsfaktoren des Drehmoment-Drehzahl-Verhaltens

Die kennzeichnenden Faktoren, die das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten beeinflussen, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 – Maßgebliche Einflussfaktoren auf das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten

Zustand	Motor	Umrichter und Motor
Losbrechen	Maximaler Fluss	Maximaler Strom
Konstanter Fluss	Kühlung (Wicklungsverluste entsprechend den Stromänderungen)	Maximaler Strom
Feldschwächung (reduzierter Fluss)	Maximale Drehzahl (mechanische Festigkeit und Stabilität) Maximales Drehmoment (Kippmoment)	Maximale Spannung
Dynamisches Verhalten	Größen des Ersatzschaltbildes (durch ein Modell bestimmt)	Regelungsverhalten

4.3.4 Schleuderdrehzahlen

Gemäß [IEC 60034-1](#) ist die Schleuderdrehzahl bei Wechselstrommaschinen auf die 1,2fache höchste Bemessungsdrehzahl festgelegt. Die Schleuderprüfung wird im Regelfall nicht als notwendig erachtet. Wenn sie vereinbart wurde, hat die Prüfung zum Ziel, die Vollständigkeit des Läuferentwurfs im Hinblick auf Schleuderkräfte zu untersuchen. Obwohl es bei Motoren mit einer Drehzahl praktisch ausgeschlossen ist, dass die Betriebsdrehzahl über der synchronen Drehzahl liegt, können Generatoren über die synchrone Drehzahl hinaus, z. B. im Fall eines plötzlichen Lastabwurfs, beschleunigt werden.

Bei umrichter gespeisten Motoren ist eine Beschleunigung über die in der Umrichterregelung vorgesehene maximale Betriebsdrehzahl hinaus nicht möglich. Insbesondere bei extrem großen Synchronmotoren ist es für den Gesamtentwurf oft ratsam, die Drehzahl bei der Schleuderprüfung auf die 1,05fache maximale Betriebsdrehzahl zu begrenzen. Technisch spricht nichts gegen eine derartige Vereinbarung.

ANMERKUNG Bei Betrieb mit höheren Drehzahlen kann eine Feinwuchtung des Motorläufers erforderlich sein. Bei Dauerbetrieb mit höheren Drehzahlen kann die Lager-Gebrauchsdauer zurückgehen. Des Weiteren sollte auf die Schmierfristen und die Fettgebrauchsdauer geachtet werden.

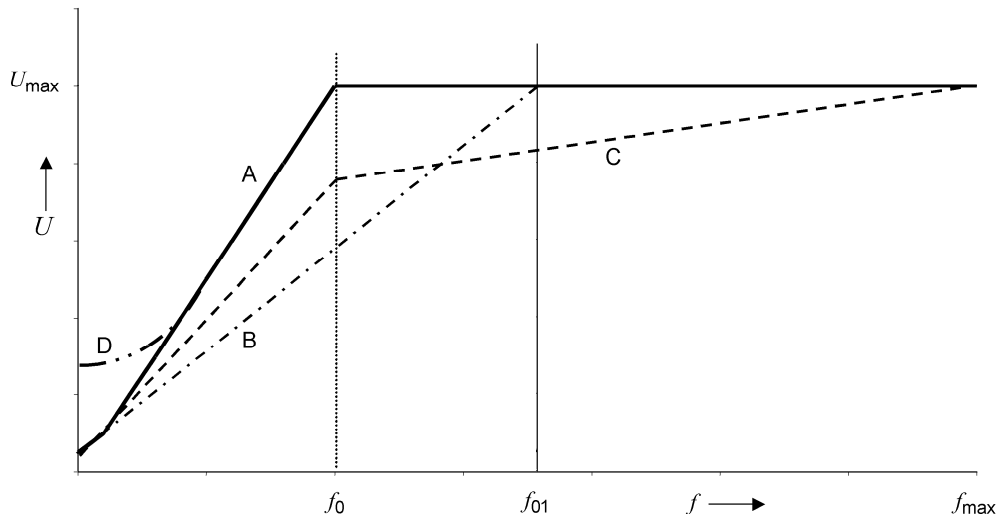
4.3.5 Kühlkreisanordnung

Wie aus [Bild 1](#) ersichtlich, hat die Wahl der Kühlungsart Einfluss auf das höchste zulässige Drehmoment-Drehzahl-Verhältnis des Antriebssystems. Die Kühlkreisanordnung elektrischer Maschinen mit einer Leistungsbemessung im Megawatt-Bereich besteht oft aus einem Primärkühlkreis (normalerweise mit Luft als Primärkühlmittel) und einem Sekundärkühlkreis (mit Luft oder Wasser als Sekundärkühlmittel). Verluste werden über einen Wärmetauscher vom Primärkühlkreis in den Sekundärkühlkreis abgeführt.

- Werden sowohl das Primär- wie auch das Sekundärkühlmittel fremdbewegt, sodass ihr Fluss unabhängig von der Drehzahl des Motorläufers ist (z. B. IC656 nach [IEC 60034-6](#)), so gilt die Kurve für Fremdkühlung in [Bild 1](#).
- Wird das Sekundärmittel fremdbewegt und das Primärkühlmittel durch ein auf der Welle montiertes Gerät bewegt (z. B. IC81W bzw. IC616), so gilt die Kurve für Selbstkühlung in [Bild 1](#).
- Werden sowohl das Primär- wie auch das Sekundärkühlmittel durch ein auf der Welle montiertes Gerät bewegt, sollte das Ausgangsdrehmoment nicht die Kurve $T/T_N = n^2/n_0^2$ überschreiten; als niedrigste Betriebsdrehzahl wird $\geq 70\%$ der Bemessungsdrehzahl empfohlen.

4.3.6 Spannungs-/Frequenz-Kennlinien

Das Verhältnis zwischen Umrichterausgangsspannung (U) und Frequenz kann, wie in [Bild 3](#) ersichtlich, mit verschiedenen Kenlinien dargestellt werden.



Legende

- A Die Spannung steigt mit der Frequenz an, und die höchste Umrichter Ausgangsspannung $U_{\max}$ wird bei der Feldschwächfrequenz f_0 erreicht.
- B Die Spannung steigt mit der Frequenz an, und die höchste Umrichter Ausgangsspannung $U_{\max}$ wird bei einer Frequenz oberhalb f_0 und einer neuen Feldschwächfrequenz f_{01} erreicht. Dies erlaubt einen vergrößerten Drehzahlbereich bei konstantem Fluss (konstantem Drehmoment), aber das verfügbare Drehmoment ist in diesem Drehzahlbereich kleiner als das in Fall A.
- C Die Spannung steigt mit der Frequenz bis zu f_0 , danach steigt sie mit einem kleineren Gradienten, bis die höchste Umrichter Ausgangsspannung $U_{\max}$ für $f_{\max}$ erreicht wird. Diese Betriebsweise vermeidet eine exzessive Drehmomentverkleinerung im Konstantflussbereich.
- D Eine erhöhte Spannung wird bei sehr niedrigen Frequenzen angelegt, um das Anlaufverhalten zu verbessern und einen ungewollten Stromanstieg zu vermeiden.

In allen vorstehenden Fällen kann die Spannungs-Frequenzabhängigkeit linear oder nichtlinear sein, angepasst an die Drehmoment-Drehzahlanforderungen der Belastung.

Bild 3 – Kennlinien der Umrichter Ausgangsspannung/Frequenz

4.3.7 Kritische Drehzahlbereiche durch Resonanzen

Der Drehzahlbereich eines umrichtergespeisten Motors kann Drehzahlen umfassen, bei denen Resonanzen in Teilen des Motorgehäuses, im Wellenstrang oder in der angetriebenen Maschine erregt werden. Abhängig vom Umrichter kann die Möglichkeit bestehen, die Resonanzfrequenzen zu überspringen. Aber auch in dem Fall, dass die Resonanzfrequenzen ausgeblendet werden, beschleunigt der Antrieb durch diese Drehzahl, wenn der Motor für jede beliebige Drehzahl oberhalb der Resonanzdrehzahl einstellbar ist. Eine Verkleinerung der Beschleunigungszeit kann zu einer Minimierung der Zeit beitragen, die der Antrieb dicht beim Resonanzpunkt verbringt.

4.3.8 Lastspiele

4.3.8.1 Allgemeines

Anwendungen für Lastspiele sind solche, in denen Übergänge zwischen Drehzahl oder Belastungen üblich sind (siehe IEC 60034-1). Mehrere Gesichtspunkte dieser Anwendungsart betreffen Motor und Umrichter.

- Die Wärmeentwicklung des Motors ist unterschiedlich, sie hängt von der Drehzahl und der Kühlungsart ab.
- Drehmomentanforderungen oberhalb des Motor-Volllastdrehmomentes können erforderlich sein. Betrieb oberhalb der Motor-Volllast kann erforderlich sein zur Beschleunigung, aufgrund von Laststößen und auch zum Abbremsen der Arbeitsmaschine. Betrieb oberhalb des Motorbemessungsstromes führt zu einem Anstieg der Erwärmung. Hierdurch kann eine höhere Wärme Klasse des Isoliersystems erforderlich sein, eine Motorbemessung für Überlastung oder eine Bewertung des Lastspiels, um zu ermitteln, ob die Kühlung des Motors für den beabsichtigten Betrieb ausreicht (siehe IEC 60034-1, Betriebsart S10).

- Gleichstrom-, Gegenstrom- oder generatorisches Nutzbremsen kann zur Stillsetzung des Motors erforderlich sein. Unabhängig davon, ob der Motor ein Drehmoment zum Antrieb der Arbeitsmaschine entwickelt, ob er angetrieben durch die Belastung als Generator Leistung zurück zum Umrichter liefert oder ein Bremsmoment durch Zufuhr von Gleichstrom zur Ständerwicklung entwickelt, entsteht eine Motorerwärmung, welche näherungsweise dem Quadrat des entsprechenden Stromes proportional ist. Diese Erwärmung sollte bei der Analyse der Betriebszyklen berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollten die Ausgleichs-Drehmomente, welche beim Bremsen die Welle beaufschlagen, auf einen solchen Pegel begrenzt werden, der keinen Schaden verursachen kann.

ANMERKUNG IEC 61800-6 vermittelt Informationen über den Lastbetrieb und die Strombestimmung für das gesamte Antriebssystem.

4.3.8.2 Hohe Stoßbelastungen

Stoßartige Belastungen stellen einen Sonderfall der Belastung dar und sind in bestimmte Anwendungen mit Aussetzbetrieb eingeschlossen (siehe [IEC 60034-1 Betriebsart S6](#)). In diesen Anwendungen wird die Belastung des Motors sehr schnell zu- oder abgeschaltet. Das Belastungsdrehmoment kann positiv (gegen den Drehsinn des Motors) oder negativ (im Drehsinn des Motors) wirken.

Die Stoßbelastung führt zu einem schnellen Anstieg oder Abfall des Strombedarfs (vom Umrichter). Wenn das Drehmoment negativ ist, kann der Motor Strom in den Umrichter rückliefern. Diese Ausgleichsströme beanspruchen die Ständerwicklung. Die Höhe dieser Ausgleichsströme hängt von der Baugröße des Umrichters und des Motors ab.

4.4 Anforderungen an die Motoren

ANMERKUNG Dieser Unterpunkt bezieht sich hauptsächlich auf Induktionsmotoren. Einige der geforderten Merkmale können jedoch auch auf andere Motorarten zutreffen.

Tabelle 3 weist auf die hauptsächlichsten Einzelaspekte und Entwurfs-Betrachtungen hin.

Tabelle 3 – Betrachtungen zum Motorentwurf

Gefordertes Merkmal der Anwendung	Entwurfsbetrachtungen
Dauerbetrieb bei kleiner Drehzahl	Thermische Überdimensionierung oder Fremdkühlung. Für den Dauerbetrieb von Gleitlagern bei Drehzahlen unterhalb von 10 % der Grunddrehzahl sollte das Lagerverhalten durch den Hersteller bestätigt werden.
Großer Drehzahlstellbereich	Von der Drehzahl unabhängige Kühlung (Fremdlüfter oder ein anderes Kühlmittel, z. B. Wasser).
Einrichtung zur Drehzahlrückführung	Vorkehrungen für die mechanische Schnittstelle. Eine elektrische Isolierung des Drehzahlnehmers kann erforderlich sein.
Hohe Drehzahl (Feldschwächbereich)	Mechanische Gesichtspunkte. Hohes Kippmoment (d. h. kleine Streureaktanz). U/f -Kennlinie ist konstant bis $f > f_0$ (siehe Bild 3).
Verbesserter Motorwirkungsgrad durch Umrichterspeisung	Bemessung des Läuferkäfigs (Läuferstäbe mit niedriger Stromverdrängung werden bevorzugt, siehe 5.2). Kann sich nachteilig auf das Einschaltverhalten auswirken.
Bemessung für direkte Einschaltung („line bypassing“)	Die Bemessung des Läuferkäfigs muss entsprechend gestaltet sein. Folglich mag der Entwurf nicht optimal sein im Hinblick auf die Verkleinerung der Verluste und die Verbesserung des Wirkungsgrades – ein ausgewogener Kompromiss ist erforderlich.
Hohes Losbrechmoment	Falls möglich, Erhöhung des Flusses um 10 % bis 40 % (abhängig von der Baugröße des Motors) bei sehr kleinen Frequenzen.

Tabelle 3 (fortgesetzt)

Gefordertes Merkmal der Anwendung	Entwurfsbetrachtungen
Spannungsabfall im Umrichter durch die Modulation oder durch Filter oder durch die Kabelführung	Anpassung der Bemessungsspannung des Motors, um den Spannungsabfall zu kompensieren.
Mehr-Motoren-Betrieb mit ungefähr der gemeinsamen Synchronrehzahl	Ähnliche Schlupf-/Drehmoment-Kennlinien der Motoren.

Für manche Anwendungen können die elektrischen Kenngrößen des Motor-Ersatzschaltbilds (für Beispiele siehe Tabelle 4) vom Motorhersteller zur Anpassung an den Umrichter gefordert werden.

Tabelle 4 – Motoreigenschaften

Eigenschaft	Beschreibung/Erklärung	Skalare Regelung	Vektorregelung oder direkte Regelung von Fluss und Drehmoment
Höchstwerte			
Höchste Drehzahl		ja	ja
Höchste Temperaturen der Ständer und Läuferwicklungen		ja	ja
Akustische Eigenschaften			
Frequenzen, die vom Umrichter ausgeblendet werden sollten, um akustische und Motorresonanzen zu vermeiden			ja, falls eine diskrete Trägerfrequenz existiert
Mechanische Eigenschaften			
Trägheit	Für hohe Werte der Beschleunigung	wahlweise	wahlweise
Anforderungen an das Reibungsdrehmoment und das Drehmoment des Lüfters zur Kühlung als Polynom in Abhängigkeit von der Drehzahl ($T = k_1 \times n + k_2 \times n^2$)	Zur Fertigungsautomatisierung oder für Produktionsaufgaben, in denen eine exakte Bestimmung der mechanischen Leistung erforderlich ist	wahlweise	wahlweise
Elektrische Kenngrößen des T-Ersatzschaltbildes für Induktionsmotoren			
Ständerwiderstand (R_s)	Bei Betriebstemperatur	wahlweise zur Kompensation des ohmschen Spannungsabfalls	ja
Läuferwiderstand (siehe Anmerkung) (R_r')	Bei Betriebstemperatur	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja
Ständerstreureaktanz (X_{os})	Bei Grundfrequenz	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja
Läuferstreureaktanz (siehe Anmerkung) (X_{or}')	Beim Bemessungspunkt, verschieden von dem Wert bei festgebremstem Läufer	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja
Hauptreaktanz (X_m)	Bei Grundfrequenz und Bemessungsbetrieb	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja

Tabelle 4 (fortgesetzt)

Eigenschaft	Beschreibung/Erklärung	Skalare Regelung	Vektorregelung oder direkte Regelung von Fluss und Drehmoment
Wirkleitwert parallel zur Hauptreaktanz (G_m)	Bei Grundfrequenz und Bemessungsbetrieb	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja
Hauptinduktivität, spezifischer Polynom-Ansatz	Im Feldschwächbereich	ja, für moderne skalare Regelung	ja
Stromverdrängung im Läufer (z. B. Kettenleiter-Nachbildung)	Zur korrekten Bestimmung der Oberschwingungsverluste und der Erwärmung in Anwendungen, in denen eine rasche Stromantwort und eine präzise dynamische Regelung erforderlich sind	wahlweise	wahlweise
Stromverdrängung im Ständer		wahlweise	wahlweise
ANMERKUNG Die elektrischen Läuferkenngrößen R_r' und X_{Gr}' sind auf den Ständer bezogen.			

Für eine verbesserte thermische Nachbildung oder in Anwendungen, in denen ein hohes Drehmoment mit genauer Regelung bei kleinen Drehzahlen erforderlich ist, kann es für den Motorberechner sinnvoll sein, Werte für die inneren Wärmekapazitäten und Wärmewiderstände der Motorkomponenten bekannt zu geben. Diese Parameter können sowohl von der Drehfrequenz als auch von der Schaltfrequenz abhängen.

5 Verluste und ihre Auswirkungen (bei Induktionsmotoren mit Speisung durch U-Umrichter)

5.1 Allgemeines

U-Umrichter prägen ihre Spannung dem angeschlossenen Motor auf. Die Ausgangsspannung baut eine sinusförmige Welle mittels einer quasi-rechteckförmigen Spannung mit steilen Anstiegen und näherungsweise konstanter Amplitude auf (Zwei-Ebenen-Umrichter pressen den Scheitel-zu-Scheitelwert der Zwischenkreisgleichspannung ein).

Zusätzlich zu den bekannten Verlusten aus grundfrequenten Spannungen und Strömen bewirkt die nicht-sinusförmige Versorgung aus einem Umrichter zusätzliche Verluste im Motor. Die zusätzlichen Verluste hängen von Drehzahl, Spannung, Strom, der Spannungs-Kurvenform am Umrichterausgang sowie von der Bemessung und Baugröße des Motors ab. Sofern keine Drosseln oder Filter vorhanden sind, können diese Verluste bei Zwei-Ebenen-Umrichtern bis zu 10 % bis 20 % der Grundschwingungsverluste betragen und folglich bis zu ungefähr 1 % bis 2 % der Bemessungsleistung des Motors ausmachen, wobei sie mit zunehmender Motorgröße abnehmen. Bei Drei-Ebenen-Umrichtern sind die zusätzlichen aufgrund von Umrichterspeisung entstandenen Verluste geringer; sie betragen üblicherweise 0,2 % bis 1 % der Bemessungsleistung.

Die Höhe und die kennzeichnenden Eigenschaften der zusätzlichen aufgrund von Umrichterspeisung entstandenen Verluste hängen von der Bemessung des Motors, von der Art und den Parametern des verwendeten Umrichters und dem Einsatz von Filterkreisen ab.

5.2 Entstehungsort der zusätzlichen aufgrund von Umrichterspeisung entstandenen Verluste und Möglichkeiten ihrer Reduzierung

Der Motor verhält sich bezüglich der Pulse am Umrichterausgang wie eine frequenzabhängige Impedanz. Die Verluste dieser Impedanz entstehen überwiegend durch Stromverdrängung in den Leitern (hauptsächlich Läuferstäbe, aber in manchen Fällen auch Leiter der Ständerwicklung) und durch Wirbelströme in den Bahnen des Streuflusses (insbesondere in den Blechpaketen).

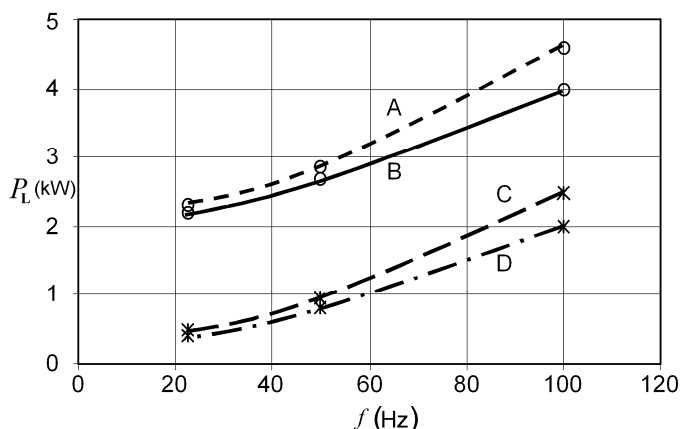
Die Erfahrung hat gezeigt, dass die zusätzlichen Verluste bei Versorgung aus einem Spannungs-Zwischenkreis-Umrichter lastunabhängig sind. Der Einfluss der Sättigung (als Folge von Fluss bzw. Strom) ist gering, und zusätzliche Verluste lassen sich durch folgende Bemessungsmaßnahmen minimieren:

- Läuferbemessung mit kleinerer Stromverdrängung;
- Bemessung der Ständerwicklung mit kleinerer Stromverdrängung;
- offene Läuferfalten;
- Vermeidung von Kurzschlüssen zwischen den Läuferblechen;
- dünnere Ständer- und Läuferbleche, um Wirbelstromverluste zu verkleinern;
- verkleinerte Wirbelstromverluste in Reihen-Drosseln oder Filtern.

5.3 Umrichtermerkmale zur Verkleinerung der Motorverluste

5.3.1 Verringerung der Grundswingungsverluste

Bild 4 zeigt Beispiele für die Verluste bei Leerlauf und bei Volllast für einen Motor mit 37 kW, 50 Hz bei Versorgung aus einem sinusförmigen Netz und aus einem 5,5 kHz U-Umrichter. Es zeigt sich, dass die zusätzlichen Verluste bei PWM-Versorgung im Vergleich zu den Grundswingungsverlusten gering sind.



Legende

A: Volllast, PWM-Versorgung B: Volllast, Sinus-Versorgung C: Leerlauf, PWM-Versorgung D: Leerlauf, Sinus-Versorgung

Bild 4 – Beispiel der gemessenen Verluste P_L als Funktion der Frequenz f und der Versorgungsart

Die größten Vorteile der Umrichterversorgung werden durch die Optimierung des Motorflusses in Abhängigkeit von der Belastung (z. B. Verkleinerung des Flusses bei Teillast) erreicht, da hierdurch die Grundswingungsverluste verkleinert werden, die beträchtlich höher sind als die zusätzlichen Verluste. Diese „Flussoptimierung“ wird häufig bei Pumpen und Ventilatoren verwendet, bei denen das erforderliche Drehmoment eine Funktion der Drehzahl ist (Drehmoment proportional dem Quadrat der Drehzahl). Bei niedrigeren Drehzahlen ist das Drehmoment wesentlich kleiner und kann daher mit niedrigeren Flüssen und geringeren Verlusten im Motor erzeugt werden.

Das gleiche Prinzip wird bei der „konstanten Leistungsfaktorregelung“ in Anwendungen verwendet, in denen sich das Belastungsdrehmoment (nicht unbedingt die Drehzahl) durch die bedarfsweise Anpassung des Motorflusses ändert, sodass der Leistungsfaktor des Motorstroms immer optimal bleibt.

Die Grundswingungsverluste können auch durch eine Änderung der Zwischenkreis-Gleichspannung verkleinert werden.

5.3.2 Verminderung der zusätzlichen aufgrund von Umrichterspeisung entstandenen Verluste

Die zusätzlichen aufgrund von Umrichterspeisung entstandenen Verluste können durch eine Verkleinerung des Oberschwingungsgehaltes der Umrichterausgangsspannung reduziert werden durch z. B.:

- Optimierung des Pulsmusters.
- Erhöhung der Schaltfrequenz; die zusätzlichen aufgrund von Umrichterspeisung entstandenen Verluste zeigen typischerweise einen deutlichen Abfall mit wachsender Schaltfrequenz bis zu einigen kHz (siehe Bild 5). Die Kommutierungsverluste im Umrichter steigen jedoch mit der Schaltfrequenz mit dem Ergebnis, dass die Summe der Verluste ein Minimum bei einigen kHz besitzt (siehe Bild A.1). Für Umrichter mit Hysterese- oder „random PWM“-Regelung gilt eine mittlere Schaltfrequenz, die auch von Spannung und Strom abhängen kann.
- Mehr-Ebenen-Umrichteranordnung.

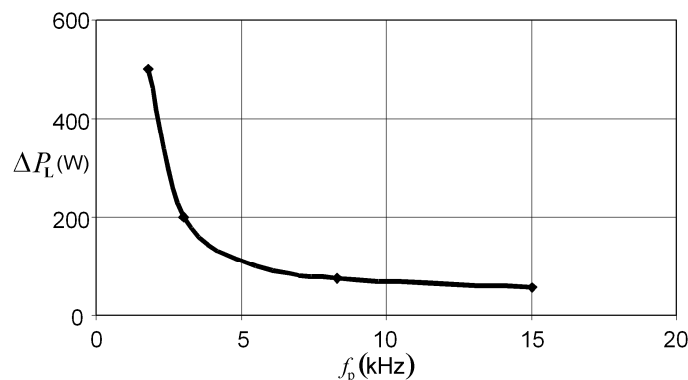


Bild 5 – Zusätzliche Verluste ΔP_L eines Motors (gleicher Motor wie in Bild 4) aufgrund des Umrichterbetriebs als Funktion der Schaltfrequenz f_p bei 50 Hz Drehfrequenz

5.4 Einsatz von Filtern zur Reduzierung zusätzlicher aufgrund von Umrichterspeisung entstandener Motorverluste

Es können Filter am Ausgang eines Umrichters zum Einsatz gebracht werden, um die Amplitude und du/dt der hochfrequenten Schaltspannung zu reduzieren, ohne die an den Motorklemmen entstehende niederfrequente Spannung zu sehr zu beeinflussen. Die Gesamtauswirkungen sind abhängig von der Anwendung und der Bemessung von Motor und Filter. Der Spannungsabfall im Filter vermindert die Spannung an den Motorklemmen. Dies sollte berücksichtigt werden, um eine Erhöhung der Grundschwingungsstromverluste im Motor zu vermeiden. Es treten natürlich auch Verluste im Filter auf; diese sind aber in der Regel niedriger als die Reduzierung zusätzlicher aufgrund von Umrichterspeisung entstandener Motorverluste, sodass der Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems sich verbessert.

Neben der Verminderung zusätzlicher aufgrund von Umrichterspeisung entstandener Motorverluste können derartige Filter ebenfalls folgende Vorteile bewirken: verminderte Spannungsbeanspruchung in den Motorwicklungen, weniger Drehmomentschwankungen und verbessertes EMV-Verhalten (siehe 9.2). Das dynamische Verhalten des Antriebssystems wird jedoch verlangsamt. Aufgrund des Spannungsabfalls im Filter kann es noch weitere Beschränkungen geben.

5.5 Temperatur und Lebenserwartung

Die Summe der Grundschwingungsverluste und der zusätzlichen Verluste in Abhängigkeit vom Lastzustand und der Spannungskurvenform bewirkt die Erwärmung der Motorwicklungen. Die Erwärmung wird auch durch die Änderung der Kühlung im jeweiligen Betriebspunkt innerhalb des festgelegten Drehzahlbereiches beeinflusst.