

	DIN VDE 0530-25 (VDE 0530-25)	DIN
	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.	VDE
ICS 29.160.01 Ersatz für DIN VDE 0530-25 (VDE 0530-25):2009-08 und DIN VDE 0530-17 (VDE 0530-17):2007-12 Siehe Anwendungsbeginn Drehende elektrische Maschinen – Teil 25: Wechselstrommaschinen zur Verwendung in Antriebssystemen – Anwendungsleitfaden (IEC/TS 60034-25:2014) Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide (IEC/TS 60034-25:2014) Machines électriques tournantes – Partie 25: Machines électriques à courant alternatif utilisées dans les entraînements électriques de puissance – Guide d'application (IEC/TS 60034-25:2014) Gesamtumfang 88 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE		

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist 2018-12-01.

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	8
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten	9
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise.....	10
Einleitung	12
1 Anwendungsbereich	13
2 Normative Verweisungen	13
3 Begriffe	14
4 Kenngrößen des Systems	16
4.1 Allgemeines	16
4.2 Erläuterungen zum System	16
4.3 Drehmoment-Drehzahl-Betrachtungen	16
4.4 Anforderungen an die elektrischen Maschinen	21
5 Verluste und ihre Auswirkungen (bei Induktionsmaschinen mit Speisung durch Spannungszwischenkreis-Umrichter).....	23
5.1 Allgemeines	23
5.2 Entstehungsort der zusätzlichen aufgrund von Umrichterspeisung entstandenen Verluste und Möglichkeiten ihrer Reduzierung.....	24
5.3 Umrichtermerkmale zur Verkleinerung der Verluste in elektrischen Maschinen.....	25
5.4 Einsatz von Filtern zur Reduzierung zusätzlicher aufgrund von Umrichterspeisung entstandener Maschinenverluste	26
5.5 Auswirkungen der Temperatur auf die Lebenserwartung	26
5.6 Bestimmung des Wirkungsgrades der elektrischen Maschine.....	27
6 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	27
6.1 Geräusche	27
6.2 Schwingungen (außer Drehschwingungen)	30
6.3 Drehschwingungen.....	31
7 Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	31
7.1 Allgemeines	31
7.2 Gründe.....	31
7.3 Dielektrische Wicklungsbeanspruchung.....	33
7.4 Begrenzungen und Verantwortlichkeiten.....	34
7.5 Möglichkeiten zur Verkleinerung der Spannungsbeanspruchung.....	36
7.6 Begrenzung der Isolierungsbeanspruchung.....	36
8 Lagerströme	37
8.1 Ursachen von Lagerströmen in umrichtergespeisten elektrischen Maschinen.....	37
8.2 Erzeugung von hochfrequenten Lagerströmen	38

8.3	Common-Mode-Kreis	39
8.4	Streuelfeld-Kapazitäten.....	40
8.5	Auswirkungen von großen Lagerströmen	41
8.6	Schutzmaßnahmen gegen Schäden durch hochfrequenten Lagerstrom	42
8.7	Zusätzliche Betrachtungen zu Lagerströmen bei umrichtergespeisten Hochspannungs-Maschinen	44
8.8	Schutzmaßnahmen bei Lagern in Hochspannungsmaschinen mit Speisung aus Stromzwischenkreis-Umrichtern	45
9	Installation	45
9.1	Erdung, Potentialausgleich und Kabelführung.....	45
9.2	Drosseln und Filter	51
9.3	Anpassung des Leistungsfaktors	52
9.4	Kompaktmaschinen (elektrische Maschine und Antriebsmodule integriert)	53
10	Zusätzliche Betrachtungen zu permanentmagnetenerregten Synchronmaschinen mit Speisung aus Spannungszwischenkreis-Umrichtern	53
10.1	Kenngößen des Systems.....	53
10.2	Verluste und ihre Auswirkungen	54
10.3	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente.....	54
10.4	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	54
10.5	Lagerströme	54
10.6	Besondere Aspekte bei Permanentmagneten	54
11	Zusätzliche Betrachtungen zu Hochspannungs-Käfigläufermaschinen mit Speisung aus Spannungszwischenkreis-Umrichtern.....	54
11.1	Allgemeines.....	54
11.2	Kenngößen des Systems.....	55
11.3	Verluste und ihre Auswirkungen	56
11.4	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente.....	56
11.5	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	57
11.6	Lagerströme	59
12	Zusätzliche Betrachtungen zu Synchronmaschinen mit Speisung durch Spannungszwischenkreis-Umrichter.....	59
12.1	Kenngößen des Systems.....	59
12.2	Verluste und ihre Auswirkungen	59
12.3	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente.....	59
12.4	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	59
12.5	Lagerströme	59
13	Zusätzliche Betrachtungen zu Käfigläufermaschinen mit Speisung aus Block-Stromzwischenkreis-Umrichtern	60
13.1	Kenngößen des Systems (siehe Bild 30 und Bild 31)	60
13.2	Verluste und ihre Auswirkungen	61
13.3	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente.....	63

13.4	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	63
13.5	Lagerströme	63
13.6	Zusätzliche Betrachtungen für 6-strängige Käfigläufermaschinen.....	64
14	Zusätzliche Betrachtungen für Synchronmaschinen mit LCI-Versorgung	64
14.1	Kenngößen des Systems	64
14.2	Verluste und ihre Auswirkungen.....	65
14.3	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	65
14.4	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	65
14.5	Lagerströme	65
15	Zusätzliche Betrachtungen zu Induktionsmaschinen mit Versorgung durch Stromzwischenkreis-Umrichter mit Pulsbreitenmodulation (PWM CSI).....	66
15.1	Kenngößen des Systems (siehe Bild 34).....	66
15.2	Verluste und ihre Auswirkungen.....	67
15.3	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	67
15.4	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	67
15.5	Lagerströme	67
16	Induktionsmaschinen mit Schleifringläufer mit Versorgung durch Spannungszwischenkreis- Umrichter im Läuferkreis	67
16.1	Kenngößen des Systems	67
16.2	Verluste und ihre Auswirkungen.....	67
16.3	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	68
16.4	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	68
16.5	Lagerströme	68
17	Weitere Maschinen-/Umrichter-Systeme.....	68
17.1	Antriebe mit Versorgung aus Direktumrichtern	68
17.2	Induktionsmaschinen mit Schleifringläufer mit Versorgung durch Stromzwischenkreis- Umrichter im Läuferkreis	70
18	Zusätzliche Betrachtungen zu für eine Drehzahl bemessene Induktionsmaschinen im Rahmen von IEC 60034-12 mit Versorgung durch Spannungszwischenkreis-Umrichter	70
18.1	Drehmomentabschläge bei Umrichterbetrieb.....	70
18.2	Verluste und ihre Auswirkungen.....	72
18.3	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	72
18.4	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	72
18.5	Lagerströme	73
18.6	Höchste sichere Betriebsdrehzahl.....	74
19	Zusätzliche Betrachtungen zu Synchron-Reluktanzmaschinen mit Speisung aus Spannungszwischenkreis-Umrichtern	74
19.1	Kenngößen des Systems	74
19.2	Verluste und ihre Auswirkungen.....	74
19.3	Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente	74
19.4	Elektrische Beanspruchung der Maschinenisolierung	75

19.5	Lagerströme	75
19.6	Besondere Aspekte bei Synchron-Reluktanzmaschinen	75
Anhang A (normativ)	Umrichter-Kenngrößen	76
A.1	Arten von Umrichter-Steuerverfahren	76
A.1.1	Allgemeines	76
A.1.2	Betrachtungen zu den Umrichterarten	77
A.2	Erzeugung der Umrichter-Ausgangsspannung (für Spannungszwischenkreis-Umrichter)	78
A.2.1	Puls-Weiten-Modulation (PWM)	78
A.2.2	Hysteres-Regelung („sliding mode“)	78
A.2.3	Einfluss der Schaltfrequenz	78
A.2.4	Mehr-Ebenen-Umrichter	80
A.2.5	Parallelbetrieb von Umrichtern	80
Anhang B (informativ)	Frequenzspektra der Ausgangsspannung von Zwei-Ebenen-Spannungszwischenkreis-Umrichtern	81
Anhang C (informativ)	Spannungen an der Stromversorgungsschnittstelle zwischen Umrichter und elektrischer Maschine	85
Bilder		
Bild 1 –	Drehmoment-Drehzahl-Verhalten	17
Bild 2 –	Umrichter-Ausgangsstrom	18
Bild 3 –	Beispiele möglicher Kennlinien der Umrichter-Ausgangsspannung/Frequenz	20
Bild 4 –	Beispiel für die Abhängigkeit der durch Oberschwingungen P_h hervorgerufenen Maschinenverluste, bezogen auf die Verluste P_{f1} bei Betriebsfrequenz f_1 , von der Schaltfrequenz f_s bei Versorgung aus einem Zwei-Ebenen-Spannungszwischenkreis-Umrichter	24
Bild 5 –	Beispiel der gemessenen Verluste P_L als Funktion der Frequenz f und der Versorgungsart	25
Bild 6 –	Zusätzliche Verluste ΔP_L einer elektrischen Maschine (gleiche elektrische Maschine wie in Bild 5) aufgrund des Umrichterbetriebs als Funktion der Schaltfrequenz f_p bei 50 Hz Drehfrequenz	26
Bild 7 –	Lüftergeräusch in Abhängigkeit von der Lüfterdrehzahl	28
Bild 8 –	Schwingungsformen des Ständerblechpakets	29
Bild 9 –	Typische Spannungsstöße an den Klemmen einer aus einem PWM-Umrichter gespeisten elektrischen Maschine	32
Bild 10 –	Typische Spannungsstöße in einer Phase an den Umrichter- und an den Maschinenklemmen (2 ms/Einheit)	33
Bild 11 –	Einzelner Stoß aus Bild 10 mit kurzer Anstiegszeit (1 μ s/Einheit)	33
Bild 12 –	Definition der Anstiegszeit t_r der Spannung an den Maschinenklemmen	33
Bild 13 –	Spannung an der ersten Windung in Abhängigkeit von der Anstiegszeit	34
Bild 14 –	Teilentladungsimpuls als Folge eines durch den Umrichter verursachten Spannungsstoßes an den Maschinenklemmen (100 ns/Einheit)	37
Bild 15 –	Mögliche Lagerströme	38
Bild 16 –	Maschinen-Kapazitäten	40

Bild 17 – Kraterbildung durch EDM-Durchschläge (Kraterdurchmesser 30 µm bis 50 µm).....	41
Bild 18 – Querrillen durch hohen Lagerstrom.....	41
Bild 19 – Potentialausgleichslitze zwischen Klemmenkasten und Gehäuse einer elektrischen Maschine	46
Bild 20 – Beispiele für geschirmte Maschinenkabel und Verbindungen.....	48
Bild 21 – Parallele symmetrische Verkabelung von Umrichter und elektrischer Maschine hoher Leistung	49
Bild 22 – Umrichter-Verbindungen mit 360° HF Kabelstutzen, Demonstration des „Faraday-Käfigs“	49
Bild 23 – Maschinen-Endverschluss mit 360°-Verbindung.....	50
Bild 24 – Verbindung des Kabelschirms.....	50
Bild 25 – Eigenschaften von Schutzmaßnahmen.....	52
Bild 26 – Schema eines typischen Drei-Ebenen-Umrichters.....	55
Bild 27 – Ausgangsspannung und -strom eines typischen Drei-Ebenen-Umrichters.....	55
Bild 28 – Typische Spannung an der ersten Windung ΔU (in Prozent der Leiter-Erde-Spannung) als Funktion von du/dt	57
Bild 29 – Materialien zur Isolierung von Mittelspannungs- und Hochspannungs-Formspulen und zum Schutz vor Spannungsbeanspruchungen.....	58
Bild 30 – Schema eines Block-Stromzwischenkreis-Umrichters	60
Bild 31 – Strom- und Spannungskurven von Block-Stromzwischenkreis-Umrichtern	60
Bild 32 – Einfluss der Umrichterspeisung auf die Verluste einer Induktionsmaschine mit Käfigläufer (Baugröße 315 M, Grundausführung N) bei Betrieb mit den Bemessungswerten von Drehmoment und Drehzahl	62
Bild 33 – Schema und Spannungs- und Stromkurven einer Synchronmaschine mit Versorgung durch einen Stromzwischenkreis-Umrichter.....	64
Bild 34 – Schema eines gepulsten Stromzwischenkreis-Umrichters	66
Bild 35 – Spannungen und Ströme von gepulsten Stromzwischenkreis-Umrichtern	66
Bild 36 – Schema eines Direktumrichters.....	68
Bild 37 – Kurvenformen von Spannung und Strom eines Direktumrichters	69
Bild 38 – Grundsicherungsspannung U_1 in Abhängigkeit von der Betriebsfrequenz f_1	71
Bild 39 – Abschlagfaktor für das Drehmoment einer Induktionsmaschine mit Käfigläufer in Grundausführung N, IC 0141 (Eigenkühlung) in Abhängigkeit von der Betriebsfrequenz f_1 (Beispiel).....	72
Bild 40 – Grenzkennlinie der zulässigen Impulsspannung $\hat{U}_{LL}/U_N$ (Spitzenwert der Leiterspannung unter Berücksichtigung von Reflexion und Dämpfung) an den Maschinenklemmen in Abhängigkeit von der Anstiegszeit t_r	73
Bild A.1 – Auswirkungen der Schaltfrequenz auf die Maschinen- und die Umrichterverluste.....	79
Bild A.2 – Auswirkung der Schaltfrequenz auf das Geräusch.....	79
Bild A.3 – Auswirkungen der Schaltfrequenz auf Drehmomentschwankungen	79
Bild B.1 – Kurvenform der Leiterspannung u_{LL} bei Betrieb am Spannungszwischenkreis-Umrichter mit der Schaltfrequenz $f_s = 30 f_1$ (Beispiel)	81
Bild B.2 – Typische Frequenzspektra der Umrichter-Ausgangsspannung.....	82
Bild B.3 – Typische Frequenzspektra der Umrichter-Ausgangsspannung.....	82

Bild B.4 – Typische Spektren der Umrichter-Ausgangsspannung	83
Bild B.5 – Typische Zeitverläufe des Maschinenstroms.....	83
Bild B.6 – Typische Zeitverläufe des Maschinenstroms.....	84
Bild C.1 – Beispiel für typische Spannungskurven und –parameter eines Zwei-Ebenen-Umrichters in Abhängigkeit von der Zeit an den Maschinenklemmen (Leiter-Leiter-Spannung; entnommen aus IEC/TS 61800-8)	85

Tabellen

Tabelle 1 – Maßgebliche Einflussfaktoren auf das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten	18
Tabelle 2 – Betrachtungen zum Entwurf elektrischer Maschinen	21
Tabelle 3 – Eigenschaften elektrischer Maschinen zur Umrichteranpassung	22
Tabelle 4 – Betriebsspannung an den Maschinenklemmen in Einheiten von U_N , bei der ein zuverlässiger Betrieb elektrischer Maschinen ohne spezielle Vereinbarungen zwischen Hersteller und Systemverantwortlichen möglich ist	35
Tabelle 5 – Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen gegen Lagerströme.....	42

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 60034-25 (VDE 0530-25):2013-04.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 311 „Drehende elektrische Maschinen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in 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 dieses Dokuments bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu diesem Dokument angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees das Dokument

- als Internationale Norm übernommen,
- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Änderungen

Gegenüber **DIN VDE 0530-25 (VDE 0530-25):2009-08** und **DIN VDE 0530-17 (VDE 0530-17):2007-12** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) IEC 60034-17 wurde durch das Hinzufügen von **Abschnitt 18** in IEC 60034-25 überführt. In diesem Abschnitt sind alle spezifischen Anforderungen an allgemein übliche elektrische Maschinen für unbestimmte Anwendungen aufgeführt. Die allgemeinen Informationen und Erkenntnisse aus IEC 60034-17 sind in die übrigen Abschnitte von IEC 60034-25 mit eingeflossen;
- b) Ersatz des Begriffs „U-Umrichter“ durch „Spannungszwischenkreis-Umrichter“;
- c) Ersatz des Begriffs „I-Umrichter“ durch „Stromzwischenkreis-Umrichter“;
- d) Neugestaltung von **Abschnitt 7**;
- e) Ergänzung von **9.3**;
- f) Streichung des **Anhangs C**: Geräuschzunahme als Folge von Umrichterspeisung.

Frühere Ausgaben

DIN VDE 0530 Beiblatt 2: 1994-04

DIN VDE 0530 Beiblatt 2 (VDE 0530 Beiblatt 2): 1999-01

DIN IEC/TS 60034-17 (VDE 0530-17): 2004-01

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

DIN VDE 0530-17 (VDE 0530-17): 2007-12

DIN VDE 0530-25 (VDE 0530-25): 2009-08

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

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

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1 (1 von 2)

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
	IEC 60050 (alle Teile):	a	
EN 60034-1:2010	IEC 60034-1:2010	DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2011-02	VDE 0530-1
EN 60034-2-1	IEC 60034-2-1	DIN EN 60034-2-1 (VDE 0530-2-1)	VDE 0530-2-1
EN 60034-6	IEC 60034-6	DIN EN 60034-6 (VDE 0530-6)	VDE 0530-6
EN 60034-9:2005 + A1:2007	IEC 60034-9:2003 mod. + A1:2007	DIN EN 60034-9 (VDE 0530-9):2008-01 DIN EN 60034-9 Berichtigung 1 (VDE 0530-9 Berichtigung 1) :2008-04	VDE 0530-9
EN 60034-12	IEC 60034-12	DIN EN 60034-12 (VDE 0530-12)	VDE 0530-12
EN 60034-14:2004 + A1:2007	IEC 60034-14:2003 + A1:2007	DIN EN 60034-14 (VDE 0530-14):2008-03	VDE 0530-14
EN 60034-18-41	IEC 60034-18-41	DIN EN 60034-18-41 (VDE 0530-18-41)	VDE 0530-18-41
EN 60034-18-42	IEC 60034-18-42	DIN EN 60034-18-42 (VDE 0530-18-42)	VDE 0530-18-42
–	IEC 61000-5-1	–	–
–	IEC 61000-5-2	–	–
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
–	IEC/TS 61800-8:2010	–	–

Tabelle NA.1 (2 von 2)

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC/TS 62578:2009-11 ersetzt durch:	–	–
–	IEC/TS 62578:2015	DIN IEC/TS 62578 (VDE V 0558-578):2018-09	VDE V 0558-578
^a „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Deutsche Ausgabe“, Online-Zugang: http://www.dke.de/dke-iev .			

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2011-02, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (IEC 60034-1:2010, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60034-1:2010 + Cor.:2010*

DIN EN 60034-2-1 (VDE 0530-2-1), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge)*

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

DIN EN 60034-9 (VDE 0530-9):2008-01, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 9: Geräuschgrenzwerte (IEC 60034-9:2003, modifiziert + A1:2007); Deutsche Fassung EN 60034-9:2005 + A1:2007*

DIN EN 60034-9 Berichtigung 1 (VDE 0530-9 Berichtigung 1):2008-04, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 9: Geräuschgrenzwerte (IEC 60034-9:2003, modifiziert + A1:2007); Deutsche Fassung EN 60034-9:2005 + A1:2007 Berichtigungen zu DIN EN 60034-9 (VDE 0530-9):2008-01*

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):2008-03, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 14: Mechanische Schwingungen von bestimmten Maschinen mit einer Achshöhe von 56 mm und höher – Messung, Bewertung und Grenzwerte der Schwingstärke (IEC 60034-14:2003 + A1:2007); Deutsche Fassung EN 60034-14:2004 + A1:2007*

DIN EN 60034-18-41 (VDE 0530-18-41), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-41: Qualifizierung und Qualitätsprüfungen für teilentladungsfreie elektrische Isoliersysteme (Typ I) in drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden*

DIN EN 60034-18-42 (VDE 0530-18-42), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-42: Teilentladungsresistente Isoliersysteme (Typ II) von drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden – Qualifizierungsprüfungen*

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 62578 (VDE V 0558-578):2018-09, *Leistungselektronische Systeme und Einrichtungen – Betriebsbedingungen und Eigenschaften aktiver Netzstromrichter (AIC) inklusive Auslegungsempfehlungen für ihre Störaussendungswerte unter 150 kHz (IEC/TS 62578:2015)*

Einleitung

Die Betriebs-Kennlinien und -Kenngrößen von Antrieben mit umrichtergespeisten elektrischen Maschinen werden durch das Gesamtsystem beeinflusst, bestehend aus Versorgungsnetz, Umrichter, Verkabelung, elektrischer Maschine, mechanischem Wellenstrang und Steuereinrichtungen. Für jede dieser Komponenten gibt es mehrere technische Ausführungsformen. Deshalb stellen alle in dieser Technische Spezifikation 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.

Dieser Fachbericht behandelt Wechselstrommaschinen, die speziell für Speisung durch Umrichter bemessen sind, sowie umrichtergespeiste elektrische Maschinen innerhalb des Anwendungsbereiches von **IEC 60034-12**, die ursprünglich für Speisung aus dem Netz ausgelegt sind.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60034 beschreibt die Betriebseigenschaften von Wechselstrommaschinen, die speziell für die Versorgung aus Umrichtern bemessen sind. Für umrichtergespeiste elektrische Maschinen werden die Auslegungsmerkmale definiert. Er legt auch die Verknüpfungparameter und gegenseitigen Beeinflussungen zwischen elektrischer Maschine und Umrichter einschließlich eines Installations-Leitfadens als Teil eines Antriebssystems fest. Ausgenommen hiervon ist die Spannung an den Maschinenklemmen, die in IEC 61800-8 geregelt wird.

Für elektrische Maschinen im Rahmen dieses Fachberichts gelten ebenfalls die allgemeinen Anforderungen der relevanten Teile aus der Normenreihe IEC 60034.

Für elektrische Maschinen, die in möglicherweise explosionsfähiger Atmosphäre betrieben werden, sind zusätzliche Anforderungen zu erfüllen, die in den Reihen IEC 60079 oder IEC 61241 zum Staubexplosionsschutz beschrieben sind.

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.

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

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, 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 60034-1:2010, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-2-1, *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*

IEC 60034-2-2, *Rotating electrical machines – Part 2-2: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests – Supplement to IEC 60034-2-1*

IEC 60034-2-3, *Rotating electrical machines – Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors*

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

IEC 60034-9:2003, *Rotating electrical machines – Part 9: Noise limits*
Amendment 1:2007

IEC 60034-12, *Rotating electrical machines – Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors*

IEC 60034-14:2003, *Rotating electrical machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity*
Amendment 1:2007

IEC 60034-18-41, *Rotating electrical machines – Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification and quality control tests*

IEC 60034-18-42, *Rotating electrical machines – Part 18-42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters*

IEC 60050 (alle Teile): *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org>)

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

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

IEC 61800-2:1998, *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 requirements and specific test methods*

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

IEC/TS 61800-8:2010, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface*

IEC/TS 62578:2009, *Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter applications*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Lagerspannungsverhältnis

BVR

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

3.2

Potentialausgleich

elektrische Verbindung metallischer Teile einer Anlage untereinander und mit Erde

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei der Anwendung dieses Teils von IEC 60034 fasst diese Definition Elemente von IEC 60050-195:1998, 195-01-10 (Potentialausgleich) und 195-01-16 (Funktionspotentialausgleich) zusammen.

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Definition ist aus **IEC 61800-2** entnommen und schließt für die Anwendung dieser Technischen Spezifikation die Begriffe vollständiges Antriebsmodul (CDM, en: Complete Drive Module) und Antriebsgrundmodul (BDM, en: Basic Drive Module) entsprechend ihrem Gebrauch in den Normen der Reihe IEC 61800 ein.

[**IEC 61800-2:1998, 2.2.1**, modifiziert (Anmerkung 1 zum Begriff hinzugefügt)]

3.5**Umrichtergespeiste elektrische Maschine**

elektrische Maschine, die aus einem Frequenzumrichter gespeist wird, unabhängig davon, ob sie speziell für Umrichterspeisung bemessen oder ob sie innerhalb des Anwendungsbereichs von **IEC 60034-12** ursprünglich für Speisung aus dem Netz ausgelegt wurde

3.6**Elektrische Maschine mit fester Drehzahl**

elektrische Maschine, die für eine Ausgangsleistung bei 50 Hz und / oder 60 Hz Netzbetrieb bemessen ist.

Anmerkung 1 zum Begriff: Elektrische Maschinen mit fester Drehzahl können für Umrichterbetrieb mit variabler Drehzahl geeignet sein.

3.7**Elektromagnetische Verträglichkeit****EMV**

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

[IEC 60050-161:1990, 161-01-07]

3.8**Feldschwächung**

Betriebszustand der elektrischen Maschine mit einem Maschinenfluss, der geringer ist als der Bemessungsfluss

3.9**Anstiegszeit**

Zeitintervall zwischen 10 % und 90 % des Spannungs-Scheitelwertes (siehe [Bild 12](#))

3.10**Antriebssystem****PDS**

System, bestehend aus dem Leistungsteil (zusammengesetzt aus Umrichter, Wechselstrommaschine 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.)

3.11**Schutzerdung****PE**

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

[IEC 60050-195:1998, 195-01-11, modifiziert („elektrischen“ vor „Sicherheit“ eingefügt)]

3.12**Ausblend-Bereich**

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

3.13**Kopplungswiderstand**

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

[IEC 60050-161:1990, 161-04-15]

3.14

Systemverantwortlicher

Person oder Einrichtung, welche die Komponenten eines Antriebssystems je nach Anwendungsbereich koordiniert und somit die Verantwortung für das System trägt

3.15

Bemessungsspannung

U_N

Spannung, die vom Hersteller für eine vorgegebene Betriebsbedingung einer elektrischen Maschine zugeordnet wurde und auf dem Leistungsschild angegeben ist

3.16

Sprungspannung

Spannungssprung zu Beginn eines jeden Impulses an den Maschinenklemmen der elektrischen Maschine, wenn diese von einem Umrichter gespeist wird

4 Kenngrößen des Systems

4.1 Allgemeines

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

4.2 Erläuterungen zum System

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

- die Leistungs- oder Drehmoment-Anforderungen bei unterschiedlichen Drehzahlen,
- den gewünschten Drehzahlbereich von Belastungsmaschine und elektrischer Maschine,
- 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 Maschinendrehzahl, Belastungs-Drehmoment während des Anfahrens),
- ob die Anwendung aus einem kontinuierlichen Prozess oder einem Betriebszyklus von Anfahrvorgängen, Stillständen und Drehzahländerungen besteht (siehe IEC 60034-1:2010, 3.1),
- eine grundsätzliche Beschreibung der Art der Anwendung einschließlich der Umgebung, in der die Komponenten des Antriebssystems betrieben werden,
- eine Beschreibung zusätzlicher Abläufe, die nicht nur die elektrische Maschine und den Umrichter betreffen können (z. B. Überwachung der Maschinentemperatur, 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 einer umrichtergespeisten elektrischen Maschine, 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 Maschinenauslegungen möglich, um eine Anpassung an die individuellen Grenzwerte vorzunehmen.

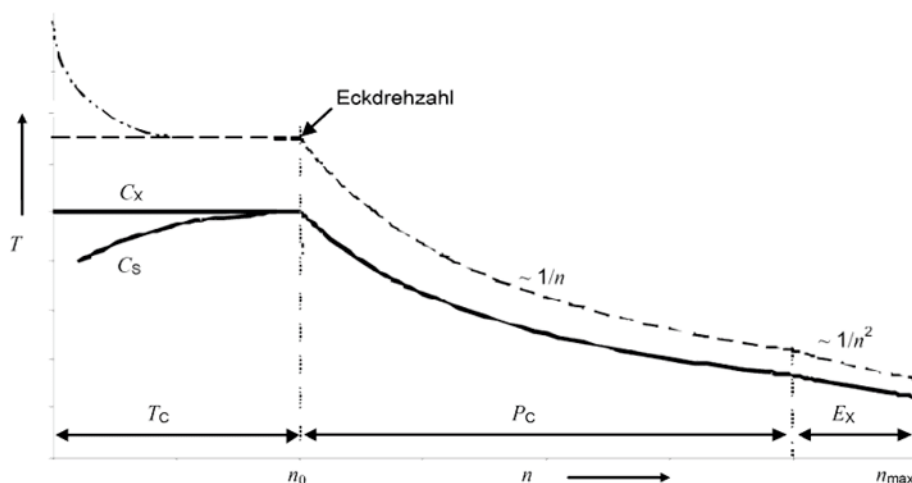
ANMERKUNG Die Bilder 1 bis 3 zeigen nicht die möglichen Ausblend-Bereiche (siehe 4.3.8).

4.3.2 Drehmoment-Drehzahl-Verhalten

Bild 1 zeigt das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten einer umrichter gespeisten elektrischen Maschine. Das höchste verfügbare Drehmoment ist durch die Bemessung der elektrischen Maschine und die Strombegrenzung des Umrichters gegeben. Im Feldschwächbereich oberhalb der Frequenz f_0 und der Drehzahl n_0 kann die elektrische Maschine bei konstanter Leistung mit einem Drehmoment proportional zu $1/n$ betrieben werden. Wenn bei Induktionsmaschinen 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 Synchronmaschinen. 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 elektrischen Maschinen reduziert werden, um eine mögliche Überhitzung zu vermeiden.

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



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 Induktionsmaschinen)		

Bild 1 – Drehmoment-Drehzahl-Verhalten

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

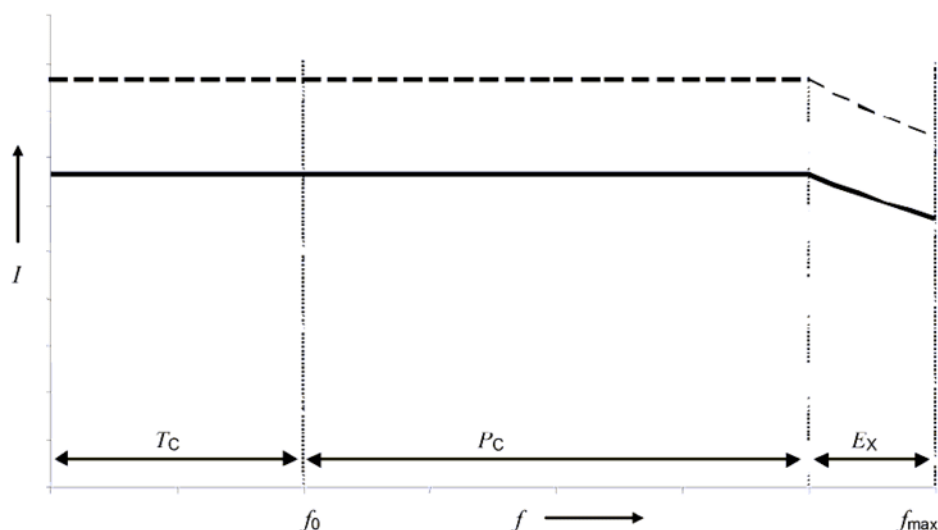


Bild 2 – Umrichter-Ausgangsstrom

4.3.3 Bemessung der elektrischen Maschine

Der Bemessungspunkt, in dem die für umrichtergespeiste Anwendungen ausgelegte elektrische Maschine ihre Bemessungsdrehzahl, ihre Bemessungsspannung, ihren Bemessungsstrom, ihr Bemessungsdrehmoment und ihre Bemessungsleistung aufweist, ist im Allgemeinen der Punkt, an dem die elektrische Maschine das höchste Drehmoment und die höchste Leistung liefert. Wie in Bild 1 dargestellt, ist dies der Eckpunkt n_0 , in dem $n_N = n_0$ ist. Die maximale Betriebsdrehzahl kann über der Bemessungsdrehzahl liegen, und in Abhängigkeit von den Spannungs-/Frequenz-Kennlinien (siehe 4.3.7) kann die maximale Betriebsspannung die Bemessungsspannung übersteigen.

4.3.4 Begrenzungsfaktoren des Drehmoment-Drehzahl-Verhaltens

Die kennzeichnenden Faktoren, die das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten beeinflussen, sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 – Maßgebliche Einflussfaktoren auf das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten

Zustand	Elektrische Maschine	Umrichter
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

4.3.5 Sichere Betriebsdrehzahlen, Schleuderdrehzahlen und Schleuderprüfungen

Bei für umrichtergespeiste Anwendungen bemessenen elektrischen Maschinen sollte die Betriebsdrehzahl vom Hersteller festgelegt und auf dem Leistungsschild angegeben werden. Für Niederspannungs-Induktionsmaschinen mit Käfigläufer ist die sichere Betriebsdrehzahl in IEC 60034-1:2010, 9.6 festgelegt.

Die Schleuderdrehzahl bei Wechselstrommaschinen ist in IEC 60034-1:2010, 9.7 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

elektrischen Maschinen 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 elektrischen Maschinen ist eine Beschleunigung über die in der Umrichterregelung vorgesehene maximale Betriebsdrehzahl hinaus nicht möglich. Insbesondere bei extrem großen Synchronmaschinen ist es für den Gesamtentwurf oft ratsam, die Drehzahl bei der Schleuderprüfung auf die 1,05fache maximale Betriebsdrehzahl zu begrenzen. Prüfungen können auch mit der 1,05fachen maximalen Betriebsdrehzahl durchgeführt werden. Technisch spricht nichts gegen eine derartige Vereinbarung.

Bei Betrieb mit höheren Drehzahlen kann eine Feinwuchtung des Läufers erforderlich sein. Bei Dauerbetrieb mit höheren Drehzahlen kann die Lager-Gebrauchsdauer zurückgehen. Auch bei hochtourigen Anwendungen ist auf die Schmierfristen und die Fettgebrauchsdauer besonders zu achten.

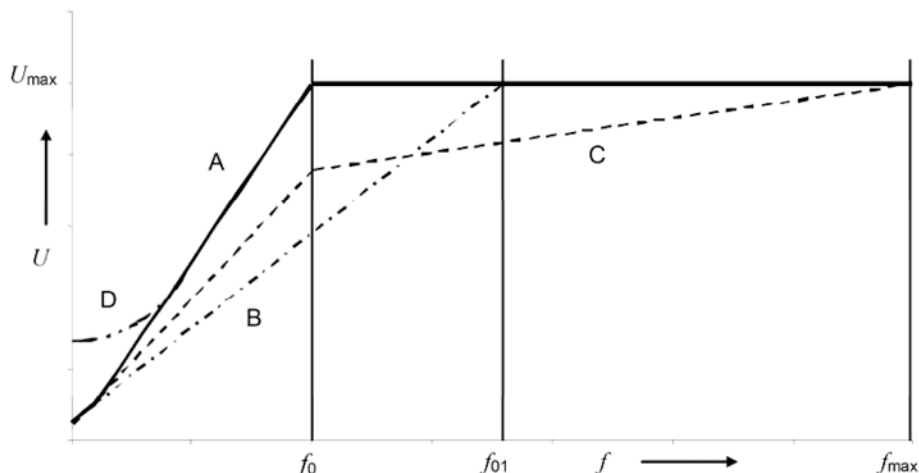
4.3.6 Kühlkreisanordnung

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 Maschinenläufers 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 ≥ 70 % der Bemessungsdrehzahl empfohlen.

4.3.7 Spannungs-/Frequenz-Kennlinien

Das Verhältnis zwischen Umrichter-Ausgangsspannung (U) und Frequenz kann, wie in [Bild 3](#) ersichtlich, mit verschiedenen Kennlinien dargestellt werden.



Legende

- A Die Spannung steigt mit der Frequenz an, und die höchste Umrichter-Ausgangsspannung $U_{\max}$ wird bei der Feldschwäcfrequenz 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 Feldschwäcfrequenz 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 – Beispiele möglicher Kennlinien der Umrichter-Ausgangsspannung/Frequenz

4.3.8 Kritische Drehzahlbereiche durch Resonanzen

Der Drehzahlbereich einer umrichtergespeisten elektrischen Maschine kann Drehzahlen umfassen, bei denen Resonanzen in Teilen des Maschinengehäuses, 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 die elektrische Maschine 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. Der Drehzahlbereich ist mit dem Maschinenhersteller abzustimmen.

4.3.9 Lastspiele

4.3.9.1 Allgemeines

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

- Die Wärmeentwicklung der elektrischen Maschine ist unterschiedlich, sie hängt von der Drehzahl und der Kühlungsart ab.
- Drehmomentanforderungen oberhalb des Volllastdrehmomentes der elektrischen Maschine können erforderlich sein. Betrieb oberhalb der Maschinen-Volllast kann erforderlich sein zur Beschleunigung, aufgrund von Laststößen und auch zum Abbremsen der Arbeitsmaschine. Betrieb oberhalb des Bemes-

sungsstromes der elektrischen Maschine führt zu einem Anstieg der Erwärmung. Hierdurch kann eine höhere Wärmeklasse des Isoliersystems erforderlich sein, eine Maschinenbemessung für Überlastung oder eine Bewertung des Lastspiels, um zu ermitteln, ob die Kühlung der elektrischen Maschine für den beabsichtigten Betrieb ausreicht (siehe IEC 60034-1, Betriebsart S10).

- Gleichstrom-, Gegenstrom- oder generatorisches Nutzbremsten kann zur Stillsetzung der elektrischen Maschine erforderlich sein. Unabhängig davon, ob die elektrische Maschine ein Drehmoment zum Antrieb der Arbeitsmaschine entwickelt, ob sie angetrieben durch die Belastung als Generator Leistung zurück zum Umrichter liefert oder ein Bremsmoment durch Zufuhr von Gleichstrom zur Ständerwicklung entwickelt, entsteht eine Maschinenerwärmung, 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.

4.3.9.2 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 der elektrischen Maschine sehr schnell zu- oder abgeschaltet. Das Belastungsdrehmoment kann positiv (gegen den Drehsinn der elektrischen Maschine) oder negativ (im Drehsinn der elektrischen Maschine) wirken.

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

4.4 Anforderungen an die elektrischen Maschinen

ANMERKUNG Dieser Unterabschnitt bezieht sich hauptsächlich auf Induktionsmaschinen. Einige der geforderten Merkmale können jedoch auch auf andere Arten elektrischer Maschinen zutreffen.

Tabelle 2 weist auf die hauptsächlichsten Einzelaspekte und Entwurfs-Betrachtungen hin.

Tabelle 2 – Betrachtungen zum Entwurf elektrischer Maschinen (1 von 2)

Gefordertes Merkmal der Anwendung	Entwurfsbetrachtungen
Dauerbetrieb bei kleiner Drehzahl	Thermische Überdimensionierung oder Fremdkühlung. Für den Dauerbetrieb von Gleitlagern bei Drehzahlen unterhalb von 10 % der Eckdrehzahl sollte das Lagerverhalten durch den Hersteller bestätigt werden. Es sollte auf die Art des Schmiermittels und die Schmierfristen geachtet 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 Wirkungsgrad der elektrischen Maschine durch Umrichterspeisung	Bemessung des Läuferkäfigs (Läuferstäbe mit niedrigerer 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.

Tabelle 2 (2 von 2)

Gefordertes Merkmal der Anwendung	Entwurfsbetrachtungen
Hohes Losbrechmoment	Falls möglich, Erhöhung des Flusses um 10 % bis 40 % (abhängig von der Baugröße der elektrischen Maschine) bei sehr kleinen Frequenzen.
Spannungsabfall im Umrichter durch die Modulation oder durch Filter oder durch die Kabelführung	Anpassung der Bemessungsspannung der elektrischen Maschine, um den Spannungsabfall zu kompensieren, d.h. die Bemessungsspannung der elektrischen Maschine kann unter der Versorgungsspannung zum Umrichter liegen.
Mehr-Maschinen-Betrieb mit ungefähr der gemeinsamen Synchrodrehzahl	Ähnliche Schlupf-/Drehmoment-Kennlinien der elektrischen Maschinen.

Für manche Anwendungen können die elektrischen Kenngrößen des Ersatzschaltbilds der elektrischen Maschine (für Beispiele siehe Tabelle 3) vom Maschinenhersteller zur Anpassung an den Umrichter gefordert werden.

Tabelle 3 – Eigenschaften elektrischer Maschinen zur Umrichteranpassung (1 von 2)

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 Maschinenresonanzen zu vermeiden			ja, falls eine diskrete Trägerfrequenz existiert
Mechanische Eigenschaften			
Trägheit	Für hohe Werte der Beschleunigung	wahlweise	wahlweise
Anforderungen an die Reibwerte k_1 und k_2 und das Drehmoment des Lüfters zur Kühlung ($m = k_1 \times n + k_2 \times n^2$)	Zur Fertigungsautomatisierung oder für Produktionsaufgaben, in denen eine exakte Bestimmung der mechanischen Leistung erforderlich ist	wahlweise	wahlweise
Elektrische Kenngrößen des T-Ersatzschaltbildes für Induktionsmaschinen			
Ständerwiderstand (R_s)	Bei Betriebstemperatur	wahlweise zur Kompensation des ohmschen Spannungsabfalls	ja
Läuferwiderstand (siehe Anmerkung 1) (R_r')	Bei Betriebstemperatur	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja
Ständerstreureaktanz ($X_{\sigma s}$)	Bei Eckfrequenz	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja
Läuferstreureaktanz (siehe Anmerkung 1) ($X_{\sigma r}'$)	Beim Bemessungspunkt, verschieden von dem Wert bei festgebremstem Läufer	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja
Hauptreaktanz (X_m)	Bei Eckfrequenz und Bemessungsbetrieb	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja

Tabelle 3 (2 von 2)

Eigenschaft	Beschreibung/Erklärung	Skalare Regelung	Vektorregelung oder direkte Regelung von Fluss und Drehmoment
Wirkleitwert parallel zur Hauptreaktanz (G_m)	Bei Eckfrequenz und Bemessungsbetrieb	wahlweise bei moderner skalarer Regelung	ja
Hauptinduktivität in Abhängigkeit von der Spannung	Im Feldschwäcbereich	ja, für moderne skalare Regelung	ja
Biegekritische Drehzahl, wenn kleiner als höchste Betriebsdrehzahl	Drehzahl ist bei Dauerbetrieb zu vermeiden	ja	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 1 Die elektrischen Läuferkenngrößen R_r' und X_{gr}' sind auf den Ständer bezogen.			
ANMERKUNG 2 Einige Umrichter benötigen zur Anpassung keine Widerstands- und Reaktanzwerte vom Motor, da sie die erforderlichen Werte selbst bestimmen können.			

Biegekritische Drehzahlen sind ebenfalls zu beachten, wobei ein Dauerbetrieb bei diesen Drehzahlen zu vermeiden ist.

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 Maschinenberechner sinnvoll sein, Werte für die inneren Wärmekapazitäten und Wärmewiderstände der Maschinenkomponenten bekannt zu geben. Diese Parameter können sowohl von der Drehfrequenz als auch von der Schaltfrequenz abhängen.

5 Verluste und ihre Auswirkungen (bei Induktionsmaschinen mit Speisung durch Spannungszwischenkreis-Umrichter)

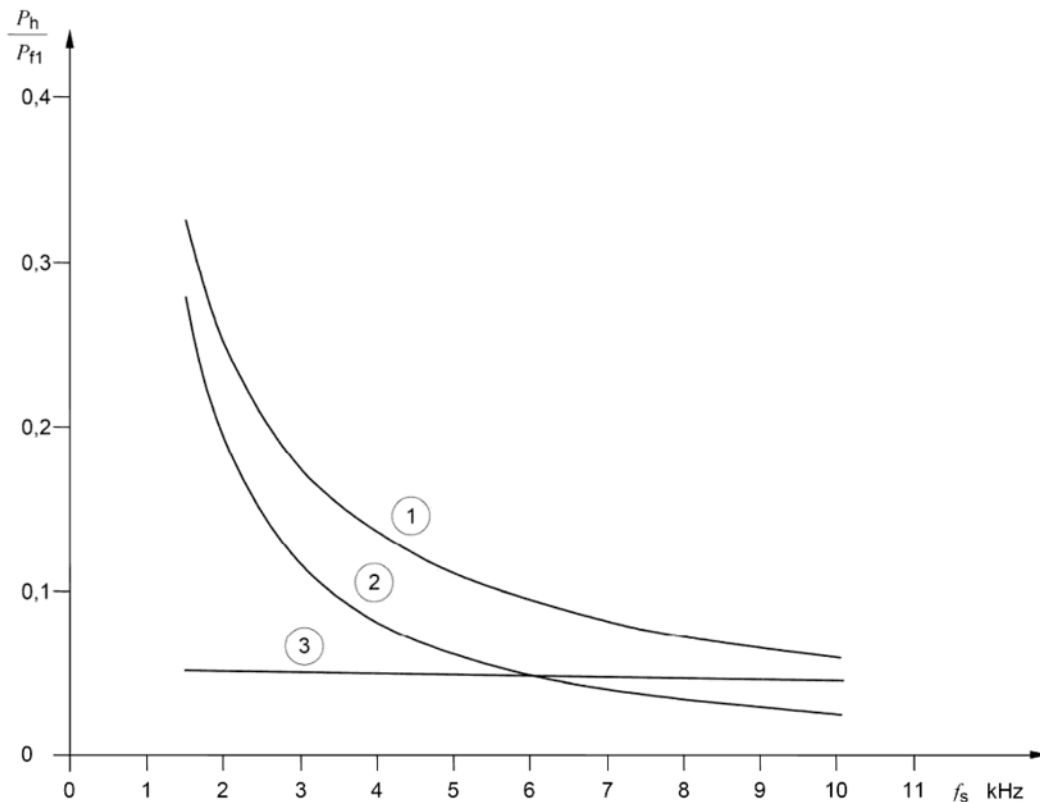
5.1 Allgemeines

Bei Speisung durch Spannungszwischenkreis-Umrichter ist die Kenntnis des Ersatzschaltbildes der elektrischen Maschine für die Auslegung des Kommutierungskreises normalerweise nicht von Bedeutung. Die Oberschwingungsimpedanzen der elektrischen Maschine haben jedoch großen Einfluss auf die durch Oberschwingungen hervorgerufenen Verluste. Spannungszwischenkreis-Umrichter prägen ihre Spannung der angeschlossenen elektrischen Maschine 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 in der elektrischen Maschine. Die zusätzlichen Verluste hängen von Drehzahl, Spannung, Strom, der Spannungs-Kurvenform am Umrichterausgang sowie von der Bemessung und Baugröße der elektrischen Maschine ab. Sofern keine Drosseln oder Filter vorhanden sind, können diese Verluste bei Zwei-Ebenen-Umrichtern bis zu 10 % bis 30 % der Grundschwingungsverluste betragen und folglich bis zu ungefähr 1 % bis 2 % der Bemessungsleistung der elektrischen Maschine ausmachen, wobei sie mit zunehmender Maschinengröße 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 der elektrischen Maschine, von der Art und den Parametern des verwendeten Umrichters und dem Einsatz von Filterkreisen ab.

Die Summe der durch Oberschwingungen hervorgerufenen Zusatzverluste nimmt mit steigender Schaltfrequenz ab (siehe Bild 4). Dieser Effekt ergibt sich durch die geringen zusätzlichen Stromwärmeverluste bei hohen Schaltfrequenzen.



Legende

- 1 durch Oberschwingungen hervorgerufene Gesamtverluste
- 2 durch Oberschwingungen hervorgerufene Stromwärmeverluste
- 3 durch Oberschwingungen hervorgerufene Eisenverluste

Bild 4 – Beispiel für die Abhängigkeit der durch Oberschwingungen P_h hervorgerufenen Maschinenverluste, bezogen auf die Verluste P_{f1} bei Betriebsfrequenz f_1 , von der Schaltfrequenz f_s bei Versorgung aus einem Zwei-Ebenen-Spannungswischenkreis-Umrichter

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

Die elektrische Maschine 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 zusätzlichen Verluste bei Versorgung aus einem Spannungswischenkreis-Umrichter lassen sich durch folgende Bemessungsmaßnahmen minimieren:

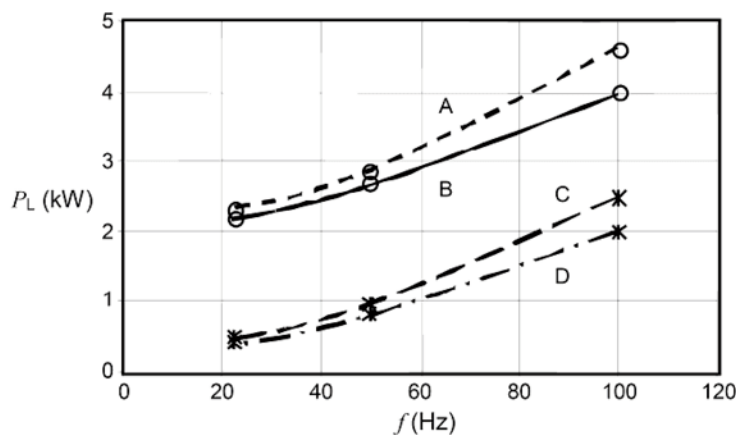
- Läuferbemessung mit kleinerer Stromverdrängung;
- Bemessung der Ständerwicklung mit kleinerer Stromverdrängung;
- offene Läufernuten;

- 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 Verluste in elektrischen Maschinen

5.3.1 Verringerung der Grundswingungsverluste

Bild 5 zeigt Beispiele für die Verluste bei Leerlauf und bei Volllast für eine elektrische Maschine mit 37 kW, 50 Hz bei Versorgung aus einem sinusförmigen Netz und aus einem 5,5-kHz-Spannungswidenkreis-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 5 – Beispiel der gemessenen Verluste P_L als Funktion der Frequenz f und der Versorgungsart

Die größten Vorteile der Umrichterversorgung werden durch die Optimierung des Maschinenflusses 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 in der elektrischen Maschine 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 Maschinenflusses ändert, sodass der Leistungsfaktor des Maschinenstroms 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 Umrichter-Ausgangsspannung 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 6). 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 Hysteres- oder „random PWM“-Regelung gilt eine mittlere Schaltfrequenz, die auch von Spannung und Strom abhängen kann.

- Mehr-Ebenen-Umrichteranordnung.

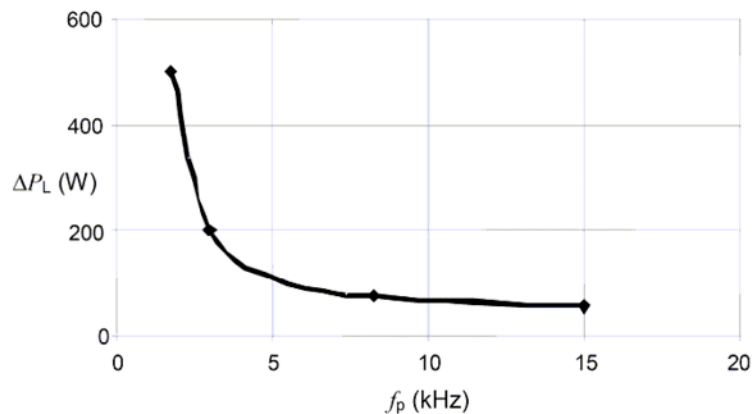


Bild 6 – Zusätzliche Verluste ΔP_L einer elektrischen Maschine (gleiche elektrische Maschine wie in Bild 5) aufgrund des Umrichterbetriebs als Funktion der Schaltfrequenz f_p bei 50 Hz Drehfrequenz

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

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 Maschinenklemmen entstehende niederfrequente Spannung zu sehr zu beeinflussen. Die Gesamtauswirkungen sind abhängig von der Anwendung und der Bemessung von elektrischer Maschine und Filter. Der Spannungsabfall im Filter vermindert die Spannung an den Maschinenklemmen. Dies sollte berücksichtigt werden, um eine Erhöhung der Grundschwingungsstromverluste in der elektrischen Maschine 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 Maschinenverluste, sodass der Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems sich verbessert.

Neben der Verminderung zusätzlicher aufgrund von Umrichterspeisung entstandener Maschinenverluste können derartige Filter ebenfalls folgende Vorteile bewirken: verminderte Spannungsbeanspruchung in den Maschinenwicklungen, 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 Auswirkungen der Temperatur auf die Lebenserwartung

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

Es gibt mehrere Möglichkeiten zur Berücksichtigung dieses Effektes, z. B.:

- Installation einer Fremdkühlung wie z. B. IC0A6 oder IC1A7 (siehe IEC 60034-6) für eine luftgekühlte elektrische Maschine,
- Einsatz einer höheren Wärmeklasse für die Isolierung (siehe IEC 60034-1),
- voller Ausgleich für die beabsichtigte Umgebungstemperatur am Aufstellungsort (siehe IEC 60034-1),
- Einsatz einer überdimensionierten elektrischen Maschine,
- Optimierung der Kurvenform am Umrichterausgang.

ANMERKUNG Erhöhte Temperaturen können nicht nur die Wicklungsisolierung, sondern auch die Lagerschmierung und somit die Lagerlebensdauer beeinträchtigen.

Der Einfluss von veränderlicher Belastung und Drehzahl auf die Wicklungstemperatur wird durch die Betriebsart, wie in IEC 60034-1 definiert, erfasst. Die Betriebsarten S1 und S10 sind für umrichter gespeiste elektrische Maschinen am besten geeignet. In der Betriebsart S1 ist die maximal zulässige Temperatur maßgebend, wohingegen S10 (für Betrieb mit veränderlicher Last und Drehzahl) Temperaturen zulässt, die die Grenzwerte der Wärmeklasse für eine begrenzte Zeitdauer überschreiten. Die Grenzwerte der Erwärmung sind in IEC 60034-1:2010 festgelegt, und Anhang A dieser Norm präsentiert eine Formel für die Berechnung der thermischen Lebenserwartung.

5.6 Bestimmung des Wirkungsgrades der elektrischen Maschine

Die empfohlenen Verfahren zur Bestimmung des Maschinenwirkungsgrades bei Sinus-Versorgung sind in IEC 60034-2-1 und IEC 60034-2-2 enthalten. Für umrichter gespeiste Induktionsmaschinen mit Käfigläufer wird in IEC/TS 60034-2-3 ein neues Verfahren zur Bestimmung von Oberschwingungsverlusten angegeben.

Wenn möglich und falls erforderlich, sollten die Gesamtverluste (einschließlich zusätzlicher Oberschwingungsverluste) auf Basis des Betriebsverhaltens des finalen Antriebssystems ermittelt werden.

6 Geräusche, Schwingungen und Pendelmomente

6.1 Geräusche

6.1.1 Allgemeines

Der Umrichter und seine Funktionsweise bewirken drei Variablen, die unmittelbaren Einfluss nehmen auf das abgestrahlte Geräusch. Dies sind:

- Änderungen der Drehzahl, die von nahezu Stillstand zu Werten oberhalb der Eckdrehzahl reichen kann. Komponenten und Faktoren, die Einfluss auf die Geräuschemission nehmen, sind Lager und Schmierung, Kühlung und andere Größen, die durch Temperaturschwankungen beeinträchtigt werden.
- Maschinenspeisespannung und Oberschwingungsgehalt, die großen Einfluss nehmen auf das magnetisch erregte Geräusch und in geringerem Maße auf das Lagergeräusch.
- Tangentiale und radiale Anregungen des Ständerblechpakets aus dem Zusammenwirken von Feldwellen unterschiedlicher Frequenz im Luftspalt der elektrischen Maschine.

6.1.2 Änderungen der Geräuschemission durch Drehzahländerungen

6.1.2.1 Gleitlager

Bei Gleitlagern tritt keine merkliche Änderung der Geräuschemission auf.

6.1.2.2 Wälzlager

Die Grundfrequenzen der potentiellen Geräuschemission eines Wälzlagers ändern sich proportional zur Drehzahl. Falls das Lager bei Eckdrehzahl „ruhig“ ist, ist es unwahrscheinlich, dass sich der Geräuschpegel merklich ändert, wenn die Drehzahl abgesenkt wird. Wenn jedoch die Drehzahl auf Werte oberhalb der Eckdrehzahl ansteigt, besteht die Möglichkeit, dass der Geräuschpegel dramatisch ansteigt, weil durch Schleudern der Wälzkörper Harmonische der Grundfrequenzen hinzutreten. Die Anfälligkeit gegen dieses Phänomen steigt erfahrungsgemäß deutlich bei Drehzahlfaktoren (Lagerdurchmesser in mm multipliziert mit Drehzahl in min^{-1}) oberhalb von 180 000. Erfahrungsgemäß kann dem Anstieg des Geräuschpegels durch Erhöhung der Schmiermittelversorgung des Lagers durch Rückfetten in sehr kurzen Intervallen oder durch Einsatz einer Ölbad- oder Ölnebelschmierung entgegengewirkt werden.