

Beanspruchung und Auswahl von Drehstrom-Asynchronmotoren mit Umrichterspeisung

P. Stupin, Dresden

Die Vorteile frequenzgesteuerter Drehstrom-Asynchronmotoren sind bekannt [1]. Die Speisung der Motoren mit nichtsinusförmigen Strömen und Spannungen aus Umrichtern erzeugt jedoch zusätzliche Beanspruchungen für die Motoren bzw. Belastungen für den Gesamtantrieb und die Umgebung. Solche Zusatzverluste, Überspannungen, Pendelmomente, Geräusche sind bei der Motorauswahl zu beachten. Diese Einflüsse werden im folgenden untersucht.

1 Motor- und Umgebungsbeanspruchungen bei Umrichterspeisung

Gegenüber dem Betrieb am sinusförmigen Netz wird der Motor bzw. seine Umgebung zusätzlich beansprucht durch:

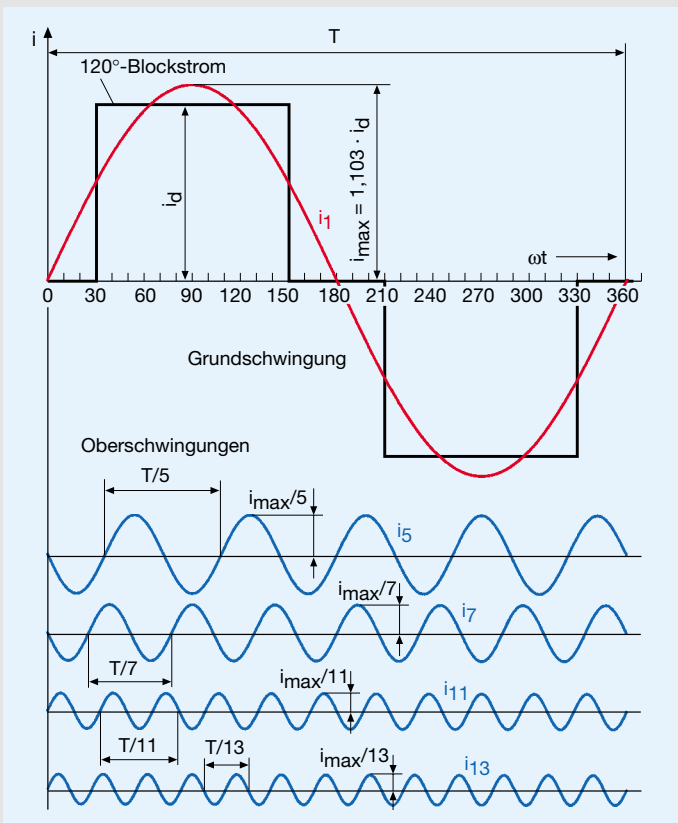
- Erwärmung der Wicklungen und des Eisenkreises
 - Pendelmomente
 - Geräusentwicklung
 - Wellenspannungen und Lagerströme
 - Beanspruchung der Wicklungsisolations.
- Die Ursache dieser Belastungen liegt im Unterschied bei der Erzeugung des internen Motordrehfeldes bei Netzspeisung gegenüber der bei Umrichterspeisung. Die zuletzt aufgeführte, erhöhte Beanspruchung der Wicklungsisolations hingegen wird durch das schnelle und häufige Schalten der Halbleiterventile im Umrichter ver-

Autor
 Dr.-Ing. Peter Stupin ist Mitarbeiter Berechnung und Konstruktion elektrischer Maschinen in VEM-Sachsenwerk GmbH Dresden, 01257 Dresden

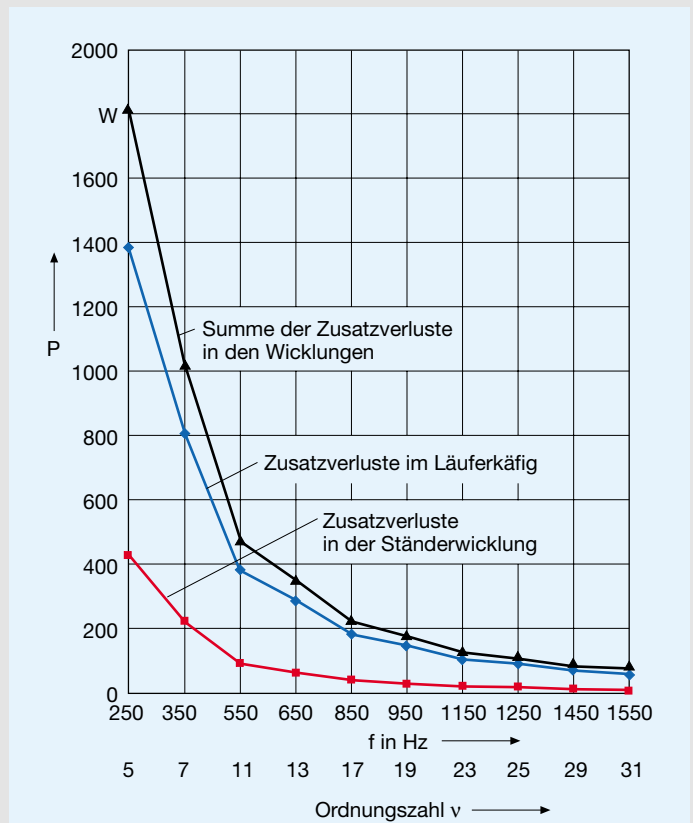
ursacht. Laufzeiteffekte in den Motorzuleitungen können zu weiteren Spannungsüberhöhungen an den Motor клемmen führen.

2 Drehfeld bei Netz- und Umrichterspeisung

Die besondere räumliche Anordnung der Wicklungsstränge in Drehstrommotoren und die Versorgung durch ein Drehstromsystem mit zeitlich sinusförmig verlaufenden Größen erzeugt in den Motoren ein gleichmäßig umlaufendes Magnetfeld. Dieses Drehfeld läuft auf einer Kreisbahn um [2]. Anders sind die Verhältnisse, wenn durch einen Umrichter blockförmige Ströme oder Spannungen in die Wicklungen des Motors gespeist werden. Das erzeugte Drehfeld rotiert im Luftspalt des Motors dadurch nicht mehr kontinuierlich kreisförmig. Es bewegt sich sprunghaft auf einem Vieleck vorwärts, weil in den das Drehfeld erzeugenden nichtsinusförmigen Strömen Oberschwingungen enthalten sind. Bild 1 zeigt beispielhaft die Zerlegung (nach Fourier) eines 120°el.-Blockstromes. Die Oberschwingungsanteile reduzieren sich, je mehr sich die vom Umrichter erzeugte Ausgangsgröße (Strom oder Spannung) der Sinusform nähert.



1 Zerlegung eines Blockstromes in Grund- und Oberschwingungen



2 Zusatzverluste durch die ersten 10 Oberschwingungen eines 120°-Blockstromes in den Wicklungen eines 750-kW-Motors

3 Umrichterarten

Zum Speisen von Motoren mit frequenzvariablen Größen Spannung oder Strom stehen zwei Umrichtertypen zur Verfügung [3]. Der Spannungswischenkreisumrichter (U-Umrichter) ist eine Spannungsquelle. Der Umrichter mit Stromzwischenkreis (I-Umrichter) stellt eine Stromquelle dar. Beide Systeme beanspruchen den Motor hinsichtlich der im Abschnitt 1 genannten Positionen unterschiedlich.

Spannungswischenkreisumrichter Diese Geräte besitzen einen kleinen Innenwiderstand (Kondensator im Zwischenkreis). Deshalb prägen sie den Motorwicklungen je nach Steuerverfahren eine meist gepulste Spannung auf. Der Strom in den Motorwicklungen stellt sich zwar überschwingungsbehaftet, aber im wesentlichen sinusförmig ein. Die „Güte“ der Sinusform des Stromes hängt vom Pulsmuster der Spannung ab.

Stromzwischenkreisumrichter Sie besitzen einen großen Innenwiderstand (Induktivität im Zwischenkreis) und prägen deshalb den Motorwicklungen blockförmige Ströme ein. Die Pulsung des Motorstromes ist ebenfalls möglich. Sie hat sich jedoch wegen des hohen Aufwandes für Filter in den Motorzuleitungen und für abschaltbare Ventile im Wechselrichter nicht durchgesetzt. Die Spannung an den Motorwicklungen stellt sich überschwingungsbehaftet, aber im wesentlichen sinusförmig ein. Sie enthält Kommutierungsspitzen, die für eine zusätzliche Spannungsbeanspruchung der Motorwicklung sorgen.

4 Zusätzliche Verluste

Verluste in den Wicklungen Die Oberschwingungen im Strom rufen die zusätzliche Erwärmung hervor. Bild 2 demonstriert die quantitativen Verhältnisse an einem 750-kW-Motor mit Kurzschlußläufer, der für den Betrieb an einem I-Umrichter

ter ausgelegt wurde. Die Werte lassen sich etwa im Verhältnis der Nennleistungen $P_{nenn}/750 \text{ kW}$ auf andere Maschinengrößen übertragen. Die Verluste im Läufer überwiegen. Für die dargestellten zehn Stromoberschwingungen beträgt die Verlusterhöhung 65%, in der Ständerwicklung dagegen nur 8,7%.

Besonderes Augenmerk wird daher bei Motoren für Umrichterspeisung auf die Gestaltung des Läufers gelegt. Die Verwendung von Keil- (breite Stabseite zur Läuferaußenseite liegend) oder Rundstäben, sind bei Normmotoren Maßnahmen zur Verlustverringerung. Auch der Umrichter kann durch die Vermeidung von Oberschwingungen mit niedriger Ordnungszahl zur Minimierung der zusätzlichen Verluste beitragen. Dies gelingt z. B. bei I-Umrichtern durch spezielle Schaltungen, mit denen ein treppenförmiger Stromverlauf statt eines Rechteck-Stromblockes vorgegeben wird. U-Pulsumrichter mit IGBT-Ausrüstung im Wechselrichterteil (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor) arbeiten mit sehr hohen Taktfrequenzen. Sie erzeugen aus diesem Grunde einen nahezu sinusförmigen Strom in den Motorwicklungen, so daß das Problem der Zusatzverluste gegenstandslos wird.

Verluste im Eisen Diese Verluste werden durch die Oberschwingungen in der Spannung hervorgerufen. Sie erhöhen sich bei Umrichterspeisung nur unwesentlich. Bei Maschinen am I-Umrichter stellt sich die Spannung an den Motorklemmen annähernd sinusförmig ein. Der Betrieb am Spannungswischenkreisumrichter ist demgegenüber etwas kritischer. Der oft größere Oberschwingungsanteil im Spannungsspektrum führt auch zu größeren Eisenverlusten. Man kann sie im ungünstigen Fall als etwa doppelt so hoch wie beim I-Umrichter ansetzen. IGBT-Umrichter mit hoher Pulsfrequenz verursachen allerdings gegenüber dem I-Umrichter geringere Verluste im Eisenkreis des Motors.

Auswirkung der zusätzlichen Verluste Als

Folge treten bei Maschinen größerer Leistung Wirkungsgradabschläge von 0,5 bis 1,5% gegenüber äquivalenten netzgespeisten Maschinen auf. Bei Maschinen kleiner Baugröße erreicht die Minderung maximal 3 bis 4%. Die zusätzlichen Verluste in Ständerwicklung, Läuferwicklung bzw. -käfig und im Magnetkreis verursachen eine größere Erwärmung der Motoren.

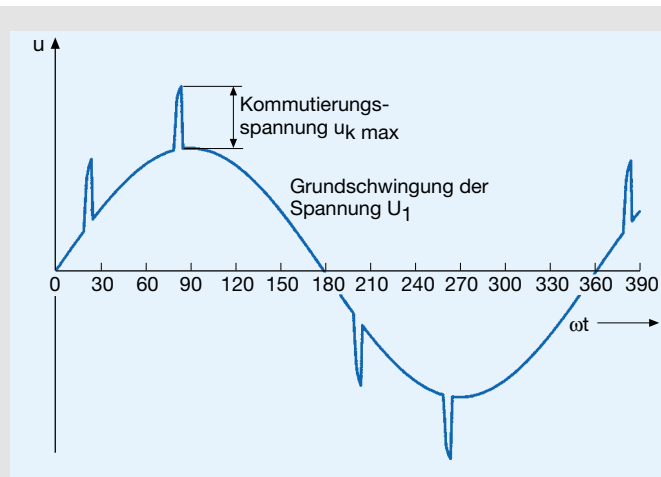
In kleineren Maschinen nimmt die Temperaturzunahme um höchstens 10 K zu. Bei der Motorauswahl ist deshalb eine Leistungsreduzierung gegenüber der Typenleistung für den Netzbetrieb vorzunehmen. Sie wird von den Herstellern angegeben. Sie liegt in der Größenordnung von 10%.

Bei größeren Maschinen bestehen mehr konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich der Wärmeabführung. Hier fällt im Vergleich Umrichterbetrieb – Netzbetrieb die Leistungsreduzierung innerhalb einer bestimmten Motorbaugröße meist kleiner aus. Sind die Motoren an die zu verwendende Umrichterart angepaßt, so haben Antriebe mit I- oder U-Umrichtern bei Vollastbetrieb annähernd gleiche Verluste. Im Teillastbereich war bisher der I-Umrichter im Vorteil, da die zusätzlichen Verluste mit kleiner werdendem Laststrom abnehmen. Bei U-Umrichtern sind die verlust erzeugenden Oberschwingungsströme dagegen weitgehend lastunabhängig. Der ursprünglich schlechtere Wirkungsgrad des Motors im Teillastbereich ist mit den IGBT-Pulsumrichtern entfallen. Sie erzeugen eben in weitem Frequenzbereich nur sehr kleine Oberschwingungsströme.

5 Pendelmomente

Pendelmomente m_v entstehen durch das Zusammenwirken der Oberschwingungen in Strom und Fluß. Sie sind vor allem bei der Verwendung von I-Umrichtern zu beachten. Ihre Amplituden sinken mit zunehmender Frequenz schnell. Näherungsweise gilt $m_v = m_1/v$. m_1 ist hierin das Grundwellenmoment und die Ordnungszahl v das Vielfache der Grundfrequenz. Das erste vorkommende Pendelmoment mit $v = 6$ -facher Grundfrequenz hat also die Größe von $m_1/6$, d. h. 16,7% des Grundwellenmomentes. Für $v = 18$ beträgt die Größe des Pendelmomentes lediglich noch 5,6%.

Störend wirken vor allem die Pendelmomente mit kleiner Ordnungszahl. Bei niedrigen Drehzahlen erzeugen sie einen unruhigen Lauf des Motors. Beim Hochlaufvorgang führen diese parasitären Momente dann zu Schwierigkeiten, wenn mechanische Eigenfrequenzen (kritische Drehzahlen) des Antriebssystems durchfahren werden müssen. Außerdem können sie eine unerfreuliche Dauerbeanspruchung von Einzelteilen des mechanischen Systems darstellen (z. B. Lüfter, Blechhauben),



② Überlagerung von Spannungsgrundschwingung und Kommutierungsspannung bei I-Umrichterspeisung

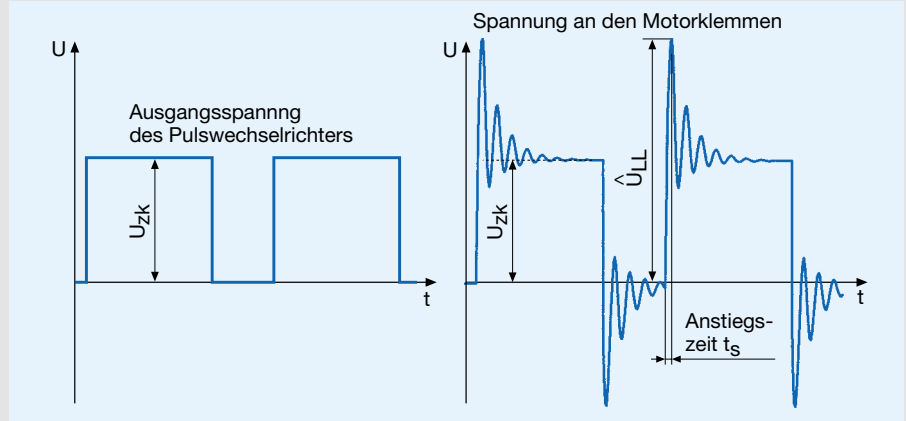
wenn deren Eigenfrequenzen in der Nähe von Pendelmomentfrequenzen liegen. Bei I-Umrichtern begegnet man der Entstehung von Pendelmomenten durch 12-Puls-Ausführungen. Beim Spannungszwischenkreisumrichter werden Pendelmomente von vornherein durch geeignete Pulsung der Spannung und dem daraus folgenden annähernd sinusförmigen Strom in den Motorwicklungen vermindert.

6 Spannungsbeanspruchung der Motorwicklungen

Die Wicklungsisolierung umrichter gespeister Motoren wird stärker beansprucht als im konventionellen Netzbetrieb.

I-Umrichterspeisung Hierbei sind es die Spitzen in der Motorspannung während der Kommutierung, welche die Isolation beanspruchen (Bild 4). Ihre Größe ist vom Laststrom, der Motorstreuinduktivität $L\sigma$ und der Größe der Kommutierungskondensatoren C_k , die für die Löschsaltung der Thyristoren im Wechselrichter benötigt werden, abhängig.

Gepulste U-Umrichter Bei dieser Variante liegt das Problem in Steilheit und großer zeitlicher Häufigkeit der Impulse. Die vom Umrichter erzeugten Spannungspulse durchlaufen als Wanderwellen die Verbindungskabel zwischen Umrichter und Motor. An den Motorwicklungen werden sie reflektiert, was zu Spannungsüberhöhungen an den Motorklemmen führt. Die Gefahr großer Überspannungen an den Klemmen besteht insbesondere dann, wenn bei sehr kurzen Anstiegszeiten der Spannungsimpulse zugleich „lange“ Kabel Umrichter und Motor verbinden. Hierunter versteht man Längen, denen die Laufzeit der Wellen größer als die Anstiegszeit der Spannungsimpulse ist. Motoren aus moderner Produktion vertragen diese Situation immer [4], sofern der Hersteller die Umrichterfestigkeit auf Anforderung bestätigt oder aber im Katalog sogar ausweist. Liegt jedoch diese Aussage nicht vor oder stehen Produkte älteren Datums vor einem Umrichtereinsatz, ist die kritische Kabellänge unbedingt zu errechnen. Setzt man für diesen Fall die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wanderwellen in einem Kabel mit $120 \text{ m}/\mu\text{s}$ an und legt z. B. die Anstiegszeit t_s an der Stirnseite eines Impulses mit $0,2 \mu\text{s}$ fest, so ergibt sich daraus eine kritische Kabellänge $l_k = 0,2 \mu\text{s} \cdot 120 \text{ m}/\mu\text{s} = 24 \text{ m}$. Dieser Wert gilt dann bereits als „lange“ Verbindung. Mit Zerstörungen am Motor ist immer zu rechnen, sofern nicht die Oberschwingungen dämpfende, also glättende Filter in die Verbindung zwischen Motor und Umrichter geschaltet werden. Charakteristische Größen der an den Motorklemmen auftretenden Spannungsimpulse sind im Bild 4 angegeben. Die



4 Spannungsüberhöhung bei U-Umrichterspeisung

überhöhten Spannungsimpulse können den doppelten Wert der Zwischenkreisspannung des Umrichters U_{zk} annehmen. Der theoretische Grenzwert liegt bei $\hat{U}_{LL} = 3 U_{zk}$. Er wird aber wegen der Dämpfung von Drehstromleitungen bei weitem nicht erreicht. Von wesentlichem Einfluß auf die Beanspruchung der Wicklungsisololation ist neben der absoluten Größe der Leiterleiter- bzw. Leiter-Erde-Spannung die Steilheit der Spannungsanstiege. Es ist mit Spannungsteilheiten von $0,2$ bis $5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ zu rechnen. Durch derartige ständig anliegenden hohen Spannungsimpulse altert die Isolation vorzeitig. Trotzdem bleibt aber festzustellen, daß die Speisung von Drehstrommotoren durch Pulsrichter mit Zwischenkreisspannungen bis 560 V für übliche Motorisierungen (Normmotorensektor) keine negativen Auswirkungen

auf die Lebensdauer hat. Bei höheren Zwischenkreisspannungen ist die Isolierung den Anforderungen anzupassen. Auch hierfür wirken sich Filterschaltungen positiv aus und verlängern die Lebensdauer der Maschinen.

7 Geräusche

Grundsätzlich ist zwischen Luft- und Lagergeräuschen sowie den magnetischen Geräuschen zu unterscheiden. Luft- und Lagergeräusche hängen von der Drehzahl der Maschine ab.

Mehr ins Gewicht fallen bei Umrichterspeisung jedoch die magnetischen Geräusche. Sie entstehen durch Kraftwellen, welche sich aus der Überlagerung von Oberwellenfeldern im Luftspalt bilden. Sie verformen das Ständerblechpaket in radialer Richtung und versetzen es dadurch in Schwingungen. Bei umrichter gespeisten Maschinen sind aus diesem Grunde Resonanzerscheinungen unvermeidbar. Derartige Resonanzüberhöhungen müssen aber zumindest bei den Betriebsdrehzahlen vermieden werden, die stationär über einen längeren Zeitraum gefahren werden.

Beim Betrieb von Motoren am I-Umrichter ist mit einem Anstieg des Geräuschpegels von 1 bis 6 dB gegenüber dem Netzbetrieb zu rechnen. Bei Speisung der Motoren durch U-Umrichter steigt der Pegel um 5 bis 15 dB .

8 Lagerströme, Wellenspannungen

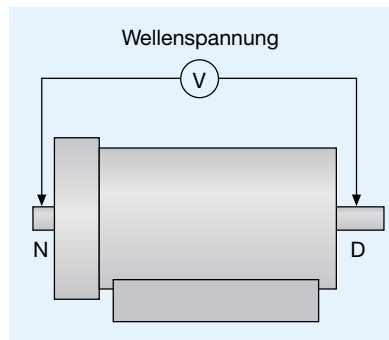
Erfahrungsgemäß sind bei umrichter gespeisten Maschinen Lagerausfälle häufiger als bei Maschinen, die am starren Netz betrieben werden. Die Ursache sind Lagerströme, welche durch unterschiedliche Arten von sogenannten Wellenspannungen erzeugt werden. Wichtig sind für umrichter gespeiste Maschinen die folgenden beiden Arten.

Induktive Wellenspannung Sie bildet sich durch Unsymmetrien bzw. Inhomogenitäten oder Sättigungserscheinungen im Motor bereits bei Betreiben am Sinus-Netz. Bei umrichter gespeisten Maschinen sind

Begriffe

Wellenspannungen, Lagerstellen

Der Name „Wellenspannung“ rührt daher, daß diese Spannung mit Meßspitzen, die dicht an den Lagerstellen von D- und N-Seite aufsetzen, gemessen wird. Wellenspannungen sind auch bei sorgfältig gebauten Maschinen kaum vermeidbar. Sie treten z. B. immer dann auf, wenn die Läufernutzahl pro Polpaar keine gerade Zahl ist. Dies ist vor allem bei höherpoligen Maschinen der Fall.



höhere Werte infolge der Vielzahl der Oberwellen im Luftspaltfeld zu beobachten.

Kapazitive Wellenpannung Diese Art der Spannung tritt bei Verwendung moderner Pulsumrichter mit hoher Taktfrequenz auf. Sie entsteht durch die kapazitive Verkopplung des Ständerpaketes mit dem Läufer-eisenpaket einer Maschine über den Luftspalt einerseits und die Rückkopplung über die Lagerbaugruppen andererseits.

Wellenspannungen im Netzbetrieb betragen 250 bis 350 mV. Diese Größen sind für die Lagerlebensdauer unkritisch. Bei umrichter gespeisten Maschinen können leicht höhere Werte auftreten. Um dann Lager-schäden zu vermeiden, ist eines der beiden Maschinenlager – gewöhnlich das der N-Seite – zu isolieren. Dadurch wird der Stromfluß Welle – Lager – Gehäuse – Lager – Welle verhindert.

Beim Aufbau eines Antriebsstranges ist zu beachten, daß durch das isolierte Motorlager die Lagerung der mechanisch gekuppelten Arbeitsmaschine oder des Getriebes nicht zerstört wird. Das wäre dann der Fall, wenn das D-seitige Motorlager isoliert wird. Die über dem isolierten Lager auftretende Spannung liegt nun, wenn die Kupplung nicht ebenfalls isoliert ist, über den Lagern der angetriebenen Arbeitsmaschine. Kapazitive Spannungen können bei einem isolierten Maschinenlager immer dann die Zerstörung des nichtisolierten Lagers einleiten, wenn noch anderweitige Fremdspannungen vorhanden sind. Hier schafft eine Erdungsbürste parallel zum nichtisolierten Lager Abhilfe. Sie reduziert die Spannung Welle – Gehäuse auf die Übergangsspannung des Bürste-Welle-Kontaktes.

Überhaupt dürfen Erdungsbürsten bei Maschinen, die nur ein isoliertes Lager besitzen, nur parallel zum nichtisolierten Lager angebracht werden. Andernfalls würde die Schutzmaßnahme gegen Lagerströme durch Wellenspannungen wieder aufgehoben. Umgekehrt soll bei Maschinen, an denen beide Lager isoliert sind, stets eine Erdungsbürste angebracht werden. Dadurch wird das Potential der Welle nicht in andere Anlagenteile verschleppt. Setzt sich bei Motoren mit zwei Wellenenden der Antriebsstrang in beide Richtungen fort, sind als Schutzmaßnahme gegen Lagerschäden durch Lagerströme an beiden Seiten Erdungsbürsten vorzusehen oder die Kupplungen zu isolieren.

9 Auswahl der Motoren für Umrichterbetrieb

Um die beschriebenen Beeinflussungen zu beherrschen, ist bei der Auswahl umrichtergespeister Motoren folgendes zu beachten.

- Stromzwischenkreisumrichter erfordern Maschinen mit kleinen Streuinduktivitäten. Ihr Kippmoment M_{kipp} muß hoch und der Anlaufstrom I_a groß sein. Der auszuwählende Motor sollte die typischen Werte $M_{kipp}/M_{nenn} \approx 3$ und $I_a/I_{nenn} \approx 10$ erreichen. Gleichzeitig ist ein hoher Leerlaufstrom (25 bis 30% des Nennstromes) erwünscht.
- Spannungszwischenkreisumrichter benötigen dagegen Motoren mit größeren Streuinduktivitäten. In diesem Fall sind Motoren mit relativ kleinem Kippmoment ($M_{kipp}/M_{nenn} \sim 1,6$ bis 2) vorzusehen.
- Wegen der Zusatzverluste im Umrichterbetrieb kann die im Katalog angegebene, für Netzbetrieb gültige Motornennleistung nicht voll ausgenutzt werden. Daher werden vom Hersteller in der Regel Leistungsabschläge vorgeschrieben. Die Reduzierung der Nennleistung um 5 bis 10 % ist notwendig. Sie kann entfallen, wenn die am häufigsten gefahrenen Lastpunkte genügend (mindestens 10 %) unter der Bemessungsleistung des Motors liegen. Außerdem kann bei der Ausführung der Isolierung in Wärme-kategorie F (maximale Übertemperatur 105 K) bei Ausnutzung B im Netzbetrieb (maximale Übertemperatur 80 K) auf die Minderung der Motorleistung verzichtet werden. In diesem Fall verfügt die Maschine über eine ausreichenden thermische Reserve von 25 K.
- Vor der Umrüstung vorhandener Antriebssysteme auf Umrichterspeisung ist zu prüfen, ob die Läuferausführung dem Einsatz am Umrichter entgegensteht. Doppelkäfigläufer, Keilstabläufer mit schmaler Stabseite oben, Druckgußläufer, in denen die Nutschlitz mit Aluminium ausgefüllt sind, eignen sich nicht.
- Motoren für IGBT-Umrichter (Pulsumrichter mit Spannungszwischenkreis) müssen über ein Isolationssystem F verfügen. Nur dann halten sie die auftretenden periodischen Spannungsspitzen aus. Vom Hersteller sollte immer eine Eignungsbestätigung eingeholt werden, da sie nur im Ausnahmefall im Katalog erklärt ist. In der 400 V-Ebene (Zwischenkreisspannung 560 V) können zu-meist jedoch ohne Bedenken Maschinen neuerer Produktion mit der bei Normmotoren üblichen Isolation (Klasse F) eingesetzt werden.

Für ältere Maschinen sowie für vom Hersteller nicht als umrichterfest bestätigte Motoren ist im Rahmen der Projektierung des Antriebssystems die kritische Kabellänge l_k nach Abschnitt 6 zu errechnen. Wird sie überschritten, muß unbedingt eine Filterschaltung eingesetzt werden. Ihre Dimensionierung bzw. Auswahl hat zweckmäßig zusammen mit dem Lieferanten des Glättungsgliedes, das

häufig als Umrichterzubehör angeboten wird, zu geschehen. Außerdem ist die Bemessungsleistung gemäß Abschnitt 4 zu mindern.

- Grundsätzlich sollte ein Motorlager isoliert sein. Da Kataloge dieses Merkmal nicht ausweisen, muß bei dieser Position ebenfalls die ausdrückliche Bestätigung durch den Lieferer erfolgen. Sind beide Motorlager isoliert, ist eine Erdungsbürsten vorzusehen.
- Für Geräusch- und Schwingungsanregungen lassen sich aus üblichen Motor- bzw. Antriebsparametern keine Vorhersagen treffen. Der Anhebung des Geräuschpegels muß durch äußere Dämmmaßnahmen begegnet werden. Resonanzstellen sind empirisch zu ermitteln und aus dem Betriebsregime auszuklammern.
- Für drehzahlverstellbare Pumpen- oder Lüfterantriebe (Drehzahlstellbereich < 60 %) eignen sich eigenbelüftete Motoren. Für Antriebe, die in einem weitem Drehzahlbereich (≥ 50 %) mit konstantem Lastmoment arbeiten, sind fremd-belüftete Motoren zwingend. Geringe Stellbereiche (< 40 %) erlauben aber auch bei dieser Lastart Selbstbelüftung.

10 Zusammenfassung

Drehstrom-Asynchronmotoren werden bei Umrichterspeisung durch höhere Verluste, Pendelmomente, periodisch einwirkende Überspannungen und Wellenspannungen zusätzlich beansprucht. Dabei bedeuten Pendelmomente, Geräusche und Wellenspannungen eine Belastung des gesamten Antriebssystems bzw. der Umgebung, also nicht nur des Motors. Die negativen Einflüsse lassen sich durch spezielle Motorauslegungen und vor allem durch richtige Motorauswahl und Antriebsprojektierung klein halten.

Literatur:

- [1] Greiner, H.: Drehstrom-Käfigläufermotoren im Umrichter-Betrieb. Elektropraktiker, Berlin 50(1996) H. 12, S. 1034 – 1039
- [2] Vorndran, E.: Magnetische Felder in elektrischen Maschinen. Elektropraktiker, Berlin 52(1998) H. 8, Magazin LuK S. 9 – 11
- [3] Kabisch, H.: Zeitgemäße Antriebslösungen. Elektropraktiker, Berlin 52(1998) H. 9, S. 860 – 865
- [4] VEM-Katalog Drehstrom-Asynchronmotoren für Niederspannung



Weiterführende Literatur befindet sich im Internet.