

Sanftanlaufgeräte im Einsatz

W. Mierke, Panitzsch

Werden Asynchronmaschinen ohne Zusatzeinrichtung wie etwa Frequenzumrichter direkt an die Versorgungsnennspannung geschaltet, kommt es zu Ausgleichs- und damit zu Einschwingvorgängen beim Strom und besonders beim Drehmoment. Um unzulässige mechanische Belastungen des gesamten Antriebsstrangs zu minimieren bzw. zu vermeiden, werden sogenannte Sanftanlaufgeräte angeboten, deren Einsatz dieser Beitrag beschreibt.

1 Einführung

In der Leistungselektronik hat sich in den letzten Jahrzehnten ein enormer Fortschritt vollzogen. Insbesondere die Entwicklung immer neuer und leistungsfähiger Halbleiterbauelemente, aber auch gesteigerte Möglichkeiten der Informationselektronik wie schnellere Rechentechnik, schnellere und kostengünstige Informationsübertragung durch Feldbustechnik und Fortschritte bei den Regelungs- und Steuerungsalgorithmen haben dies zusammen mit gesunkenen Preisen für leistungselektronische Geräte bewirkt. Leistungselektronische Geräte teilt man in vier Hauptgruppen ein. Dies sind

- **Gleichrichter**, wandeln eine Wechsel- oder Dreiphasenspannung ungesteuert oder gesteuert in eine Gleichspannung
- **Gleichstrom-Pulssteller**, auch **DC-Chopper** genannt, wandeln eine konstante Gleichspannung in eine steuerbare Gleichspannung
- **Wechsel- oder Drehstromsteller**, wandeln eine konstante Wechsel- oder Dreiphasenspannung in eine steuerbare Wechsel- oder Dreiphasenspannung ohne die Frequenz zu verändern
- **Wechselrichter und Frequenzumrichter**, wandeln eine Gleichspannung (bzw. mit vorgeschaltetem Gleichrichter eine Wechsel- oder Dreiphasenspannung) in eine meist dreiphasige Spannung veränderbarer Amplitude und Frequenz

Die ersten praktisch verwertbaren leistungselektronischen Geräte waren seit den 60er-Jahren des letzten Jahrhunderts die Gleichrichter. Sie wurden und werden vor allem für den Betrieb geregelter Gleichstromantriebe verwendet. Wird die Einrichtung durch eine Gleichspannung gespeist (z. B. bei Batterie-fahrzeugen), tritt an die Stelle des Gleichrichters der Gleichstrompulssteller.

Zunehmend bessere Technik und stetig sinkende Preise bei Frequenzumrichtern er-

möglichten den Einsatz von Asynchron- und Synchronmaschinen für gesteuerte und geregelte Antriebe. Gegenüber Gleichstrommaschinen weisen Asynchron- und Synchronmaschinen einige Vorteile auf, weshalb die Gleichstrommaschine zunehmend verdrängt wurde und noch wird.

Oftmals ist gerade beim Einsatz der robusten, wartungsarmen und kostengünstigen Asynchronmaschine mit Käfigläufer keine Steuerung oder Regelung der Drehzahl erforderlich. Probleme können jedoch beim Anlauf auftreten. Zu deren Lösung können vor allem leistungselektronische Sanftanlaufgeräte helfen, die das Prinzip des Drehstromstellers nutzen. Der technisch sinnvolle Einsatz dieser Geräte soll hier beschrieben werden, wozu die Anlaufvorgänge bei der Asynchronmaschine mit und ohne Anwendung von Sanftanlaufgeräten an Hand von Computersimulationen erläutert werden.

Allen Simulationen liegt ein Drehstrom-Asynchronmotor mit den folgenden Daten zu Grunde:

Nennleistung	11 kW
Nenndrehzahl	1460 min ⁻¹
Nennspannung	400 V
Nennstrom	20,9 A

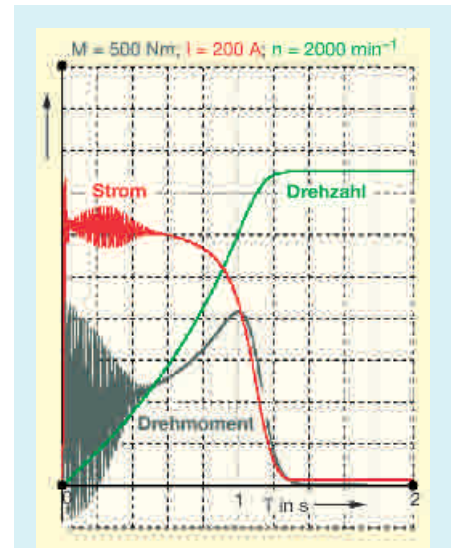
Das für den Anlauf wichtige motorbezogene **Gesamtragemoment** wurde mit 1 kgm² angenommen.

Sämtliche Anlaufvorgänge wurden im Leerlauf simuliert.

2 Anlaufvorgang bei Asynchronmaschinen

2.1 Anlaufdrehmoment und -strom

Bei der Asynchronmaschine wird der das Drehmoment bildende Läuferstrom durch die im Läufer induzierte Spannung angetrieben. Da die Frequenz von Strom und Spannung des Läufers im Stillstand der Maschine und bei kleiner Drehzahl gleich bzw. annähernd gleich der Netzfrequenz ist, kommt es in diesem Betriebszustand auf Grund der Streuinduktivität zu einer zeitlichen und damit auch räumlichen Verschiebung zwischen Fluss und Strom. Dadurch wird das Drehmoment im Anlauf klein gegenüber dem Kippmoment. Dieser Effekt kann durch besondere Formgebung des Quer-



1 Direktanlauf einer Asynchronmaschine

schnittes der Läuferstäbe gemildert werden. Eine Vergrößerung des Anlaufdrehmomentes ist durch Speisung aus einem Frequenzumrichter möglich, was jedoch nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrages ist.

Im Bild 1 sind der Verlauf von Drehmoment (grau), Strom (rot) und Drehzahl (grün) bei einer Direkteinschaltung an Nennspannung simuliert worden. Es wird sichtbar, dass (abgesehen von den im nächsten Abschnitt beschriebenen netzfrequenten Schwingungen des Drehmomentes kurz nach dem Einschalten) das Drehmoment mit wachsender Drehzahl bis zum Kippmoment ansteigt. In der Simulation beträgt dies 210 Nm, etwa das dreifache des Nenndrehmomentes von 71 Nm.

Ein Hauptproblem ist der Anlaufstrom. Asynchronmaschinen verlangen einen hohen Anlaufstrom, der je nach Nennleistung und Auslegung der Maschine das 5- bis 8fache des Nennstromes betragen kann. In vielen Fällen ist es unzulässig, diesen Strom dem Netz zu entnehmen, da dies Spannungseinbrüche zur Folge haben kann, welche wiederum andere Verbraucher beeinflussen. Hier sind die technischen Anschlussbedingungen (TAB) der jeweiligen Energieversorger zu beachten.

Der hohe Anlaufstrom von Asynchronmaschinen wird durch die erwähnte räumliche Verschiebung zwischen Strom und Fluss und durch den daraus resultierenden hohen Blindstrom verursacht.

In der Simulation beträgt der Anlaufstrom etwa 125 A, das ist das sechsfache des Nennstromes. Ist für den Netzanschlusspunkt ein solcher Anlaufstrom zulässig, kann die Asynchronmaschine direkt an Netzspannung eingeschaltet werden. Der Anlaufvorgang im Leerlauf ist dann nach rund 1,3 s beendet. Ansonsten sind Maßnahmen zur Senkung des Anlaufstromes erforderlich.

Autor

Prof. Dr.-Ing. habil. W. Mierke leitet ein Ingenieurbüro für Elektrotechnik und Automatisierungstechnik, Panitzsch.

2.2 Drehmomentschwingungen beim Einschalten

Es ist bekannt, dass das direkte Einschalten der Netzspannung bei Asynchronmaschinen Drehmomentschwingungen verursacht, deren Amplitude das Kippmoment übersteigen kann (vergleiche Bild ❶). Dadurch werden Bauteile der angetriebenen Maschine (z. B. Kupplungen, Rädergetriebe, Zahnriemen, Ketten und Seile bei Hebezeugen) mechanisch erheblich beansprucht. So verschleifen diese Teile vorzeitig oder werden zerstört, wenn sie nicht für diese Belastungen (über-) dimensioniert sind. Wird eine Gleichstrom- oder eine Synchronmaschine eingeschaltet, kann davon ausgegangen werden, dass die Erregung vor dem Ankerkreis eingeschaltet wurde. Der magnetische Fluss ist damit bereits vorhanden, bevor die Ankerspannung ansteht. Bei der Asynchronmaschine ist dies prinzipiell nicht der Fall, da es keine explizite Erregung gibt und der Ständerstrom sowohl den magnetischen Fluss als auch das Drehmoment bilden muss. Das führt dazu, dass es beim Einschalten der Asynchronmaschine zu einem Übergangsvorgang kommt. Dieser verursacht die beschriebenen Schwingungen des Drehmoments. Ohne Messgeräte sind sie oft nicht feststellbar, da sie meist rasch abklingen, sich wegen der mechanischen Trägheit praktisch nicht als Drehzahlschwingungen manifestieren und die damit verbunden Stromschwingungen gering sind.

3 Verbessern des Anlaufverhaltens

3.1 Prinzip des Anlaufs mit verminderter Spannung

Wird die Spannung beim Anlauf einer Asynchronmaschine abgesenkt, führt dies in gleichem Maße zu einer Verminderung des Anlaufstromes. Es ist allerdings zu beachten, dass dies in jedem Falle eine Verminderung des Anlaufdrehmomentes zur Folge hat. Diese Drehmomentsenkung während des Anlaufs führt zu einer Verlängerung des Anlaufvorganges.

Voraussetzung für einen technisch sinnvollen Einsatz des Anlaufs mit verminderter Spannung ist damit, dass beim Anlauf der Asynchronmaschine nur ein geringes Drehmoment benötigt wird. Das ist bei Lüftern und Fliehkraftpumpen stets der Fall.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist gegeben, wenn der Antrieb immer im Leerlauf angefahren wird wie z. B. bei Hauptantrieben von Werkzeugmaschinen oder wenn durch steuerungstechnische Maßnahmen das Anfahren unter Last ausgeschlossen werden kann wie bei manchen Fördereinrichtungen.

Hier können auch Antriebe eingeordnet werden, bei denen die Belastung fast ausschließlich durch die Beschleunigung der bewegten Massen entsteht wie bei Zentrifugen und Horizontal-Fördergeräten.

3.2 Stern-Dreieck-Anlauf

Das bekannteste Verfahren zur Senkung des Anlaufstromes ist der Stern-Dreieck-Anlauf. Dazu wird die Asynchronmaschine, deren Nennspannung bei Dreieckschaltung gleich der Netzspannung ist, zunächst in Sternschaltung eingeschaltet. Damit beträgt die Strangspannung nur $1/\sqrt{3}$ der Strang-Nennspannung. Deshalb erreichen im Stillstand der Strangstrom nur $1/\sqrt{3}$ und der Leiterstrom nur $1/3$ der Werte, die in Dreieckschaltung erreicht würden.

Diese einfache und kostengünstige Lösung des Anlaufstrom-Problems kann unter Beachtung des für den Antrieb erforderlichen Anlaufdrehmomentes angewendet werden, das auf $1/3$ des in den Datenblättern angegebenen Anlaufdrehmomentes für Nennspannung absinkt.

Nach Bild ❷ beträgt der Anlaufstrom unter sonst gleichen Bedingungen nur noch rund 40 A gegenüber 125 A bei der Direkteinschaltung nach Bild ❶. Das Kippmoment sinkt von 210 Nm nach Bild ❶ auf rund 70 Nm. Dadurch verlängert sich der Anlaufvorgang auf etwa 3,6 s.

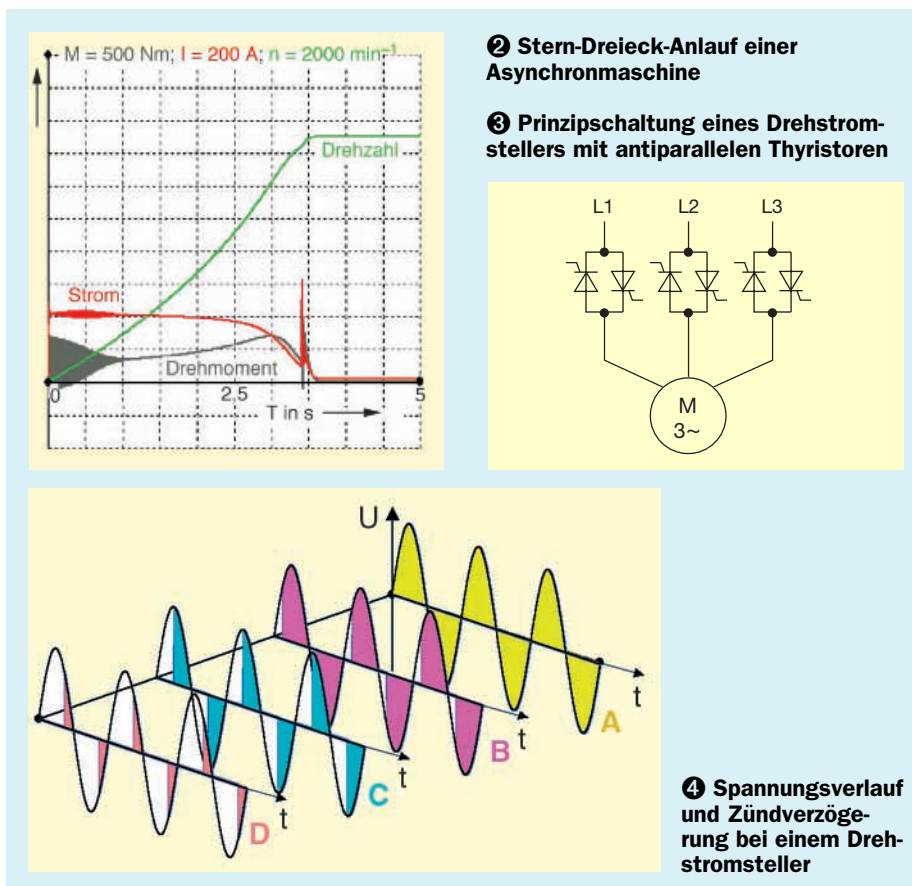
Es sollte beachtet werden, dass die erläuterten Drehmomentschwingungen durch den Stern-Dreieck-Anlauf nicht unterdrückt werden können. Sie treten einmal beim Einschalten in Sternschaltung und dann auch bei der Umschaltung auf Dreieckschaltung auf (Bild ❷). Aus diesen Gründen ist die Stern-Dreieck-Anlaufschaltung für Antriebe mit Schweranlauf nicht geeignet und für solche, die häufig angelassen werden und empfindliche mechanische Bauteile aufweisen, nicht vorteilhaft.

3.3 Einsatz von Drehstromstellern

3.3.1 Aufbau und Wirkungsweise von Drehstromstellern

In der modernen Antriebstechnik kann vorteilhaft der Drehstromsteller (eigentlich wird die Spannung gesteuert!) eingesetzt werden. Mit ihm ist es möglich, die Betriebsspannung der Asynchronmaschine stetig – insbesondere während des Anlaufs – zu verändern und damit die oben genannten Probleme in vielen Fällen wirtschaftlich zu lösen. Die Industrie bietet heute anschlussfertige Geräte dieser Art mit verschiedenen Handelsbezeichnungen wie Sanftanlaufgeräte, Softstarter oder Anlaufstrombegrenzer an. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit den Möglichkeiten des Einsatzes solcher Geräte.

Es sind verschiedene Schaltungsvarianten für Drehstromsteller bekannt. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, in jeder der drei Phasen der Zuleitung zur Asynchronmaschine ein Paar von antiparallelen Thyristoren anzuordnen (Bild ❸). Für jede Stromrichtung ist ein Thyristor vorgesehen, da der Thyristor den Strom nur in einer Richtung führen kann. Er wird jedoch erst dann leitend, wenn er



durch einen kurzen Stromimpuls in das Gate („Zündimpuls“) „gezündet“ wurde. Dies kann bereits dann geschehen, wenn die jeweilige Halbperiode der Spannung beginnt (Bild 4A). Dann steht die volle Netzspannung an der Asynchronmaschine zur Verfügung. Werden die Thyristoren jeweils verspätet gezündet, wird der Strom in der jeweiligen Richtung erst später fließen, wenn der andere Thyristor gezündet wird. Die für das Drehmoment wesentliche Grundschwingung der Spannung wird kleiner. Die Bilder 4B bis 4D zeigen die an der Asynchronmaschine verfügbare Spannung bei zunehmender Verzögerung der Zündung der Thyristoren.

Auf diese Weise lässt sich mit einem Drehstromsteller die Ständerspannung von Asynchronmaschinen stetig einstellen.

Bei dieser Ausführung eines Drehstromstellers ist es nachteilig, dass der dem Netz entnommene Strom erheblich von der Sinuskurvenform abweicht und durch die Art der Steuerung auch eine schnell veränderliche Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auftreten kann. Dies kann zu einer Verzerrung der Spannungskurvenform bzw. bei größerer Leistung zu Stabilitätsproblemen im Netz führen. Entsprechende gesetzliche Vorschriften (EMV-Gesetz) und Normen sind einzuhalten. Deshalb sind heute auch andere Schaltungen bekannt, die weniger so genannte Netzrückwirkungen verursachen. Sie arbeiten mit ausschaltbaren Bauelementen, so genannten IGBT, beeinflussen die Spannungskurvenform wenig und werden so gesteuert, dass keine unzulässigen Phasenverschiebungen auftreten (power factor control, PFC). Bei der Planung sollten diese Gesichtspunkte berücksichtigt werden.

Anschlussfertige Geräte die diese Prinzipien nutzen, werden im Weiteren als Sanftanlaufgeräte bezeichnet.

3.3.2 Reduzieren der Drehmoment-schwingungen

Die Schwingungen des Drehmomentes bei der Direkteinschaltung einer Asynchronmaschine lassen sich wirksam bekämpfen, wenn die Ständerspannung nicht sprunghaft zugeschaltet wird, sondern beim Einschalten der Asynchronmaschine stetig ansteigt. Theoretisch erreicht man schon bei einer Anstiegszeit von 40 ms bis zum Erreichen der Nennspannung eine wirksame Reduzierung. Praktisch sind Anstiegszeiten ab etwa 0,1 s (Bild 5). Dieser stetige Anstieg der Ständerspannung ist mit einem Sanftanlaufgerät realisierbar.

Von dieser Möglichkeit des Einsatzes eines Drehstromstellers kann Gebrauch gemacht werden, wenn mechanisch empfindliche Antriebe häufig angelassen werden, jedoch kein Grund besteht, den Anlaufstrom zu senken oder das Anlaufdrehmoment generell zu reduzieren. Die Anlaufzeit wird bei der kurzen Anstiegszeit der Spannung praktisch nicht verlängert (vgl. Bild 1).

Bei einem Antrieb, der mit einem (nach dem Kippmoment des Motors ausreichend dimensionierten) Stahlseil eine relativ große Masse zieht, wurde das häufige Reißen des Seiles beobachtet. Nach dem Einsatz eines Sanftanlaufgerätes für den Anlauf des Motors trat diese Erscheinung nicht mehr auf.

3.3.3 Verminderung des Anlaufstroms durch Spannungssteuerung

Soll der Anlaufstrom wirksam gesenkt werden, ist eine erheblich längere Anstiegszeit der Spannung erforderlich. Es zeigt sich jedoch, dass allein durch einen langsamen linearen Spannungsanstieg eine wirksame Senkung des Anlaufstromes bei vertretbarer Anlaufzeit nicht erreicht werden kann (Bild 6), da der Motor bei kleiner Spannung nur ein kleines Drehmoment entwickelt und deshalb noch keine genügend hohe Drehzahl hat, wenn die Spannung größer wird.

Bild 6 zeigt, dass trotz der Wahl einer Anstiegszeit der Spannung von 4 s der Anlaufstrom, der bei Direkteinschaltung 125 A betrug (Bild 1), nur auf etwa 95 A gesenkt werden konnte, während die Anlaufzeit von 1,3 s auf 4 s gestiegen ist.

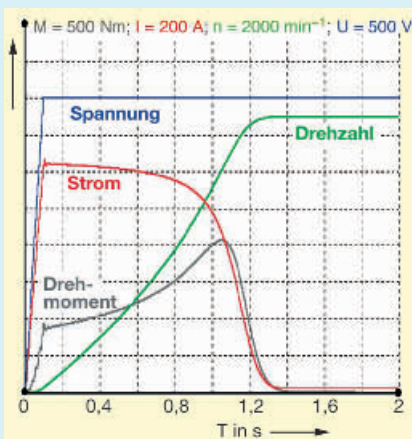
Günstiger ist die zweistufige Anstiegsrampe der Spannung nach Bild 7. Bei etwa 2,5 s Anlaufzeit beträgt der Maximalwert des Anlaufstromes auch nur etwa 95 A. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist für die optimale Parametrierung eines Sanftanlaufgerätes wichtig. Unter Parametrierung versteht man hier die Einstellung aller Vorgabewerte für die Steuerung und Regelung der Geräte.

3.3.4 Verminderung des Anlaufstroms durch Stromregelung

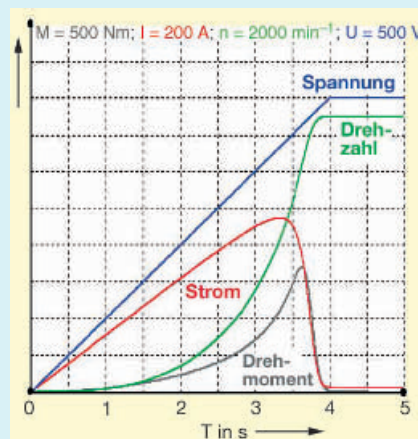
Die exakte Einhaltung eines bestimmten Anlaufstromes ist mit einer Stromregelung möglich. Der Regler stellt die Spannung stets so ein, dass der vorgegebene Sollwert des Anlaufstromes (der meist mit den Parametern des Gerätes bei der Inbetriebnahme eingestellt werden kann) eingehalten wird. Bei dem Vorgang nach Bild 8 wurde ein Sollwert von 90 A eingestellt. Damit kann eine Anlaufzeit von 2 s erreicht werden.

Für die Regelung des Stromes sollte im Sanftanlaufgerät ein digitaler Regler integriert sein, der als PI-Regler konfiguriert werden sollte. Für die einwandfreie Funktion ist die Einstellung der Parameter Nachstellzeit und Verstärkung durch eine kundige Fachkraft erforderlich. Die zulässigen Abweichungen der Einstellungen von den Idealwerten sind hier jedoch verhältnismäßig groß.

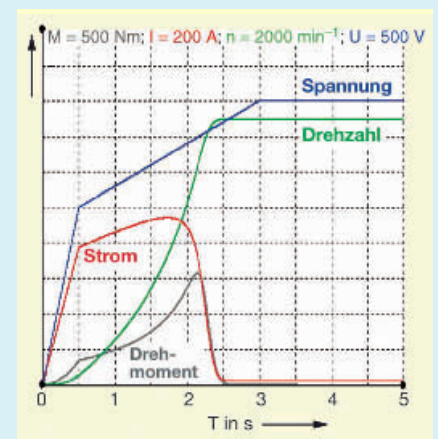
Da gerade beim Anlauf ein hoher Blindstromanteil auftritt, kann mit dieser Methode zwar ein bestimmter Scheinstrom eingehalten werden (das genügt dann den Anforderungen des Energieversorgers), es kann jedoch nicht ein bestimmtes Drehmoment für den Sanftanlauf garantiert werden.



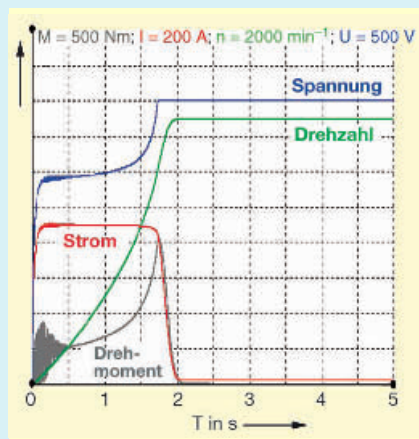
5 Spannungssteuerung beim Anlauf einer Asynchronmaschine mit Sanftanlaufgerät (1)



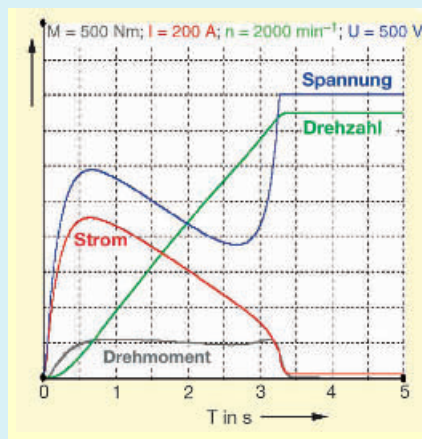
6 Spannungssteuerung beim Anlauf einer Asynchronmaschine mit Sanftanlaufgerät (2)



7 Spannungssteuerung beim Anlauf einer Asynchronmaschine mit Sanftanlaufgerät (3)



8 Regelung des Stromes beim Anlauf einer Asynchronmaschine



9 Regelung des Wirkanteils des Stromes beim Anlauf einer Asynchronmaschine

3.3.5 Sanftanlauf mit Regelung des Wirkstroms

Um ein bestimmtes Drehmoment während des Anlauf einzuhalten, müsste dies geregelt werden. Die Regelung des Drehmomentes erfordert jedoch die Messung des Drehmomentes. Wegen des damit verbundenen Aufwandes scheidet eine solche Variante meist aus.

Es kann hier empfohlen werden, an Stelle des Drehmomentes den Wirkanteil des Ständerstromes zu regeln und einen entsprechenden Sollwert vorzugeben. Zwar ist der Wirkstrom dem Drehmoment nicht exakt proportional, es gibt jedoch einen hinreichenden Zusammenhang. Der Wirkstrom kann wesentlich günstiger erfasst werden als das Drehmoment, zumal dies keine zusätzlichen Sensoren an der Maschine erfordert.

In Bild 9 wurde eine Regelung des Wirkstromes simuliert. Es wurde zunächst ein Wirkstrom-Sollwert von 5 A vorgegeben, der innerhalb von 0,1 s auf 30 A gesteigert wurde und dann konstant blieb. Durch diesen Zeitverlauf kann der Ruck klein gehalten werden. Dadurch konnte das Drehmoment während des Anlaufes bei 50 Nm etwa konstant gehalten werden. Für einen Sanftanlauf ist eine solche Methode besonders günstig, und die Verlängerung der Anlaufzeit ist erwünscht, um mechanische Übertragungsglieder zu schonen oder die technologischen Anlaufbedingungen einzuhalten. Beispielsweise ist beim Anlauf von Förderbändern in der Getränke- und Konservenindustrie oftmals gefordert, dass Flaschen und andere Behältnisse nicht umstürzen und nicht verrutschen oder Flüssigkeiten nicht verschüttet werden.

Auch bei dieser Methode der Regelung ist nach erfolgtem Anlauf eine Umschaltung oder Außerbetriebnahme des Sanftanlaufgerätes nicht zwingend erforderlich. Der Regler stellt automatisch die volle Netzspannung ein, wenn der Anlauf beendet ist und durch das Lastmoment kein höherer als der eingestellte Wirkstrom erfordert wird.

Die Regelung des Wirkstromes erfordert eine besonders sorgfältige Parametrierung des Reglers, da sie auf Grund des Verhaltens der Asynchronmaschine nur einen relativ kleinen Stabilitätsbereich hat.

4 Fazit

Sanftanlaufgeräte arbeiten nach dem Prinzip des Drehstromstellers mit Halbleiterbauelementen der Leistungselektronik. Solche Bauelemente weisen immer einen Spannungsfall von etwa 2 V beim Stromfluss auf. Dies verursacht eine bestimmte Verlustleistung. Sie ist für die Geräte nicht schädlich. Soll sie jedoch vermieden werden, bieten die meisten Anbieter die Möglichkeit, die Geräte nach erfolgtem Anlauf durch Schütze oder Schalter zu überbrücken.

Muss die Asynchronmaschine unter hoher Last anlaufen, kommt der Einsatz von Sanftanlaufgeräten zur Begrenzung des Anlaufstromes nicht in Frage, da damit immer eine Verringerung des Anlaufdrehmomentes verbunden ist. Allerdings können die Drehmomentschwingungen weitgehend beseitigt werden. Ein Schweranlauf großer Asynchronmaschinen mit netzverträglichem Anlaufstrom ist mit Frequenzumrichter möglich. ■

WEB-TIPP

- www.softstarter.net/wir.htm
- ei.huethig.de/product/012003014