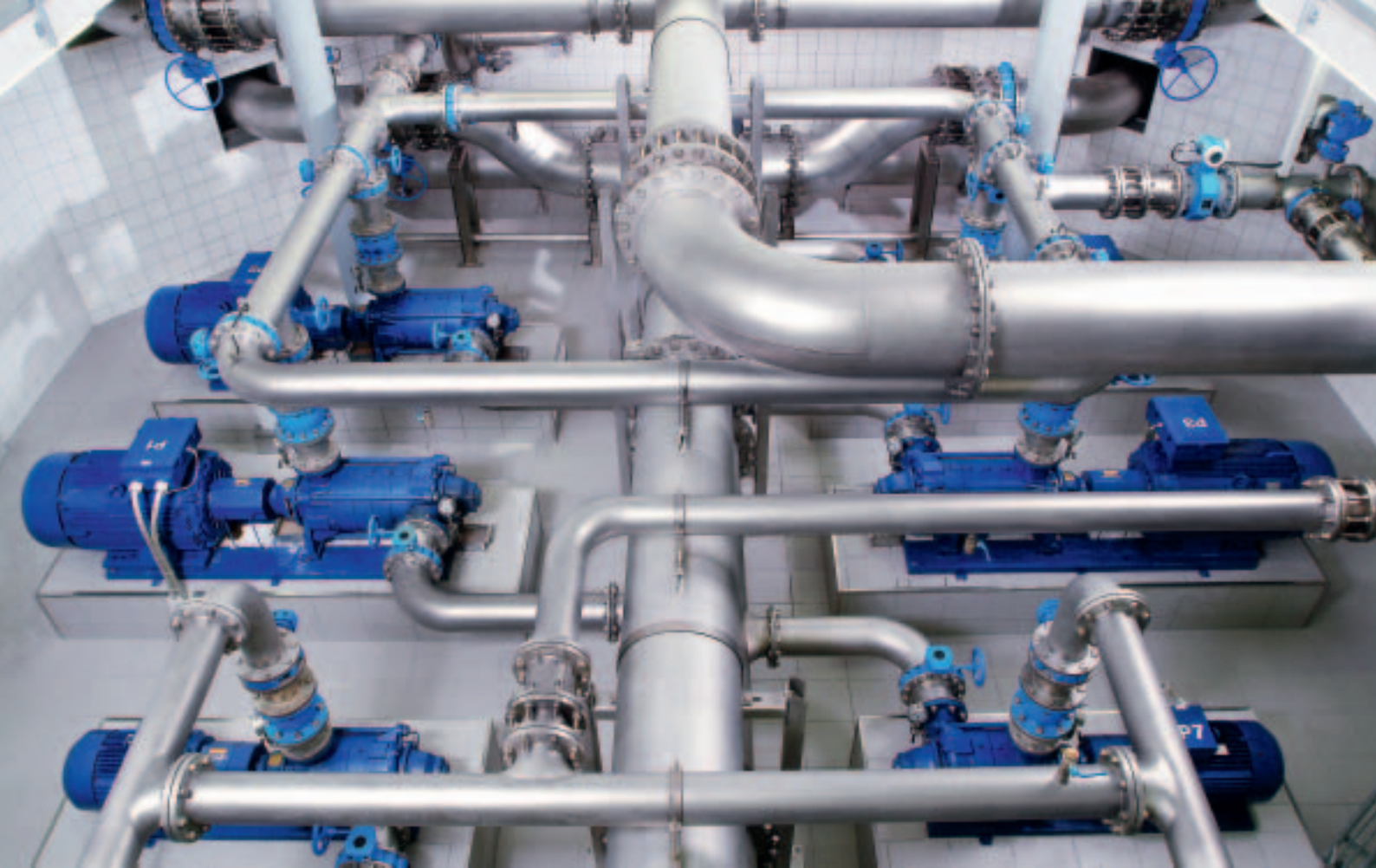


Starten und steuern von Drehstrom-Asynchronmotoren



Fachaufsatz
Jörg Randermann



Vorwort

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist der weltweit am meisten eingesetzte Elektromotor in industriellen Anlagen und großen Gebäuden. Einfach in Aufbau und Handhabung, flexibel in unterschiedlichen Einsatzbereichen und kostengünstig im Betrieb. Er ist qualitativ und preislich die günstigste Antriebslösung.

Charakteristisch für den Drehstrommotor ist die hohe Strombelastung im speisenden Netz beim direkten Einschalten. Durch das Anlegen der vollen Spannung entstehen hohe Anlauf- und Stoßströme, mit störenden Spannungseinbrüchen im Netz und starken Stoßmomenten in der Mechanik.

Seit der Erfindung des Drehstrommotors – vor über 100 Jahren (1889) – wurden Lösungskonzepte für das Anlassen entwickelt, welche die unangenehmen Nebenerscheinungen eliminieren sollten. Doch welche dieser Lösungskonzepte den Wunsch nach einem zufrieden stellenden Start- und optimalem Betriebsverhalten erfüllen, entscheiden die Anwendungen (Applikationen) und letztendlich auch die wirtschaftlichen Betrachtungen.

Zur vereinfachten Übersicht werden hier die vier wichtigsten und in der Praxis bekanntesten Anlaufmethoden zum Starten und Steuern der Drehstrom-Asynchronmotoren vorgestellt. Dabei wird bewusst auf detaillierte Beschreibung der Geräte und Funktionen verzichtet und allgemeine Grundkenntnisse der elektrischen Antriebstechnik vorausgesetzt.

Startvarianten für den Drehstrom-Asynchronmotor

Der Drehstrom-Asynchronmotor wird in Bezug auf Konstruktion und Schaltart seines passiven Läufers auch Käfigläufer oder Kurzschlussläufer (-motor) genannt. Vergleichbar einem rotierenden Transformator und gemäß seiner Wirkweise ist aber auch die Bezeichnung Induktionsmotor üblich. Ausführungen mit getrennten Statorwicklungen werden als Dahlandermotor bezeichnet. Eine weitere Ausprägung ist der Schleifringläufer (-motor). Hier sind die Wicklungen des Läufers über drei Schleifringe herausgeführt und werden erst außerhalb des Motors über Widerstände kurzgeschlossen.

So vielfältig die Ausprägungen und Benennungen beim Asynchronmotor sind, so vielfältig sind auch die jeweiligen Motorabgänge zum Starten und Steuern. Zur vereinfachten Übersicht werden hier nachfolgend vier der bekanntesten und wichtigsten Motorabgänge betrachtet. Bei der Einspeisung ein dreiphasiges, mittelpunktgeerdetes Wechselstromnetz (3 / N / PE / AC 50/60 Hz) zugrunde gelegt.

Für die hier nachfolgend aufgeführten Startvarianten bietet Eaton Moeller das komplette Programm im Motorabgang zum Schalten, Schützen und Steuerung von Drehstrom-Asynchronmotoren.

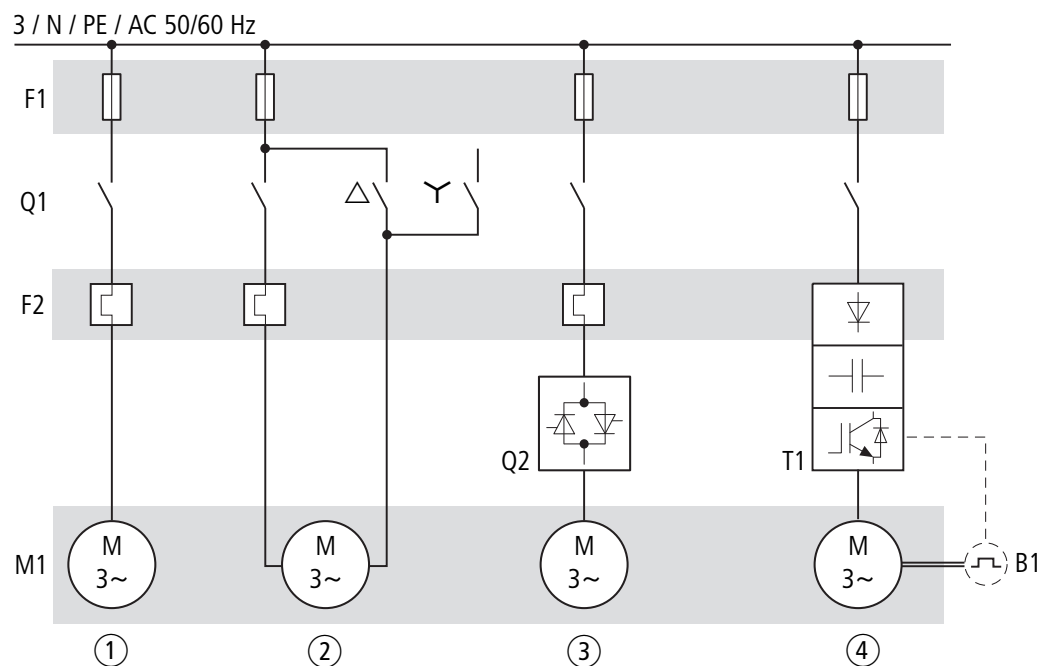


Abbildung 1: Motorstartvarianten

F1 = Absicherung (Kurzschluss- und Leitungsschutz)

Q1 = Schalten (Leistungsschutz, Motorschutz)

F2 = Motorschutz (Schutz vor thermischer Überlast, Motorschutzrelais)

M1 = Drehstrom-Asynchronmotor

- ① Direkter Motorstart.
- ② Stern-Dreieck-Starter, die bekannteste und am meisten angewandte Startvariante.
- ③ Softstarter (Q2), der kontinuierliche und stufenlose Motorstart. Eine moderne, elektronische Alternative zum Stern-Dreieck-Starter.
- ④ Frequenzumrichter (T1), geführter, stufenloser Motorstart mit Nennmoment. Frequenzumrichter ermöglichen zudem eine stufenlose Drehzahlsteuerung und haben einen elektronischen Motorschutz (I²t) integriert. Je nach Ausprägung ermöglichen sie auch die genaue Drehzahlregelung (Option, Impulsgeber B1) beim sonst schlupfabhängigen Asynchronmotor.

Anschlusschaltung des Drehstrommotors

Beim Anschluss des Drehstrommotors am elektrischen Netz müssen die Daten auf dem Leistungsschild mit der Netzspannung und der Netzfrequenz übereinstimmen. Der Anschluss erfolgt dabei über sechs Schraubenverbindungen (Standardaus-

führung) im Klemmkasten des Motors und unterscheidet zwei Grundschaltungen, die Stern- und die Dreieckschaltung. Beispiel für eine Netzanschlussspannung 3 AC 400 V, 50 Hz (siehe Abbildung 2)

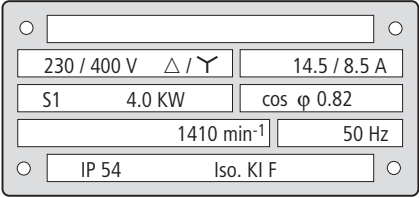
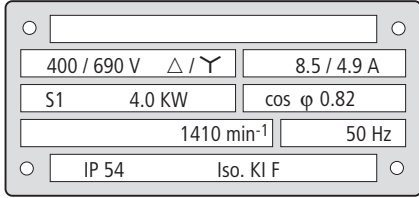
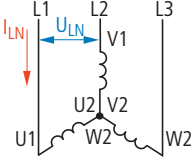
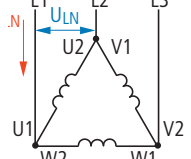
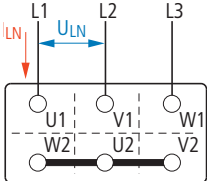
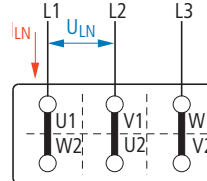
Sternschaltung		Dreieckschaltung	
			
			
$U_{LN} = \sqrt{3} \cdot U_w$		$U_{LN} = U_w$	
$I_{LN} = I_w$		$I_{LN} = \sqrt{3} \cdot I_w$	
			
<ul style="list-style-type: none"> Mit seiner Spannungsangabe von 230/400 V muss dieser Motor in der Sternschaltung am Drehstromnetz ($U_{LN} = 400$ V) angeschlossen werden. Die Spannung einer Motorwicklung ist hier für eine maximale Spannung von 230 V ausgelegt. Die drei Wicklungsstränge (W2-U2-V2) sind im Klemmkasten zum so genannten Sternpunkt zusammen gefasst. Die Spannung der einzelnen Phasen zum Sternpunkt ist 230 V. 		<ul style="list-style-type: none"> Mit seiner Spannungsangabe von 400/690 V muss dieser Motor in der Dreieckschaltung am Drehstromnetz ($U_{LN} = 400$ V) angeschlossen werden. Jede Motorwicklung ist hier für die maximale Phasenspannung von 400 V ausgelegt und kann direkt angeschlossen werden. Für den Direktanlauf werden im Klemmkasten die Enden der Wicklung zusammengefasst (U1-W2, V1-U2, W1-V2) und mit den einzelnen Phasen verbunden. 	

Abbildung 2: Motor-Anschlusschaltungen, Rechtslauf

Generell sind die Eigenschaften eines Drehstrommotors in Normen festgelegt (DIN/VDE 0530, IEC/EN 60034). Konstruktive Möglichkeiten zur Ausführung bleiben den Herstellern dennoch. So findet man beispielsweise im preissensiblen Markt kleinere Motorleistungen (<4 kW) – und hier besonders bei Pumpen und Lüftern – immer wieder Motoren ohne Klemmkasten. Hier sind die Wicklungen dann bereits im Motor zum Sternpunkt verbunden und nur drei Anschlussleitungen für die zugeordnete Bemessungsspannung werden herausgeführt.

Unabhängig von der Ausführung (mit/ohne Klemmkasten) müssen die Anschlüsse des Drehstrommotors so gekennzeichnet sein, dass deren alphabetische Reihenfolge (z.B. U1, V1, W1), der zeitlichen Phasenfolge der Netzspannung (L1, L2, L3) entsprechen und beim Motor einen Rechtslauf bewirken. Der Drehsinn wird dabei mit Blick auf die Antriebsseite (Welle des Motors) angegeben. Bei Motoren mit zwei Wellenenden ist die Antriebsseite mit D, die Nichtantriebsseite mit N gekennzeichnet (D = Drive, N = No drive). Der Linkslauf des Drehstrom-

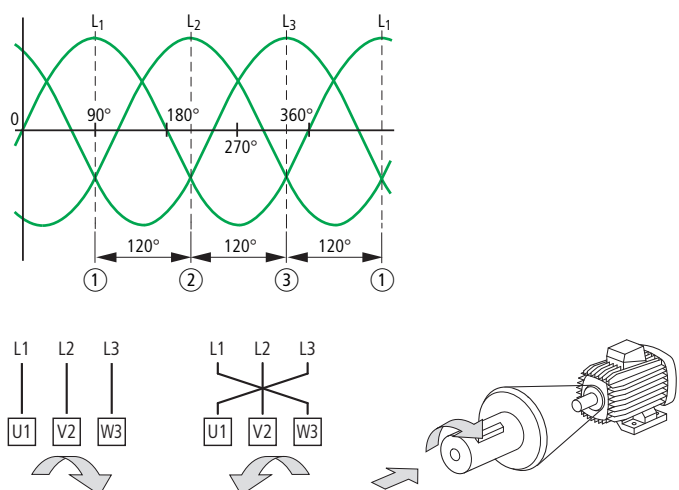


Abbildung 3: Rechtsdrehung: Phasenfolge – Anschlussklemmen – Antriebsseite

motors wird durch Vertauschen zweier Anschlussleitungen (Netzphasen) erreicht.

Der Arbeitspunkt (M_M) des Drehstrom-Asynchronmotors ist durch den Bereich der Bemessungsspannung und der zugehörigen Frequenz beschrieben (z.B. 400V/50 Hz). Die Drehzahl wird dabei durch die Frequenz des speisenden Netzes bestimmt ($n \sim f$). Sie ist lastabhängig und wird nur so lange beibehalten, wie Motormoment (M_M) und Lastmoment (M_L) gleich groß sind.

Die elektrischen und mechanischen Bemessungsdaten des Arbeitspunktes müssen im Leistungsschild des Motors dokumentiert sein. Während des Anlassvorgangs (Beschleunigungsvorgang) sind die Betriebsdaten instabil. Ein stationärer Betrieb des Antriebes ist nur im Bereich des Arbeitspunktes (M_M) zulässig.

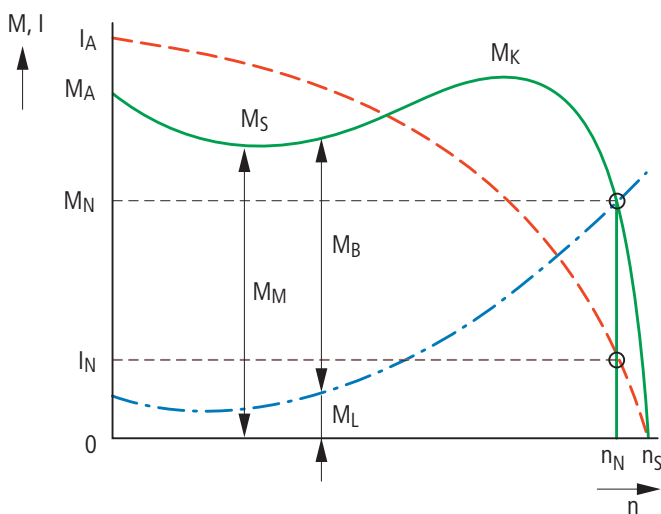


Abbildung 4: Charakteristische Anlaufkennlinie des Drehstrom-Asynchronmotors

- I_A = Anlaufstrom
- I_N = Nennstrom im Arbeitspunkt
- M_A = Anlaufmoment
- M_B = Beschleunigungsmoment ($M_M > M_L$)
- M_K = Kippmoment
- M_L = Lastmoment
- M_M = Motormoment (Arbeitspunkt)
- M_N = Nennmoment, stabiler Schnittpunkt der Drehmomentkennlinie mit der Lastkennlinie
- n = Drehzahl (aktueller Wert)
- n_N = Nennzahl im Arbeitspunkt
- n_s = synchrone Drehzahl ($n_s - n_N$ = Schlupfdrehzahl)

$$P = \frac{M_N \cdot n}{9550} \quad P = [\text{kW}] \quad f = [\text{Hz}] = 1/\text{sec}$$

$$M_N = [\text{Nm}] \quad n = [\text{min}^{-1}]$$

$$1 \text{ min} = 60 \text{ sec}$$

$$n = \frac{f}{p} \cdot (1 - s) \quad s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \%$$

Direkter Motorstart

Der direkte Motorstart ist die einfachste Art für das Anlassen von Drehstrom-Asynchronmotoren. Die Statorwicklungen werden dabei in einem einzigen Schaltvorgang direkt mit dem elektrischen Netz verbunden.

Durch das Anlegen der vollen Netzspannung entstehen große Anlaufströme (Stoßströme), die wiederum störende Spannungsänderungen im Netz verursachen. Die elektrischen Energieversorgungsunternehmen (EVU) begrenzen daher die zulässigen Bemessungsleistungen der Motoren am Netz. Diese Grenzwerte können von Netz zu Netz variieren. Im öffentlichen Netz gilt die Begrenzung im Allgemeinen als erfüllt, wenn der gelegentlich anlaufende Drehstrommotor eine Scheinleistung von weniger als 5,2 kVA hat oder bei höheren Scheinleistungen, der Anlaufstrom 60 A nicht überschreitet. Bei einer Netzspannung von 400 V und einem 8-fachem Anlaufstrom, entspricht dies einem Bemessungsstrom von 7,5 A bzw. einer abgegebenen Motorleistung von 4 kW (Wellenleistung).

Bei Motoren mit gelegentlich höheren Anlaufströmen als 60 A und Motoren mit Anlaufströmen von mehr als 30 A, die im öffentlichen Netz störende Rückwirkungen verursachen, z.B. durch schweren Anlauf, häufiges Schalten oder schwankende Stromaufnahme (Aufzüge, Sägegatter), müssen weitere Maßnahmen zur Vermeidung der störenden Spannungsänderungen getroffen werden. Motoren mit Leistungen über 4 kW und der Spannungsangabe 400/690 V können hier zum Beispiel über einen Stern-Dreieck-Anlauf hochgefahren werden.

Das direkte Einschalten belastet die Wicklungen des Motors thermisch und durch große, wenn auch nur kurzzeitige, elektrodynamische Kräfte. Zu häufiges, direktes Einschalten vermindert beim Standardmotor die Lebensdauer der Wicklung (z.B. periodischer Aussetzbetrieb).

Die Blockade des Läufers (festgebremster Läufer) ist im Betrieb ein ernsthafter Störfall, der zu einer thermischen Zerstörung des Drehstrom-Asynchronmotors führen kann. Zum Schutz vor einer solchen thermischen Überlastung muss jeder Motorabgang mit einer stromabhängigen Schutzvorrichtung versehen sein. Einen preiswerten Schutz gewährleisten hier Überlastrelais; besser auch bekannt als Motorschutzrelais oder Bimetall.

In Kombination mit einem Schaltantrieb werden diese Überlastrelais als Motorschutzschalter bezeichnet. Synonym hierfür ist der PKZM. Er schützt im Motorabgang die Schaltgeräte (Schütz DILM), Zuleitungen und Motorwicklungen gegen die Zerstörung durch thermische Überlast (Blockierschutz) und Kurzschluss, auch bei Ausfall eines Außenleiters (L1, L2, L3). Dazu müssen der Bemessungsstrom des Motors auf dem Motorschutzschalter eingestellt und die Anschlussleitungen im Motorabgang nach diesem Einstellwert dimensioniert werden.

Die Auslegung der Komponenten im Hauptstromkreis des Motorabgangs erfolgt gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom (I_g) des Motors und der Gebrauchskategorie AC-3 (Norm IEC/EN60947-4-1); AC-3 = Käfigläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufes.

Die Auswahl des geeigneten Motorschutzschalters ist von zentraler Bedeutung für die Funktionssicherheit und die Lebensdauer eines Motors. Die Motorstarterkombination (MSC) bietet hier für den Direktstart eine ideale Komplettlösung im Motorabgang. MSC bestehend in der Standardausprägung aus einem Motorschutzschalter PKZM0 mit Steckverbinder und einem

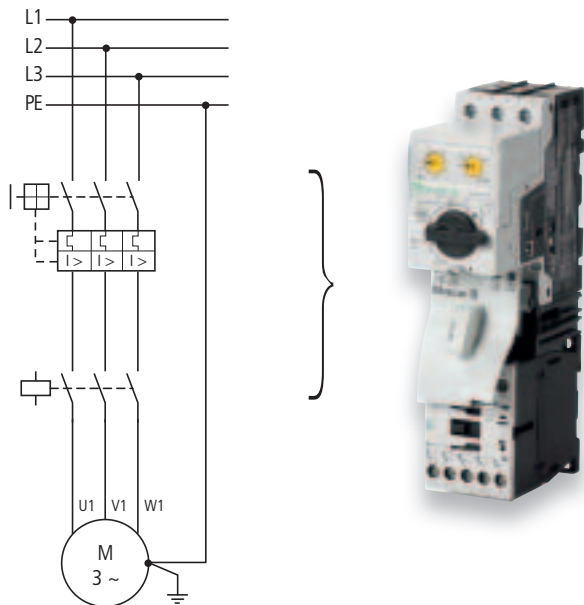


Abbildung 5: Motorabgang, Direktstarter, Rechtslauf, Beispiel MSC

Schütz DILM. In der Version MSC-DE bietet der elektronische Motorschutzschalter PKE für Motorströme bis 65 A eine innovative Alternative zur Bimetall Lösung (PKZM0). Mit hoher Flexibilität und gleichen Zubehörteilen erfüllen MSC-DE die Kundenanforderungen nach austauschbaren "Norm"-Geräten.

Stern-Dreieck-Anlauf

Beim Stern-Dreieck-Anlauf erfolgt das Anlassen des Drehstrom-Asynchronmotors durch Umschaltung der Wicklungen. Die Brücken im Klemmkasten des Motors entfallen und alle 6 Wicklungsanschlüsse werden mit der so genannten Stern-Dreieck-Schaltung (manuell betätigter Schalter oder automatische Schützschaltung) an Netzspannung gelegt.

In der Betriebsschaltung sind die Wicklungen des Motors im Dreieck geschaltet. Die Wicklungsspannung (U_w) muss daher gleich der Phasenspannung (U_{LN}) des Drehstromnetzes sein. Beispielsweise bei einer Netzanschlussspannung von 3 AC

400 V muss die Spannungsangabe im Leistungsschild des Motors 400/690 V sein.

In der Sternschaltung reduziert sich die Netzspannung (U_{LN}) an der einzelnen Motorwicklung um den Faktor $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0,58$). Zum Beispiel: $400 \text{ V} \cdot 1/\sqrt{3} = 230 \text{ V}$. Anzugsdrehmoment und Einschaltstrom werden dabei (in der Sternschaltung) auf etwa ein Drittel der Werte bei der Dreieckschaltung reduziert. Typischer Anlaufstrom: $2 \dots 2,5 I_e$.

Wegen des reduzierten Anzugsmoments eignet sich die Stern-Dreieck-Schaltung für Antriebe mit kleinem oder erst mit der Drehzahl steigendem Lastmoment (M_L) wie zum Beispiel bei Pumpen und Lüftern (Ventilatoren). Sie wird auch dort eingesetzt, wo der Antrieb erst nach dem Hochlauf belastet wird, beispielsweise bei Pressen und Zentrifugen.

Bei der Umschaltung der Schaltungsart von Stern auf Dreieck fällt der Strom auf Null und die Drehzahl des Motors nimmt je nach Belastung ab. Das Umschalten auf Dreieck bewirkt danach einen sprunghaften Anstieg des Stroms, da hier die volle Netzspannung an den Motorwicklungen anliegt. Bei schwachen Netzen entstehen dadurch Spannungseinbrüche. Das Motormoment springt beim Umschalten auf Dreieck ebenfalls auf einen hohen Wert, was den gesamten Antrieb mechanisch belastet. Werden zum Beispiel Pumpen mit Stern-Dreieck-Startern betrieben, so wird dort zur Dämpfung meistens ein mechanischer Schieber eingesetzt, um den für das System kritischen Fall „Wasserschlag“ zu verhindern.

Die automatische Umschaltung von Stern auf Dreieck steuert bei der Schützschaltung meist ein Zeitrelais. Die zeitliche Dauer des Anlaufs in der Sternschaltung ist dabei abhängig von der Belastung des Motors und sollte solange dauern, bis der Motor etwa 75 bis 80 % seiner Betriebsdrehzahl (n_N) erreicht hat, um nach dem Umschalten auf Dreieck, möglichst wenig Nachbeschleunigung leisten zu müssen. Diese Nachbeschleunigung ist in der Dreieckschaltung mit hohen Strömen wie beim Direktanlauf verbunden.

Ein zu schnelles Umschalten zwischen Stern und Dreieck kann über den Ausschaltlichtbogen (an den Schaltkontakten) einen Kurzschluss hervorrufen. Die Pausenzeit der Umschaltung

Motorschutz in Stern- und Dreieckschaltung
Bimetallrelais
 $0,58 \times I_e$
 $t_a \leq 15 \text{ s}$

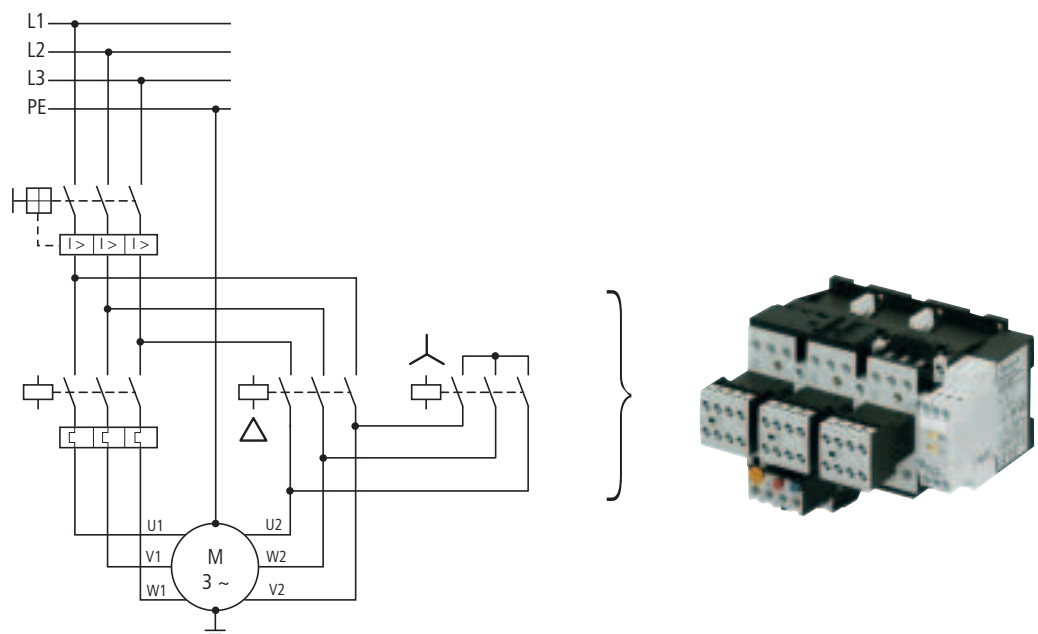


Abbildung 6: Motorabgang, Stern-Dreieck-Starter, Rechtslauf, Beispiel SDAINL

sollte daher immer so lang gewählt sein, wie für die Lichtbogenlöschung nötig ist. Die Antriebsdrehzahl sollte dabei möglichst wenig abfallen. Spezielle Zeitrelais für die Stern-Dreieck-Umschaltung erfüllen diese Anforderungen.

Beim Anschluss der Leiter an Motor und Starter muss für die Umschaltung von Stern auf Dreieck die richtige Phasenfolge beachtet werden (siehe Abbildung 6). Dabei ist auch auf die Drehrichtung des Motors zu achten. Ein falscher Anschluss der Phasen kann, bedingt durch den leichten Drehzahlabfall während der stromlosen Umschaltpause, beim Wiedereinschalten sehr hohe Stromspitzen hervorrufen. Diese Stromspitzen gefährden die Motorwicklungen und beanspruchen die Kontakte der Schaltgeräte unnötig.

Für den Anlauf in Sternschaltung verbindet erst das Sternschütz die Wicklungsenden U2, V2, W2. Anschließend schaltet das Hauptschütz die Netzspannung (U_{LN}) an die Wicklungsenden U1, V1, W1. Nach Ablauf der eingestellten Anlaufzeit schaltet das Zeitrelais das Sternschütz ab und das Dreieckschütz verbindet die Klemmen U2, V2 und W2 mit der Netzspannung.

Die Auslegung der Komponenten im Hauptstromkreis des Motorabgangs erfolgt gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom (I_b) des Motors und der Gebrauchskategorie AC-3 (Norm IEC/EN60947-4-1); AC-3 = Käfigläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufs. Das Motorschutzrelais wird dabei in den Wicklungsstrang des Hauptschützes geschaltet. Der einzustellende Strom ist deshalb um den Faktor $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0,58 \cdot I_b$) kleiner als der Nennstrom des Motors. Auch Haupt- und Dreieckschütz werden um diesen Faktor ($\sim 0,58 \cdot I_b$) kleiner ausgewählt. Das Sternschütz wird für Anlaufzeiten bis zu 15 Sekunden auf ein Drittel ($\sim 0,33 \cdot I_b$) des Motornennstroms ausgelegt. Bei Anlaufzeiten (> 15 s) bis etwa 60 Sekunden muss das Sternschütz gleich groß gewählt werden wie das Hauptschütz.

Softstarter

In vielen Fällen sind der direkte Anlauf und der stufige Stern-Dreieck-Anlauf des Drehstrom-Asynchronmotors nicht die beste Lösung, denn hohe Stromspitzen beeinflussen das elektrische Netz und Momentstöße beanspruchen stark die mechanischen Teile von Maschine oder Anlage.

Der Softstarter schafft hier Abhilfe. Er ermöglicht einen kontinuierlichen und stoßfreien Drehmomentanstieg und bietet auch die Möglichkeit einer gezielten Anlaufstromreduzierung. Die Motorspannung wird dazu innerhalb einer einstellbaren Anlaufzeit von einer gewählten Startspannung auf die Motornennspannung erhöht. Durch Spannungsverringern kann mit dem Softstarter auch der Auslauf des Antriebes gesteuert werden.

Die charakteristischen Kennlinien des Drehstrom-Asynchronmotors gelten nur dann, wenn die volle Netzspannung (U_{LN}) zur Verfügung steht. Wenn eine kleinere Spannung anliegt, verringert sich das Drehmoment quadratisch ($M \sim U^2$). Wird beispielsweise im Vergleich zum Stern-Dreieck-Anlauf die Motorspannung auf 58 % ($\sim 1/\sqrt{3}$) reduziert, verringert sich das Drehmoment auf etwa 33 % (ein Drittel).

Die Differenz zwischen Lastkennlinie (M_L) und Momentkennlinie des Motors (M_M) und damit die Beschleunigungskraft, lässt sich so durch Anpassen der Motorspannung beeinflussen. Der Softstarter ist daher vor allem bei Anwendungen mit belasteten Anläufen (Last kann nicht nach dem Hochlaufen zugeschaltet werden) der Stern-Dreieck-Schaltung vorzuziehen. Aus wirtschaftlichen Gründen und unter Berücksichtigung von Energie-

sparmaßnahmen ist er, besonders bei Antrieben mit größerer Leistung, ein Ersatz für die Stern-Dreieck-Schaltungen.

Die Motorspannung wird im Softstarter mit einer Phasenschnittsteuerung der Sinushalbwellen verändert. Dazu sind in den Phasen zwei Thyristoren antiparallel geschaltet; einer für die positive und einer für die negative Halbwelle.

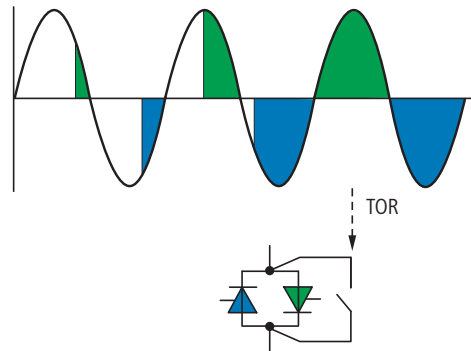


Abbildung 7: Phasenschnittsteuerung und Bypass-Kontakt

Nach Ablauf der eingestellten Startzeit (t_{start}) sind die Thyristoren voll angesteuert (volle Sinushalbwellen => Top Of Ramp: TOR).

Da die Thyristoren nur während der Hochlaufphase bzw. während der Auslaufphase aktiv sind, können sie für den statischen Dauerbetrieb durch so genannte Bypass-Kontakte überbrückt werden. Durch den deutlich geringeren Übergangswiderstand der mechanischen Schaltkontakte kann die Verlustleistung am Softstarter reduziert werden.

Beim Softstarter werden heute im Aufbau der Leistungsteile zwei grundsätzliche Varianten unterschieden (Abbildung 8).

<ul style="list-style-type: none"> • zweiphasengesteuert, • einfache Handhabung, mit drei Einstellwerten ($t_{\text{start}}, U_{\text{start}}, t_{\text{stop}}$), • zeitlich geführte, lineare Spannungsrampe, • in der Regel mit internen Bypass-Kontakten, • preiswerte Alternative zum Stern-Dreieck-Starter, • nur In-Line-Schaltung möglich, • für kleine bis mittlere Motorleistungen (< 250 kW). 	<ul style="list-style-type: none"> • dreiphasengesteuert, • für anspruchsvolle Aufgaben, • voreingestellte Applikationen (Kennlinien), • parametrierbar, • Steuer- und Regelkreise, • mit Strombegrenzung (I^2t) und Motorschutzfunktionen, • kommunikationsfähig (Feldbusanschaltung), • In-Linie- und In-Delta-Schaltung möglich, • für Motorleistung ab etwa 7,5 kW

Abbildung 8: Merkmale der Softstartervarianten

Die Hochlaufzeit eines Antriebes mit einem Softstarter ergibt sich aus den Einstellungen der Startspannung (U_{Start}) und der Rampenzeit (t_{Start}) für die lineare Erhöhung bis zur vollen Netzspannung (U_{LN}). Die Startspannung bestimmt dabei das Losbrechmoment des Motors. Hohe Startspannungen und kurze Rampenzeiten entsprechen in etwa dem Direktstart. In der Praxis wird man zuerst das erforderliche Losbrechmoment (U_{Start}) und dann eine möglichst kurze Rampenzeit (t_{Start}) für den gewünschten Sanftanlauf einstellen.

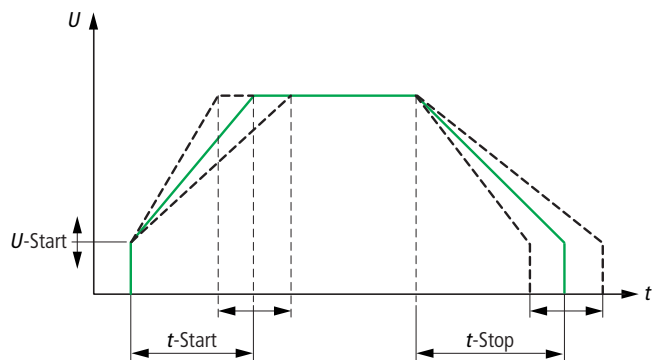


Abbildung 9: Spannungsverlauf in einem Softstarter

Die eingestellte Rampenzeit (t_{Start}) ist hierbei nicht die tatsächliche Hochlaufzeit des Antriebes. Diese ist abhängig von der Last und vom Losbrechmoment. Die Rampenzeit steuert nur die Spannungsänderung. Der Strom steigt dabei bis zu seinem Maximum an und fällt erst beim Erreichen der Bemessungsdrehzahl des Motors auf den Nennstrom zurück. Der maximale Strom stellt sich nun gemäß des Antriebes (Motor plus Last) ein und kann nicht im voraus bestimmt werden. So können stark belastete Antriebe und lange Rampenzeiten auch zu einer übermäßig starken thermischen Belastung der Thyristoren führen.

Soll ein gewisser Strom nicht überschritten werden, muss ein Softstarter mit Strombegrenzung gewählt werden. Diese Anlaufvariante wird oft von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) gefordert, wenn große Antriebe am öffentlichen Netz angeschlossen werden (z.B. Hebepumpen, Ventilatoren zur Tunnelbelüftung).

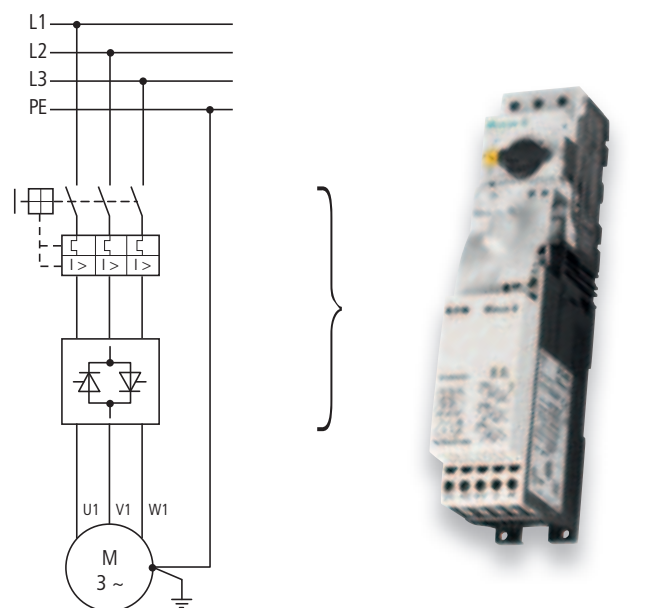


Abbildung 10: Motorabgang, Softstarter DS7, In-Linie-Schaltung, kombiniert mit PKZM0

Softstarter ermöglichen auch eine zeitlich geführte Verringerung der Motorspannungen und damit einen gesteuerten Auslauf der Motoren. Die eingestellte Auslaufzeit (t_{Stop}) muss dabei länger sein, als der lastabhängige, freie Auslauf der Maschine. Wie bei der Beschleunigung ist auch dieser Vorgang lastabhängig. Für die Thyristoren des Softstarters ist dies die gleiche thermische Belastung, wie beim Startvorgang. Wird beispielsweise bei einem Softstarter mit zulässigen 10 Starts pro Stunde auch die Verzögerung aktiviert, sind noch 5 Starts pro Stunde (plus 5 Stopps pro Stunde) zulässig. Die Stopp-Rampenzeit (t_{Stop}) kann unabhängig von der Startzeit eingestellt werden und wird häufig bei Pumpen zur Verhinderung von Druckwellen (Wasserschlag) gefordert. Aber auch ruckartige Bewegungen beim ungeführten Auslauf, die z.B. einen höheren Verschleiß an Riemen, Ketten, Getrieben und Lagern zur Folge haben, können damit verhindert werden.

Die Auslegung der Schalt- und Schutzgeräte (elektromechanische Komponenten) im Hauptstromkreis des Motorabgangs erfolgt gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom (I_e) des Motors und der Gebrauchskategorie AC-3 (Norm IEC60947-4-1). Die Auslegung des Softstarters erfolgt gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom (I_e) des Motors und der Gebrauchskategorie AC-53a oder AC-53b (Norm IEC/EN60947-4-2):

- AC-3 = Käfigläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufs.
- AC-53a = Steuern eines Käfigläufermotors: 8-Stunden-Betrieb mit Anlaufströmen für Startvorgänge, Maneuving, Betrieb.
- AC-53b = Steuern eines Käfigläufermotors: Aussetzbetrieb (Aussetzbetrieb, das heißt, der Softstarter wird im statischen Dauerbetrieb extern überbrückt, z.B. durch ein Bypass-Schütz).

Die In-Line-Schaltung entspricht dem Motorabgang beim Direktstart. Es werden nur drei Leitungen zum Motor geführt und im Klemmkasten an U1, V1 und W1 angeschlossen. Die Wicklungsenden werden gemäß Motor- und Netzspannung in Stern- oder Dreieck geschaltet.

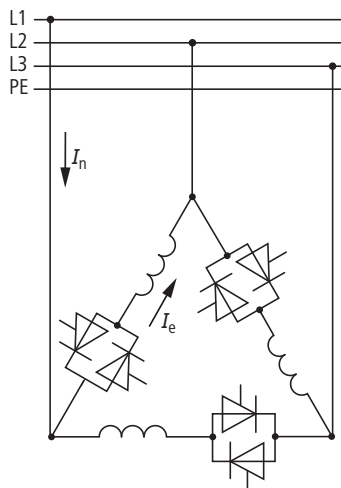


Abbildung 11: In-Delta-Schaltung

Die dementsprechend genannte In-Delta-Schaltung ist nur mit dreiphasengesteuerten Softstartern möglich. Die einzelnen Wicklungen des Motors werden hierbei in Reihe mit den Thyristoren im Dreieck angeschlossen. Der Softstarter kann in dieser Schaltungsart um den Faktor $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0.58 \cdot I_e$) kleiner als der Nennstrom des Motors ausgelegt werden. Unter wirt-

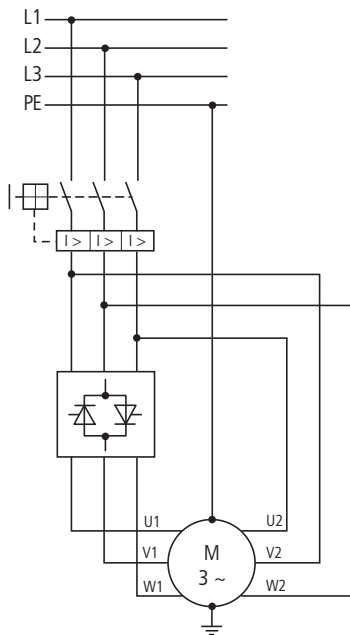


Abbildung 12: Motorabgang, Softstarter, In-Delta-Schaltung

schaftlicher Betrachtung eine interessante Anschlussvariante bei großen Motorleistungen.

Das Motorschutzrelais wird dabei auch in den Wicklungsstrang des Softstarters und auf den um Faktor $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0.58 \cdot I_n$) kleineren Nennstrom des Motors ausgelegt. Wird das Motorschutzrelais in der netzseitigen Zuleitung angeordnet, muss es wie der Leistungsschutz oder netzseitige Schaltgeräte auf den Bemessungsbetriebsstrom (I_n) des Motors ausgelegt werden.

Frequenzumrichter

Der Frequenzumrichter ist letztendlich die beste Lösung für den kontinuierlichen und stufenlosen Anlauf des Drehstrom-Asynchronmotors. Durch die einstellbare Strombegrenzung werden hohe Stromspitzen im elektrischen Netz und stoßartige Belastungen in den mechanischen Teilen von Maschine und Anlage verhindert.

Neben dem kontinuierlichen Anlauf ermöglicht der Frequenzumrichter auch eine stufenlose Drehzahl- (Frequenz-) Steuerung des Drehstrom-Asynchronmotors. Während beim direkt am Versorgungsnetz angeschlossenen Motor die idealen Betriebsverhältnisse nur im stationären Arbeitspunkt (= Leistungsschildangaben) bestehen, können sie frequenzregelt im gesamten Stellbereich genutzt werden, von beispielsweise 4 V bei 0,5 Hz bis 400 V bei 50 Hz. Das konstante Verhältnis von Spannung zu Frequenz (U/f) gewährleistet dabei unabhängige Arbeitspunkte mit Nennmoment (M_M).

Gegenüber den vorangestellten Startvarianten erscheint der Frequenzumrichter auf den ersten Blick als teuerste Lösung. Höhere Anschaffungskosten und zusätzlich erforderliche Installationsmaßnahmen (abgeschirmte Motorleitungen und Funkentstörfilter zur elektromagnetischen Verträglichkeit, EMV) sind Ursachen hierfür. Doch spätestens im Betrieb zeigt der sanfte Motorstart neben Energieeffizienz und Prozessoptimierung auch wirtschaftliche Vorteile auf. Dies gilt beispielsweise besonders für Pumpen und Ventilatoren. Durch die Anpassung von Drehzahl und Geschwindigkeit an den Produktionsprozess und die Kompensation äußerer Störgrößen gewährleistet die

frequenzgeregelt Antriebsseinheit eine höhere Lebensdauer und Funktionssicherheit.

Weitere Vorteile des Frequenzumrichters sind die höhere Drehzahlkonstanz bei Lastschwankungen (Drehzahlabweichungen kleiner etwa ein Prozent) und die Möglichkeit des direkten Drehrichtungswechsels. Da das Drehfeld im Frequenzumrichter elektronisch gebildet wird, genügt hier ein Steuerbefehl, um die Phasenfolge und damit die Drehrichtung des Motors zu wechseln. Der in Frequenzumrichtern integrierte elektronische Motorschutz (I^2t -Regelung) ermöglicht zudem einen sicheren Betrieb ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen (Motorschutzrelais). Je nach Ausprägung bieten parametrierbare Temperaturmodelle im Frequenzumrichter einen hohen Wärmeschutz des Motors. In Verbindung mit Thermistoren ist auch der so genannte Motor-Vollschutz möglich. Über- und Unterlasterkennung erhöhen dabei auch die Betriebssicherheit der Antriebsseinheit.

Im Hauptstromkreis eines Motorabgangs arbeitet der Frequenzumrichter als Leistungswandler. Getrennt durch die Leistung des Gleichspannungszwischenkreises nimmt er über den Gleichrichter aus dem speisenden Netz Wirkleistung auf und versorgt dann über den Wechselrichter den angeschlossenen Motor mit Wirk- und Blindleistung. Die, für den Motorbetrieb erforderliche Blindleistung liefern die Kondensatoren im Zwischenkreis. Zum elektrischen Netz hin verhält sich der frequenzgeregelt Antriebs dabei quasi wie ein ohmscher Verbraucher ($\cos \varphi \sim 1$).

Die Leistungsumwandlung und die damit verbundenen Stromarten müssen bei der Auslegung der Schalt- und Schutzgeräte im Motorabgang berücksichtigt werden. Dazu werden die elektromechanischen Komponenten (z.B. Sicherungen, Netzdrössel, Netzschütz) auf der netzseitigen Einspeiseseite des Frequenzumrichters gemäß dem Eingangstrom (Wirkstrom) und der Gebrauchskategorie AC-1 (Norm IEC60947-4-1) ausgelegt. Die Komponenten im Ausgang des Frequenzumrichters (z.B. Motordrossel, Sinusfilter, Motorleitung) werden gemäß dem Bemessungsbetriebsstroms des angeschlossenen Motors und Gebrauchskategorie AC-3 dimensioniert.

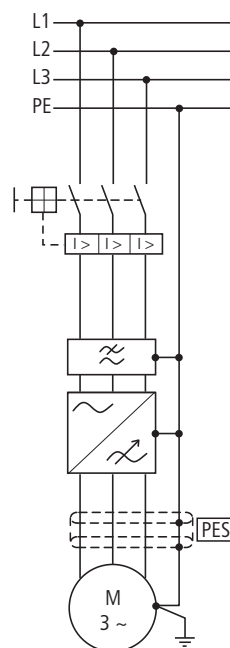


Abbildung 13: Motorabgang, Frequenzumrichter, Beispiel M-Max



Im Motorbetrieb unterscheiden sich die Frequenzumrichter durch die, vom Anwender einstellbare, Arbeitsweise des Wechselrichters. Neben der standardmäßigen U/f-Steuerung mit linearem oder quadratischem Kennlinienverlauf, sind die sensorlose Drehzahlsteuerung mit Schlupfkompensation und die Drehmoment erhöhende Vektorsteuerung heute bekannte Verfahren. Während die U/f-Steuerung den Parallelbetrieb mehrerer Motoren, auch mit unterschiedlichen Leistungen, im Ausgang des Frequenzumrichters ermöglicht, sind Drehzahl- und Vektorsteuerung nur für den Einzelantrieb vorgesehen. Hierbei

wird mit dem Frequenzumrichter automatisch, durch ein elektronisches Motormodell, das lastabhängige Betriebsverhalten des (einzelnen) Drehstrom-Asynchronmotors optimiert.

Die detaillierte Beschreibung dieser spezifischen Betriebsverfahren mit Frequenzumrichtern würde hier jedoch die gewollt vereinfachte Übersicht der bekanntesten Anlaufmethoden zum Starten und Steuern der Drehstrom-Asynchronmotoren überschreiten.

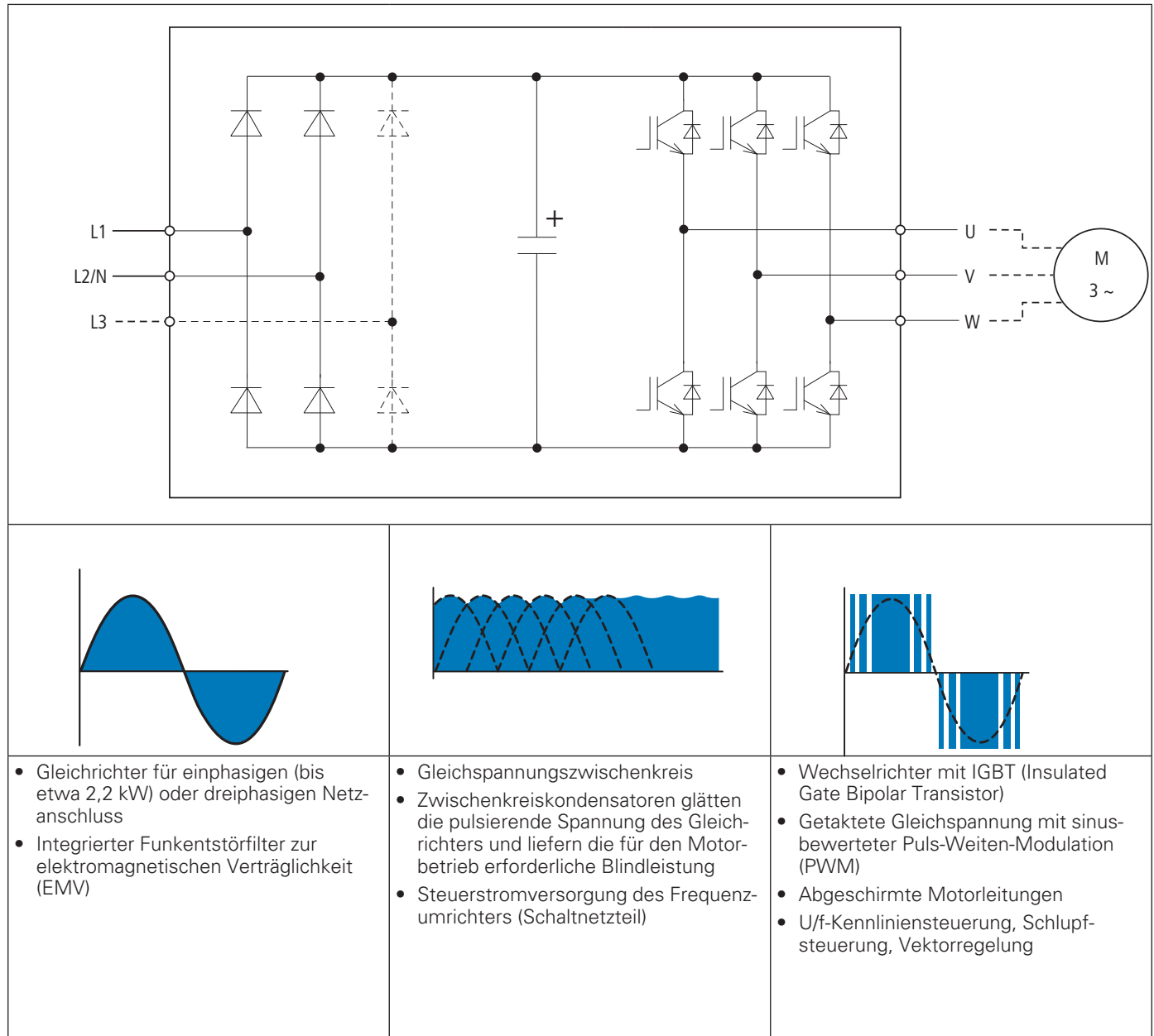
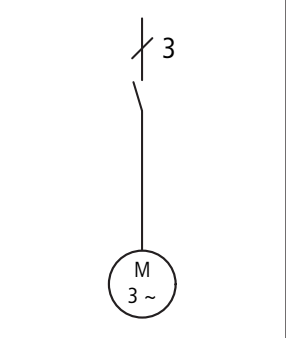
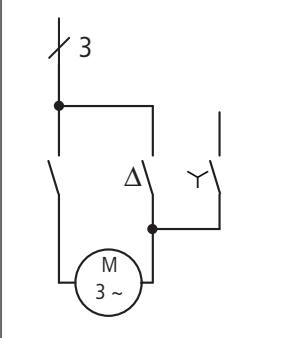
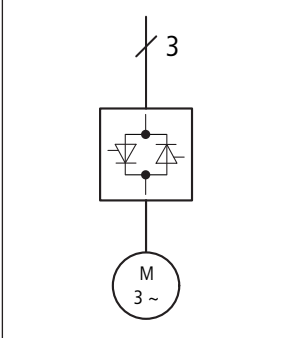
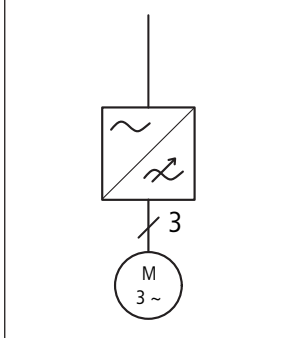
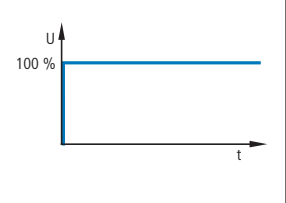
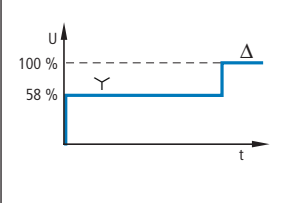
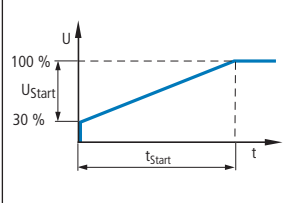
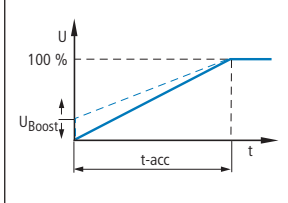
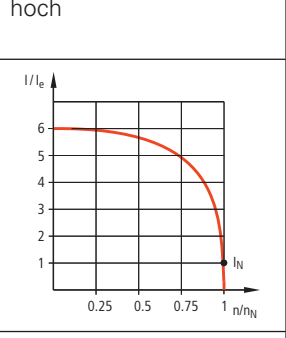
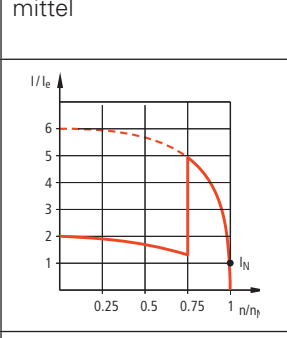
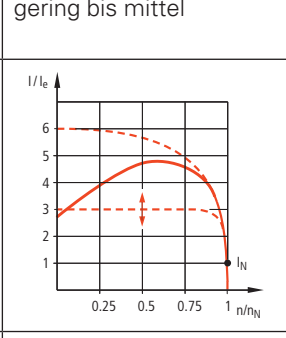
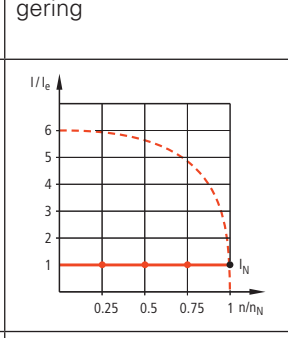
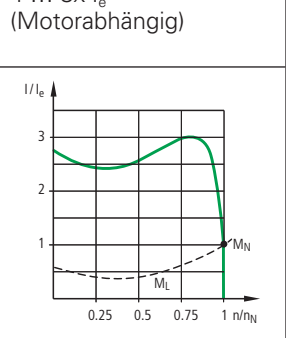
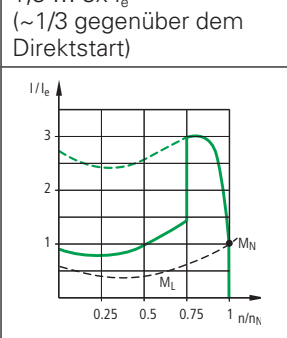
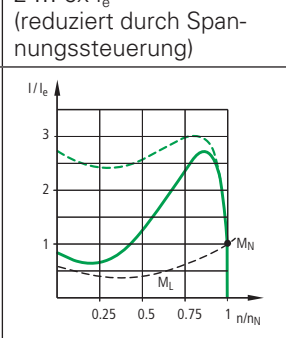
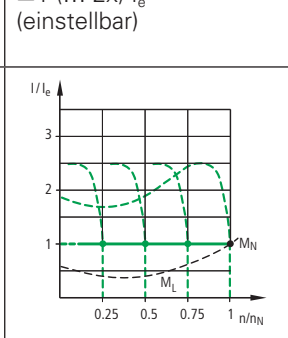


Abbildung 14: Hauptbestandteile des Frequenzumrichters

Zusammenfassung

Anwendung und Applikation bestimmen die Auswahl der Startvarianten im Motorabgang für einen Drehstrom-Asynchronmotor. Gegenüberstellung der charakteristischen Merkmale dieser hier beschriebenen Anlassverfahren:

	Direkter Motorstart	Stern-Dreieck Starter	Softstarter	Frequenzumrichter
Blockschaltbild				
Spannungsverlauf				
Netzbelastung beim Anlauf	hoch	mittel	gering bis mittel	gering
Stromverlauf				
Relativer Anlaufstrom	4 ... 8x I _e (Motorabhängig)	1,3 ... 3x I _e (~1/3 gegenüber dem Direktstart)	2 ... 6x I _e (reduziert durch Spannungssteuerung)	≤1 (... 2x) I _e (einstellbar)
Drehmomentverlauf				
Relatives Anlaufmoment	1,5 ... 3x M _N (Motorabhängig)	0,5 ... 1x M _N (~ 1/3 gegenüber dem Direktstart)	0,1 ... 1x M _N (M ~ U ² , quadratisch reduziert durch Spannungssteuerung)	~0,1 ... 2x M _N (M ~ U/f, einstellbares Drehmoment)
Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> – Starke Beschleunigung bei hohem Anlaufstrom. – Hohe mechanische Belastung. 	<ul style="list-style-type: none"> – Anlauf mit reduziertem Strom und Moment – Strom- und Moment-spitze beim Umschalten 	<ul style="list-style-type: none"> – einstellbare Anlaufcharakteristik – gesteuerter Auslauf möglich 	<ul style="list-style-type: none"> – hohes Moment bei geringem Strom – Anlaufcharakteristik einstellbar
Anwendungsbereich	Antriebe an starken Netzen, die hohe Anlaufströme (-Moment) zulassen	Antriebe, die erst nach dem Hochlauf belastet werden	Antriebe, die einen sanften Drehmomentverlauf oder Stromreduzierung verlangen	Antriebe, die einen geführten Sanftanlauf und eine stufenlose Drehzahlverstellung bedingen.

Eaton Electric GmbH
Kunden-Service-Center
Postfach 1880
53105 Bonn

Auftragsbearbeitung

Kaufmännische Abwicklung
Direktbezug
Tel. 0228 602-3702
Fax 0228 602-69402
E-Mail: Bestellungen-Bonn@eaton.com

Kaufmännische Abwicklung
Elektrogroßhandel
Tel. 0228 602-3701
Fax 0228 602-69401
E-Mail: Bestellungen-Handel-Bonn@eaton.com

Technik

Technische Auskünfte / Produktberatung
Tel. 0228 602-3704
Fax 0228 602-69404
E-Mail: Technik-Bonn@eaton.com

Anfragen / Angebotserstellung
Tel. 0228 602-3703
Fax 0228 602-69403
E-Mail: Anfragen-Bonn@eaton.com

Qualitätssicherung / Reklamationen
Tel. 0228 602-3705
Fax 0228 602-69405
E-Mail: Qualitaetssicherung-Bonn@eaton.com

Zentrale

Tel. 0228 602-5600
Fax 0228 602-5601

Schweiz
Internet: www.moeller.ch

Lausanne
Moeller Electric Sarl
Chemin du Vallon 26
1030 Bussigny
Tel. +41 58 458 14 68
Fax +41 58 458 14 69
E-Mail: lausanneswitzerland@eaton.com

Zürich
Moeller Electric GmbH
Im Langhag 14
8307 Effretikon
Tel. +41 58 458 14 14
Fax +41 58 458 14 88
E-Mail: effretikonswitzerland@eaton.com

Österreich
Internet: www.moeller.at / www.eaton.com

Wien
Eaton GmbH
Scheydgasse 42
1215 Wien, Austria
Phone: +43 (0)50868-0
Fax: +43 (0)50868-3500
Email: InfoAustria@Eaton.com

After Sales Service
Eaton Industries GmbH
Hein-Moeller-Straße 7-11
53115 Bonn
Tel. +49 (0) 228 602-3640
Fax +49 (0) 228 602-1789
E-Mail: AfterSalesEGBonn@Eaton.com
www.moeller.net/aftersales

Eaton Corporation

Eaton ist ein führendes Energiemanagement-Unternehmen. Weltweit ist Eaton mit Produkten, Systemen und Dienstleistungen in den Bereichen Electrical, Hydraulics, Aerospace, Truck und Automotive tätig.

Eatons Electrical Sector

Eatons Electrical Sector ist weltweit führend bei Produkten, Systemen und Dienstleistungen zu Energieverteilung, sicherer Stromversorgung und Automatisierung in der Industrie, in Wohn- und Zweckbauten, öffentlichen Einrichtungen, bei Energieversorgern, im Handel und bei OEMs.

Zu Eatons Electrical Sector gehören die Marken Cutler-Hammer®, Moeller®, Micro Innovation, Powerware®, Holec®, MEM®, Santak® und MGE Office Protection Systems™.

www.eaton.com

Adressen weltweit:
www.moeller.net/address

E-Mail: info-bonn@eaton.com
Internet: www.moeller.net
www.eaton.com

Herausgeber:
Eaton Corporation
Electrical Sector – EMEA

Eaton Industries GmbH
Hein-Moeller-Str. 7-11
D-53115 Bonn

© 2010 by Eaton Industries GmbH
Änderungen vorbehalten
VER8200-968de ip 04/10
Printed in Germany (04/10)
Artikelnr.: 144055

