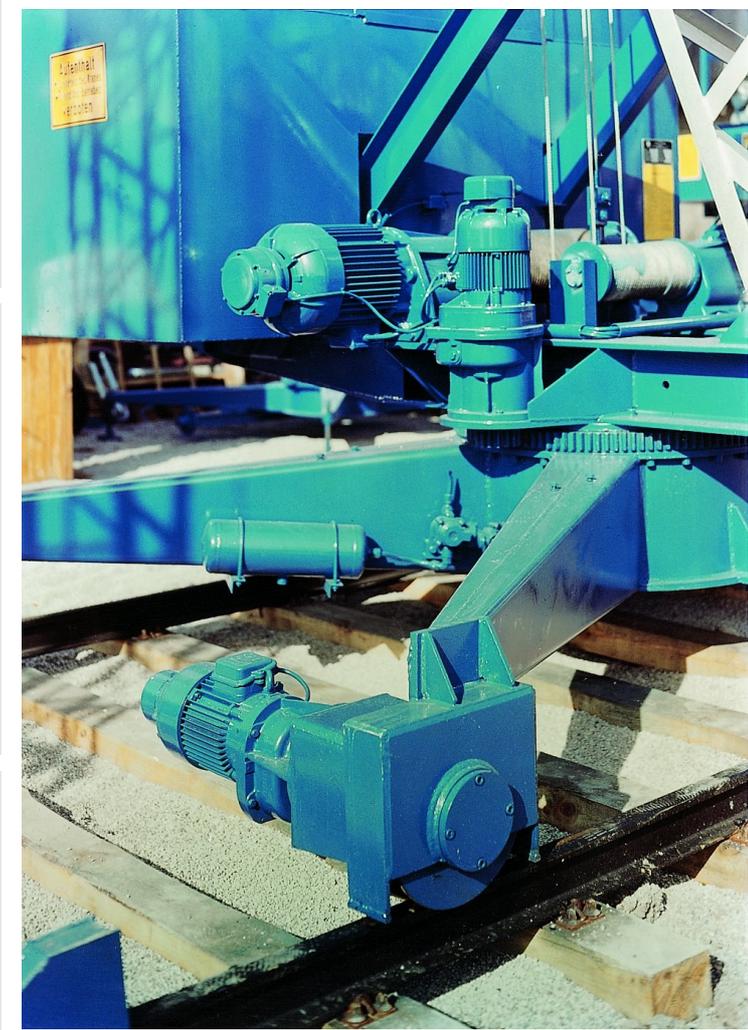


Stern-Dreieck-Einschaltung oder Sanftanlauf



Stern-Dreieck-Einschaltung oder Sanftanlauf bei Käfigläufermotoren

Obering. H. Greiner

Für den häufig verwendeten Stern-Dreieck-Anlauf von Drehstrom-Käfigläufermotoren gibt es hauptsächlich zwei Gründe:

- Das Versorgungsnetz soll entlastet werden
- Übertragungsmittel und Arbeitsmaschine sollen geschont werden.

Beide Ziele werden oft nur unvollständig erreicht – von einem "sanften Anlauf" kann bei vielen Antriebsfällen nicht die Rede sein.

In diesem Beitrag werden Grenzen des Y-Δ-Anlaufes und alternative Methoden gezeigt.

1 Stern-Dreieck-Einschaltung

1.1 Gründe für die Anwendung

Der Drehstrom-Asynchronmotor mit Käfigläufer verdankt seinen guten Ruf als robuster, problemloser Antrieb nicht zuletzt den guten Anlaufeigenschaften: Bei 4poligen Motoren im Normbereich (0,06 ... 132 kW) mit einem Anzugsmoment vom 1,5 ... 2,5fachen Bemessungsmoment (**Bild 1.1.1**) ist er in der Lage, auch schwergängige Arbeitsmaschinen unter Volllast loszureißen und rasch zu beschleunigen.

Während diese Eigenschaft in der großen Mehrzahl der Anwendungsfälle positiv bewertet wird, gibt es auch eine Reihe von Arbeitsmaschinen, bei denen die ruckartige Beschleunigung zu Problemen führen kann. Beispiele sind das Pendeln einer Last am Kranhaken, das Kippen von Flaschen auf einem Förderband, die stoßartige Überbeanspruchung von mechanischen Übertragungselementen.

Die »Verbesserung des Anlaufverhaltens« eines Drehstrom-Käfigläufermotors zielt daher selten auf eine Erhöhung, sondern meist auf eine **Verminderung des Hochlaufmomentes**.

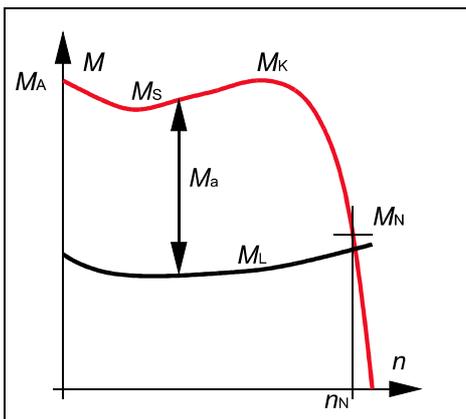


Bild 1.1.1
Typische Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines Käfigläufermotors mit den Kennwerten

- n - Drehzahl
- M - Drehmoment
- M_N - Bemessungsmoment
- n_N - Bemessungsdrehzahl
- M_A - Anzugsmoment
- M_K - Kippmoment
- M_S - Sattelmoment
- M_L - Lastmoment
- M_a - Beschleunigungsmoment

Das hohe Anzugsmoment führt zwangsläufig auch zu einem hohen Anzugsstrom: Im genannten Leistungsbereich sind Werte von 3 ... 7fachem Bemessungsstrom üblich; den Einfluss von Polzahl (Drehzahl) und Bemessungsleistung zeigt **Bild 1.1.2**.

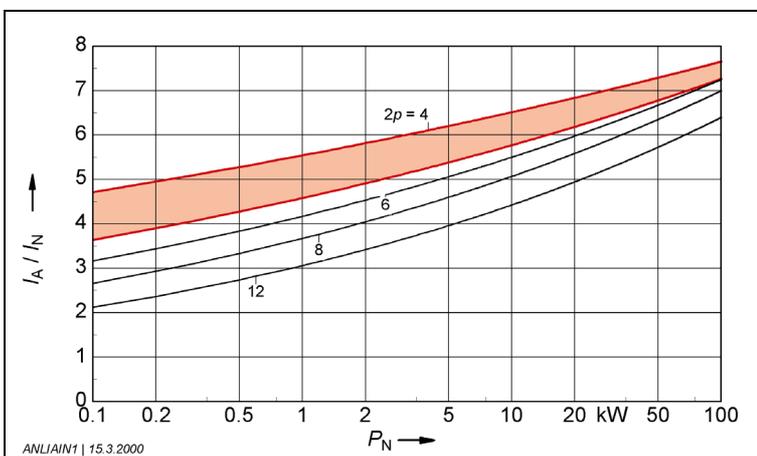


Bild 1.1.2
Richtwerte für den relativen Anzugsstrom I_A/I_N bei Direkteinschaltung von Drehstrom-Käfigläufermotoren mit Bemessungsleistungen $P_N = 0,1 \dots 100$ kW

In Niederspannungsnetzen wird die Höhe des zulässigen Anzugsstromes durch die Elektrizitätswerke begrenzt, um störenden Spannungsfall und das damit verbundenen "Flickern" in den betreffenden und in benachbarten Anlagen zu vermeiden. Die Vorschriften können im Einzelfall örtlich verschieden sein, doch gibt die folgende Tabelle aus den früher gültigen »Technischen Anschlussbedingungen« der VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke) einen guten Anhaltspunkt. Zur Erfüllung dieser Vorschriften wird häufig die **Stern-Dreieck-Einschaltung** verwendet.

	Direkte Einschaltung	Stern-Dreieck- Einschaltung	Einschaltung über Anlass- vorrichtung $I_A \leq 2 I_N$
Einphasenstrom- Motoren bei 230 V	bis 1,1 kW	-	-
Einfach-Käfigläufer- Drehstrommotoren bei 400 V	bis 2,2 kW	bis 4 kW	bis 11 kW
Stromverdrängungs- läufer-Drehstrom motoren bei 400 V	bis 4 kW	bis 7,5 kW	bis 11 kW

Tabelle 1.1.3 Maximal zulässige Motor-Bemessungsleistung bei Niederspannungsversorgung nach früheren Einschaltvorschriften der VDEW

Aus den neuen, derzeit regional in der praktischen Umsetzung befindlichen Technischen Anschlussbedingungen TAB 2000 [6] wird zitiert:

(1) Durch den Anlauf von Motoren dürfen keine störenden Spannungsänderungen im Netz verursacht werden. Diese Bedingung ist bei gelegentlich anlaufenden Motoren im allgemeinen dann erfüllt, wenn

- Wechselstrommotoren mit einer Scheinleistung von nicht mehr als 1,7 kVA oder
- Drehstrommotoren mit einer Scheinleistung von nicht mehr als 5,2 kVA oder
- bei höheren Scheinleistungen Motoren mit einem Anzugsstrom von nicht mehr als 60A eingesetzt werden.

(2) Bei Motoren mit gelegentlichem Anlauf und mit höheren Anzugsströmen als 60 A vereinbart der Planer oder Errichter mit dem VNB (Verteilungsnetzbetreiber) die notwendigen Maßnahmen zur Vermeidung störender Spannungsänderungen, sofern nicht durch eine Untersuchung gemäß Abschnitt 10.1 (3) eine Unbedenklichkeit bezüglich möglicher störender Netzurückwirkungen nachgewiesen wurde.

(3) Bei Motoren, die störende Netzurückwirkungen durch schweren Anlauf, häufiges Schalten oder schwankende Stromaufnahme verursachen können, z. B. Aufzüge, Sägegatter und Cutter mit einem Anzugsstrom von mehr als 30 A, vereinbart der Planer oder Errichter mit dem VNB die für die Reduzierung der Netzurückwirkungen notwendigen Maßnahmen.

Die neuen Festlegungen nach TAB 2000 orientieren sich direkt an der für das Netz maßgebenden Höhe des Anzugsstromes (in A) oder an der aufgenommenen Scheinleistung (in kVA) statt an der Motor-Bemessungsleistung (in kW). Dies ist sachlich begründet, da so die zusätzlichen Parameter Polzahl und Läuferbauart eliminiert sind. Da der Anzugsstrom im Gegensatz zur Bemessungsleistung nicht auf dem Leistungsschild des Motors zu finden ist, muss ihn der Planer oder die Fachkraft vor Ort aus den Herstellerunterlagen (z. B. einem Katalog) ermitteln. Der Bemessungsstrom I_N und der relative Anzugsstrom I_A/I_N sind i. A. in der Dokumentation des Motorherstellers zu finden. Im Allgemeinen gilt

$$I_A = I_N \cdot \frac{I_A}{I_N}$$

Im **Bild 1.1.4** sind Richtwerte für den Anzugsstrom von listenmäßigen Normmotoren mit den Polzahlen 2 ... 8 bei Bemessungsspannung 400 V bei Direktanlauf und bei Stern-Dreieck-Anlauf gezeigt. Es wird deutlich, dass der neue Grenzwert 60 A vergleichbare Einschaltgrenzen liefert wie die früheren Leistungsgrenzen.

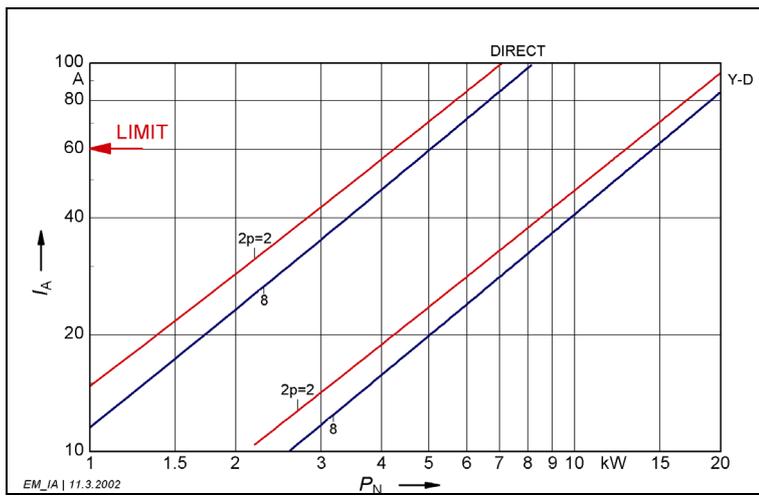


Bild 1.1.4
Richtwerte für den Anzugsstrom, Normmotoren 1 ... 20 kW, 400 V im Vergleich zum Grenzwert nach TAB 2000

I_A Anzugsstrom
 P_N Bemessungsleistung
 $2p$ Polzahl
 DIRECT Direkteinschaltung
 Y-D Stern-Dreieck-Einschaltung
 LIMIT Grenzwert nach TAB 2000

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass bei Beachtung der im Abschnitt 1.2 genannten Anwendungsgrenzen auch der dort genannte, reduzierte Anzugsstrom zu erwarten ist. Wenn jedoch im Einzelfall Zweifel bestehen, ob der nach den TAB 2000 zulässige Grenzstrom quasistationär und/oder häufig so überschritten wird, dass störendes "Flickern" auftritt, dann empfiehlt es sich, elektronische Sanftanlaufgeräte nach Abschnitt 2 zu planen oder nachträglich zu installieren.

1.2 Wirkungsweise

Die Motorwicklung ist für die Betriebsspannung in Δ -Schaltung ausgelegt, wird aber in der Anlassstufe in Y geschaltet. Die Spannung pro Wicklungsstrang beträgt dadurch nur das $1/\sqrt{3}$ fache der Bemessungsspannung. Anzugsmoment und Anzugsstrom sind gegenüber der direkten Einschaltung auf ein Drittel vermindert.

$$M_{AY} = \frac{M_{A\Delta}}{3}$$

$$I_{AY} = \frac{I_{A\Delta}}{3}$$

Hat also ein Motor beispielsweise bei Direkteinschaltung ein Anzugsmoment von 2fachem Bemessungsmoment, so ist sein Anzugsmoment bei Y-Einschaltung nur noch

$$M_{AY} = \frac{1}{3} \cdot M_{A\Delta} = \frac{2}{3} \cdot M_N$$

d. h. der Motor läuft in der Anlassstellung bei Belastung mit höheren Drehmomenten als $(2/3) M_N$ nicht an. **Stern-Dreieck-Einschaltung ist also nur bei Leer- oder Schwachlast-Anlauf anwendbar.**

Bei manueller Betätigung des Schalters empfiehlt es sich, den für den Strangstrom bemessenen Überlastungsschutz nach **Bild 1.2** in Reihe mit dem jeweiligen Wicklungsstrang zu schalten, weil sonst der Motor bei versehentlichem Verweilen in der Anlaufstellung gefährdet ist.

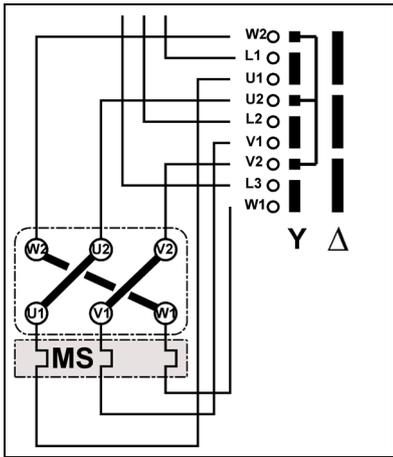


Bild 1.2
Schaltbild für Y-Δ-Anlauf mit Anordnung und Bemessung des Motorschutzrelais (MS) für den Strangstrom $I_{ph} = I_N / \sqrt{3}$

1.3 Verstärkte Stern-Dreieck-Einschaltung

Weil das auf 1/3 reduzierte Hochlaufmoment für einen Anlauf gegen Teil- oder Vollast nicht ausreicht, wird gelegentlich die **verstärkte Stern-Dreieck-Einschaltung** verwendet. Moment und Strom sind auf etwa 50 % der Werte bei Direkteinschaltung vermindert. Die Methode erfordert einen relativ hohen Aufwand für die Wicklungsausführung (unterteilte Stränge) und Verdrahtung und hat deshalb mit dem einfachen Y-Δ-Anlauf nur noch die Bezeichnung gemeinsam (**Bild 1.3**).

I Anlauf	II Anlauf	III Betrieb
$M_A/M_{AD} \approx 30 \%$	$\approx 40 \dots 50 \%$	100 %
$I_A/I_{AD} \approx 30 \%$	$\approx 50 \%$	100 %

Bild 1.3 Schaltung und Kennwerte bei verstärkter Stern-Dreieck-Einschaltung

Obige Kennwerte für Anzugsmoment und Anzugsstrom im Vergleich zur Direkteinschaltung (Index D) beziehen sich auf eine symmetrische Unterteilung der Wicklungsstränge. Es wurden auch asymmetrische Aufteilungen mit entsprechend geänderten Momenten und Strömen ausgeführt. Diese komplizierten Verfahren sind heute weitgehend durch elektronische Sanftanlasser abgelöst.

1.4 Nachteile

Bei Y-Δ-Anlauf gegen Schwerlast oder Vollast wird die Anlaufspitze von Moment und Strom ungenügend gedämpft, wie **Bild 1.4.1** zeigt.

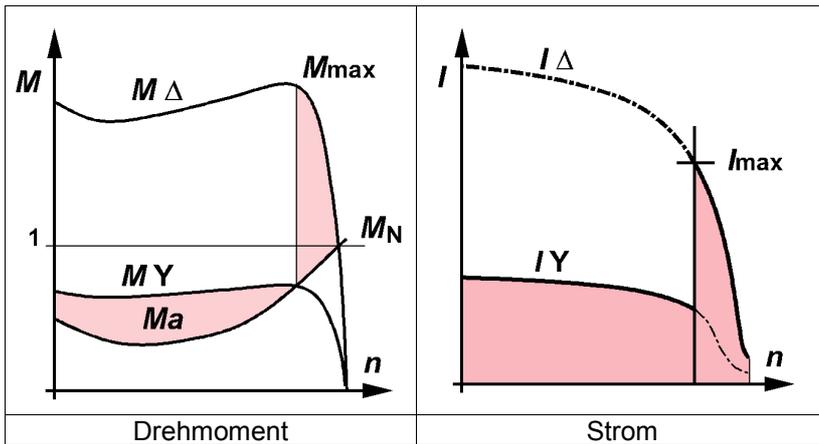


Bild 1.4.1
Spitzenwerte von Moment M_{max} und Strom I_{max} bei ungünstiger Umschaltung von Y auf Δ wegen Anlauf gegen zu hohe Last

Weitaus gravierender sind jedoch Vorgänge, die von *Bunzel* in einer umfangreichen und mathematisch anspruchsvollen Analyse [2] beschrieben wurden:

Beim Stern-Dreieck-Anlauf von Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufern entstehen in der Umschaltphase je nach Phasenlage von Restfeld und Wiedereinschaltvorgang hohe Strom- und Drehmomentspitzen, die bei Belastung des Motors durch eine Arbeitsmaschine mit einem hohen Massenträgheitsmoment zu Kupplungsschäden führen können. Typisch für einen derartigen Schadenshergang ist, dass die Rückseite der Passfeder beschädigt wird – der Schaden also offensichtlich durch einen negativen Drehmomentenstoß verursacht wird. Eine Simulationsrechnung ergab negative Drehmomentenspitzen bis fast zum 15fachen Bemessungsmoment (**Bild 1.4.2**).

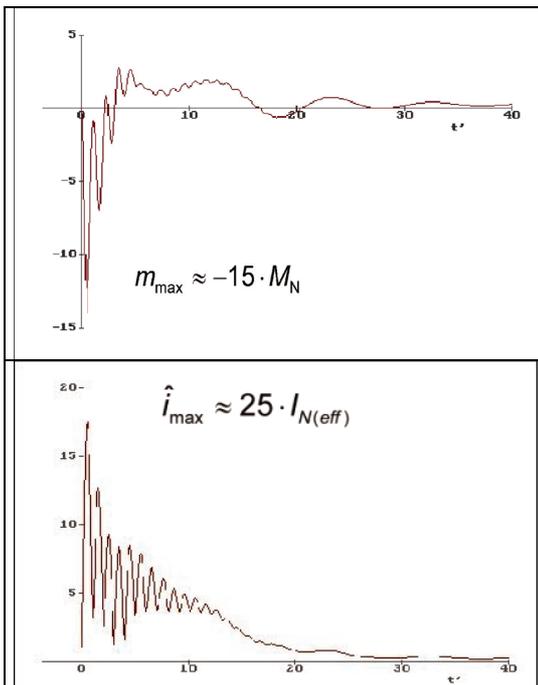


Bild 1.4.2
Simulation des Drehmomentverlaufes bei Stern-Dreieck-Umschaltung mit 5 ms Schaltverzug, hohe negative Drehmomentenspitze fast 15faches Bemessungsmoment

Bild 1.4.3
Simulation des Stromverlaufes bei Stern-Dreieck-Umschaltung mit 5 ms Schaltverzug; hoher Spitzenwert des Stromes ca. 25facher Effektivwert des Bemessungsstromes

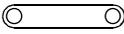
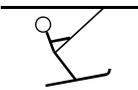
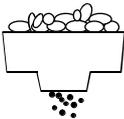
Quelle der Bilder 1.4.2 und 1.4.3:
Dr. Bunzel, VEM motors

Diese Betrachtungen zeigen, dass die Stern-Dreieck-Einschaltung bei vielen Anwendungsfällen den eingangs formulierten Ansprüchen nicht genügt.

2 Elektronische Sanftanlaufgeräte

2.1 Anwendungsgebiete

Softstarter reduzieren den Anlaufstrom und die mechanische Stoßbelastung. Dies schont Transportgut und Übertragungsmittel und erhöht somit die Lebensdauer. Sie können – im Gegensatz zur Y- Δ -Einschaltung – einfach und stufenlos an wechselnde Lastverhältnisse angepasst werden.

Anwendung	Vorteile
Pumpen 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimierter hydraulischer Schlag in den Röhren beim Starten und Stoppen. • Unterstromschutz verhindert Schäden durch verstopfte Röhren oder Wasserniedrigstand. • Automatischer Reset gewährleistet den ununterbrochenen Betrieb von unbemannten Pumpstationen. • Phasenumkehrschutz verhindert Schäden durch Gegenlauf der Pumpe. • Schutz gegen kurzzeitige Überlast verhindert Schäden durch in die Pumpe eingesogenen Abfall.
Förderbänder 	<ul style="list-style-type: none"> • Kontrollierte Softstarts ohne mechanische Schocks (z.B. fallen beim Anlaufen keine Flaschen auf einem Förderband um), minimierte Bandbeanspruchung. • Kontrolliertes Stoppen ohne mechanische Schocks. Softstopp. • Optimales Softstarten auch bei variierenden Startlasten wie etwa beladen oder unbeladen anlaufenden Kohleförderbändern. • Wartungsfreiheit.
Zentrifugen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleichmäßiges Anbringen des Drehmoments verhindert mechanische Beanspruchung. • Reduzierte Startzeiten gegenüber Stern/Dreieck-Schaltung. • Reduzierte Stoppzeiten (Gleichstrombremse und sanftes Abbremsen).
Skilifte 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruckfreies Beschleunigen erhöht den Komfort für Skifahrer und verhindert das Schaukeln von T-Bügeln usw. • Reduzierter Anlaufstrom ermöglicht das Starten großer Motoren bei schwacher Stromversorgung. • Gleichmäßige und allmähliche Beschleunigung unabhängig davon, ob der Skilift leicht oder schwer belastet ist. • Phasenumkehrschutz verhindert den Betrieb in umgekehrter Richtung.
Ventilatoren 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierter Anlaufstrom ermöglicht es, dass große Ventilatoren gestartet werden, wenn die maximale Stromkapazität begrenzt ist. • Phasenumkehrschutz verhindert den Betrieb in umgekehrter Richtung.
Mischer 	<ul style="list-style-type: none"> • Sanftes Rotieren beim Start verringert die mechanische Beanspruchung.
Zerkleinerer 	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Startfähigkeit verfügbar für das Starten, nachdem der Zerkleinerer angehalten hat, als er nicht ganz leer war. Das thermische Motormodell des MCD 3000 kann auf die wirkliche Überlastkapazität des angeschlossenen Motors abgestimmt werden und erlaubt es dem Motor, Anlaufdrehmoment für eine höchstmögliche Zeitdauer zu liefern. Quelle: Danfoss Broschüre [3]

2.2 Wirkungsweise

Bei Softstartern wird die Motorspannung (Phasenanschnittsteuerung) in den drei Außenleitern über Thyristoren in Antiparallelschaltung gemäß Bild 2.2.1 gesteuert. Über die Einstellung der Stromgrenze können Anlaufmoment und -zeit leicht und **stufenlos** einjustiert werden. Im Softstarter eingebaute Stromwandler messen den Motorstrom und liefern ein Rückführsignal zur Konstantstromregelung.

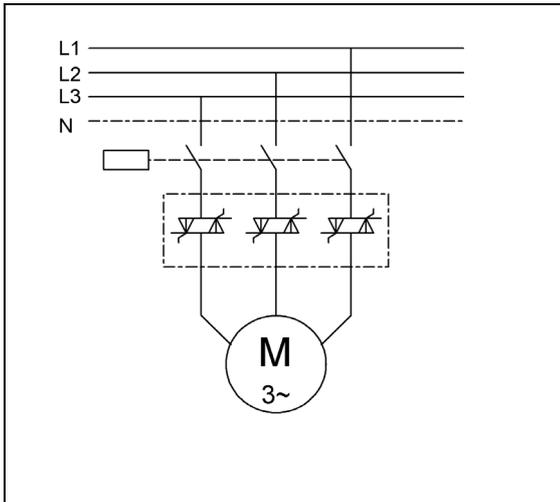


Bild 2.2.1
Prinzipialschaltbild einer elektronischen Anlaufschaltung mit antiparallelem Thyristorpaar in allen Außenleitern

Im Gegensatz zu anderen Anlassschaltungen (außer dem frequenzgeführten Anlauf) werden Spannung und Drehmoment stetig verändert und Einschwingvorgänge vermieden. Die grundsätzlichen Unterschiede im Verlauf von Drehmoment und Strom im Vergleich zur Direkteinschaltung und zum nur bei Leerlauf oder Schwachlast geeigneten Stern-Dreieck-Anlaufschaltung sind in Bild 2.2.2 gezeigt.

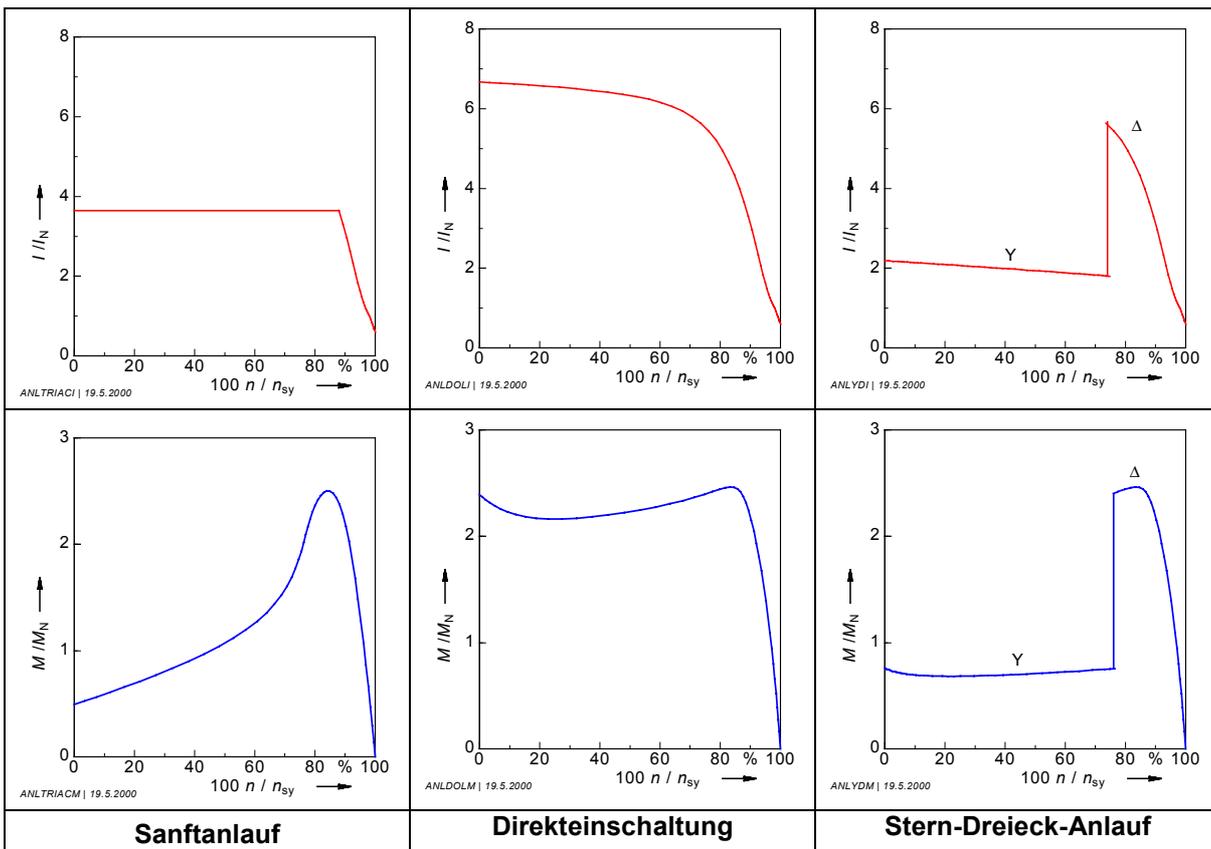


Bild 2.2.2 Strom I und Drehmoment M bei Sanftanlauf mit elektronischem Gerät im Vergleich zur Direkteinschaltung und zum Stern-Dreieck-Anlauf (nach Unterlagen der Fa. Danfoss Antriebs- und Regeltechnik GmbH)

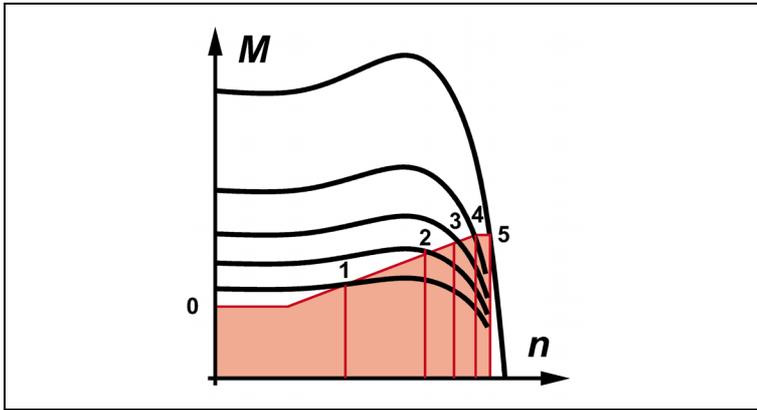


Bild 2.2.3
Hochlauframpe für die Steuerung der Ausgangsspannung am Sanftanlaufgerät zur langsamen Steigerung des Drehmomentes von 0 bis zum Betriebspunkt 5



Bild 2.2.4
Softstarter der Reihe MCD 3000 für Motorleistungen 4 ... 1300 kW, Spannungen 200 ... 690 V

(Danfoss Antriebs- und Regeltechnik GmbH)

Literaturhinweise:

- 1 *Greiner, H.:*
Anlaufen, Bremsen, Positionieren mit Drehstrom-Asynchronmotoren
Publikation der Fa. Danfoss Bauer GmbH, D-73726 Esslingen
- 2 *Bunzel, E.:*
Analyse der Ursache von Kupplungsschäden bei Stern-Dreieck-Umschaltung von Asynchronmotoren mit Käfigläufer
Beitrag zum VEM-Symposium "Elektrische Maschinen – heute und morgen" (2001)
- 3 MCD 3000 Softstarter
Produktbeschreibung der Fa. Danfoss Antriebs- und Regeltechnik GmbH, D-63073 Offenbach
- 4 Motor starten im Wandel der Zeiten – Elektronische Sanftanlasser im Wandel der Zeiten
Veröffentlichung durch den Fachverband Schaltgeräte, Schaltanlagen, Industriesteuerungen im ZVEI
- 5 *Seitz, A.:*
Sanfter Start und Stopp
CAV 9/2000
- 6 Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Niederspannungsnetz
TAB 2000 der VDEW; VDEW-Verlag, Frankfurt (2000)