

Stern-Dreieck-Einschaltung oder Sanftanlauf bei Käfigläufern

H. Greiner, Aichwald

Für den häufig verwendeten Stern-Dreieck-Anlauf von Drehstrom-Käfigläufermotoren gibt es hauptsächlich zwei Gründe: Auf der einen Seite soll das Versorgungsnetz entlastet und auf der anderen Seite sollen die Übertragungsmittel und Arbeitsmaschinen 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 Stern-Dreieck-Anlaufes als auch alternative Methoden aufgezeigt.

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 4-poligen Motoren im Normbereich (0,06 bis 132 kW) mit einem Anzugsmoment vom 1,5...2,5-fachen Bemessungsmoment ist er in der Lage, auch schwergängige Arbeitsmaschinen unter Vollast 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

- Pendeln einer Last am Kranhaken,
- Kippen von Flaschen auf einem Förderband oder
- 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.

Das hohe Anzugsmoment führt zwangsläufig auch zu einem hohen Anzugsstrom: Im genannten Leistungsbereich sind Werte im Bereich des 3...7-fachen Bemessungsstroms üblich; den Einfluss von Polzahl (Drehzahl) und Bemessungsleistung zeigt Bild 1.

In Niederspannungsnetzen wird die Höhe des zulässigen Anzugsstromes durch die Elektrizitätswerke begrenzt, um einen störenden Spannungsfall und das damit verbundene „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 früheren gültigen Technischen Anschlussbedingungen der

VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke) einen guten Anhaltspunkt. Zur Erfüllung dieser Vorschriften wird häufig die Stern-Dreieck-Einschaltung verwendet. Aus den neuen, derzeit regional in der praktischen Umsetzung befindlichen, Technischen Anschlussbedingungen TAB 2000 [6] wird zitiert:

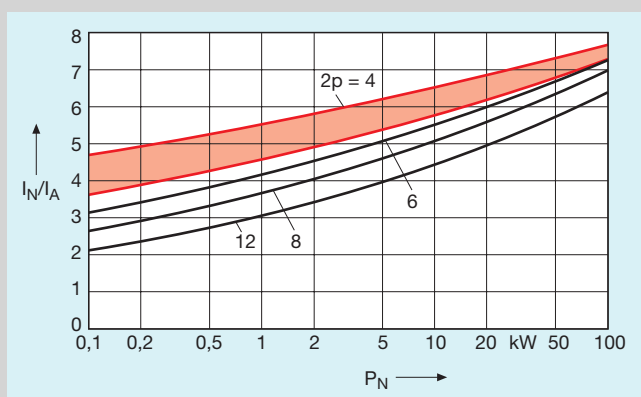
(1) Durch den Anlauf von Motoren dürfen keine störenden Spannungsänderungen im Netz verursacht werden. Diese Bedingung ist bei gelegentlich anlaufenden Motoren im Allgemeinen dann erfüllt, wenn

- 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 60 A

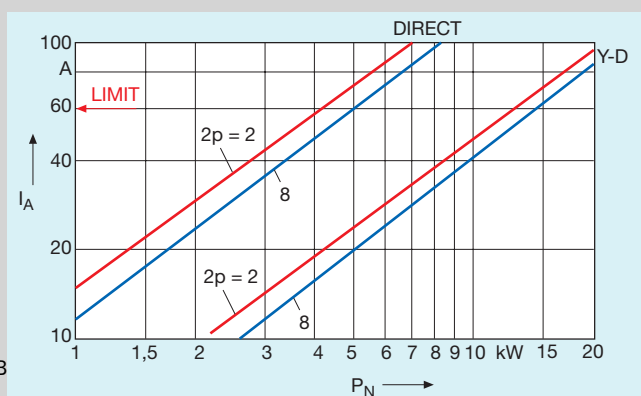
eingesetzt werden.

(2) Bei Motoren mit gelegentlichem Anlauf und mit höheren Anzugsströmen als 60 A

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



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

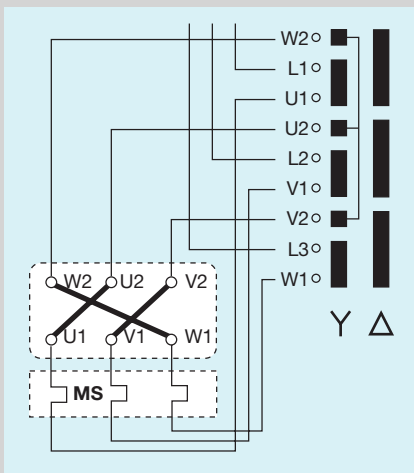


I_A Anzugsstrom
 P_N Bemessungsleistung
 $2p$ Polzahl
 DIRECT Direkteinschaltung
 Y-D Stern-Dreieck-Einschaltung
 LIMIT Grenzwert n. TAB 2000

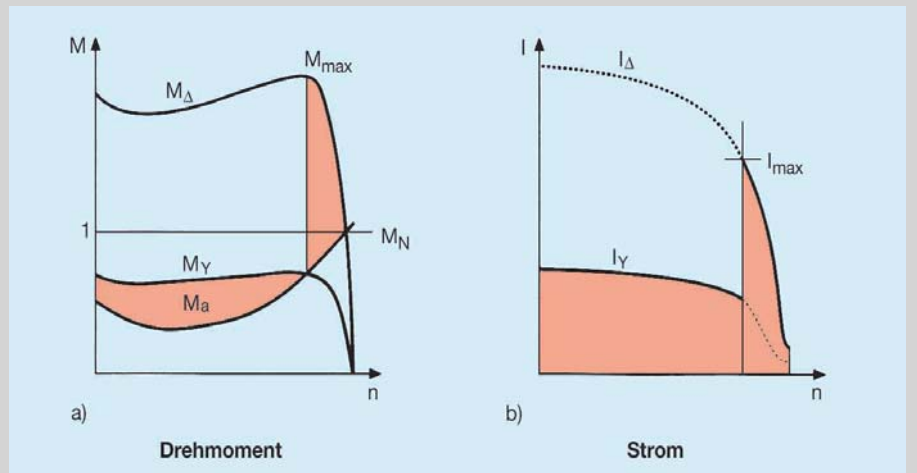
Tafel 1 Maximal zulässige Motor-Bemessungsleistung bei Niederspannungsversorgung nach früheren Einschaltvorschriften der VDEW

| | Direkte Einschaltung | Stern-Dreieck-Einschaltung | Einschaltung über Anlassvorrichtung mit $I_A < 2 I_N$ |
|--|----------------------|----------------------------|---|
| 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 |
| Stromverdrängungsläufer-Drehstrommotoren bei 400 V | bis 4 kW | bis 7,5 kW | bis 11 kW |

Autor
 Obering. Helmut Greiner, Aichwald, war Mitglied in verschiedenen DKE- und IEC-Komitees und ist heute als beratender Ingenieur tätig.



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



④ Spitzenwerte von Moment M_{max} und Strom I_{max} bei ungünstiger Umschaltung von Stern auf Dreieckschaltung wegen Anlauf gegen zu hohe Last

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 Netzrückwirkungen nachgewiesen wurde.

(3) Bei Motoren, die störende Netzrückwirkungen 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 Netzrückwirkungen 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, s. Tafel ①). 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 im Allgemeinen in der Dokumentation des Motorherstellers zu finden. Allgemein gilt:

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

Im Bild ② sind Richtwerte für den Anzugsstrom von listenmäßigen Normmotoren der Bemessungsspannung 400 V mit den Polzahlen 2 bis 8 bei Direktanlauf und bei Stern-Dreieck-Anlauf gezeigt. Es wird deutlich, dass der neue Grenzwert 60 A

Tafel ② Schaltung und Kennwerte bei verstärkter Stern-Dreieck-Einschaltung

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

vergleichbare Einschaltgrenzen liefert wie die früheren Leistungsgrenzen.

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

$$M_{AY} = \frac{M_{A\Delta}}{3} \text{ bzw.}$$

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

Hat ein Motor z. B. bei Direkteinschaltung ein Anzugsmoment von 2-fachem Bemessungsmoment, so ist sein Anzugsmoment bei Stern-Einschaltung nur noch

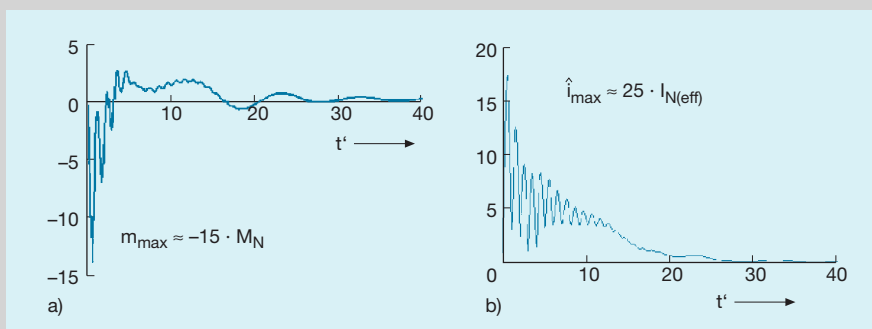
$$M_{AY} = \frac{1}{3} \cdot M_{A\Delta} = \frac{2}{3} \cdot M_N$$

d. h. der Motor läuft in der Anlassstellung bei Belastung mit höheren Drehmomenten als $2/3 \cdot M_N$ 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 ③ in Reihe mit dem jeweiligen Wicklungsstrang zu schalten, weil sonst der Motor bei versehentlichem Verweilen in der Anlaufstellung gefährdet ist.

Bei manueller Betätigung des Schalters empfiehlt es sich, den für den Strangstrom bemessenen Überlastungsschutz nach Bild ③ in Reihe mit dem jeweiligen Wicklungsstrang zu schalten, weil sonst der Motor bei versehentlichem Verweilen in der Anlaufstellung gefährdet ist.

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



5 Simulation des Drehmoment- und Stromverlaufes bei Stern-Dreieck-Umschaltung mit 5 ms Schaltverzögung:








a) hohe negative Drehmomentspitze (fast 15faches Bemessungsmoment)

b) hoher Spitzenwert des Stromes (ca. 25facher Effektivwert des Bemessungsstromes)

Quelle: Dr. Bunzel, VEM motors

Tafel 3 Anwendungsgebiete von Sanftanlaufgeräten

Quelle: Danfoss Broschüre [3]

| Anwendung | Vorteile |
|---|--|
|  Pumpen | Minimierter hydraulischer Schlag in den Röhren beim Starten und Stoppen. Unterstromschutz verhindert Schäden durch verstopfte Röhren oder Wasser-niedrigstand. 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 | 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 | Gleichmäßiges Anbringen des Drehmoments verhindert mechanische Beanspruchung. Reduzierte Startzeiten gegenüber Stern-Dreieck-Schaltung. Reduzierte Stoppzeiten (Gleichstrombremse und sanftes Abbremsen). |
|  Skilifte | 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 | Reduzierter Anlaufstrom ermöglicht es, dass große Ventilatoren gestartet werden, wenn die maximale Stromkapazität begrenzt ist. Phasenumkehrschutz verhindert den Betrieb in umgekehrter Richtung. |
|  Mischer | Sanftes Rotieren beim Start verringert die mechanische Beanspruchung. |
|  Zerkleinerer | 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: [3]) |

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 Stern-Dreieck-Anlauf nur noch die Bezeichnung gemeinsam (Tafel 2).

Die Kennwerte für Anzugsmoment und Anzugsstrom im Vergleich zur Direkteinschaltung 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 Stern-Dreieck-Anlauf gegen Schwerlast oder Vollast wird die Anlaufspitze von Moment und Strom ungenügend gedämpft, wie Bild 4 zeigt.

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 Drehmomentspitzen bis fast zum 15fachen Bemessungsmoment (Bild 5).

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

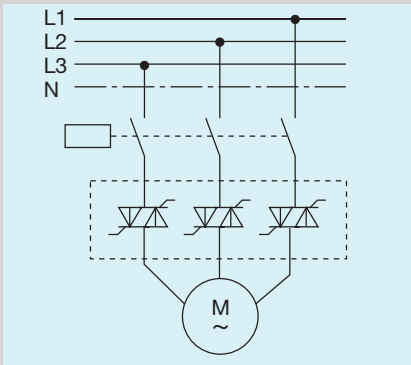
2 Elektronische Sanftanlaufgeräte

2.1 Anwendungsgebiete

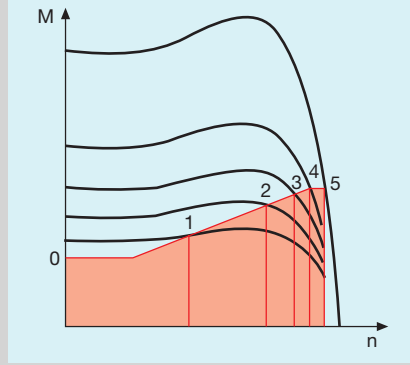
Softstarter reduzieren den Anlaufstrom und die mechanische Stoßbelastung. Dies schont Transportgut und Übertragungsmittel und erhöht somit die Lebensdauer. Sie können – im Gegensatz zur Stern-Dreieck-Einschaltung – einfach und stufenlos an wechselnde Lastverhältnisse angepasst werden (Tafel 3).

2.2 Wirkungsweise

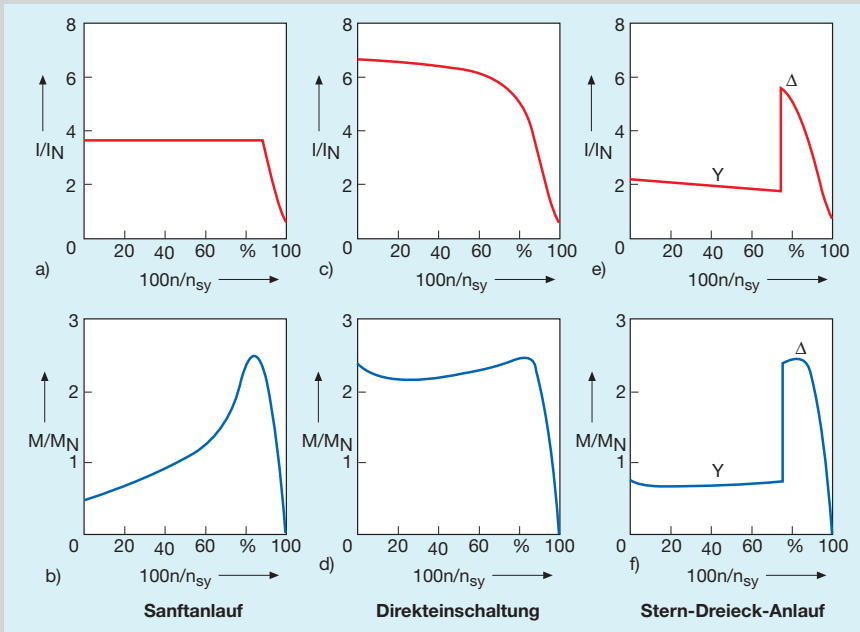
Bei Softstartern wird die Motorspannung (Phasenanschnittsteuerung) in den drei



6 Prinzipschaltbild einer elektronischen Anlaufschaltung mit antiparallelem Thyristorpaar in allen Außenleitern



8 Hochlaufkurve der Ausgangsspannung am Sanftanlaufgerät; Steigerung des Drehmomentes von 0 bis zum Betriebspunkt 5



7 Strom I und Drehmoment M bei Sanftanlauf mit elektronischem Gerät im Vergleich zur Direkteinschaltung und zum Stern-Dreieck-Anlauf
Quelle: Danfoss

Außenleitern über Thyristoren in Antiparallelschaltung gemäß Bild 6 gesteuert. Über die Einstellung der Stromgrenze können Anlaufmoment und -zeit leicht und stufenlos einjustiert werden (Bild 7). Im Softstarter eingebaute Stromwandler messen den Motorstrom und liefern ein Rückführsignal zur Konstantstromregelung.

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 zur nur bei Leerlauf oder Schwachlast geeigneten Stern-Dreieck-Anlaufschaltung sind in Bild 8 gezeigt.

Literatur:

- [1] Greiner, H.: Anlaufen, Bremsen, Positionieren mit Drehstrom-Asynchronmotoren. Esslingen, Publikation der Fa. Danfoss Bauer GmbH.
- [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, 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, Frankfurt, VDEW-Verlag, 2000