

Elektrisches Bremsen



1. Einleitung	5
1.1 Allgemeines	5
1.2 Übersicht über Antriebsapplikationen mit Drehzahl- und Drehmomentregelung	5
2. Berechnung der Bremsleistung	7
2.1 Allgemeine Dimensionierungsprinzipien für das elektrische Bremsen	7
2.2 Grundlegende Beschreibung der Last	8
2.2.1 Konstantmoment und quadratisches Moment	8
2.2.2 Berechnung von Bremsmoment und Bremsleistung	8
2.2.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	12
3. Elektrisches Bremsen mit Antrieben	13
3.1 Motorflussbremsung	13
3.2 Bremschopper und Bremswiderstand	14
3.2.1 Energiespeicherung im Frequenzumrichter	14
3.2.2 Arbeitsweise des Bremschoppers	15
3.3 Aufbau einer anti-parallel arbeitenden Thyristorbrücke	17
3.4 Aufbau der IGBT-Brücke	19
3.4.1 Arbeitsweise der IGBT-Rückspeiseeinheiten	19
3.4.2 Regelung der IGBT-Rückspeisung	19
3.4.3 Direkte Drehmomentregelung als direkte Leistungsregelung	20
3.4.4 Dimensionierung einer IGBT- Rückspeiseeinheit	22
3.5 Gleichspannungs-Sammelschiene	23
4. Lebensdauerkosten verschiedener Arten elektrischer Bremsung	25
4.1 Kalkulation der direkten Energiekosten	25
4.2 Berechnung der Investitionskosten	25
4.3 Berechnung der Lebensdauerkosten	26
5. Symbole und Definitionen	30
6. Index	32

1.1 Allgemeines Mit dieser Anleitung setzt ABB die Reihe der technischen Anleitungen fort, die die verfügbaren, praktischen Lösungen für den Abbau gespeicherter Energie und die Rückspeisung gespeicherter Energie in das Netz beschreiben. Ziel dieser Anleitung ist es, für verschiedene Bremslösungen praktische Anleitungen zu geben.

1.2 Übersicht über Antriebsapplikationen mit Drehzahl- und Drehmomentregelung

Antriebsapplikationen können im wesentlichen nach Drehzahl und Drehmoment in drei Kategorien unterteilt werden. Die am häufigsten verwendete AC-Antriebsapplikation ist die Ein-Quadrant-Anwendung, bei der Drehzahl und Drehmoment immer die gleiche Richtung haben, d.h. der Energiefluss (der sich aus dem Produkt von Drehzahl und Drehmoment ergibt) erfolgt vom Wechselrichter zum Prozess. Bei diesen Anwendungen handelt es sich zumeist um Pumpen- und Lüfteranwendungen mit einem quadratischen Verhalten des Lastmoments. Einige Ein-Quadrant-Anwendungen, wie Extruder oder Förderer sind Konstantmoment-Anwendungen, d.h. das Lastmoment ändert sich nicht mit Drehzahländerungen.

Zur zweiten Kategorie gehören die Zwei-Quadranten-Anwendungen, bei denen die Drehrichtung gleich bleibt, die Richtung des Drehmoment sich jedoch ändern kann, d.h. der Energiefluss kann vom Antrieb zum Motor oder umgekehrt erfolgen. Der Ein-Quadrant-Antrieb kann sich als Zwei-Quadranten-Antrieb erweisen, wenn ein Lüfter schneller abgebremst wird als dies durch mechanische Verluste auf natürliche Weise möglich wäre. In vielen Industriezweigen kann auch die Notwendigkeit einer Notabschaltung der Maschinen einen Zwei-Quadranten-Betrieb erfordern, obwohl der Prozess selbst dem Ein-Quadrant-Prinzip folgt.

Zur dritten Kategorie gehören die echten Vier-Quadranten-Anwendungen, bei denen sowohl die Drehrichtung und die Richtung des Drehmoments frei wechseln können. Typische Anwendungen sind Aufzüge, Winden und Krane sowie Prozesse wie Schneiden, Biegen, Weben und Motorenprüfstände mit wiederkehrenden Drehzahl- und Drehmomentänderungen. Zu nennen sind auch Ein-Quadranten-Prozesse, bei denen der Energiefluss hauptsächlich von der Maschine zum Wechselrichter erfolgt, wie dies bei einer Wickelmaschine oder einer Aufwärts-/Abwärtsfördereinrichtung der Fall ist.

Generell ist unter dem Aspekt der Energieeinsparung die Kombination eines AC-Motors mit einem Wechselrichter als die bessere Lösung der mechanischen Regelung, wie der Drosselung, vorzuziehen. Jedoch wird die Tatsache, dass in vielen Prozessen ein Energiefluss vom Prozess zum Antrieb erfolgt, noch wenig beachtet. Die Möglichkeit, wie diese Bremsenergie auf möglichst effiziente Weise genutzt werden könnte, findet noch wenig Beachtung.

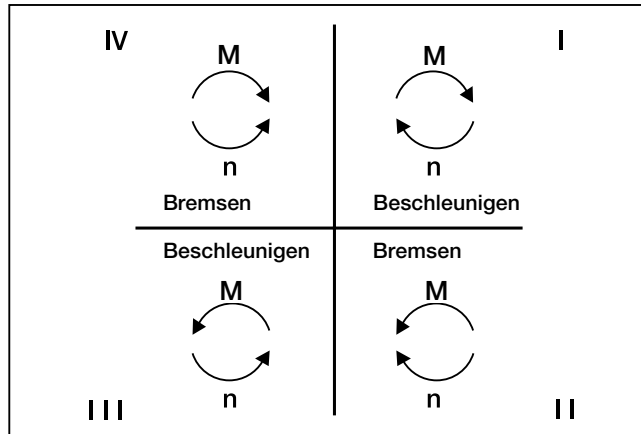


Abb.1.1 Quadranten der Antriebsanwendungen nach Drehzahl und Drehmoment

Kapitel 2 - Berechnung der Bremsleistung

2.1 Allgemeine Dimensionierungsprinzipien für das elektrische Bremsen

Die Berechnung der notwendigen Bremsleistung beginnt bei der Mechanik. Zumeist besteht die Anforderung darin, das mechanische System innerhalb einer vorgegebenen Zeit abzubremesen; oder der Prozess enthält untergeordnete Zyklen, in denen der Motor generatorisch mit konstanter oder sich nur geringfügig ändernder Drehzahl läuft.

Es ist wichtig zu bedenken, dass Geräte, die beim elektrischen Bremsen eingesetzt werden, nach der Bremsleistung dimensioniert werden. Die mechanische Bremsleistung hängt vom Bremsmoment und der Drehzahl ab (Formel 2.1). Je höher die Drehzahl, desto höher ist die Leistung. Diese Leistung wird dann bei einer festgelegten Spannung und einem bestimmten Strom übertragen. Je höher die Spannung ist, desto weniger Strom wird für die gleiche Leistung benötigt (Formel 2.2). Der Strom ist die primäre Komponente, die die Kosten bei Niederspannungs-AC-Antrieben bestimmt.

Formel (2.2) enthält den Term $\cos\phi$. Dieser Term gibt an, wieviel Motorstrom für die Magnetisierung des Motors verwendet wird. Der Magnetisierungsstrom erzeugt kein Drehmoment und wird deshalb vernachlässigt.

Andererseits wird dieser Motor-Magnetisierungsstrom nicht von der AC-Einspeisung, die den Stromrichter versorgt, bezogen, d.h. der zum Wechselrichter fließende Strom ist niedriger als der in den Motor eingespeiste Strom. Diese Tatsache bedeutet, dass auf der Einspeiseseite $\cos\phi$ normalerweise nahe 1,0 ist. Es ist zu beachten, dass in Formel (2.2) angenommen wurde, dass bei der Umwandlung von Gleichspannung in Wechselspannung kein Verlust auftritt. Bei dieser Umwandlung entstehen zwar Verluste, die in diesem Zusammenhang jedoch vernachlässigt werden können.

$$P_{\text{mech.}} = T * \omega = T * \frac{n}{60} * 2 \pi \quad (2.1)^1$$

$$P_{\text{elektr.}} = U_{\text{DC}} * I_{\text{DC}} = \sqrt{3} * U_{\text{AC}} * I_{\text{AC}} * \cos\phi \quad (2.2)$$

¹⁾ Siehe Kapitel 5 - Symbole und Definitionen auf Seite 30

2.2 Grundlegende Beschreibung der Last

Lasten können typischerweise als Konstantmoment oder quadratisches Drehmoment kategorisiert werden. Quadratisches Lastmoment bedeutet, dass das Lastmoment proportional zum Quadrat der Drehzahl ist. Es bedeutet auch, dass die Leistung die dritte Potenz der Drehzahl ist. Bei Anwendungen mit Konstantmoment ist die Leistung direkt proportional zur Drehzahl.

2.2.1 Konstantmoment und quadratisches Drehmoment

Konstantmoment:

C: Konstantmoment

$$T_{\text{Last}} = C \quad (2.3)$$

$$P_{\text{Last}} = T * \omega = C * \omega \quad (2.4)$$

Quadratisches Drehmoment:

$$T_{\text{Last}} = C * \omega^2 \quad (2.5)$$

$$P_{\text{Last}} = T * \omega = C * \omega^2 * \omega = C * \omega^3 \quad (2.6)$$

2.2.2 Berechnung von Bremsmoment und Bremsleistung

Bei stationärem Betrieb (die Winkelbeschleunigung α ist Null) muss das Drehmoment des Motors dem Reibungsmoment, welches proportional der Winkeldrehzahl ist, und dem Lastmoment bei dieser Drehzahl entsprechen. Das benötigte Bremsmoment und die benötigte Leistung unterscheiden sich in Bezug auf die Zeit bei diesen beiden Lasttypen erheblich.

$$T_{\text{Motor}} = -[J * \alpha + \beta * \omega + T_{\text{Last}}(\omega)] \quad (2.7)$$

Zunächst soll der Fall betrachtet werden, bei dem die Last den Typ *Konstantmoment* hat und das Antriebssystem nicht in der Lage ist, das Bremsmoment zu erzeugen, d.h. der Antrieb selbst ist ein Ein-Quadrant-Antrieb. Die benötigte Bremszeit kann mit der folgenden Gleichung berechnet werden. Beachten Sie, dass in Formel (2.7) deutlich wird, dass das benötigte Drehmoment für die Beschleunigung (oder Verzögerung) der Trägheit, die Reibung und das Lastmoment dem Motormoment entgegengesetzt sind.

$$0 = -[J * \alpha + \beta * \omega + T_{\text{Last}}(\omega)] \quad (2.8)$$

In der Praxis kann die Wirkung der Reibung nur schwer genau bestimmt werden. Bei der Annahme, dass die Reibung Null ist, ergibt sich für die Berechnung der Zeit ein sicheres Ergebnis.

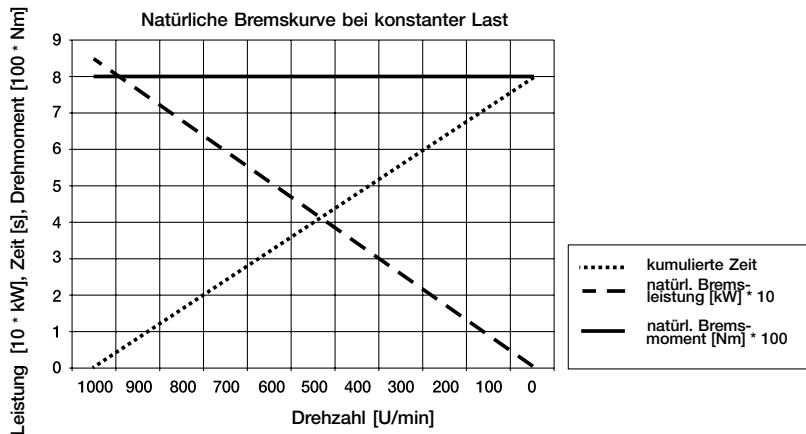


Abb. 2.1 Kumulierte Bremszeit, Bremslastleistung und Drehmoment in Abhängigkeit von der Drehzahl.

$$T_{\text{Last}}(\omega) = J * \alpha = J * \frac{(\omega_{\text{Start}} - \omega_{\text{Ende}})}{t} = J * \frac{(n_{\text{Start}} - n_{\text{Ende}}) * 2 \pi}{t * 60} \quad (2.9)$$

Aus der Auflösung von t ergibt sich folgende Formel:

$$t = J * \frac{(n_{\text{Start}} - n_{\text{Ende}}) * 2 \pi}{60 * T_{\text{Last}}(\omega)} \quad (2.10)$$

Wird bei einem Trägheitsmoment der Last von 60 kgm² und einem Lastmoment über den gesamten Drehzahlbereich von 800 Nm bei Drehzahl 1000 U/min das Drehmoment des Motors Null gesetzt, geht die Last in der folgenden Zeit gegen Null:

$$t = J * \frac{(n_{\text{Start}} - n_{\text{Ende}}) * 2 \pi}{60 * T_{\text{Last}}(\omega)} = 60 * \frac{(1000 - 0) * 2 \pi}{60 * 800} = 7,85 \text{ s} \quad (2.11)$$

Dies gilt für Anwendungen, bei denen das Lastmoment ab Beginn des Bremsvorgangs konstant bleibt. Wenn das Lastmoment entfällt (z.B. das Förderband reißt), bleibt die kinetische Energie der Mechanik unverändert, das Lastmoment, das die Mechanik verzögern würde, wirkt jetzt nicht. In dem Fall, wenn der Motor die Drehzahl nicht abbremst, verringert sich die Drehzahl nur aufgrund der mechanischen Reibung.

Jetzt soll der Fall mit gleichem Massenträgheitsmoment und dem gleichen Lastmoment bei 1000 U/min betrachtet werden, bei dem sich nun jedoch **das Lastmoment quadratisch ändert**. Wenn die kumulierte Bremszeit in Abhängigkeit von der Drehzahl dargestellt wird, zeigt sich, dass die natürliche Bremszeit bei niedrigeren Drehzahlen z.B. von 200 U/min auf 100 U/min deutlich länger ist im Vergleich zu der Drehzahländerung von 1000 U/min auf 900 U/min.

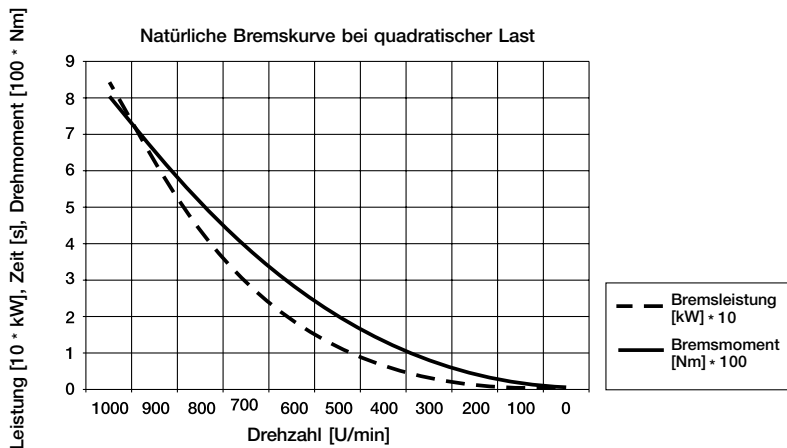


Abb. 2.2 Natürliche Bremskurve bei der Bremslastleistung und dem Drehmoment eines Lüfters von 90 kW in Abhängigkeit der Drehzahl

Eine natürliche Bremskurve kann auf Basis der Leistung und der Drehzahl am Nennpunkt leicht anhand der Formeln (2.5) und (2.6) gezeichnet werden.

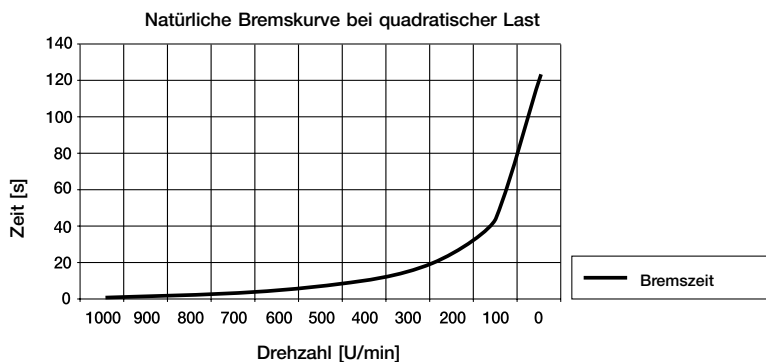


Abb. 2.3 Kumulierte Bremszeit für z.B. einen 90 kW Lüfter

Nun soll der Fall betrachtet werden, wenn es erforderlich ist, das mechanische System in einer vorgegebenen Zeit von einer bestimmten Drehzahl aus abzubremesen.

Der 90 kW Lüfter besitzt ein Massenträgheitsmoment von 60 kgm². Der Nennarbeitspunkt des Lüfters ist 1000 U/min. Der Lüfter muss innerhalb von 20 Sekunden gestoppt werden. Die natürliche, durch die Last bedingte Bremswirkung ist zu Beginn des Bremsvorgangs am größten. Die maximale Energie des Massenträgheitsmoments kann nach der Formel (2.12) berechnet werden. Die durchschnittliche Bremsleistung kann durch Division der Bremsenergie durch die Zeit errechnet werden. Dieser Wert liegt, da die Lastcharakteristik des Lüfters nicht berücksichtigt wird, sehr auf sicherer Seite.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (2.12)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 60 * \left(\frac{1000}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{20} = 16,4 \text{ kW} \quad (2.13)$$

Wenn der Bremschopper für den Wert von 16,4 kW dimensioniert ist und das Motorbremsvermögen bei einer höheren Drehzahl weit über 16,4 kW liegt, muss der Antrieb mit einer Überwachungsfunktion für die maximale Rückspeiseleistung ausgestattet werden. Diese Funktion ist bei einigen Antrieben verfügbar.

Wenn die Dimensionierung des Bremschoppers für eine bestimmte Bremszeit optimiert werden soll, hilft Abbildung (2.3) weiter. Die Drehzahl fällt ohne zusätzliches Bremsen schnell von 1000 auf 500 U/min. Die natürliche Bremswirkung zu Beginn des Bremsvorgangs ist am größten. Dies bedeutet, dass der Motor zunächst nicht mit der obengenannten Leistung von 16 kW abgebremst werden muss. Wie in Abbildung (2.3) dargestellt, fällt die Drehzahl innerhalb von 10 Sekunden ohne zusätzliches Bremsen von 1000 U/min auf 500 U/min. Zu diesem Zeitpunkt beträgt das Lastmoment nur 25 % des Nennwertes und die in dem Lüfter gespeicherte kinetische Energie beträgt nur 25 % der Energie bei 1000 U/min. Wenn die für 1000 U/min. durchgeführte Berechnung mit 500 U/min. wiederholt wird, zeigt sich, dass die Bremsleistung zum Erreichen einer Verzögerung von 500 U/min auf 0 U/min ca. 8 kW beträgt. Wie schon in den vorangegangenen Berechnungen ist dies ein sicherer Wert, weil die von der Lastcharakteristik abhängige natürliche Bremskurve nicht berücksichtigt wird.

Zusammenfassend ergibt sich: das Ziel für eine Verzögerung von 1000 U/min auf 0 U/min in 20 Sekunden wird mit einem auf 8,2 kW dimensionierten Bremschopper und Widerstand erreicht. Wenn der Grenzwert des Antriebs für die Rückspeisung auf 8,2 kW eingestellt wird, wird die Bremsleistung auf einen entsprechenden Wert gesetzt.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (2.14)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 60 * \left(\frac{500}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{10} = 8,2 \text{ kW} \quad (2.15)$$

2.2.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es gibt grundsätzlich zwei Lasttypen: konstantes und quadratisches Lastmoment.

Applikation mit konstantem Drehmoment:

- Die Charakteristik des Lastmoments hängt nicht von der Drehzahl ab. Das Lastmoment bleibt über den gesamten Drehzahlbereich in etwa gleich.
- Die Leistung erhöht sich linear mit der Drehzahlerhöhung und umgekehrt.
- Typische Anwendungen mit konstantem Drehmoment: Krane, Aufzüge und Förderer.

Anwendung mit quadratischem Drehmoment:

- Das Lastmoment erhöht sich auf das Quadrat der Drehzahl.
- Bei einer Erhöhung der Drehzahl erhöht sich die Leistung proportional zur dritten Potenz der Drehzahl.
- Typische Anwendungen mit quadratischem Drehmoment: Lüfter und Pumpen.

Bewertung der Bremsleistung:

- Bei quadratischer Lastcharakteristik erfolgt eine schnelle natürliche Verzögerung von 50-100 % der Nenndrehzahl. Dies sollte bei der Dimensionierung der benötigten Bremsleistung ausgenutzt werden.
- Das quadratische Lastmoment bedeutet, dass bei niedrigen Drehzahlen die natürliche Verzögerung im wesentlichen auf der Reibung beruht.
- Die Charakteristik bei konstantem Lastmoment ist eine konstante natürliche Verzögerung.
- Die Bremsleistung ist vom Drehmoment und der Drehzahl an einem festgelegten Betriebspunkt abhängig. Die Dimensionierung des Bremschoppers entsprechend der Spitzenbremsleistung führt meistens zu einer Überdimensionierung.
- Die Bremsleistung hängt nicht vom Motor-Nennstrom (Drehmoment) oder der Leistung an sich ab.
- Wenn das Lastmoment zu Beginn des Bremsvorgangs entfällt, ist die natürliche Bremswirkung gering. Das wirkt sich auf die Dimensionierung des Bremschoppers aus.

Kapitel 3 - Elektrisches Bremsen mit Antrieben

Der moderne AC-Antrieb besteht aus einem Eingangsgleichrichter, der die Wechselspannung in Gleichspannung umwandelt, die in den DC-Kondensatoren gespeichert wird. Der Wechselrichter wandelt die Gleichspannung in eine Wechselspannung zurück, die den AC-Motor mit der gewünschten Frequenz versorgt. Die benötigte Prozessenergie fließt durch den Gleichrichter, die Gleichspannungs-Sammelschiene und den Wechselrichter zum Motor. Die in den DC-Kondensatoren gespeicherte Energie ist sehr gering verglichen mit der benötigten Energie, d.h. der Gleichrichter muss ständig die vom Motor benötigte Leistung plus die im Antriebssystem auftretenden Verluste liefern.

3.1 Motor- flussbremsung

Die Flussbremsung ist ein auf den Motorverlusten basierendes Verfahren. Wenn das Antriebssystem abgebremst werden muss, wird der Motorfluss und somit auch der im Motor verwendete Magnetisierungsstrom erhöht. Die Flussregelung kann auf einfache Weise durch die direkte Drehmomentregelung erreicht werden (siehe hierzu Technische Anleitung Nr. 1). Mit DTC wird der Wechselrichter direkt geregelt, damit das erforderliche Drehmoment und der Fluss für den Motor erreicht werden. Während der Flussbremsung befindet sich der Motor in der DTC-Regelung, die sicherstellt, dass der Motor entlang der festgelegten Drehzahlrampe abgebremst wird. Dieses Verfahren unterscheidet sich völlig von der häufig in Antrieben verwendeten Gleichstrombremsung. Beim Verfahren der Gleichstrombremsung wird der Gleichstrom in den Motor eingespeist, wobei während des Bremsvorgangs die Regelung des Motorflusses verloren geht. Die auf DTC basierende Flussbremsung ermöglicht es, den Motor bei Bedarf schnell vom Bremsen auf motorische Leistung umzuschalten.

Bei Flussbremsung bedeutet der erhöhte Strom höhere Verluste im Motor. Die Bremsleistung wird deshalb auch erhöht, obwohl die an den Frequenzumrichter abgegebene Bremsleistung nicht erhöht wird. Der erhöhte Strom erzeugt in den Motorwiderständen erhöhte Verluste. Je höher der Widerstandswert ist, desto höher ist die Bremsenergieaufnahme im Motor. In Motoren mit geringer Leistung (unter 5 kW) ist der Widerstand des Motors in Relation zum Nennstrom des Motors relativ groß. Je höher die Leistung oder die Spannung des Motors, desto geringer ist der Widerstand des Motors im Hinblick auf den Motorstrom. Mit anderen Worten die Flussbremsung ist in Motoren mit niedriger Leistung am effektivsten.

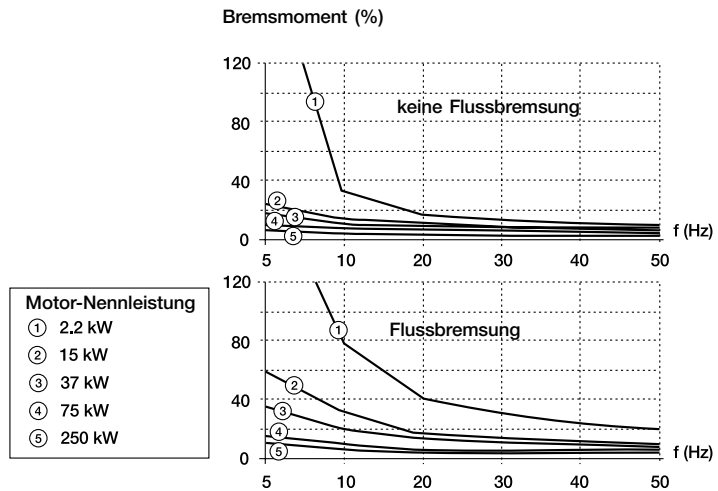


Abb. 3.1 Prozentsatz des Motorbremsmoments vom Nennmoment in Abhängigkeit der Ausgangsfrequenz.

Die Hauptvorteile der Flussbremsung sind:

- Keine zusätzlichen Komponenten und keine Extrakosten durch Einsatz der DTC-Regelung.
- Der Motor wird im Gegensatz zu der bei Antrieben häufig verwendeten Gleichstrombremsung während des Bremsens geregelt.

Die Nachteile der Flussbremsung sind:

- Erhöhte thermische Belastung des Motors, wenn der Bremsvorgang in kurzen Abständen wiederholt wird.
- Die Bremsleistung wird durch die Motorkennwerte begrenzt z.B. Widerstandswert.
- Die Flussbremsung ist vor allem bei Motoren mit niedriger Leistung nützlich.

3.2 Bremschopper und Bremswiderstand

3.2.1 Energiespeicherung im Frequenzumrichter

In Standardantrieben ist der Gleichrichter normalerweise ein 6-Puls- oder 12-Puls-Diodengleichrichter, der nur Strom aus dem AC-Netz an die DC-Sammelschiene aber nicht umgekehrt liefern kann. Wenn sich der Energiefluss wie in Vier-Quadranten-Anwendungen ändert, belastet der vom Prozess rückgespeiste Strom die DC-Kondensatoren entsprechend der Formel (3.1) und die Spannung an der DC-Sammelschiene steigt an. Die Kapazität C ist in einem AC-Antrieb ein relativ niedriger Wert, der zu einem schnellen Spannungsanstieg führt, wobei die Komponenten eines Frequenzumrichters nur für Spannungen bis zu einem bestimmten Wert ausgelegt sind.

$$W = P * t = \frac{C * U_{dc}^2}{2} \quad (3.1)$$

$$U_{dc} = \sqrt{\frac{2 * W}{C}} = \sqrt{\frac{2 * P * t}{C}} \quad (3.2)$$

Um einen übermäßigen Anstieg der Spannung der DC-Sammelschiene zu verhindern, gibt es zwei Möglichkeiten: Der Wechselrichter selbst verhindert den Energiefluss vom Prozess zum Frequenzumrichter. Dies erfolgt durch Begrenzung des Bremsmoments, um die DC-Sammelschienenspannung konstant zu halten. Dieses Merkmal der Überspannungsregelung ist in den meisten modernen Antrieben eine Standardausstattung. Das bedeutet jedoch, dass das Bremsprofil der Maschine nicht der vom Benutzer vorgegebenen Drehzahlrampe entspricht.

Die Energiespeicherkapazität des Wechselrichters ist zumeist sehr klein. Bei einem 90 kW Antrieb beispielsweise liegt die typische Kapazität bei 5 mF. Wenn der Antrieb mit 400 V AC gespeist wird, hat die DC-Sammelschiene den Wert von $1,35 * 400 = 565$ V DC. Angenommen die Kondensatoren sind für maximal 735 V DC ausgelegt, dann kann die Zeit, in der 90 kW Nennleistung in den DC-Kondensator eingespeist werden kann, wie folgt, berechnet werden:

$$t = \frac{C * U_{dc}^2}{2 * P} = \frac{5 * 10^{-3} * (735^2 - 565^2)}{2 * 90 * 10^3} = 6 \text{ ms} \quad (3.3)$$

Dieser Wertebereich gilt generell für alle modernen Niederspannungs-AC-Antriebe unabhängig von ihrer Leistung. In der Praxis bedeutet das, dass der Überspannungsregler und die Drehmomentregelung des AC-Motors sehr schnell sein müssen. Außerdem muss die Aktivierung der Rückspeisung oder des Bremschoppers in Antrieben sehr schnell sein.

3.2.2 Arbeitsweise des Bremschoppers

Die andere Möglichkeit, die Sammelschienengleichspannung zu begrenzen, ist, die Bremsenergie über einen Bremschopper zum Bremswiderstand zu leiten. Der Bremschopper ist ein elektrischer Schalter, der die Sammelschienengleichspannung in einen Widerstand leitet, in dem die Bremsenergie in Wärme umgewandelt wird. Die Bremschopper werden automatisch aktiviert, wenn der Istwert der Sammelschienengleichspannung einen bestimmten Grenzwert überschreitet, der von der Nennspannung des Wechselrichters abhängig ist.

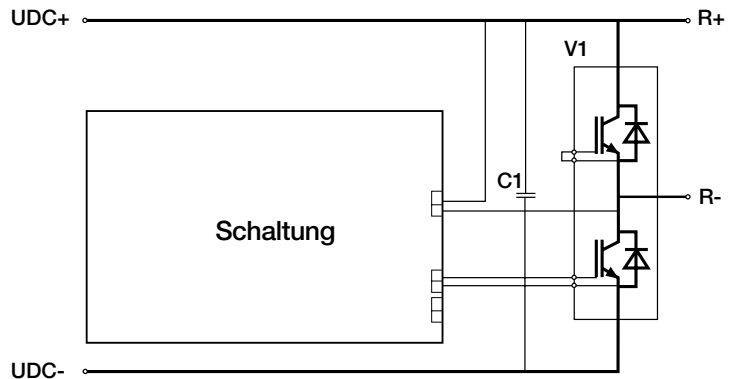


Abb. 3.2 Schaltbild (Beispiel) des Bremschoppers. UDC sind die Anschlüsse der Gleichspannungssammelschiene und R die Anschlüsse des Bremswiderstandes.

Die Hauptvorteile der Lösung mit Bremschopper und Widerstand sind:

- Einfacher elektrischer Aufbau und bewährte Technik.
- Geringe Investitionen für Chopper und Widerstand.
- Der Chopper arbeitet auch noch nach Ausfall der Wechselspannung. Bremsen bei Netzausfall ist z.B. bei Aufzügen oder anderen sicherheitsrelevanten Anwendungen notwendig.

Die wesentlichen Nachteile des Bremschoppers und des Widerstandes sind:

- Die Bremsenergie geht verloren, wenn erwärmte Luft nicht anders genutzt werden kann.
- Der Bremschopper und die Widerstände benötigen zusätzlich Platz.
- Zusätzliche Investitionen im Kühl- und Wärmehückgewinnungssystem können erforderlich sein.
- Bremschopper werden meistens für einen bestimmten Zyklus dimensioniert z.B. 100 % Leistung 1/10 Minuten, lange Bremszeiten erfordern eine genauere Dimensionierung des Bremschoppers.
- Erhöhtes Brandrisiko aufgrund des heißen Widerstandes und eventuell in der Umgebungsluft vorhandene Staubpartikel und chemische Stoffe.
- Die während des Bremsens erhöhte Sammelschienengleichspannung verursacht eine erhöhte Belastung der Motorisolation.

Wann ist der Einsatz von Bremschopperrn richtig:

- Gelegentlich benötigter Bremszyklus.

- Die Menge der Bremsenergie ist im Verhältnis zur motorischen Energie extrem gering.
- Während eines Netzausfalls muss das Bremsen möglich sein.

Wann sind andere Lösungen als Bremschopper und Widerstand besser:

- Der Bremsvorgang wird ständig oder regelmäßig wiederholt.
- Die gesamte Bremsenergie ist im Hinblick auf die benötigte motorische Energie groß.
- Die Bremsleistung ist zeitweise hoch z.B. während mehrerer Minuten mehrere Hundert kW.
- Die Umgebungsluft enthält größere Mengen Staub oder andere potentiell brennbare, explosive oder metallische Bestandteile.

3.3 Aufbau einer anti-parallel arbeitenden Thyristorbrücke

In einem Frequenzumrichter können die Dioden-Gleichrichterbrücken durch zwei gegenphasige Thyristorbrücken ersetzt werden. Durch diese Konfiguration kann die Brücke entsprechend dem im Prozess benötigten Energiefluss ausgetauscht werden.

Die wichtigsten Komponenten der Thyristor-Einspeiseeinheit sind zwei 6-Puls-Thyristorbrücken. Die Vorwärts-Brücke wandelt den eingespeisten Drehstrom in Gleichstrom um. Die Antriebe (Wechselrichter) werden über den Zwischenkreis versorgt. Die Rückwärts-Brücke wandelt, wo es notwendig ist, DC-Strom in AC-Strom zurück, um die überschüssige Bremsleistung des Motors in das Netz zurückzuspeisen.

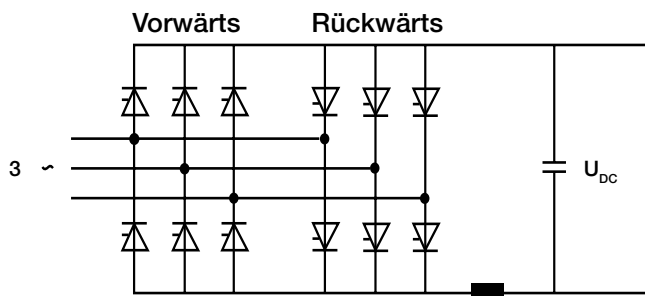


Abb. 3.3 Schaltbild einer anti-parallel arbeitenden Thyristor-Einspeiseeinheit

Es arbeitet immer nur eine Brücke, die andere ist blockiert. Der Zündwinkel des Thyristors wird ständig so geregelt, dass die Zwischenkreis-Spannung auf dem gewünschten Wert gehalten wird. Die Wahl der Vorwärts-/Rückwärts-Brücke und die Regelung der Zwischenkreis-Gleichspannung basieren auf der Messung des Einspeisestroms,

der Einspeisespannung und der Zwischenkreis-Spannung. Die DC-Drosselspule filtert die Stromspitzen aus dem Zwischenkreis heraus.

Die Hauptvorteile der anti-parallel arbeitenden Thyristorbrücke sind:

- Bewährte Technik.
- Geringere Investitionskosten als bei der IGBT-Lösung.
- Die Gleichspannung kann auf einen niedrigeren Wert als das Netz geregelt werden. Bei bestimmten Spezialanwendungen kann das ein Vorteil sein.

Die wesentlichen Nachteile der anti-parallel arbeitenden Thyristorbrücke sind:

- Die DC-Sammelschienenenspannung ist immer niedriger als die AC-Einspeisespannung, um eine Kommutationsreserve zu erhalten. Somit bleibt die in den Motor eingespeiste Spannung niedriger als die Wechselspannung der Einspeiseeinheit. Das kann durch Einsatz eines Step-up-Spartransformators in der Einspeisung umgangen werden.
- Bei Ausfall der AC-Einspeisung besteht die Gefahr, dass die Sicherung aufgrund eines Ausfalls der Thyristorkommutierung durchbrennt.
- $\cos\phi$ ändert sich mit der Belastung.
- Die Oberschwingungen sind größer als in rückspeisefähigen IGBT-Einheiten.
- Die Verzerrung fließt durch andere Netzimpedanzen und kann bei anderen Geräten, die an dasselbe Netz angeschlossen sind, eine unerwünschte Verzerrung der Spannung verursachen.
- Bei Netzausfall besteht keine Bremsmöglichkeit.

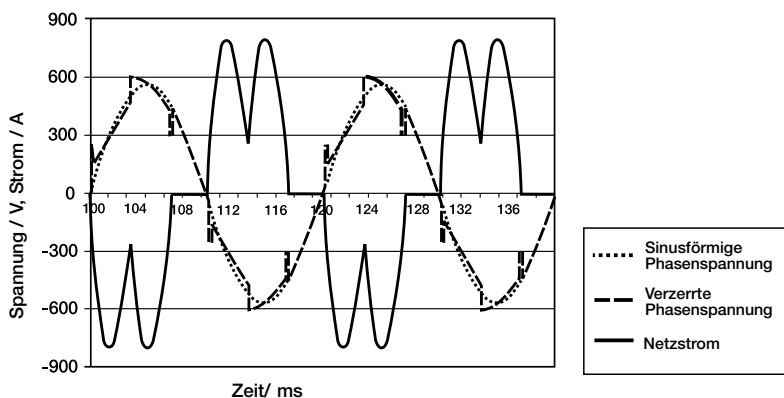


Abb. 3.4. Verlauf des anti-parallelen Brückenstromes und der Spannung beim Bremsen.

3.4 Aufbau der IGBT-Brücke

3.4.1 Arbeitsweise der IGBT-Rückspeiseeinheiten

Die auf IGBT basierende Rückspeisung beruht auf den gleichen Prinzipien wie die Übertragung von Energie im Netz. In einem Netz sind mehrere Generatoren und Lasten miteinander verbunden. Es kann angenommen werden, dass am Anschlusspunkt das Netz ein großer Synchrongenerator mit einer festen Frequenz ist. Die IGBT-Eingangsbürcke des Antriebs (später Netzwechselrichter) kann als ein anderes AC-Spannungsnetz betrachtet werden, das über ein Drossel an den Generator angeschlossen ist. Das Prinzip der Stromübertragung zwischen zwei AC-Netzen mit der Spannung U , die miteinander verbunden sind, kann anhand der folgenden Formel (3.4) berechnet werden.

$$P = \frac{U_{\text{Netz1}} \cdot U_{\text{Netz2}}}{X} \sin \delta \quad (3.4)$$

Die Formel zeigt, dass für die Stromübertragung zwischen zwei Netzen eine Differenz im Phasenwinkel zwischen den Spannungen der beiden AC-Netze bestehen muss. Um den Stromfluss zwischen den beiden Netzen regeln zu können, muss der Winkel geregelt werden.

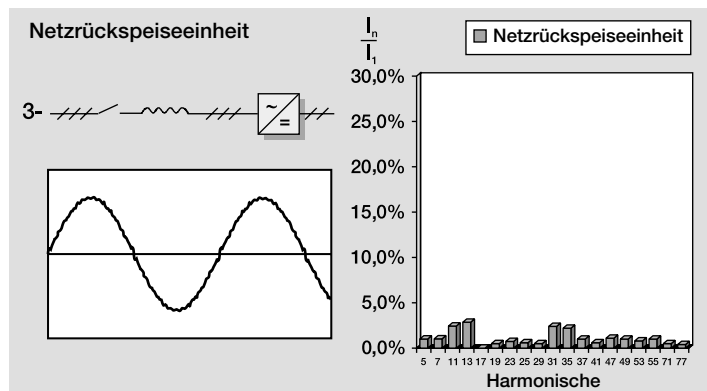


Abb. 3.5. Typische Wellenform und Harmonische des Netzstroms einer IGBT-Wechselrichterbrücke.

3.4.2 Regelung der IGBT-Rückspeisung

In IGBT-Rückspeiseeinheiten gibt es drei allgemeine Regelaufgaben. Die erste Aufgabe ist, die Spannung der DC-Sammelschienen unabhängig vom Absolutwert des Energieflusses und der Stromrichtung stabil zu halten. Hierdurch wird sichergestellt, dass Wechselrichter, die AC-Motoren mit Spannung versorgen, aufgrund einer stabilen Sammelschienen Gleichspannung unabhängig vom Arbeitspunkt optimal arbeiten können. Die Sammelschienen Gleichspannung ist stabil, wenn der Stromfluss in die Sammelschiene dem Stromfluss aus der Sammelschiene entspricht. Diese Regelung des entsprechenden Stromflusses wird durch Regelung des Phasenwinkels zwischen den beiden AC-Netzen erreicht.

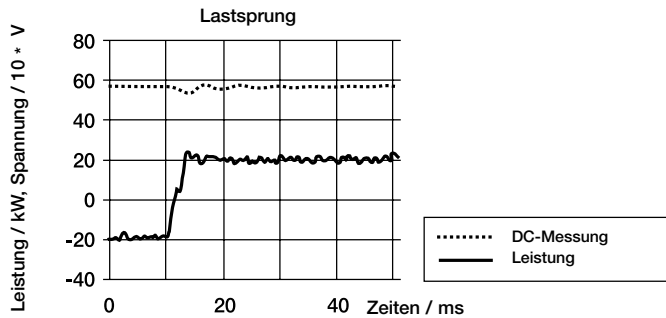


Abb. 3.6. Schneller Wechsel vom Rückspeise- zum Motorbetrieb. Bemerkenswerte Stabilität der DC-Sammelschienenspannung bei der Umschaltung.

Das zweite Regelziel ist die Minimierung des benötigten Einspeisestroms, d.h. mit $\cos\varphi = 1,0$ zu arbeiten. Dies wird durch die Regelung der Ausgangsspannung des Netzwechselrichters erreicht. Bei bestimmten Anwendungen ist es erwünscht, dass der IGBT-Netzwechselrichter auch als induktive oder kapazitive Last arbeitet.

Das dritte Regelziel ist die Minimierung der Oberschwingungen des Einspeisestroms. Die Hauptkriterien bei der Planung sind die Impedanz der Drossel und ein geeignetes Regelverfahren.

3.4.3 Direkte Drehmomentregelung als direkte Leistungsregelung

Die direkte Drehmomentregelung (DTC) ist eine Möglichkeit, einen durch einen Wechselrichter gespeisten AC-Motor zu regeln. Bei diesem Regelungsverfahren werden IGBT-Schalter auf Basis der Differenz zwischen dem Istwert des AC-Motordrehmoments und dem vom Benutzer vorgegebenen Drehmoment-Sollwert direkt ein- und ausgeschaltet (Technische Anleitung Nr. 1). Das gleiche Prinzip kann bei einem Netzwechselrichter, der den Energiefluss vom Netz zum Antrieb und umgekehrt regelt, angewandt werden. Energie ist das Drehmoment multipliziert mit der im Netz konstanten Winkelfrequenz, d.h. Drehmomentregelung bedeutet auch Regelung des Energieflusses.

$$P = \frac{U_l U_k}{X} \sin\delta = |T| |\omega| \quad (3.5)$$

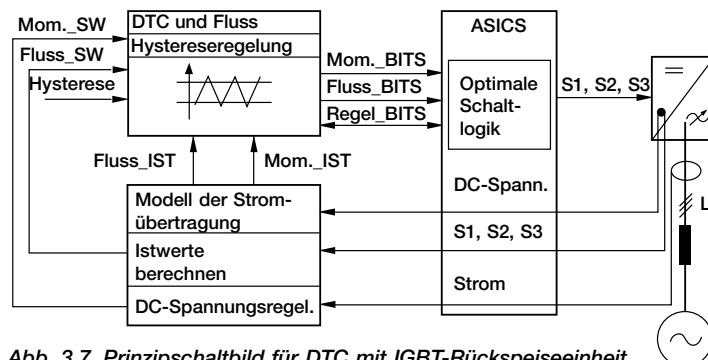


Abb. 3.7. Prinzipschaltbild für DTC mit IGBT-Rückspeiseeinheit.

Die DTC-Regelung trägt mit der IGBT-Technologie zu geringeren Oberschwingungen des Stroms bei. Deshalb kann die IGBT-Einspeiseeinheit als Ersatz für Ein-Quadranten-12-Puls- oder 18-Puls-Einspeisekonfigurationen verwendet werden, die üblicherweise zur Reduzierung der Oberschwingungen des Stroms auf der Einspeiseseite verwendet werden. Eine IGBT-Einspeiseeinheit ist deshalb auch in solchen Fällen eine Lösung, in denen die eher die Oberschwingungen als die Bremsenergie eine Rolle spielen.

Die wesentliche Vorteile einer IGBT-Rückspeiseeinheit sind:

- Geringe Oberschwingungen des Einspeisestroms im Motor- und Generatorbetrieb.
- Hohe Dynamik durch schnelle Änderungen des Energieflusses auf der Lastseite.
- Möglichkeit, eine höhere Gleichspannung zu erreichen, als bei entsprechender AC-Einspeisung. Hiermit kann ein schwaches Einspeisenetz kompensiert werden oder das maximale Motormoment im Feldschwächebereich erhöht werden.
- Vollständige Kompensation von Netzspannungseinbrüchen dank der Fähigkeit der Spannungserhöhung.
- Regelbarkeit des Leistungsfaktors.
- Durchlauf bei Netzausfall durch automatische Synchronisation auf das Netz.
- Die Sammelschienen Gleichspannung hat im motorischen Betrieb und beim Bremsen in etwa den gleichen Wert. Keine zusätzliche Spannungsbelastung der Isolation der Motorwicklung beim Bremsen.

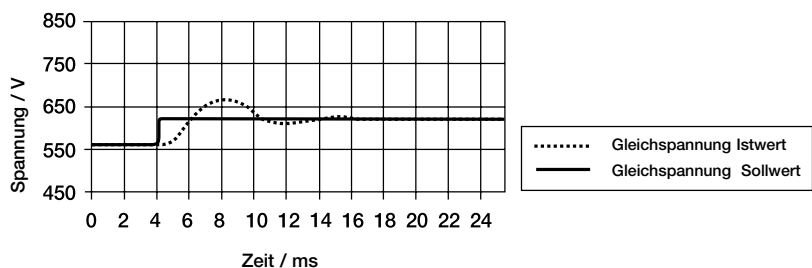


Abb.3.8. Erhöhung der Einspeisespannung.

Die wesentlichen Nachteile einer IGBT-Rückspeiseeinheit sind:

- Höhere Investitionskosten.
- Bei Netzausfall ist Bremsen nicht möglich.
- Hochfrequente Spannungsüberschwingungen aufgrund der hohen Schaltfrequenz. Diese Spannungsanteile von mehreren Kilohertz können kleine, in anderen elektrischen Geräten verwendete Kondensatoren erregen. Mit einer geeigneten Planung und entsprechender Anordnung der Einspeisetransformatoren für die verschiedenen Geräte können diese Phänomene eliminiert werden.

Wann empfiehlt sich die Verwendung einer IGBT-Rückspeiseeinheit:

- Das Bremsen erfolgt kontinuierlich oder wiederholt sich regelmäßig.
- Die Bremsleistung ist sehr hoch.
- Wenn ein Platzersparnis gegenüber der Lösung mit Bremswiderständen erzielt werden kann.
- Wenn die Grenzwerte der Netzüberschwingungen kritisch sind.

3.4.4 Dimensionierung einer IGBT Rückspeiseeinheit

Die Festlegung des Einspeisestroms der IGBT-Einheit basiert auf der benötigten Leistung. Angenommen die benötigte Motorwellenleistung beträgt 130 kW und die Bremsleistung 100 kW. Zur Dimensionierung der IGBT-Einspeiseeinheit wird der Maximalwert der Motor- oder Bremsleistung gewählt, in diesem Fall 130 kW. Die Motorspannung beträgt 400 V. Der Mindestwert für das Versorgungsnetz ist 370 V.

In diesem Fall kann die Fähigkeit der Spannungserhöhung genutzt werden; die Sammelschienengleichspannung wird soweit erhöht, als wäre die Einspeisewechselspannung 400 V. Der benötigte Einspeisestrom wird auf Basis von 370 V berechnet. Bei angenommenen 5 % Verlusten im Motor und Antrieb beträgt die vom Netz benötigte Gesamtleistung 136,5 kW. Der Einspeisestrom kann anhand der folgenden Formel berechnet werden:

$$I_{\text{Einspeisung}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Einspeisung}}} = \frac{136,5 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 370 \text{ V}} = 213 \text{ A} \quad (3.6)$$

Die Auswahl der IGBT-Rückspeiseeinheit erfolgt ausschließlich nach dem berechneten Stromwert.

3.5 Gleichspannungs-Sammelschiene

Wenn ein Prozess aus mehreren Antrieben besteht und ein Motor bremsbar sein muss während andere motorisch laufen, ist die gemeinsame Gleichspannungs-Sammelschiene eine sehr effektive Lösung zur Wiederverwendung der mechanischen Energie. Ein Antriebssystem mit einer gemeinsamen Gleichspannungs-Sammelschiene besteht aus einem separaten Eingangsgleichrichter, der Wechsel- in Gleichspannung umwandelt und Wechselrichtern, die die an die gemeinsame Gleichspannungs-Sammelschiene angeschlossenen Drehstrom-Motoren versorgen, d.h. über die Sammelschiene kann die Bremsenergie von einem Motor für die anderen Motoren genutzt werden. Der Grundaufbau der gemeinsamen Gleichspannungs-Sammelschiene ist in Abbildung (3.9) dargestellt.

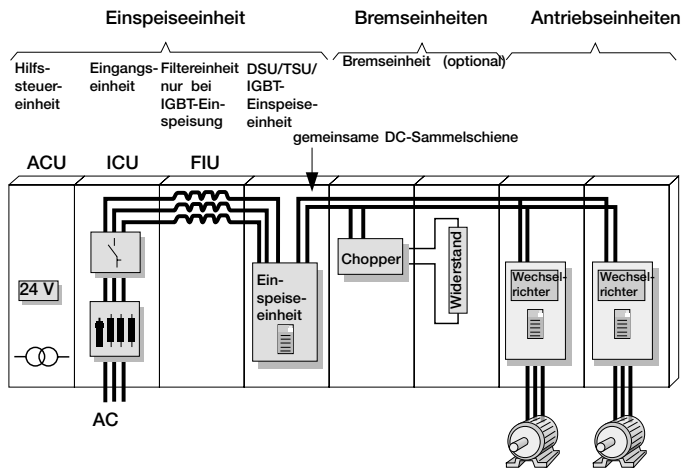


Abb. 3.9. Grundaufbau mit Gleichspannungs-Sammelschiene.

Die Hauptvorteile des Einsatzes der Gleichspannungs-Sammelschiene sind:

- Einfacher Ausgleich des Energieflusses zwischen den Antrieben.
- Geringe Systemverluste bei der Umwandlung der Bremsenergie durch die Gleichspannungs-Sammelschiene.
- Selbst wenn die momentane Bremsleistung höher ist als die motorische Leistung brauchen der Bremschopper und der Widerstand nicht auf die volle Bremsleistung ausgelegt zu werden.
- Wenn die Bremsleistung voraussichtlich über längere Zeiträume benötigt wird, können mehrere Gleichrichter kombiniert werden.

Die wesentlichen Nachteile der Verwendung der Gleichspannungs-Sammelschiene mit Ein-Quadrant-Gleichrichter sind:

- Die benötigte motorische Leistung muss größer oder gleich der Bremsleistung sein.
- Bremschopper und -Widerstand werden benötigt, wenn die erforderliche Bremsleistung die motorische Leistung übersteigt.

Wann sollte eine Gleichspannungs-Sammelschiene mit Ein-Quadranten-Gleichrichter verwendet werden:

- Bei einer größeren Anzahl von Antrieben.
- Die motorische Leistung ist immer größer als die Bremsleistung oder der Bremschopper benötigt nur eine geringe Bremsleistung.

Kapitel 4 - Lebensdauerkosten verschiedener Arten elektrischer Bremsung

Die Ermittlung der über die gesamte Lebensdauer anfallenden Kosten wird bei Investitionen in energiesparende Produkte immer wichtiger. Mit AC-Antrieben werden Motordrehzahl und das Drehmoment geregelt. Diese Grundfunktion der AC-Antriebe führt, im Vergleich mit anderen Verfahren, zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs. In Pumpen- und Lüfteranwendungen werden Bremsvorgänge selten benötigt. Moderne AC-Antriebe werden jedoch zunehmend in Anwendungen eingesetzt, bei denen das Bremsen notwendig ist.

Einige technische Kriterien wurden oben bereits genannt. Nachfolgend werden die ökonomischen Faktoren der verschiedenen Ansätze für das elektrische Bremsen untersucht.

4.1 Kalkulation der direkten Energiekosten

Die direkten Energiekosten können z.B. anhand der Energiepreise und der geschätzten Bremszeit und Leistung pro Tag berechnet werden. Der Energiepreis schwankt von Land zu Land, es kann jedoch ein typischer Wert von 0,05 Euro pro Kilowattstunde angesetzt werden. 1 Euro ~ 1 USD. Die jährlichen Energiekosten können mit der folgenden Formel errechnet werden:

$$\text{Kosten} = \text{Bremszeit (Std./Tag)} \cdot \text{Durchschnittl. Bremsleistung (kW)} \cdot \text{Energiepreis (Euro/kWh)} \cdot 365 \quad (4.1)$$

Beispiel: ein 100 kW Antrieb läuft pro Jahr 8000 Stunden und bremst stündlich 5 Minuten mit einer durchschnittlichen Leistung von 50 kW, d.h. 667 Stunden pro Jahr. Die jährlich anfallenden direkten Kosten für die Bremsenergie betragen 1668 Euro.

4.2 Berechnung der Investitions- kosten

Die für die verschiedenen Bremsverfahren benötigte Ausrüstung variiert. Die Investitionskosten der folgenden Komponenten müssen bewertet werden.

Bremschopper:

- Die zusätzlichen Investitionskosten von Bremschopper und Widerstand plus die Kosten für den zusätzlich von den Komponenten benötigten Platz.
- Die Investitionskosten für die zusätzlich benötigte Kühlung des Bremschoppers.

Elektrische Bremsung mit Thyristor oder IGBT:

- Die zusätzlichen Investitionskosten für die Thyristor- oder IGBT-Nutzbremung im Vergleich mit den Kosten des gleichen Antriebs ohne elektrische Bremsung.

Gleichspannungs-Sammelschiene:

- Die zusätzlichen Investitionskosten für den Bremschopper und den Widerstand einschl. des für diese Komponenten benötigten Platzes bei einer Lösung mit gemeinsamer Gleichspannungs-Sammelschiene.
- Die Kostendifferenz bei der Lösung mit Gleichspannungs-Sammelschiene und der entsprechenden Lösung mit Einzelantrieben.

4.3 Berechnung der Lebensdauerkosten

Die Berechnung der während der Lebensdauer anfallenden Kosten unterstützt die rein ökonomische Investitionsentscheidung. Der Energiepreis sowie der Preis der Antriebe schwankt in den verschiedenen Ländern und ist von den Energieversorgern, der Unternehmensgröße, dem Zinssatz, der Laufzeit der Investition und der gesamten makroökonomischen Situation abhängig. Die in den folgenden Beispielen angegebenen Preise dienen lediglich zur Veranschaulichung des Berechnungsprinzips.

Fall 1 - Gelegentliches Bremsen

Der folgende Anwendungsfall wird betrachtet: Die motorische Dauerleistung beträgt 200 kW bei einer Wellendrehzahl von 1500 U/min. Bei einem Not-Halt-Befehl muss die Anwendung innerhalb von 10 Sekunden herunterfahren. Die prozesstechnische Erfahrung zeigt, dass sich einmal pro Monat ein Not-Halt ereignet. Das Massenträgheitsmoment J des Antriebssystems beträgt 122 kgm^2 . Bei Aktivierung des Not-Halts kann das Lastmoment vernachlässigt werden.

Berechnung des für den Motor benötigten Bremsmoments:

$$T = J \cdot \frac{(\omega_{\text{Start}} - \omega_{\text{Ende}})}{t} = J \cdot \frac{(n_{\text{Start}} - n_{\text{Ende}}) \cdot 2 \pi}{t \cdot 60} =$$
$$122 \cdot \frac{(1500 - 0) \cdot 2 \pi}{10 \cdot 60} = 1915 \text{ Nm} \quad (4.2)$$

Das typische Drehmoment für einen Motor mit 200 kW, 1500 U/min. beträgt ca. 1200 Nm. Ein herkömmlicher, von einem Wechselrichter geregelter Drehstrom-Motor kann mit einem Drehmoment von 200 % des Nennwertes laufen. Um höhere Drehmomentwerte zu erreichen, wird ein proportional höherer Motorstrom benötigt. Die Bremsleistung ist zu Beginn des Bremszyklus am größten.

$$P_{\text{Brems, max.}} = T * \omega = 1915 * \frac{1500}{60} * 2 \pi \approx 300 \text{ kW} \quad (4.3)$$

Der Bremschopper und der Widerstand müssen unverzüglich dem Strom für eine Leistung von 300 kW standhalten. Die durchschnittliche Bremsleistung wird nachfolgend berechnet.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (4.4)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$
$$\frac{1}{2} * 122 * \left(\frac{1500}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{10} = 150,3 \text{ kW} \quad (4.5)$$

Kosten der Widerstandsbremung:

Der benötigte Bremschopper ist für eine maximale Bremsleistung von 300 kW ausgelegt. Wenn der Antrieb eine Leistungsbegrenzungsfunktion besitzt, kann der Bremswiderstand auf 150,3 kW dimensioniert werden. Die zusätzlichen Kosten für den Bremschopper und den Widerstand betragen 4000 Euro.

Der Bremswiderstand erfordert einen zusätzlichen Platz von 0,4 m² Bodenfläche. Die Kosten hierfür betragen 500 Euro/m².

Aufgrund des geringen Heizenergiebedarfs und der Bremsung bei Not-Aus können zusätzliche Kosten für die Kühlung vernachlässigt werden.

Die gesamten zusätzlichen Investitionskosten betragen:

- Bremschopper und Widerstand im Schrank eingebaut, 4000 Euro.
- Platzbedarf 0,4 m² * 500 Euro/m², = 200 Euro.

Die Gesamtkosten der während eines Bremsvorgangs vernichteten Energie betragen:

$$\text{Kosten} = \frac{10}{3600} (\text{h}) * \frac{300}{2} (\text{kW}) * 0,5 (\text{ Euro/kWh}) = 0,02 \text{ Euro} \quad (4.6)$$

In diesem Fall können die Kosten für die Bremsenergie vernachlässigt werden.

Kosten des 4Q-Antriebs:

Die zusätzlichen Kosten einer entsprechenden Investition für elektrisches Bremsen mit anti-paralleler Thyristorbrücke im Vergleich mit einem Antrieb mit Bremschopper betragen 7000 Euro. Wie erwartet, können die Energieeinsparungen nicht als Argument zur Deckung der Kosten der zusätzlich benötigten Investitionen herangezogen werden.

Fall 2 - Krananwendung

Folgender Anwendungsfall wird betrachtet:

Kran mit einer Hubleistung von 100 kW. Der Kran benötigt im motorischen und generatorischen Betrieb die volle Leistung. Der längste Hub kann 3 Minuten dauern. Die durchschnittliche Betriebsdauer für das Heben beträgt 20 % über das Jahr.

Kosten der Widerstandsbremung:

Der Bremschopper und der Widerstand müssen für eine Dauerbremsleistung von 100 kW mit einer maximalen Bremszeit von 3 Minuten ausgelegt sein. Üblicherweise wird der Bremschopper für eine Bremsdauer von 1 Minute alle 10 Minuten dimensioniert.

- Bremschopper und Widerstand in einen Schrank eingebaut kosten 7800 Euro.

Der mechanische Aufbau des Krans ermöglicht Schränke mit Bremschopper. Keine Kosten für zusätzlichen Platzbedarf.

Es wird angenommen, dass der Kran 50 % der Betriebszeit generatorisch arbeitet, d.h. durchschnittlich 2,4 h/Tag. Die Gesamtkosten der vernichteten Energie betragen pro Jahr:

$$\text{Kosten} = 2,4 (\text{Std./Tag}) * 100 (\text{kW}) * 0,05 (\text{ Euro/kWh}) * 365 = 4380 \text{ Euro} \quad (4.7)$$

Kosten des 4Q-Antriebs:

Der IGBT-4Q-Antrieb wird für Krananwendungen empfohlen.

Die zusätzlichen Investitionskosten für elektrisches Bremsen mit IGBT-Eingangsbücke im Vergleich zu einem Antrieb mit Bremschopper betragen 4000 Euro.

Die Amortisationsrechnung zeigt, dass eine zusätzliche Investition von 4000 Euro schon während des ersten Betriebsjahres eine Energieeinsparung in gleicher Höhe bringt.

Fall 3 - Zentrifuge

Der folgende Anwendungsfall wird betrachtet:

Zuckerzentrifuge mit 6-Pol-Motor, 160 kW Leistung. Der Motor benötigt für die Dauer von 30 Sekunden das volle Drehmoment, um die Charge auf die Maximaldrehzahl von 1100 U/min zu beschleunigen, die Zentrifuge schleudert dann 30 Sekunden lang bei hoher Drehzahl Flüssigkeit aus der Charge. Wenn die Charge trocken ist, bremst der Motor die Zentrifuge so schnell wie möglich ab, um das Entleeren und Wiederbeschicken zu ermöglichen.

In einem Chargenzyklus sind die Beschickungs-, Zentrifugier- und Entleerungszeiten festgelegt, so dass die einzige Möglichkeit der Produktionssteigerung die Erhöhung der Beschleunigungs- und Verzögerungswerte ist. Das wird mit Hilfe eines IGBT-4Q-Antriebs erreicht, da die Zwischenkreis-Gleichspannung im Feldschwächungsbereich (1000 bis 1100 U/min) für den Betrieb erhöht werden kann. Damit können pro Zyklus 3 Sekunden gespart werden, wodurch sich die Zykluszeit von 110 Sekunden auf 107 Sekunden verkürzt. Auf diese Weise kann der Durchsatz, also die Produktivität des Prozesses, gesteigert werden. Die Mehrkosten für IGBT betragen 10 %.

Kapitel 5 - Symbole und Definitionen

- AC: Wechselstrom oder -spannung
- B: Reibungskoeffizient
- C: Konstante oder Koeffizient
- $\text{Cos}\phi$: Cosinus des elektrischen Winkels zwischen der Grundspannung und dem Grundschwingungsstrom
- DC: Gleichstrom oder -spannung
- DPF: Grundschwingungs-Verschiebungsfaktor definiert als $\text{Cos}\phi_1$, wobei ϕ_1 der Phasenwinkel zwischen dem aus der Einrichtung gezogenen Grundfrequenzstrom und der der Grundfrequenzkomponente der Einspeisespannung ist.
- I: Strom [Ampere, A]
- J: Massenträgheitsmoment [kgm^2]
- n: Drehzahl [Umdrehungen pro Minute, U/min]
- P: Leistung [Watt, W]
- PF: Leistungsfaktor definiert als $\text{PF} = P/S$ (Leistung/Voltampere) = $I_1 / I_s * \text{DPF}$ (mit Sinusstrom ist PF gleich DPF).
- T: Drehmoment (Newtonmeter, Nm)
- t: Zeit
- THD: Die gesamte nichtlineare Verzerrung im Strom wird definiert als:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I_1} \quad (5.1)$$

wobei I_1 der Effektivwert des Grundschwingungsstromes ist. Die THD in der Spannung kann auf ähnliche Weise berechnet werden.

U: Spannung [V]

W: Energie [Joule, J]

ω : Winkeldrehzahl [Radiant/Sekunde, 1/s]

Kapitel 6 - Index

A

Aufzüge 12

B

Bremschopper 11, 12, 15, 16, 17,
23, 24, 25, 26, 27

Bremsleistung 7, 11, 12, 13, 15,
17, 22, 23, 26

C

$\cos\phi$ 7, 18, 29

D

DC-Einspeisung, Bremsung 13

Direkte Drehmomentregelung 13,
20

E

Ein-Quadranten 5, 8, 21, 23

Energiespeicherung 14, 15

F

Flussbremsung 13, 14

G

Gleichrichter 13, 14, 17, 22, 23

Gleichspannung 7

Gleichspannungs-
Sammelschiene 22, 23, 25

H

Harmonische 18, 29

I

IGBT 18, 19, 20, 21, 22, 24, 27,
28

Impedanz 18, 20

K

Konstantmoment 8, 12

Krane 12, 27

L

Lüfter 12

N

natürliches Bremsen 10, 11, 12

Netzwechselrichter 19, 20

O

Oberschwingungen 18, 29

P

Pumpen 12

Q

quadratisches Moment 8, 12

T

Thyristorbrücke 17, 18, 26

Trägheitsmoment 9, 10, 25, 29

U

Überdimensionierung 12

Überspannungsregler 15

V

Vier-Quadranten 5

W

Wechselrichter 13, 15, 16, 19,
20, 23, 25

Wechselspannung 7

Z

Zentrifuge 27

Zwei-Quadranten 5



ABB Automation Products GmbH

Standard Antriebe

Dudenstrasse 44 - 46

D - 68167 Mannheim

Hotline Vertrieb 0180 - 33 22 400

Fax 0621 381 1777

Internet <http://www.abb-drives.de>



Copyright © ABB Automation Group Ltd, 2001 3BFE 644562 11 R0103 Änderungen vorbehalten.

DE 16.03.2001

411
014
Druckseite