

Servoregler

Servoregler mit Stromverstärkung oder Spannungsverstärkung

Der Zweck eines Servoreglers (Servoverstärkers) in einem Bewegungssteuerungssystem ist es, einem Motor eine kontrollierte Strom- oder Spannungsmenge, basierend auf einem Steuersignal des Motion Controllers, zur Verfügung zu stellen. Dies geschieht über einen Stromverstärker (Transkonduktanz) oder Spannungsverstärker. Jeder dieser beiden Arten von Servoreglern hat Vor- und Nachteile, die berücksichtigt werden müssen, um die richtige Struktur für eine bestimmte Anwendung auszuwählen. Hier sollen nun die Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen diesen beiden Haupttypen von Schaltverstärkern aufgezeigt werden, indem drei Schlüsselbereiche betrachtet werden: Leistung, Sicherheit und Effizienz

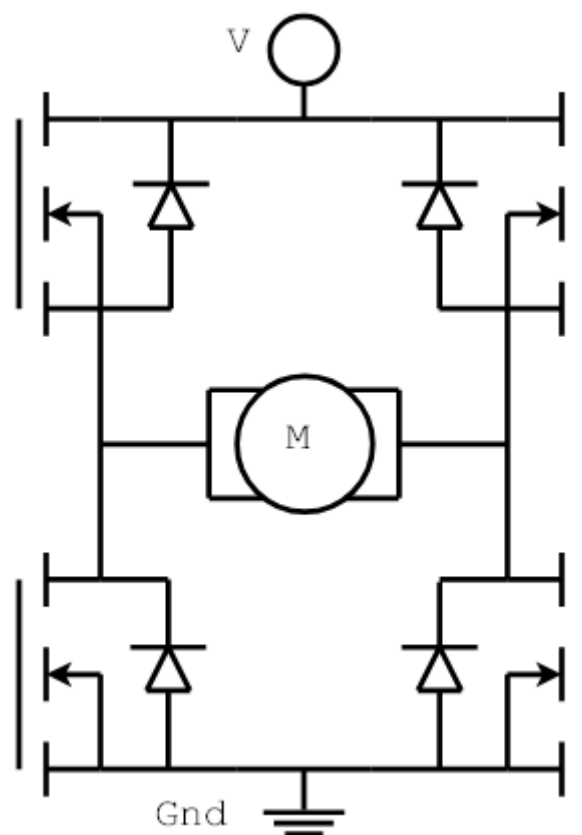


Abbildung 1: Typische H-Brücke von Schaltverstärkern

Schaltverstärker arbeiten, indem sie jeden Transistor entweder vollständig ein- oder ausschalten und ihre Arbeitszyklen verwalten, das vom Motor abgegebene Drehmoment kann vom Schaltverstärker gesteuert werden. Erwähnenswert ist, dass Linearverstärker hingegen die Transistoren in ihrer linearen Zone betreiben, in der die Transistoren je nach gewünschter Leistung teilweise eingeschaltet werden. Linearverstärker sind nützlich in Anwendungen, in denen die Stromwelligkeit - die Schwankung des Stroms durch Schalten - ein Problem sein kann, sowie bei Anwendungen mit geringer Leistung. Da die Transistoren jedoch in ihrem linearen Bereich betrieben werden, sind Linearverstärker von Natur aus ineffizient. Aufgrund ihres höheren Wirkungsgrades und ihrer Nutzbarkeit für ein breiteres Anwendungsspektrum sind Schaltverstärker weit verbreitet.

Grundlegende Funktionsprinzipien

Schaltverstärker erhalten einen Befehl von einem Motion Controller. Dieser Befehl kann in Form eines digitalen Wortes oder eines analogen Signals von einem Digital-Analog-Wandler (DAC) erfolgen. In beiden Fällen beträgt die Auflösung des Befehls typischerweise 12 oder 16 Bit. Weitere Informationen darüber, wie sich die Auflösung des Verstärkers auf die Leistung auswirkt, finden Sie im White Paper „Effects of Amplifier Resolution von Galil“. Nach dem Empfang wird dieser Befehl in die richtigen Einheiten umgewandelt und mit der Verstärkung des Servoreglers skaliert. Für einen Spannungsverstärker hat dies Einheiten von Volt/Volt oder Volt/Inkrement. Ähnlich ist es für einen Stromverstärker. Hier sind es die Einheiten von Ampere/Volt oder Ampere/Inkrement. Viele Servoverstärker verfügen über konfigurierbare Verstärkungen, die so gewählt werden sollten, dass der maximale Befehl des Motion Controllers das maximal erforderliche Drehmoment für eine konkrete Anwendung ergibt.

Sobald das Steuersignal ordnungsgemäß umgewandelt wurde, erzeugt der Servoregler entweder einen Strom oder eine Spannung, die dem Befehl entspricht. Für den Spannungsverstärker wird ein Tastverhältnis erzeugt, so dass der Spannungsausgang dem Spannungsbefehl entspricht. Der Stromverstärker ist etwas komplexer, aber letztendlich wird ein Tastverhältnis basierend auf dem Fehler zwischen dem tatsächlichen Ausgangsstrom und dem Sollstrom erstellt. Dieser Strom oder diese Spannung erzeugt dann ein Drehmoment am Motor. Die Drehmomentabgabe eines Motors ist proportional zum Strom, der durch die Motorwicklungen fließt, multipliziert mit der Drehmomentkonstante K_T des Motors, wie in Gleichung 1.

$$T = K_T * I$$

Gleichung 1: Motordrehmoment T in Abhängigkeit vom Strom

$$V = I * R + \omega * K_e + L * \frac{di}{dt}$$

Gleichung 2: Berechnung der Motorspannung

Basierend auf Gleichung 2 gibt es drei Faktoren, die die Spannung am Motor beeinflussen. Der erste Begriff, $I * R$, wobei I der Strom und R der Motorwiderstand ist, stellt den Spannungsabfall aufgrund des Motorwiderstandes dar. Zweitens, $\omega * K_e$, wobei ω die Drehzahl des Motors und K_e die Back-EMK-Konstante des Motors ist, stellt den Spannungsabfall am Motor aufgrund seiner Drehzahl dar. Der dritte Begriff, $L * di/dt$, wobei L die Motorinduktivität und di/dt die Änderungsrate des Stroms im Motor ist, stellt den Spannungsabfall am Motor durch den Schaltstrom dar. Ein wichtiger Aspekt dieser Gleichung ist, dass die maximale Spannungsabgabe des Verstärkers die maximale Geschwindigkeit bestimmt, die der Motor aufgrund seiner Back-EMK-Konstante erreichen kann. Die Neuordnung dieser Gleichung gibt einen besseren Überblick darüber, wie sich die Spannung letztlich auf das Drehmoment eines Motors auswirkt, und wird als Gleichung 3 dargestellt.

Leistung

Basierend auf Gleichung 2 gibt es drei Faktoren, die die Spannung am Motor beeinflussen. Der erste Begriff, $I \cdot R$, wobei I der Strom und R der Motorwiderstand ist, stellt den Spannungsabfall aufgrund des Motorwiderstandes dar. Zweitens, $\omega \cdot K_e$, wobei ω die Drehzahl des Motors und K_e die Back-EMK-Konstante des Motors ist, stellt den Spannungsabfall am Motor aufgrund seiner Drehzahl dar. Der dritte Begriff, $L \cdot \frac{di}{dt}$, wobei L die Motorinduktivität und $\frac{di}{dt}$ die Änderungsrate des Stroms im Motor ist, stellt den Spannungsabfall am Motor durch den Schaltstrom dar. Ein wichtiger Aspekt dieser Gleichung ist, dass die maximale Spannungsabgabe des Verstärkers die maximale Geschwindigkeit bestimmt, die der Motor aufgrund seiner Back-EMK-Konstante erreichen kann. Die Neuordnung dieser Gleichung gibt einen klareren Blick darauf, wie sich die Spannung letztendlich auf das Drehmoment eines Motors auswirkt, und wird als Gleichung 3 dargestellt.

$$T = \frac{V - \omega * K_e - L * \frac{di}{dt}}{R} * K_T$$

Gleichung 3: Motordrehmoment T basierend auf Spannung

Nachdem die Theorie aufgestellt wurde, wie Spannung und Strom das Drehmoment eines Motors beeinflussen, können die Auswirkungen dieser Gleichungen auf Servoregler mit Strom- und Spannungsverstärkung untersucht werden. Der Vergleich der obigen Gleichungen ergibt ein Bild von einem der wichtigsten Unterschiede zwischen Strom- und Spannungsverstärkern - der Linearität. Gleichung 3 zeigt, dass das von einem Spannungsverstärker erzeugte Drehmoment von der Drehzahl des Motors abhängig ist. Das bedeutet, dass das Drehmoment bei einer gegebenen Spannung je nach Drehzahl variiert. Transkonduktanzverstärker leiden nicht unter dem gleichen Problem, da sie den Strom direkt steuern.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass Spannungsverstärker, die im Chopper-Modus arbeiten, bei Betrieb in der Nähe des Ursprungs von Natur aus nichtlinear sind. Im Chopper-Modus sendet der Verstärker ein 0 bis +V (wobei V die Spannung ist, die an die Transistoren des Verstärkers angelegt wird) PWM-Signal an den Motor, wenn er sich in Vorwärtsrichtung bewegt, und ein 0 bis -V PWM-Signal an den Motor, wenn er sich in die negative Richtung bewegt. Abbildung 2 zeigt die nichtlineare Reaktion eines Spannungsverstärkers, der im Chopper-Modus arbeitet.

Dieses Verhalten tritt auf, wenn der Strom, der vom Verstärker erzeugt wird, zwischen den Einschaltzeiten der Transistoren 0 erreicht. In diesem Fall folgt der durchschnittliche Strom über den Motor einer quadratischen Kurve und nicht einer linearen Kurve. Das lineare Verhalten wird wieder aufgenommen, sobald die aktuelle Wellenform zwischen den Schaltern nicht mehr den Wert 0 erreicht. Abbildung 3 zeigt dieses Konzept.

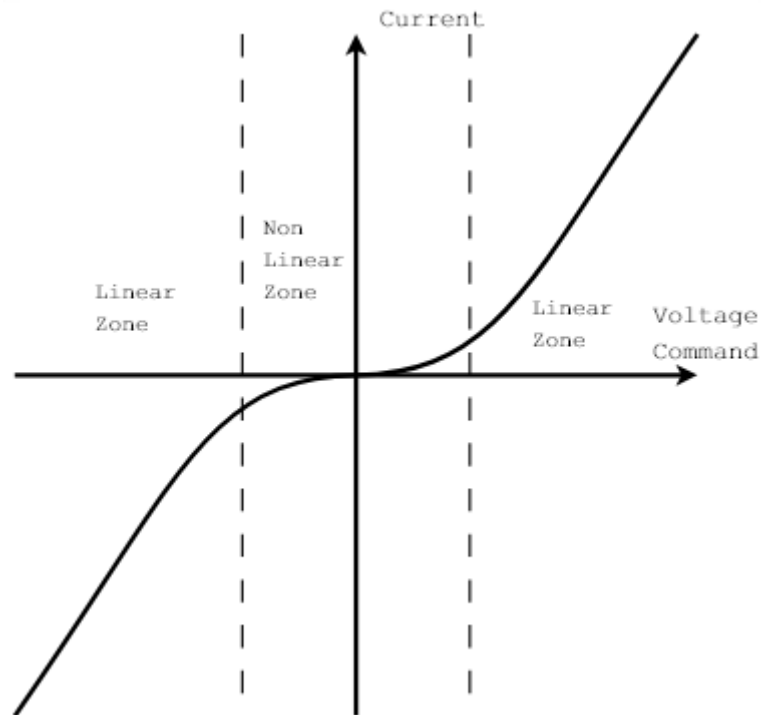


Abbildung 2: Ausgang des Spannungsverstärkers im Chopper-Modus

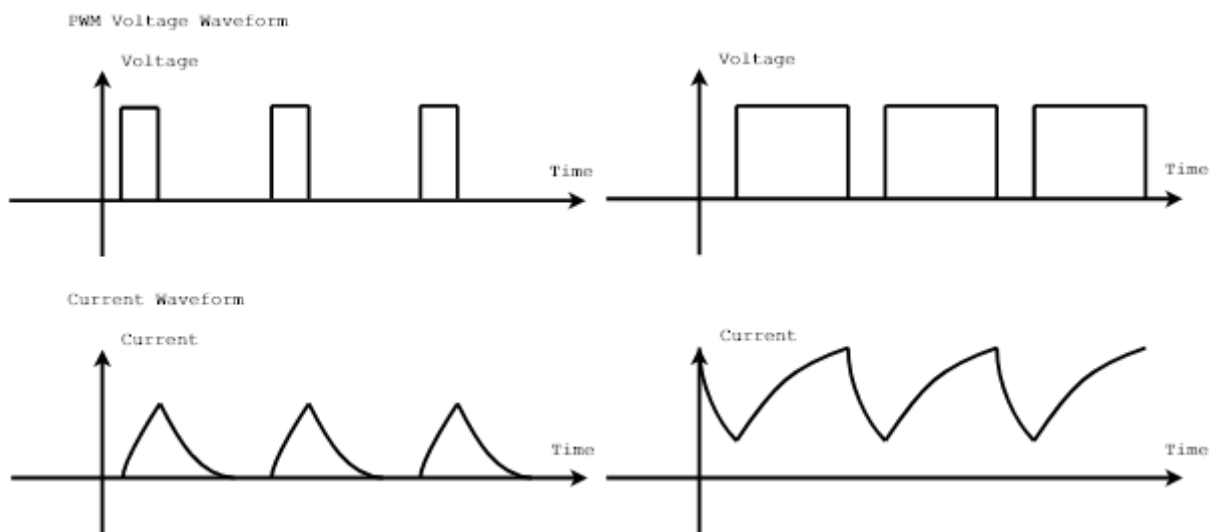


Abbildung 3: Chopper-Modus PWM und Stromwellenform nahe dem Ursprung

Eine weitere wichtige Messgröße für die Leistung ist die Bandbreite. Es gibt zwei Arten von Bandbreite, die in Bezug auf Stromverstärker angesprochen werden müssen: die Bandbreite des Stromregelkreises und die Bandbreite des Positionsregelkreises. Die Bandbreite des Stromregelkreises ist ein Maß für die Fähigkeit des Stromverstärkers, auf Änderungen des Sollstroms zu reagieren. Die Bandbreite des Positionsregelkreises ist ein Maß für die Fähigkeit des zu regelnden Systems, auf Veränderungen der vorgegebenen Position zu reagieren. Damit die Bandbreite des Positionsregelkreises nicht durch den aktuellen Verstärker beeinflusst wird, sollte die Bandbreite des Stromregelkreises eine Größenordnung größer sein, als die Bandbreite des Positionsregelkreises. Spannungsverstärker haben keine Stromregelkreise und damit kein gleichwertiges Problem. Da der Stromverstärker jedoch linearer ist als ein Spannungsverstärker, kann eine höhere Bandbreite des Positionskreises erreicht werden.

Sicherheit

Aus Gründen der Sicherheit ist es notwendig, die Stromausgabe des Verstärkers begrenzen zu können. Motoren haben zwei Nennströme, mit denen man sich befassen muss - einen Dauerwert und einen Spitzenwert. Der durchschnittliche Strom im Motor muss auf oder unter seinem Dauerstrom gehalten werden, während die Spitzenleistung mit höherem Strom über wesentlich kürzere Zeiträume verbunden ist. Der Grund dafür ist, dass mit dem Anlegen von Strom an den Motor die Temperatur des Motors steigt. Wenn die Temperatur des Motors zu hoch ansteigt, schmilzt die Isolierung auf den Motorspulen. Stromverstärker können sicherstellen, dass der Strom im Motor niemals den vom Motion Controller geforderten Wert überschreitet, da sie die Strommenge am Motor direkt steuern. Das bedeutet, dass keine Gefahr einer Überhitzung des Motors besteht, wenn die Bewegungssteuerung die für den Motor geeigneten Befehle gibt. Spannungsverstärker überwachen jedoch auf natürliche Weise den Strom nicht, so dass es zu einer Überhitzung des Motors kommen kann, wenn kein zusätzlicher Überstromschutz am Verstärker vorhanden ist. Dies kann passieren, wenn der Motor blockiert oder kurzgeschlossen wird. Eine weitere Möglichkeit tritt dafür ein, wenn die vorgegebene Spannung dazu führt, dass ein zu hoher Strom an den Motor abgegeben wird. Die zusätzliche Überstromschaltung erhöht die Kosten und Komplexität des Spannungsverstärkers.

Ebenso stellt die Überspannung eine potenzielle Gefahr für den Verstärker selbst dar. Motoren können auch als Generator fungieren, wenn eine große Trägheitslast nachläuft und den Motor antreibt, statt wie normalerweise der Motor die Last. Statt der Last können auch äußere Kräfte bzw. Momente denselben Effekt bewirken. Die so erzeugte Leistung verursacht ein Problem, da der Strom in entgegengesetzter Richtung zum Normalfall durch den Verstärker bis hin zur Stromversorgung fließt. Diese Leistung muss irgendwo verarbeitet werden, wenn die erzeugte Leistung zu groß ist. Andernfalls können Elemente der Schaltung zerstört werden. Um dies zu verhindern, müssen bei beiden Verstärkertypen Shunt-Regler oder andere Schutzschaltungen hinzugefügt werden.

Schließlich ist die Zuverlässigkeit eines Servoreglers eine Schlüsselgröße für die Sicherheit. Spannungsverstärker sind einfacher aufgebaut als ein Stromverstärker und können daher etwas zuverlässiger sein. Die Zuverlässigkeit hängt jedoch in erster Linie mit den Leistungskomponenten des Servoreglers zusammen, die sowohl zwischen Strom- als auch zwischen Spannungsverstärkern üblich sind.

Effizienz

Das letzte Thema, das als Maßstab für den Vergleich von Spannung und Stromverstärkern herangezogen wird, ist ihr Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis der erzeugten Nutzleistung zur Gesamtmenge der verbrauchten Leistung, wie in Gleichung 4 dargestellt.

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Gesamtleistung}} * 100\%$$

Gleichung 4: Effizienz

Durch den Vollbetrieb ihrer Transistoren liegt der Wirkungsgrad beider Schaltverstärkertypen typischerweise bei mehr als 90%.

Schließlich stellt die Kommutierung von bürstenlosen Motoren eine zusätzliche technische Herausforderung für Stromverstärker dar, die überwunden werden müssen, damit sie den Motor ordnungsgemäß mit Strom versorgen können. Kommutierung ist der Prozess der korrekten

Stromversorgung der bürstenlosen Motorphasen, um sie zu drehen. Während sowohl Strom- als auch Spannungsverstärker ihre Leistung kommutieren müssen, um einen bürstenlosen Motor korrekt zu betreiben, müssen Stromverstärker über eine zusätzliche Strommessschaltung verfügen, um dies zu erreichen. Diese zusätzliche Rückführung muss auch für jede Phase des Motors kommutiert werden, damit sie korrekt skaliert werden kann.

Während Transkonduktanz- und Spannungsverstärker in Bezug auf den Wirkungsgrad identisch sind, ist der Transkonduktanzverstärker aufgrund seiner Linearität und der höheren Fähigkeit zur Bandbreite des Positionsschleifens eine bessere Wahl für Anwendungen mit Motion Controller. Obwohl sie eine gewisse zusätzliche Komplexität für die Kommutierung haben, wird dies durch ihre Leistungsvorteile aufgewogen.

Servoregler	als Stromverstärker	als Spannungsverstärker
Linearität	sehr gut	Nichtlinearität um den Nullpunkt
Bandbreite	Höher	Geringer
Sicherheit	Abhängig von Leistungsbauteilen	Abhängig von Leistungsbauteilen
Effizienz	>90%	>90%

ACHSTRON Motion Control GmbH

Berner Feld 42
78628 Rottweil – Germany

T +49 741 174 29-0
F +49 741 174 29-90

Mail mail@achstron.de
www www.achstron.de