

Stromsensoren

Kompensierte Messung

Es gibt viele Arten, um Ströme zu messen. Recht hohe Genauigkeit lässt sich mit der Methode der magnetischen Erfassung nach dem Kompensationsprinzip erzielen.

Magnetische Stromsensoren, die nach dem Kompensationsprinzip arbeiten, messen Stromstärken vom Gleichstrom bis hin zu hohen Frequenzen (über 10 kHz) agiert das System als Stromwandler und der Spannungsausgang des Kompensationsstromtreibers dient als Massenpunkt. Der Übergang zwischen den beiden Betriebsmodi ist fließend. Der Kompensationsstrom oder eine abgeleitete Spannung über einen in Reihe geschalteten Messwiderstand ist die Ausgangsvariable des Sensors. Ein Prinzip zur Bestimmung von Nullfeldern innerhalb des Spalts des Feldkonzentrator-kerns verwendet eine magnetische Sonde (Bild 2). In diesem Fall wird das Feld nicht mittels des für gewöhnlich verwendeten Hall-Effekt-Sensors bestimmt. Der Sensor der Magnetfeldsonde besteht stattdessen aus einer Spule, die auf ihren eigenen weichmagnetischen Kern aufgewickelt ist, der wiederum aus einem Streifen amorphen Metalls aufgebaut ist. Eine Rechteckspannung hoher Frequenz, die durch eine Spule gekoppelt. Der magnetische Fluss dieses Kerns wird innerhalb des Luftspalts gemessen und mittels eines Kompensationsstroms, der proportional zum Primärstrom ist und durch das Win-

dungszahlverhältnis geteilt wird, auf Null geregelt. Bei höheren Frequenzen (über 10 kHz) agiert das System als Stromwandler und der Spannungsausgang des Kompensationsstromtreibers dient als Massenpunkt. Der Übergang zwischen den beiden Betriebsmodi ist fließend. Der Kompensationsstrom oder eine abgeleitete Spannung über einen in Reihe geschalteten Messwiderstand ist die Ausgangsvariable des Sensors.

Ein Prinzip zur Bestimmung von Nullfeldern innerhalb des Spalts des Feldkonzentrator-kerns verwendet eine magnetische Sonde (Bild 2). In diesem Fall wird das Feld nicht mittels des für gewöhnlich verwendeten Hall-Effekt-Sensors bestimmt. Der Sensor der Magnetfeldsonde besteht stattdessen aus einer Spule, die auf ihren eigenen weichmagnetischen Kern aufgewickelt ist, der wiederum aus einem Streifen amorphen Metalls aufgebaut ist. Eine Rechteckspannung hoher Frequenz, die durch eine Spule gekoppelt. Der magnetische Fluss dieses Kerns wird innerhalb des Luftspalts gemessen und mittels eines Kompensationsstroms, der proportional zum Primärstrom ist und durch das Win-

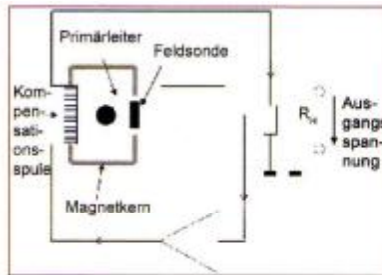


Bild 1: Blockdiagramm eines Stromsensors nach dem Kompensationsprinzip

stimmt den Arbeitszyklus des Steuerstroms. Ist kein magnetisches Feld vorhanden, ist dessen Wert 0,5. Ein vorhandenes Magnetfeld stört die Symmetrie des Sondenkerns und verändert den Arbeitszyklus des PWM-Signals am Komparatorausgang, von dem der Kompensationsstrom hergeleitet wird.

Die Frequenz des PWM-Signals der Sonde in den aktuellsten Sensoren liegt zwischen 250 kHz und 550 kHz, was den verwendbaren Frequenzbereich eines derartigen Sensors, der für gewöhnlich bis zu 100 kHz reicht, sowie die Übergangsfrequenz des Regelkreises (für gewöhnlich 10 kHz) bei Weitem übertrifft (Bild 3).

Eigenschaften der Magnetsonde

Der Sensor der Magnetsonde bietet gegenüber den Hall-Effekt-Sondensensoren mehrere Vorteile. Diese resultieren hauptsächlich daraus, dass die Nachteile von Halbleitern, wie zum Beispiel eine breite Streuung entscheidender Parameter (z.B. Offset), Rauschen und thermische Drift nicht zum Tragen kommen.

Die Sondenverstärkung kann als das Verhältnis zwischen der Ausgangsspannung der Sonde und dem Eingangsstrom bei offenem Regelkreis definiert werden. Der Arbeitszyklus des PWM-Signals des Magnetsondenkreises ändert sich in Abhängigkeit vom Primärstrom, das PWM-Signal wird integriert und liefert eine (innere) Ausgangs-

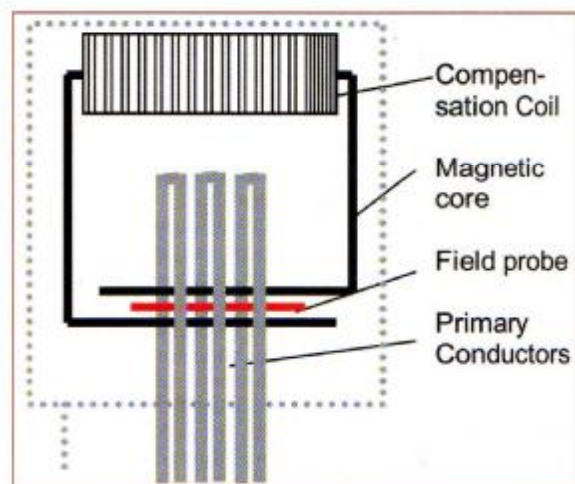


Bild 2: Schematische Konstruktion eines Stromsensors mit Magnetsonde

spannung. Die Änderung dieser Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom Primärstrom ist die Sondenverstärkung. Das Hall-Effekt-Gerät produziert stattdessen auf direktem Wege eine Spannung. Die hohe Verstärkung der Magnetsonde von 0,5 V/A übertrifft die Verstärkung des Hall-Effekt-Gerätes, die bei 1 mV/A liegt, um ein Vielfaches. Diese hohe Verstärkung schafft eine hohe Messpräzision, sodass eine niedrige Verstärkung in den nachfolgenden Verstärkerstufen ausreicht. Dies wiederum führt zu einem niedrigeren Rauschen und reduziert die verstärkerbedingten Einflüsse (z.B. Verstärker-Offset).

Der niedrige Offset des Magnetsondenkreises (10 mA Primärstromäquivalente im Vergleich zu den 100 mA bis 200 mA eines Hall-Effekt-Sensors) resultiert aus der nahezu perfekten Symmetrie der magnetischen Hysterese des Magnetfeldsondenkerns und schafft auch am Ausgang einen niedrigen Offset. Hall-Effekt-Sonden produzieren nicht nur viel größere Offsets, sie unterliegen auch einer breiten Streuung und einer thermischen Drift des Offsets. Sämtliche Eigenschaften von Magnetfeldsondensensoren, die eine Auswirkung auf die Genauigkeit haben, sind so gut wie temperaturunabhängig. Aus diesem Grunde sind derartige Bauelemente anderen Sensoren überlegen, wenn man den Offset, die Linearität und die gesamte Genauigkeit über den gesamten Betriebstemperaturbereich und nicht nur bei Raumtemperatur betrachtet. Der Gesamtfehler, den man für gewöhnlich im Falle von Magnetfeldsondensensoren zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ feststellt, liegt zwischen 1% und 1,5%; Hall-Effekt-Sensoren weisen in demselben Temperaturbereich eine Ge-

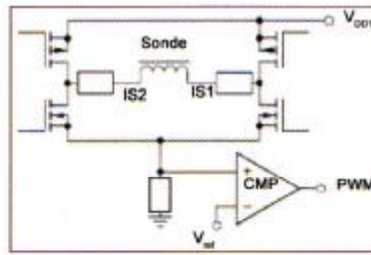


Bild 3: Steuerkreis mit magnetischer Sonde

nauigkeit von 2% bis 3% auf. Feuchtigkeit kann die Ausgangsspannung von Hall-Effekt-Geräten beeinflussen, die relativ hochohmige Spannungsausgänge besitzen, denn sie sorgt dafür, dass Leckstrompfade entstehen. Auf die niederohmigen Stromkreise der magnetischen Sonde hingegen hat Feuchtigkeit keine Auswirkungen. Daher brauchen die Sonde und ihr Kreislauf keinen speziellen Schutz. Derartige Sensoren eignen sich sehr gut für den Betrieb in tropischem Klima.

Signalverarbeitung

Das IC »DRV401« von Texas Instruments dient der Verarbeitung von Signalen für Stromsensoren mit Magnetsonden nach dem Kompensationsprinzip und integriert nahezu die gesamte Sensorelektronik auf einem Chip. Die Elektronik umfasst die Magnetsondenschnittstelle, Filter, einen Kompensationsstromtreiber mit H-Brückenschaltung, einen Spannungstreiber für die differenzielle Ausgangsspannung sowie eine präzise Referenzspannungsquelle. Für ein vollständiges, hochpräzises Stromerfassungsgerät sind lediglich ein paar passive Komponenten und der Magnetkreis notwendig.

Das IC kann mit einer unipolaren Versorgungsspannung von +5 V betrieben werden. Ein Integrator filtert das PWM-Signal an der Schnittstelle der Magnetfeldsonde durch einen Tiefpass. Dieser Filterung folgt

eine Integrator-Differenzierer-Stufe. Auf diese Weise bildet es das Signal für den Kompensationsstromtreiber und beschränkt die Bandbreite, damit die Stabilität dieses hoch verstärkenden Regelkreises erreicht werden kann. Der Kompensationsstromtreiber muss in der Lage sein, eine maximale Stromstärke von $I_{prim,max}/n$ durch den Widerstand der Kompensationswiderstand und den Messwiderstand zu treiben. Je höher die Stromstärken sind, die der Treiber treiben kann, desto größer können die Bandbreiten der Stromstärken des resultierenden Sensors sein.

Dementsprechend ist der Treiber als Vollbrücke konstruiert, da diese Konstruktion es ermöglicht, die erforderlichen Stromstärken mit einer einzigen Versorgungsspannung von nur 5 V zu treiben. Für höhere Stromstärken kann eine externe Endstufe hinzugefügt werden. Diese lässt sich beispielsweise mit einer dualen Versorgung von $\pm 15\text{ V}$ betreiben. Um die Stabilität

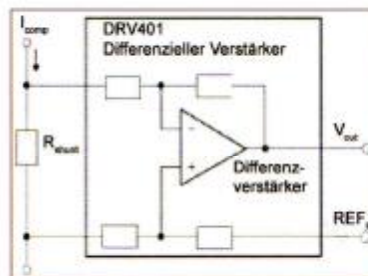


Bild 4: Endstufe des Differenzverstärkers

des Regelkreises in diesem Fall aufrecht zu erhalten (eine zusätzliche Stufe sorgt für eine höhere Verstärkung), wird die innere Spannungsverstärkung um 8 \times verringert.

Der Kompensationsstrom fließt durch einen Mess- oder Lastwiderstand. Die Spannung am Widerstand wird abgegriffen und durch einen Differenzverstärker mit fest eingestellter Verstärkung verstärkt (Bild 4). Dieser Differenzverstärker, der eine hohe Gleichtaktunterdrückung aufweist, ist aufgrund des Differenztreibers (mit H-Brückenschaltung) erforderlich.

Das neue IC bietet auch wichtige Zusatzfunktionen. So verringert eine Abmagnetisierung des Sensorkerns (DEMAC-Pin) den Hysteresis-Offset des Kerns und verbessert somit die Genauigkeit des Sensors. Diese Funktion lässt sich entweder beim Einschalten oder auf Befehl hin, etwa nach einem Systemneustart nach einem Kurzschluss oder einer Überlastung, aktivieren. Der Over-Range-Ausgang wird durch Bestimmung einer Stromstärke durch den Messwiderstand, die hoch genug ist, um eine Begrenzung des Differenzverstärkers am Ausgang zu bewirken, aktiviert.

Somit lässt sich das Over-Range-Signal für eine zuverlässige Bestimmung von Überstrom- oder Kurzschlussituationen im Leistungselektroniksystem verwenden.

Es ersetzt zusätzliche Schaltkreise, die andernfalls der Systementwickler einbauen müsste. Während einer Überstromsituation wird die Polarität des Stroms gespeichert. Sobald der Primärstrom in den Messbereich zurückkehrt, werden dessen Größe und Polarität wieder auf zuverlässige Art und Weise angezeigt.

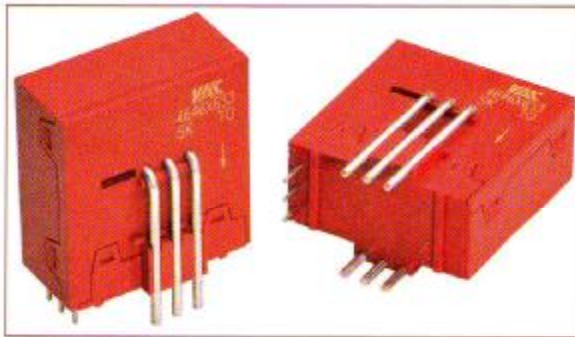


Bild 5: Beispiel für einen integrierten Stromsensor für maximale Stromstärken von 50 A (Effektiv) und 150 A (Maximal) in einem schmalen Gehäuse

Ein Schaltkreis mit Selbstkontrolle überwacht mehrere Funktionen des Stromsensors und zeigt verschiedene Fehlfunktionen, die auftreten können, an:

- Ein Spannungsabfall der Versorgungsspannung (<math><4\text{ V}</math>, >100 $\mu\text{s}</math>).$
- Ein offener Schaltkreis der Magnetfeldsonde.
- Ein Kurzschluss der Magnetfeldsonde.
- Ein offener Schaltkreis an der Kompensationsspule.
- Eine Überstromsituation bei der Anschaltung.

Das Reduzieren des Offset-Ripples minimiert den Rest des Taktsignals der Sonde, das bis zum Ausgangssignal hin durchdringt. Dieses Signal stört für gewöhnlich die Genauigkeit der Erfassung nicht, da es eine niedrige Amplitude, eine hohe Frequenz (250 kHz bis 550 kHz) und ein symmetrisches Nullsignal hat, das durch Tiefpassfilterung des Ausgangssignals weiter verringert werden kann. Des Weiteren können Kompensationsspulen niedriger Kapazität sowie eine aktive Reduzierung des Offset-Ripples durch Subtraktion des Signals von dem Kompensationsstrom dazu beitragen, dass ein Ausgangssignal mit außergewöhnlich niedrigem Störpegel gebildet wird.

Weiterhin ist auch eine Referenzspannungsquelle »Bandgap Reference« inte-

griert. Sie liefert 2,5 V mit einer niedrigen Drift von gewöhnlich 10 ppm/K und sollte als Referenzpunkt für die Ausgangsspannung dienen.

Der DRV401 ist das Herzstück eines neuen Sortiments von integrierten Stromsensoren. Diese Produkte dienen als einfach zu verwendende, serienmäßig produzierte Stand-alone-Lösungen, welche die Erfassung galvanisch getrennter Stromstärken in einem Bereich von 2 A bis 200 A ermöglichen und von einer einzelnen +5-V-Versorgungsspannung oder von einer dualen $\pm 15\text{-V}$ -Versorgungsspannung betrieben werden (Bild 5).

Des Weiteren sind auch passive Stromerfassungsmodule erhältlich. Diese umfassen die galvanische Trennung und den Magnetkreis, nicht jedoch die signalverarbei-

tende Elektronik. Zwischen dem Erfassungsmodul und dem Elektronikschaltkreis ist eine Verbindung mit vier Drähten erforderlich – zwei zur Verbindung der Sonde und zwei zur Verbindung der Kompensationsspule.

Weiterverarbeitung

Die Ausgangsvariable des ICs lässt sich weiter verarbeiten und auf verschiedene Art und Weise durch fast überall erhältliche Standardkomponenten in einen digitalen Wert umwandeln. Der Signalausgang des ICs sollte mit einem Tiefpassfilter an den Eingang des A/D-Wandlers gekoppelt werden.

Dieser Filter begrenzt die Signalbandbreite (d.h. er erzeugt eine definierte Bandbreite) und entkoppelt mögliches Rauschen, das bei der Abtastung am Eingang entstehen kann, von dem IC-Ausgang. Als Alternative kann ein Delta-Sigma-Modulator mit einem digitalen Filter zum Einsatz kommen (Bild 6).

Der »ADS1204« ist ein Delta-Sigma-Modulator mit vier Kanälen zur Umwandlung des Differenzsignals mit einer dynamischen Bandbreite von 100 dB. Mit dem geeigneten Digitalfilter und den geeigneten Modulatorfrequenzen kann er eine

Auflösung von bis zu 16 Bit erzielen. Eine effektive Auflösung von 12 Bit lässt sich mit einer Digitalfilterdateifrequenz von 160 kHz bei einer Modulatorfrequenz von 10 MHz erreichen. Beim »ADS7861/2« handelt es sich um einen 12-Bit-A/D-Wandler mit SAR (Successive-Approximation Register) und vier Kanälen. Sie wandeln die Eingangsspannungen in ein serielles oder paralleles digitales Ausgangssignal mit einer Abtastfrequenz von 500 kHz um. Der »ADS8361« ist die entsprechende 16-Bit-Version mit seriellem Ausgangssignal.

Wenn drei Kanäle derartiger Vier-Kanal-Systeme der Stromerfassung dienen, kann der vierte Kanal zur Dekodierung der Position durch Koordinatenwandler in Motorantrieben, zur Temperaturerfassung, zur Spannungsmessung oder Ähnlichem verwendet werden. Im Falle komplexerer Systeme, die eine höhere Zahl analoger Eingangskanäle benötigen, sollte ein Wandler wie der »ADS7869« vorgezogen werden. Dieser bietet zwölf unabhängige Differenzsignalkanäle sowie viele zusätzliche Funktionen.

Alle beschriebenen Delta-Sigma-Modulatoren sowie alle A/D-Wandler werden durch eine einzige +5-V-Versorgungsspannung betrieben und nehmen eine Eingangsspannung an, die sich um $\pm 2,5\text{ V}$ um eine Referenzspannung von 2,5 V herum bewegt.

Diese kann aus einer internen Quelle kommen oder von außen. (mc)

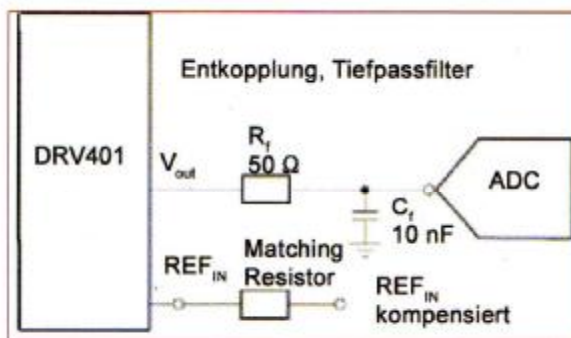


Bild 6: Endstufe des Differenzverstärkers mit Analog-Digital-Wandler

Klaus Reichert
ist Manager Product Marketing
Industrial Applications,
Dr. Dirk Heumann
ist Leiter Entwicklung Bauelemente
Industrial Applications bei
Vacuumschmelze
Telefon 0 61 81/38 0
www.vacuumschmelze.de