

Messen von Wechselgrößen

G. Graichen, Chemnitz

Zur Überwachung und Kontrolle von Spannungen und Strömen in Einrichtungen der Energieversorgung, zur Bereitstellung von Istwerten zur Steuerung industrieller Prozesse sowie in vielen anderen Bereichen sind Messwandler ein wesentlicher Bestandteil der Gesamtanlage. Aufgabe solcher Wandler ist neben der Messwerterfassung häufig eine Messbereichsanpassung und in vielen Fällen zusätzlich eine Potentialtrennung.

1 Messen mit konventionellen Wandlern

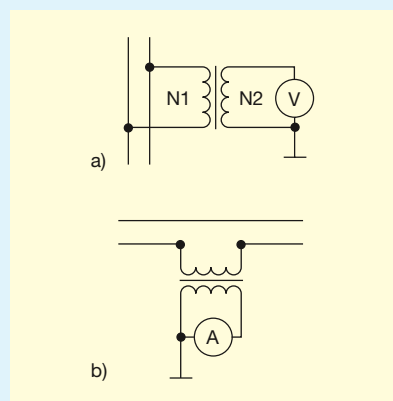
Die in Anlagen der Energieversorgung dominierende Frequenz von 50 Hz und die weitestgehend sinusförmigen Zeitverläufe von Strömen und Spannungen ermöglichen nach wie vor den breiten Einsatz konventioneller Spannungs- und Stromwandler, die auf dem Wirkprinzip des Einphasen-Transformators beruhen (Bild 1). Für Spannungswandler typisch sind niedrige Wicklungsströme, die mit geringen Spannungsabfällen an den Wicklungswiderständen einhergehen. Die induzierte Spannung ist praktisch gleich der Klemmenspannung. Konventionelle Spannungswandler besitzen üblicherweise Genauigkeitsklassen zwischen 0,1 und 3, zu deren Einhaltung das Realisieren einer so genannten Nennbürde, meist 30...300 VA, erforderlich ist. Typisch für konventionelle Stromwandler ist der primärseitige Betrieb mit eingepprägtem Strom bei sekundärseitigem praktischen Kurzschluss durch den angeschlossenen Strommesser. Zum Antreiben des Sekundärstromes ist folglich nur eine geringe induzierte Spannung notwendig, was gleichbedeutend mit geringem magnetischen Fluss im Eisenkreis ist. Bei beiden konventionellen Wandlerarten treten im praktischen Betrieb unvermeidliche Eisenverluste auf. Daraus resultiert eine gewisse Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärgrößen, üblicherweise als Fehlwinkel bezeichnet. Für eine Spannungs- oder Strommessung ist ein solcher Fehlwinkel ohne Bedeutung, bei Leistungs- und Phasenwinkelmessungen ist seine Beachtung häufig unverzichtbar.

1.1 Öffnen des Messkreises

Unter Beachtung möglicher hoher Berührungsspannungen ist bei konventionellen Spannungswandlern eine Öffnung des Messkreises im praktischen Betrieb ohne schädigende Folgen für den Wandler möglich. Bei konventionellen Stromwandlern ist dies nicht der Fall. Bei einer Unterbrechung des Sekundärstromkreises tritt eine sehr hohe primärseitige mag-

netische Durchflutung auf, was einer Aussteuerung des Eisenkreises bis weit in die Sättigung entspricht. Folge davon ist, dass die Eichung des Wandlers infolge Verschiebung der wirksamen Magnetisierungskennlinie nicht mehr gegeben ist. Das gilt auch bei nur kurzzeitigen Unterbrechungen. Von Bedeutung ist des Weiteren, dass ein sekundärseitig aufgetrennter Stromwandler wie eine Drosselspule im Primärkreis wirkt, was je nach konkreten Gegebenheiten negative Auswirkungen im Primärstromkreis haben kann. Zu beachten ist auch, dass eine Gefährdung des Wandlers infolge Überhitzung durch stark ansteigende Eisenverluste eintreten kann. Am kritischsten ist jedoch die Induktion hoher Sekundärspannungen, woraus eine akute Gefährdung für Personen resultiert. Aus diesen Problemen ergeben sich nachfolgend aufgeführte Handhabungsvorschriften für konventionelle Stromwandler.

- Bei einem Wechsel des Strommessers Primärstromkreis vorher abschalten oder den Wandler vorher kurzschließen.
- Keinerlei Sicherungen im sekundären Wandlerstromkreis anordnen.
- Zur Sicherung der Genauigkeitsklasse oder Fehlergrenze die vom Hersteller angegebene Nennbürde einhalten. (Bei räumlicher Trennung von Wandler und Anzeigeinstrument Widerstände der Verbindungskabel in notwendigen Fällen berücksichtigen.)



1 Messung von Wechselgrößen mit konventionellen Wandlern

- a) Spannungswandler
b) Stromwandler

Autor

Dr. Ing. Günter Graichen ist freier Fachautor, Chemnitz.

1.2 Nicht sinusförmige Spannungen

Konventionelle Strom- und Spannungswandler sind insbesondere in der Energieversorgungstechnik weit verbreitet. Ihre Einsatzmöglichkeiten sind jedoch sehr begrenzt oder überhaupt nicht mehr gegeben, wenn Gleich-, Mischgrößen oder impulsförmige Spannungen im praktischen Betrieb typisch sind. Als ein Beispiel dafür sei auf moderne Drehstromantriebe verwiesen, bei denen die Speisung der Maschine über einen Wechselrichter mit pulsweitenmodulierten impulsförmigen Spannungen erfolgt. Auf diese Weise kann die Maschine sowohl mit variabler Amplitude als auch mit variabler Frequenz der erzeugten Drehspannung gesteuert werden. Bild 2 zeigt ein Schaltbeispiel für einen solchen Wechselrichter, bei dem IGBT mit Antiparalleldiode als elektronische Leistungsschalter eingesetzt sind. Weiterhin sind auf Bild 2 Varianten der Stromerfassung im Wechselrichter aufgezeigt, die je nach konkreten Anforderungen in der Praxis üblich sind. Vor- und Nachteile dieser verschiedenen Möglichkeiten der Anordnung von Strommessgliedern im Wechselrichter sollen hier nicht diskutiert werden. Ebenso unbeachtet soll eine mögliche zusätzliche Einzelüberwachung der Leistungsschalter bleiben, die auf Überströme beziehungsweise Kurzschlüsse reagiert und den jeweiligen Schalter durch rechtzeitiges Abschalten vor Zerstörung schützt.

2 Messen mit Kompensations-Messwandlern

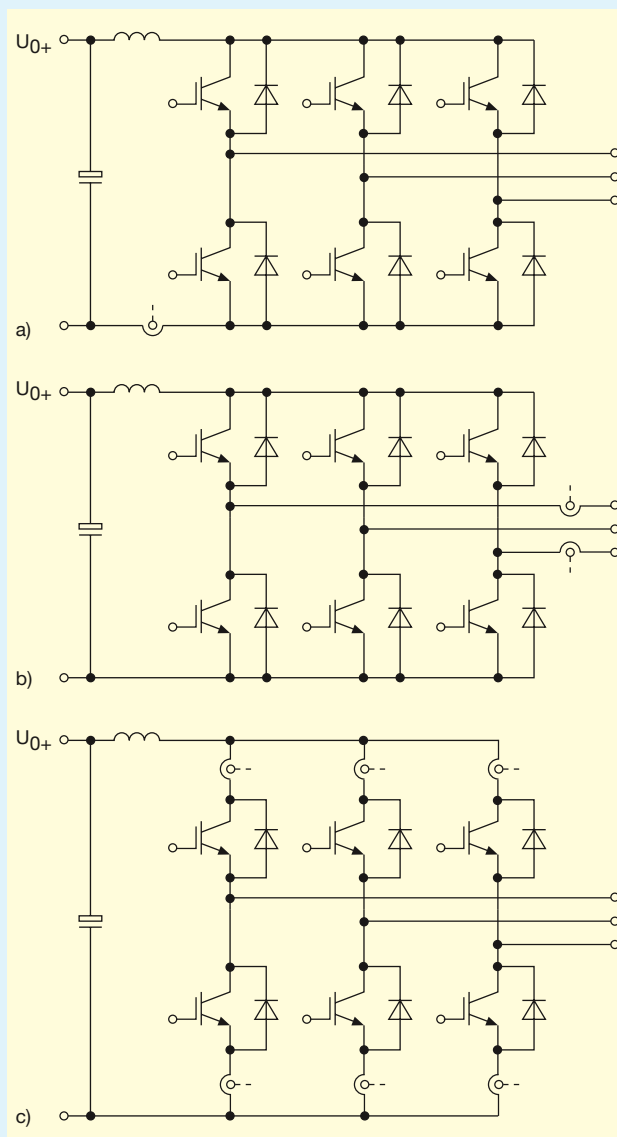
Zum Messen von Gleich- und vor allem Mischströmen, wie sie in leistungselektronischen Einrichtungen auftreten, gibt es so genannte Kompensations-Messwandler. Diese Wandler beruhen auf der bekannten Tatsache, dass stromdurchflossene Leiter von magnetischen Feldlinien umschlossen werden. Wirken diese ihrerseits als äußere Magnetfelder auf bestimmte stromdurchflossene meist Halbleitermaterialien ein, so treten in diesen die bekannten galvanomagnetischen Effekte Halleffekt und Widerstandseffekt auf. Mit Hilfe von Bild 3 soll die Problematik in vereinfachter Art und Weise insoweit erläutert werden, wie es für das Verständnis des Betriebsverhaltens von Kompensations-Stromwandlern und damit für deren zweckdienlichen Einsatz bedeutsam ist.

2.1 Hall- und Widerstandseffekt

Hall- und Widerstandseffekt basieren auf dem Grundgesetz der Elektrodynamik, wonach auf bewegte Ladungen im Magnetfeld eine Kraft, die sogenannte Lorentz-Kraft, wirkt. Auf Bild 3a sind Strombahnen und Äquipotentiallinien eines stromdurchflossenen Halbleiterplättchens ohne einwirkendes äußeres

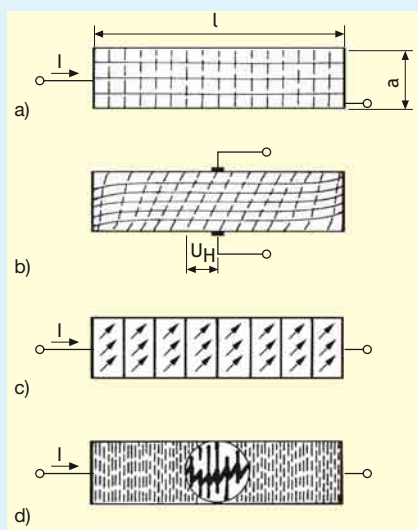
Magnetfeld dargestellt. Wirkt auf ein solches Halbleiterplättchen ein äußeres Magnetfeld mit einer senkrecht auf dem Plättchen „stehenden“ Normalkomponente B_n der magnetischen Induktion ein, so werden die bewegten Ladungsträger entsprechend Bild 3b abgelenkt, wobei sich sowohl die Strombahnen als auch die Äquipotentiallinien verschieben. Es ist zu erkennen, dass zwei gegenüber angeordnete Kontakte „Verbindung“ zu unterschiedlichen Äquipotentiallinien erhalten. Aus der Potentialdifferenz ergibt sich eine Spannung, die so genannte Hallspannung U_H . Diese ist sowohl dem das Halbleiterplättchen durchfließenden meist als Steuerstrom bezeichneten Strom I als auch der Normalkomponente B_n eines äußeren Magnetfeldes direkt proportional. Bild 4 verdeutlicht die Zusammenhänge am Beispiel eines Hallgenerators. Wie auf Bild 3b weiterhin erkennbar ist, entsteht nicht nur eine Hallspannung infolge des Halleffektes, sondern es tritt zugleich eine gewisse Verlängerung der Strombahnen

ein. Hieraus folgt analog zur Längenabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Leiters ein erhöhter Widerstand für den Strom I durch das Halbleiterplättchen (Widerstandseffekt). Der Widerstandseffekt könnte durch Einbringen von kurzschließenden metallischen Streifen, gleichbedeutend mit feststehenden Äquipotentiallinien oder -flächen, entsprechend Bild 3c stärker ausgeprägt werden. Praktisch umgesetzt wird diese Möglichkeit durch das Einbringen von metallisch leitenden nadelförmigen Einschlüssen in Halbleiterplättchen, die aus Verbundhalbleitern (III-V-Verbindungen) bestehen (Bild 3d). Solche Anordnungen finden als Feldplatten vielfältige praktische Anwendung. Bild 5 zeigt die nichtlineare erwartungsgemäß symmetrische Abhängigkeit des Feldplatten-Widerstandes vom Betrag der Normalkomponente der magnetischen Induktion eines äußeren Feldes. Bild 6 verdeutlicht die Abhängigkeit der Widerstandsänderung von der Richtung eines einwirkenden Feldes.



2 Übliche Varianten der Stromerfassung in Wechselrichtern

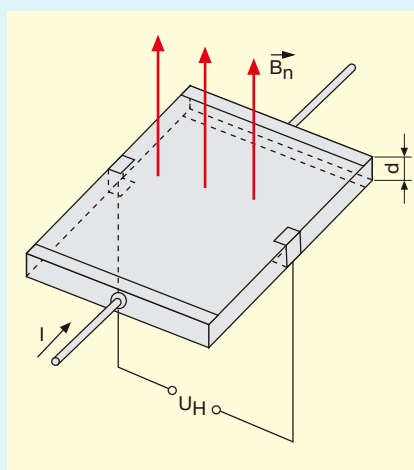
- a) Summenstromerfassung zwischen dem Zwischenkreis und Wechselrichter
- b) Stromerfassung in Ausgangsleitungen
- c) Stromerfassung in den Brückenzeigern



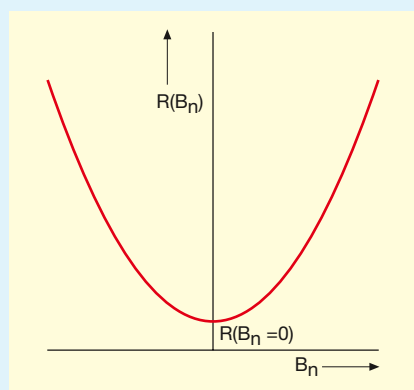
③ Verlauf der Strombahnen und der Äquipotentiallinien in einem Halbleiterplättchen (Vereinfachte Darstellung).

- a) ohne Magnetfeld
- b) mit Magnetfeld
- c) mit Magnetfeld und kurzschließenden metallisch leitenden Streifen
- d) mit Magnetfeld und metallisch leitenden nadelförmigen Einschlüssen

⑤ Typischer Verlauf des elektrischen Widerstandes einer Feldplatte in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion ►



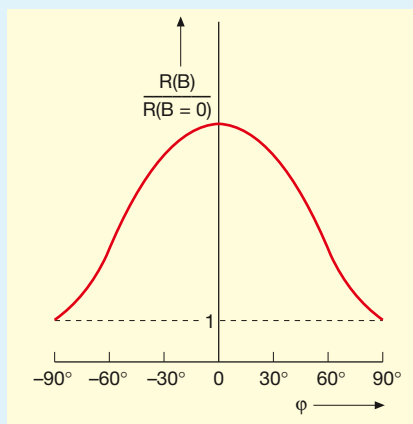
④ Hallgenerator



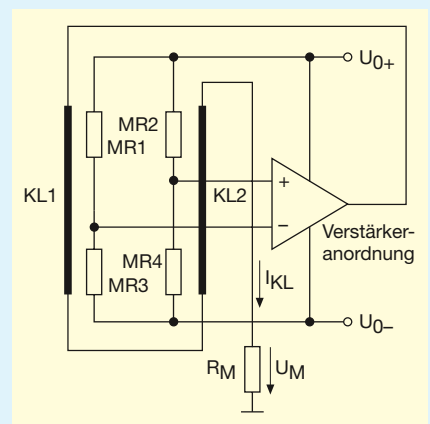
2.2 Wandler mit Hallgenerator

Der auf Bild ⑦ gezeigte prinzipielle Aufbau eines Kompensations-Stromwandlers für Gleich-, Wechsel-, Impuls- und Mischströme arbeitet mit einem Hallgenerator nach Bild ④ im Luftspalt eines Ferritkerns. Der zu messende Strom I_m fließt in einer Leiterschleife (Bild ⑦), in einer Primärwicklung mit der Windungszahl N_1 oder auch in einer Stromschiene „durch“ den Ferritkern. Dabei wird in diesem entsprechend dem Durchflutungs-gesetz eine magnetische Spannung erzeugt, die einen magnetischen Fluß antreibt. Dieser Fluss durchsetzt den im Luftspalt angeordneten Hallgenerator, der mit einem Konstantstrom betrieben wird. Die auf diesem Wege entstehende Hallspannung U_H wird einer Verstärkeranordnung zugeführt. Deren Ausgangsstrom fließt über eine Kompensationswicklung mit der Windungszahl N_2 und einen Messwiderstand R_M . Im praktischen Betrieb des Wandlers stellt sich der Strom über die Kompensationswicklung so ein, dass die von diesem im Ferritkern hervorgerufene Gegen-durchflutung das vom Messstrom I_m verursachte Magnetfeld im Luftspalt vollständig kompensiert. Die Hallspannung und damit die Eingangsspannung der Verstärkeranordnung werden auf den Wert Null eingeregelt (vergl. Prinzip des virtuellen Kurzschlusses bei Operationsverstärkern im Verstärkerbetrieb). Der

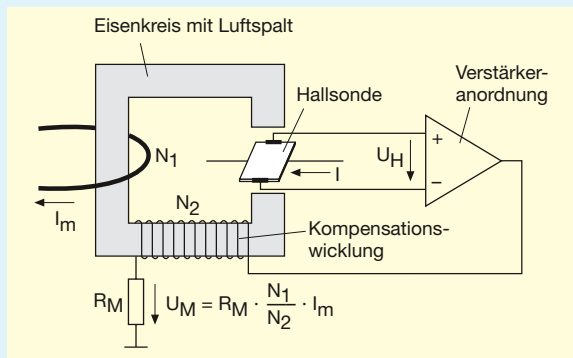
am Messwiderstand R_M entstehende Spannungsabfall U_M ist somit ein potentialgetrenntes formgetreues Abbild eines weitgehend beliebigen Zeitverlaufs des Meßstromes I_m . Dieser Spannungsabfall kann auf vielfältige Art und Weise weiterverarbeitet werden wie beispielsweise bei der Stromregelung in leistungselektronischen Anordnungen. Zur Messbereichsanpassung der in ihrer prinzipiellen Wirkungsweise erläuterten Stromwandler (Bild ⑦) gibt es übliche Übersetzungsverhältnisse: $N_1/N_2 = 1/100, 1/500, 1/1000, 1/2000$. Die weitere Möglichkeit der Messbereichsanpassung durch N_1 dürfte in der Praxis nur begrenzt nutzbar sein. Unmöglich ist ein Verändern von N_1 dann, wenn die Montage des Wandlers in verschienten induktivitätsarmen „Verdrahtungen“ erfolgt, wie beispielsweise in Wechselrichtern nach Bild ②. Dann kann nur noch durch geschickte Wahl des externen Messwiderstandes R_M eine Anpassung des Messbereiches im gewünschten Sinne erreicht werden. Die Genauigkeit der beschriebenen Wandler ist unter anderem vom Magnetmaterial, Hallgenerator, Verstärker abhängig. Typisch sind Toleranzen von 1...3 % bei Bandbreiten auch größer 100 kHz. Auf die dynamischen Kenngrößen ist insbesondere dann zu achten, wenn impulsförmige Ströme auftreten können oder im Normalbetrieb üblich sind.



⑥ Typische Abhängigkeit der Widerstandsänderung von Feldplatten von der Richtung des Magnetfeldes



⑧ Funktionsprinzip eines magnetoresistiven Stromwandlers



⑦ Funktionsprinzip eines Halleffekt-Stromwandlers

2.3 Magneto-resistive Wandler

Die günstigen Betriebseigenschaften von Kompensations-Stromwandlern führten dazu, dass auch der Widerstandseffekt in so genannten magnetoresistiven Wandlern genutzt wurde (Bild ⑧). Dabei lassen sich gegenüber Wandlern nach Bild ⑦ deutlich erhöhte Empfindlichkeiten (bis etwa Faktor 20) erreichen. Die Unabhängigkeit der Widerstandsänderung vom Vorzeichen des einwirkenden Magnetfeldes und die auftretenden Nichtlinearitäten (Bild ⑤ und ⑥) sind Probleme, die durch spezielle technologische Maßnahmen gut beherrschbar sind. Wie aus Bild ⑧ ersichtlich, beinhaltet ein üblicherweise in Dünnschicht-technik hergestellter Sensorchip eine komplette Wheatstone-Brücke mit vier Sensor-Widerständen und die notwendigen Kompensationsleiter. Der Messstrom wird durch einen massiven U-förmigen Leiter über die Sensorwiderstände geführt, beispielsweise in der Reihenfolge MR3-MR1-MR2-MR4 oder umgekehrt (nicht dargestellt). Das vom Messstrom erzeugte Magnetfeld bewirkt eine Diagonalspannung in der Wheatstone-Brücke, die die Verstärkeranordnung so steuert, dass mit dem über die Kompensationsleiter KL1 und KL2 sowie den Strommesswiderstand R_M geführten Ausgangsstrom I_{KL} eine Kompensation des vom Messstrom verursachten Magnetfeldes erfolgt (verg. auch hier Prinzip virtueller Kurzschluss von OPV im Verstärker-

betrieb). Dabei erlaubt die räumliche Nähe der Kompensationsleiter zu den Sensorwiderständen eine Kompensation mit vergleichsweise geringen Strömen. Durch den speziellen Kompensationsvorgang wird ein Betrieb des Wandlers in einem definierten Arbeitspunkt gewährleistet, wodurch eine gute Linearität erreicht wird. Der Kompensationsstrom und damit die Spannung am Messwiderstand R_M sind folglich ein formgetreues Abbild der Zeitfunktion des Messstromes. Potentialtrennung ist gegeben. Mit magnetoresistiven Stromwandlern sind Strom-Messbereiche von 1 mA bis zu 1 kA durch angepasste Realisierungsvarianten für eine praktische Anwendung verfügbar.

2.4 Praktischer Einsatz

Anwendungsgebiete beider Arten von Kompensations-Stromwandlern sind vor allem leistungselektronische Einrichtungen wie beispielsweise Stromrichter. Damit ist ein Einsatz in vielfältigen industriellen Anlagen, von Schaltnetzteilen, USV, Antrieben verschiedenster Art und Schutzeinrichtungen möglich. Vergleichsweise günstigere dynamische Eigenschaften bei geringeren Baugrößen und niedrigeren Kosten lassen für magnetoresistive Wandler weitere Einsatzfelder in der Stromversorgungstechnik, beispielsweise Photovoltaik, Batteriemanagement erwarten.