

Messung der Ausgangsspannung von Frequenzumrichtern mit einem Fluke ScopeMeter® Serie 190

Frequenzumrichter werden immer häufiger in Industrieanlagen eingesetzt. Bei der Installation und Instandhaltung erhält man bei der Messung der Ausgangsspannungen oft unerwartete Ergebnisse. Woran liegt das und wie lässt sich das verhindern?

Frequenzumrichter

Bei konventionellen elektrischen Maschinen, die direkt an ein ein- oder dreiphasiges Stromversorgungssystem angeschlossen sind, kann die Drehzahl nur in sehr begrenztem Umfang geregelt werden, wenn überhaupt. Eine mögliche Lösung ist ein externes Getriebe. Dieses Getriebe benötigt häufig viel Platz und ist geräuschintensiv, kostspielig und verschleißanfällig.

Der Einsatz neuer Halbleiterbauelemente, die für hohe Ströme und Spannungen ausgelegt sind, hat die Entwicklung von Frequenzumrichtern möglich gemacht. Diese Bauelemente ermöglichen eine Drehzahlsteuerung in einem weiten Bereich und bieten außerdem geringe elektrische Verluste und ein konstantes Drehmoment, das unabhängig von der tatsächlichen Drehzahl der Maschine ist.

Infolgedessen werden Frequenzumrichter immer häufiger in Industrieanlagen eingesetzt und bieten hierbei die folgenden Vorteile:

- kein Verschleiß, da Asynchronmaschinen verwendet werden
- effiziente Steuerung und
- hoher Wirkungsgrad



Bei der Installation und Instandhaltung erhält man jedoch oft unerwartete Messergebnisse. Im Folgenden werden die Ursachen hierfür und die Vorgehensweise erläutert, wie Sie mit einem Fluke ScopeMeter der Serie 190 korrekte Messergebnisse erhalten.

Erzeugung einer variablen Ausgangsfrequenz

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung der variablen Ausgangsfrequenz. Die ersten Modelle wurden als selbstgeregelt oder maschinen-synchronisierte Thyristor-Stromrichter bezeichnet. Sie werden heute immer noch in Frequenzumrichtern für hohe Leistungen eingesetzt. Für geringere Leistungen wurden jedoch bessere Alternativen entwickelt.

Thyristoren können nur beim Nulldurchgang des Netzstroms ausgeschaltet werden. Darum ist die Ausgangsspannung dieser Umrichter keine kontinuierliche Sinuskurve, sondern weist immer einen Phasenanschnitt auf (wie z. B. in Abb. 1 dargestellt).

Eine Änderung des Phasenwinkels dieses Phasenanschnitts steuert die Ausgangsleistung, wodurch die Maschinendrehzahl geändert und gleichzeitig die verfügbare mechanische Leistung gesenkt werden kann. Leider gestatten diese Umrichter keine beliebige Modulation der Ausgangssignalfrequenz. Auch mit zusätzlichen Schaltkreisen kann dieses Problem nur bedingt gelöst werden, wobei gleichzeitig hohe Kosten entstehen.

Das Aufkommen von so genannten abschaltbaren Leistungshalbleitern (Gate turn-off Thyristor, GTO) ermöglichte einen völlig neuen Ansatz zur Drehzahlregelung. Diese Halbleiter können ein- und ausgeschaltet werden, wodurch sie sich zum „Zerhacken“ in einem Gleichstromsystem eignen. Abb. 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Antriebssteuerung.

Der Ein- oder Dreiphasen-Netzeingang ist an eine Reihe von Gleichrichtern angeschlossen, die einen internen Gleichstrom-Zwischenkreis (DC-Bus) speisen. Die Gleichspannung wird in einem Speicherkondensator mit großer Kapazität gepuffert, der auf eine Spannung U_b aufgeladen wird:

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_{\text{Netz}} \approx 1.41 \cdot U_{\text{Netz}}$$

Die Gleichspannung wird dann an eine Reihe von doppelseitigen Schaltern angeschlossen, die abwechselnd jeden der drei Maschinenanschlüsse mit der positiven oder negativen Busleitung verbinden. Außerdem kann jede Abzweigung des Schalters in einen inaktiven (d. h. nicht leitenden) Zustand versetzt werden, wodurch der entsprechende Maschinenanschluss potenzialfrei wird.

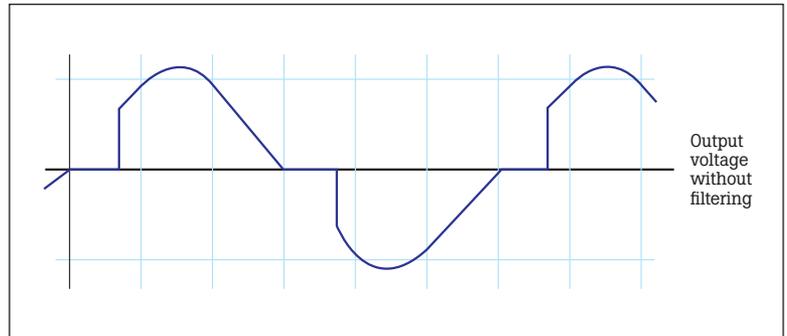


Abbildung 1: Ausgangsspannung eines Thyristorumrichters. Die ungefilterte Ausgangsspannung weist deutliche Phasenanschnitte auf.

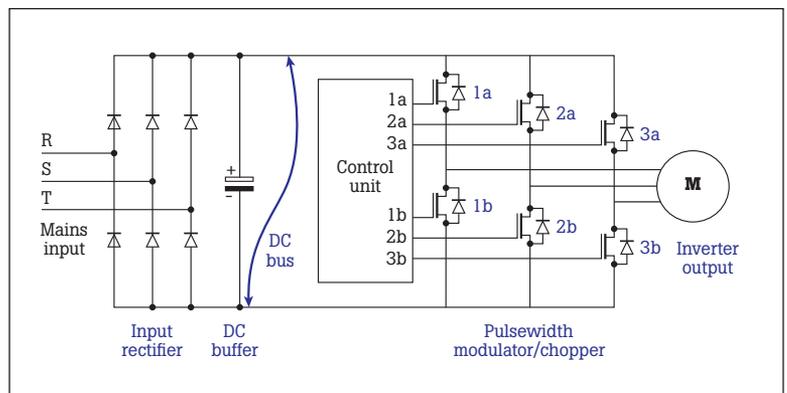


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Frequenzumrichters

Die Schalter werden alle von einem zentralen Steuergerät gesteuert, das die Antriebsimpulse erzeugt, mit denen jeder der sechs Schalter zum richtigen Zeitpunkt betätigt wird. Die Schaltgeschwindigkeit ist variabel, und dadurch wird die Ausgangsfrequenz bestimmt. Die Reihenfolge, in der die drei Ausgänge angesteuert werden bestimmt die Drehrichtung der Maschine.

Das Steuergerät ist so eingestellt, dass die Ausgangsfrequenz in einem weiten Bereich variiert werden kann. Da die Drehzahl der Maschine direkt von der Versorgungsfrequenz abhängt, kann sie effizient gesteuert werden.

Abb. 3 zeigt die resultierenden Ausgangsspannungen für die einzelnen Ausgangsleitungen. An jedem Maschinenanschluss zeigt sich ein positiver Impuls, ein Zeitraum, in dem der Anschluss stromlos ist, dann ein negativer Impuls und wieder ein Zeitraum, in dem keine Antriebsspannung anliegt.

Bei diesem einfachen Beispiel beträgt die Leerlaufspannung an jedem der Ausgänge entweder $+1/2 U_b$ oder null (potenzialfrei) oder $-1/2 U_b$, wobei U_b die Busspannung ist. Da alle drei Ausgänge auf dieselbe Weise angeschlossen sind, entspricht der Mittelwert der Spannung jedes Ausgangs der Hälfte der Spannung am DC-Bus.

Wenn die obige Signalform an einen Tiefpassfilter angelegt würde, würde der Ausgang einer Sinuskurve ähneln, die die gleiche Grundfrequenz hat wie die vom Steuerkreis vorgegebene Rechteckspannung (siehe Abb. 4). Tiefpassfilter, die für die in Motorantrieben anzutreffenden Energieniveaus geeignet sind, wären jedoch groß und kostspielig, so dass Alternativen entwickelt wurden.

Alternativen zu Tiefpassfiltern

Eine Alternative zu Tiefpassfiltern ergibt sich aus einer weiteren Verbesserung in der Leistungselektronik. Bei den in der Praxis verwendeten Systemen entstehen die positiven und negativen Impulse normalerweise nicht durch die Erzeugung eines einzigen Impulses mit der gewünschten Polarität. Stattdessen werden alle Impulse dadurch erzeugt, dass man denselben Halbleiterschalter mit einer wesentlich höheren Pulsfrequenz und einem variierenden Tastgrad immer wieder ein- und ausschaltet (siehe Abb. 5).

Der Trick besteht jetzt darin, den Tastgrad so zu variieren, dass der Strom (aber nicht die Spannung) durch die Maschinenwicklung eine Sinusform aufweist. Die Induktion der Maschinenwicklungen fungiert dann als Tiefpassfilter, in dem infolge der pulsbreitenmodulierten Spannung ein sinusförmiger Strom fließt.

In Abb. 5 zeigt die obere Kurve die Ausgangsspannung nur einer Ausgangsleitung, so dass die Auswirkung der Variation des Tastgrads deutlich wird. Die untere Kurve zeigt die effektive Ausgangsspannung pro internem Taktzyklus T auf einer relativen Skala.

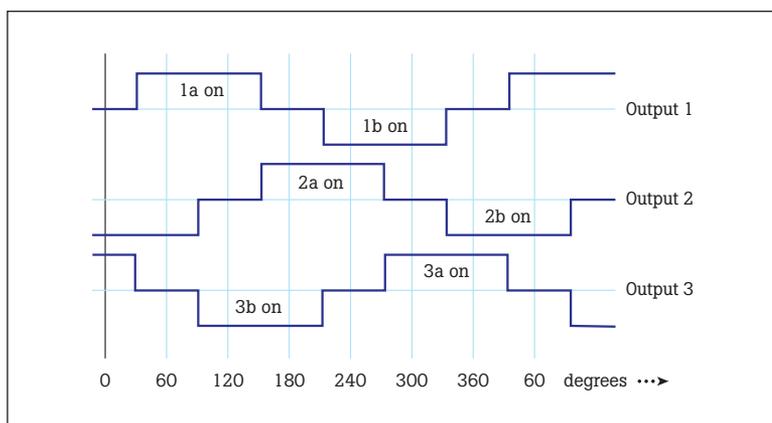


Abbildung 3: Ausgangsspannung an jeder Ausgangsleitung

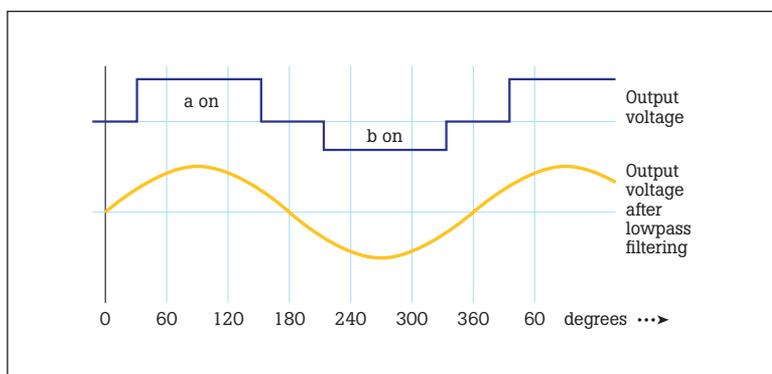


Abbildung 4: Ausgangsspannungen, direkt und über einen Tiefpassfilter

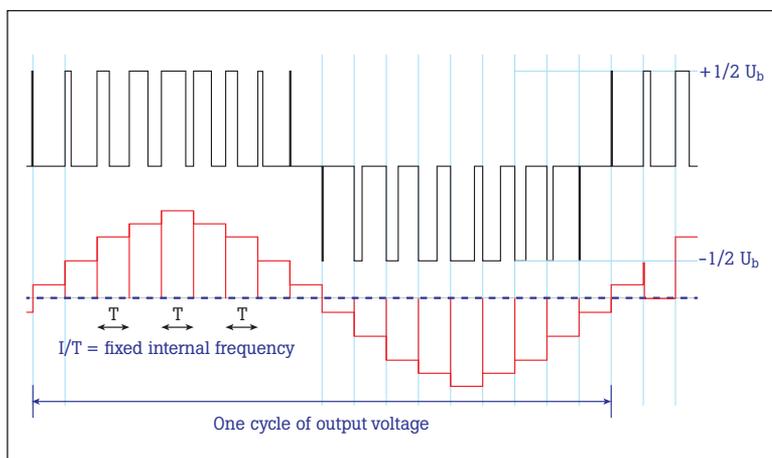


Abbildung 5: Ausgangsspannungen eines pulsbreitenmodulierten Frequenzumrichters (vereinfacht)

Dies weist darauf hin, dass die effektive Ausgangsspannung sinusförmig ist. Die tatsächliche Ausgangsspannung des Frequenzumrichters ähnelt jedoch viel stärker der oberen Kurve! Im Gegensatz zu den oben erwähnten Thyristorschaltungen können die Frequenzumrichterschaltungen jetzt durchgängig im Schaltbetrieb verwendet werden. Energieverluste in den Halbleiterschaltern sind daher minimal, was zu hohem Wirkungsgrad und geringer Wärmeentwicklung im Frequenzumrichtermodul führt.

Spannungsmessung

Obwohl die Verbesserungen von Wirkungsgrad und Drehzahlsteuermöglichkeiten bei diesen Frequenzumrichtern offensichtlich sind, ergibt sich für die Installations- und Instandhaltungstechniker ein Problem.

Die Ausgangsspannung des Motorantriebs soll über eine induktive Last einen sinusförmigen Strom erzeugen, aber die angelegte Spannung hat eine gänzlich andere Signalform. Eine direkte Messung der Ausgangsspannung kann daher zu unerwarteten Ergebnissen führen, da das als Messgerät verwendete Multimeter im Gegensatz zur elektrischen Maschine auf die ungefilterte Ausgangsspannung reagiert.

Dies hängt sowohl mit der Signalform als auch mit den konstruktionsbedingten Eigenschaften von digitalen Multimetern zusammen. Diese sind normalerweise für die Messung der Amplitude einer Sinuskurve bei Netzfrequenz, d. h. 50 oder 60 Hz, ausgelegt. Die Ausgangsspannung des Frequenzumrichters ist dagegen ein Rechtecksignal mit hoher Frequenz und ständig wechselndem Tastgrad. Der Spitzenwert der Amplitude des Rechtecksignals ist dafür konstant. Außerdem müssen auch noch zwei Polaritäten berücksichtigt werden.

Die meisten Multimeter reagieren auf die angelegte Spitze- oder Spitze-zu-Spitze-Spannung oder den Mittelwert der Spannung und werden so kalibriert, dass sie den Effektivwert der Amplitude der Sinuskurve anzeigen. Außerdem verwenden die meisten Multimeter für Wechselspannungsmessungen einen zweiphasigen Gleichrichter am Eingang, damit Spannungen mit beiden Polaritäten in gleichem Maße zum Messwert beitragen.

Wenn wir uns die Ausgangsspannung in Abb. 5 ansehen, ist der Mittelwert der Spannung pro Zyklus T (nach der Gleichrichtung) direkt proportional zum Tastgrad der Signalform und zur Spannung im DC-Zwischenkreis und ändert sich daher aufgrund des variierenden Tastgrades laufend. Innerhalb eines Halbzyklus des Ausgangsstroms beträgt der Mittelwert der Spannung dann:

$$U_{\text{Mittel}} = d * U_{\text{Spitze}} = d * (1/2 U_b)$$

wobei d = Tastgrad ist, der von 0 auf 100 % und zurück wechselt.

Der resultierende Messwert in Volt kann beträchtlich von dem erwarteten Wert an den Maschinenklemmen abweichen (wie er z. B. auf einem Display im Motorantrieb selbst angezeigt wird, das die von der internen Steuerelektronik berechnete effektive Ausgangsspannung anzeigt).

Zur Veranschaulichung der obigen Erläuterungen haben wir unter exakt denselben Bedingungen mit demselben Frequenzumrichter und denselben Einstellungen eine Reihe von Multimetern verschiedener Hersteller getestet. Die Messwerte (siehe Tabelle 1) schwanken zwischen 143 V und 1000 V.

Digitalmulti- meter- Modell	Messwert (Vac)
1	1001 V
2	154,2 V
3	157,6 V
4	170,1 V
5	187,1 V
6	193,6 V
7	204,3 V
8	215,3 V
9	237,93 V
10	254 V
Fluke 41B	143 V
Fluke 43B	143,3 V
Fluke Serie 190	144 V

Tabelle 1: Wechselspannungsmesswert verschiedener Digitalmultimeter, im Vergleich zu den Netzanalysatoren 41B und 43B und eine ScopeMeter der Serie 190.

Richtige Messergebnisse erzielen!

Für die Berechnung der Ausgangsspannung in dieser besonderen Situation muss die spezielle Anwendung des Motorantriebs berücksichtigt werden.

Die Antriebsleistung für elektrische Maschinen wird durch den Strom erzeugt, der durch die Maschinenwicklungen fließt, während die angelegte Spannung im Prinzip nur benötigt wird, um diesen Strom fließen zu lassen. Frequenzumrichter machen sich diese Tatsache zunutze, indem eine hochfrequente diskontinuierliche Spannung angelegt wird. Diese erzeugt einen sinusförmigen Strom in den Maschinenwicklungen, dessen Frequenz durch das Steuergerät bestimmt wird und dessen Polarität der Schaltspannung entspricht.

Zur Berechnung der effektiven Ausgangsspannung muss also nur die Grundschwingungskomponente der angelegten Spannung berücksichtigt werden.

Um dies zu erreichen, wird ein große Anzahl von Stichproben der angelegten Spannung genommen und ein detailliertes Abbild der Spannungssignalförmigkeit im digitalen Speicher des Messgeräts abgelegt, anhand dessen die Grundschwingungskomponente berechnet und angezeigt werden kann.

Genau dies tun die letzten drei in Tabelle 1 aufgeführten Messgeräte. Hierzu gehören die Fluke ScopeMeter der Serien 190B, 190C und der neuen Serie 190 II, bei denen alle Eingangsspannungen mit einer hohen Abtastrate digitalisiert werden und ein digitales Abbild des Signals zur weiteren Analyse gespeichert wird.

Die ScopeMeter 190 sind für diese Zwecke mit einer speziellen „Vpwm“-Spannungsmessfunktion ausgestattet. Mit dieser Funktion können die ScopeMeter 190 das digitalisierte Signal analysieren und die Grundschwingungsfrequenz berechnen. Diese weist dieselbe Signalförmigkeit wie der Ausgangsstrom des Frequenzumrichters auf. Anhand dieser Signalförmigkeit wird dann der Effektivwert berechnet und als Vpwm-Messwert angezeigt.

Das Bildschirmfoto in Abb. 6 zeigt sowohl die Spitze-zu-Spitze-Amplitude als auch die effektive Ausgangsspannung eines Frequenzumrichters in den Feldern am oberen Bildschirmrand.

Die effektive Ausgangsfrequenz der angezeigten Signalförmigkeit kann hier einfach bestimmt werden: Ein einzelner Zyklus dauert etwa 6,3 Skalenteile. Die Zeitachseinteilung entspricht 5 ms, sodass ein einzelner Zyklus ca. 31,5 ms dauert. Die Ausgangsfrequenz beträgt dann $1/31,5 \text{ ms} = 32 \text{ Hz}$.

Alternativ können die Cursor verwendet werden, um einen Zyklus dieses Ausgangssignals zu markieren.

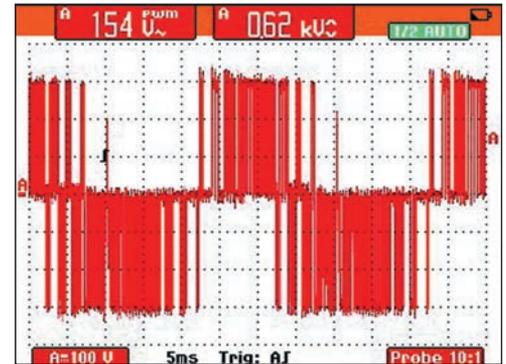


Abbildung 6: Ausgang eines Frequenzumrichters, gemessen mit einem Fluke ScopeMeter der Serie 190

Fazit

Frequenzumrichter bieten den Konstrukteuren und Anwendern von Maschinen eine Reihe von Vorteilen. Für Instandhaltungstechniker und Installateure der Maschinenantriebe kann die Messung der Ausgangsspannungen und -frequenzen jedoch eine Komplikation darstellen. Nur Messgeräte, die speziell für die Messung dieser Ausgangsspannungen ausgelegt sind, liefern zuverlässige Messwerte, die mit der (berechneten) Anzeige am Motor selbst übereinstimmen.

Die Fluke-ScopeMeter 190 eignen sich besonders gut für den Einsatz bei Installation und Instandhaltung dieser Frequenzumrichter und stellen alle benötigten Mess- und Prüffunktionen zur Verfügung.

Fluke. *Damit Ihre Welt intakt bleibt.*

Fluke Deutschland GmbH

In den Engematten 14
79286 Glottertal
Telefon: (07684) 8009 420
Telefax: (07684) 8009 410
E-Mail: info@de.fluke.nl
Web: www.fluke.de

Technischer Beratung:

Beratung zu Produkteigenschaften,
Spezifikationen, Messgeräte und
Anwendungsfragen
Tel.: +49 (0) 7684 8 00 95 45
E-Mail: techsupport.dach@fluke.com

Fluke Austria GmbH

Liebermannstraße FO1
2345 Brunn am Gebirge
Telefon: (01) 928 95 00

Telefax: (01) 928 95 01
E-Mail: info@as.fluke.nl
Web: www.fluke.at

Fluke (Switzerland) GmbH

Industrial Division
Hardstrasse 20
CH-8303 Bassersdorf
Telefon: 044 580 75 00
Telefax: 044 580 75 01
E-Mail: info@ch.fluke.nl
Web: www.fluke.ch

©2005, 2016 Fluke Corporation.
Alle Rechte vorbehalten. Änderungen vorbehalten.
10/2016 2543358b-ger

Dieses Dokument darf nicht ohne die schriftliche Genehmigung der Fluke Corporation geändert werden.