

Elektrische Leistungsmessung

Elektrische Verluste und Wirkungsgrade

Für ein effektives Energiemanagement ist die Betrachtung der gesamten Energiekette erforderlich. Ein wichtiger Aspekt ist der Wirkungsgrad der eingesetzten Produkte. Es treten elektrisch-mechanische oder elektrisch-elektrische Teilwirkungsgrade auf. Die Vergleichszahlen der Hersteller geben nur bedingt Auskunft, denn auch die Umgebungsvariablen sind entscheidend.

Walter Huber*

Bei Haushaltsgeräten und Produkten der Informationstechnologie treten die so genannten Standby-Verluste auf. Durch ihre millionenfache Verbreitung verursachen sie einen enormen, aber nutzlosen Energieverbrauch. Entgegenwirkende gesetzliche Regelungen sind bereits auf den Weg gebracht, wie das „0,5- bzw. 1-Watt-Gesetz“. Das Nähere regeln Normen wie die IEC 62301, die auch Mindestanforderungen an die Messtechnik vorgeben.

Wirkungsgradmessung elektrisch-elektrisch

Die Standardaufgabe für die Messtechnik stellt sich wie folgt dar: Man bestimme den Wirkungsgrad, also das reziproke Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangswirkleistung bzw. die Verlustleistung. Mit anderen Worten die Differenz der Größen. Dies klingt einfach, ist in der Praxis aber komplizierter als vermutet.

*Walter Huber ist Technischer Leiter Produktsupport Power Analyzer bei Yokogawa in Herrsching.

Das Problem liegt darin, dass die Verluste auf Grund der gänzlich verschiedenen Spannungs- und Stromverläufe auf Primär- und Sekundärseite nicht direkt von einem Leistungsmessgerät bestimmt werden können.

Nur eine separate und möglichst simultane Messung beider Leistungen mit anschließender Berechnung liefert das gewünschte Ergebnis. Häufige Anwendungsfälle dafür sind Wechselrichter in der Fotovoltaik oder Umrichter in der hybriden Antriebstechnik bzw. bei E-Mobilen mit Einspeisung DC, Ausgang 1-phasig oder 3-phasig AC.

Hinzu kommen die heute erreichbaren hohen Wirkungsgrade von > 95 %: Die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsleistung wird mit zunehmenden Wirkungsgrad immer geringer, so dass bereits kleine Messfehler zu einer großen Verfälschung des Ergebnisses führen. Abhilfe besteht nur darin, hochgenaue Messgeräte und ggf. Wandler einzusetzen, die mit einem entsprechendem Investitionsaufwand verbunden sind.

Wirkungsgradmessung elektrisch-mechanisch

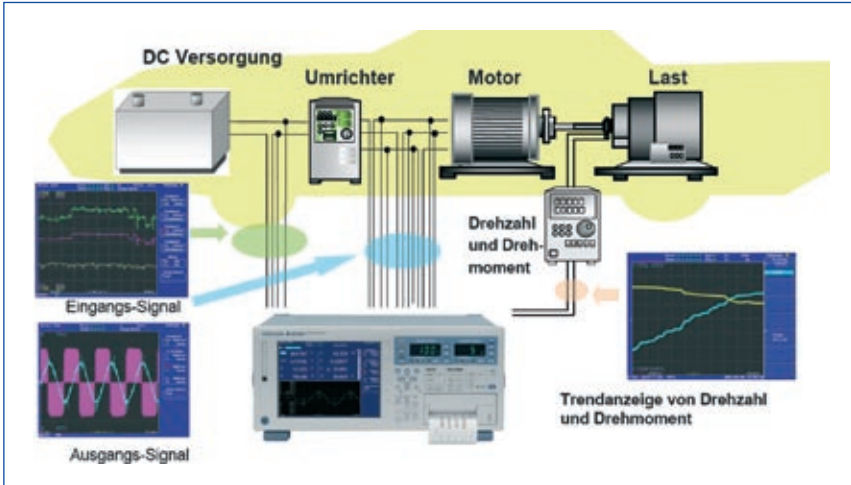
Soll der Wirkungsgrad eines E-Motors bestimmt werden, so ist neben der elektrischen Eingangsleistung auch die mechanische Ausgangsleistung zu messen. Grundsätzlich kann die mechanische Leistung, die bei rotierenden Vorgängen proportional zum Produkt aus Drehzahl und Drehmoment ist, völlig unabhängig von der elektrischen Leistungsmessung ermittelt werden. Praktische Gründe sprechen jedoch für eine Lösung mit einem Gerät:

■ Die absolute Gleichzeitigkeit der elektrischen und mechanischen Leistungsmessung führt zu deutlich stabileren Werten für den Wirkungsgrad, insbesondere bei stark fluktuierenden Bedingungen

■ Es wird automatisch ein zeitsynchroner Datensatz von elektrischen und mechanischen Parametern erzeugt, so dass eine



Leistungsmessgeräte von Yokogawa



Elektrische und mechanische Wirkungsgradmessung am E-Motor

spätere Software-Synchronisierung entfallen kann. Viele digitale Leistungsmesser lassen sich mit Sensoren für Drehzahl und Drehmoment ausstatten und parametrieren, so dass der Geräteaufwand reduziert wird. Die Ausgangssignale der Sensoren können analog oder pulsformig vorliegen.

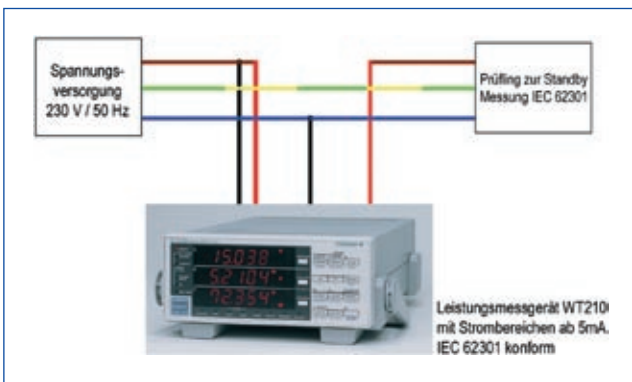
Die Energie- und Verbrauchsmessung

In der Betriebsart „Integrator“ ist der Leistungsmesser ähnlich zu einem Verbrauchszähler einzusetzen. Der Anwendungsfall tritt dann auf, wenn stark schwankende Lastbedingungen zu einem sehr instabilen Ergebnis bei der momentanen Leistungsmessung oder dem Wirkungsgrad führen. Es kann über sehr lange Zeiten bis 24 Stunden gemittelt werden, indem das Integrationsergebnis fortlaufend durch die bis dahin abgelaufene Zeit dividiert wird. Die Standby Norm IEC 62301 etwa fordert einen Mittelwert über mindestens fünf Minuten. Bei der Energieoptimierung von industriellen Anlagen oder

Gebäuden sind meist sehr viele Verbraucher gleichzeitig über längere Zeit zu erfassen. Hier können kostengünstige, vernetzbare Panelmeter oder mobile, batteriebetriebene Geräte eingesetzt werden.

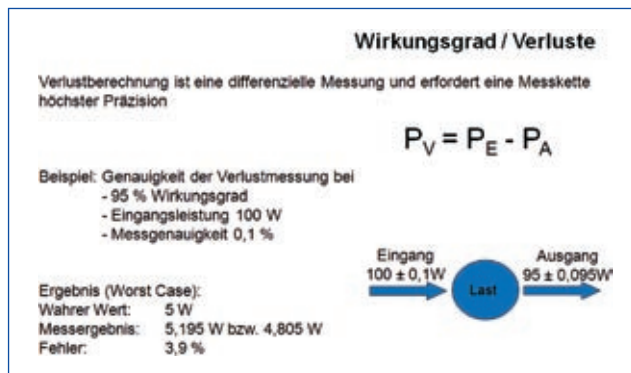
Wie anfangs gezeigt, kann selbst mit einer Messeinrichtung der Klasse 0,1 die differenzielle Verlustleistung bei 95% Wirkungsgrad nur auf 4% genau bestimmt werden. Den Genauigkeits-Spezifikationen oder noch besser den nachgewiesenen Genauigkeiten ist deshalb hohe Aufmerksamkeit zu schenken.

Die Sache wird dadurch kompliziert, weil jeder Hersteller seine Eigenheiten pflegt und dadurch die Zahlen nicht mehr direkt vergleichbar sind. Zudem spielen eine Reihe von Umgebungsparametern eine wichtige Rolle. Das können beispielsweise Temperatur oder EMV-Bedingungen sein. Für Spannung, Strom und Leistung wird ein Messfehler von $\pm(x\%$ vom MW + $y\%$ vom MB) in einem Temperaturbereich von $23 \pm z\%$ angegeben. MW bedeutet hier Messwert oder Sollgröße und MB-Messbereich eine geräteabhängige Einstellung. Dazu ein Beispiel:

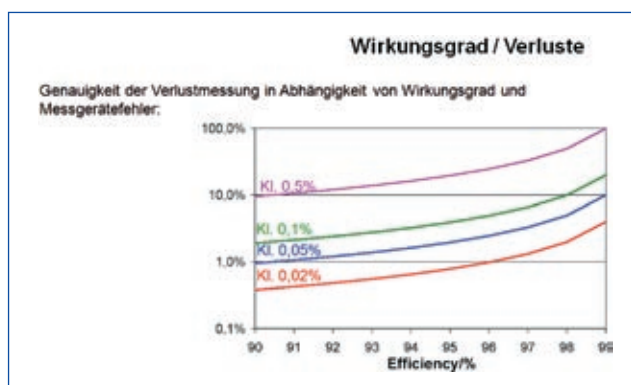


Standby Messung gemäß der IEC-Norm 62301

Differenzielle Messung der Verlustleistung



Anforderung an die Klassengenauigkeit



- Hersteller Y gibt seinen Fehler mit $\pm (0,1\% \text{ MW} + 0,1\% \text{ MB})$, $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ an.
- Hersteller Z gibt seinen Fehler mit $\pm (0,05\% \text{ MW} + 0,05\% \text{ MB})$, $23 \pm 0 \text{ }^\circ\text{C}$ an. Auf den ersten Blick scheint das Gerät von Hersteller Z doppelt so genau zu sein. Aber Vorsicht: Hersteller Z gibt seinen Messbereich MB als Spitzenwert an, Hersteller Y dagegen als Effektivwert. Soll beispielsweise $100 V_{\text{eff}}$ gemessen werden, trifft für Y der Wert $\text{MB} = 100 \text{ V}$ zu, für Z dagegen $\text{MB} = 300 \text{ V}$, weil der nächste geeignete Spitzenwert-Bereich gewählt werden muss. Für einen vergleichbaren und durchaus realistischen Temperaturbereich von $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ muss bei Z noch der Zusatzfehler $0,02\%/^\circ\text{C}$ vom MW berücksichtigt werden, also bei einer $10 \text{ }^\circ\text{C}$ Spanne $\pm 0,2\%$ vom MW.

Den Phasenwinkelfehler nicht vernachlässigen

Das erstaunliche Ergebnis lautet also, dass das Gerät von Y einen Gesamtfehler von $\pm (0,1\% + 0,1\%) = \pm 0,2\%$, das Gerät von Z dagegen einen Gesamtfehler von $\pm (0,05\% + 0,2\% + 3 \cdot 0,05\%) = \pm 0,4\%$ produziert. Die anfänglichen Verhältnisse haben sich also genau umgekehrt. Nicht zu vernachlässigen bei der Toleranz der Wirkleistung P ist der so genannte Phasenwinkelfehler des Leistungsmess-

gerätes oder Wandlers. Seriöse Spezifikationen geben diesen frequenzabhängigen Fehler direkt in Grad oder Winkelminuten bzw. als prozentualen Wert der Scheinleistung S an. Dieser etwas unhandliche Fehlerbeitrag hängt von der Phasenlage der angelegten Spannungs- und Stromverläufe ab. Aus der Fehlerfortpflanzungsrechnung für die Wirkleistung folgt: $\Delta P/P = \Delta U/U + \Delta I/I + \epsilon \cdot \tan(\varphi)$. Die ersten beiden Terme geben den Amplitudenfehler für Spannungs- und Strom-Messung an, der dritte Term den Einfluss des Phasenwinkelfeh-

Umweltaspekte mit der EuP-Richtlinie

Die EU-Kommission hat am 17. Dezember 2008 mit der Richtlinie 2005/32/EC das Rahmenwerk für die EuP-Richtlinie (Energy using Products) verabschiedet. Mit EuP soll die Integration von Umweltaspekten im gesamten Produktlebenszyklus und damit die möglichst optimale Verringerung der Umweltauswirkungen dieser Produkte gefördert werden. Ein wichtiges Anliegen dabei ist die Verbesserung der Energieeffizienz.

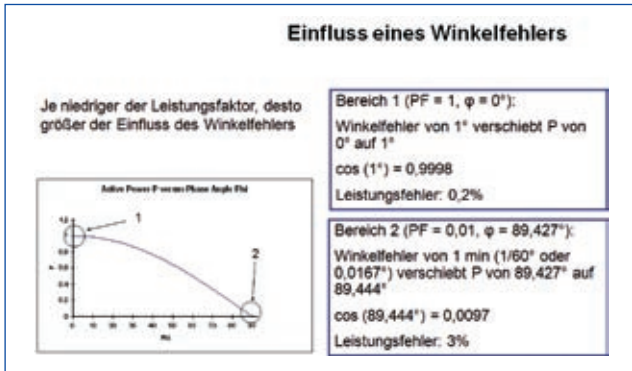
lers ϵ bei der Phasenlage φ zwischen Spannung und Strom. Sind Spannung und Strom in Phase $\varphi = 0^\circ$, $\cos(\varphi) = 1$, so verschwindet dieser Beitrag. Bei $\varphi = 60^\circ$, $\cos(\varphi) = 0,5$ kommt der Wert $1,73 \cdot \epsilon$ dazu. Bei hochwertigen Leistungsmessern liegt der Wert für ϵ bei $< 0,01\%$ von S. In der Praxis spielen diese Betrachtungen immer dann eine Rolle, wenn der Leistungsfaktor sehr klein wird ($< 0,1$), wie es bei Transformatoren oder Motoren im Leerlauf (induktiv) oder der kapazitiven Stromaufnahme durch EMV-Filter bei Standby-Messungen der Fall ist.

Besonderheit bei der Wirkungsgradmessung

Neben den bereits erläuterten hohen Anforderungen an Genauigkeit, Linearität und minimalen Phasenwinkelfehler kommt noch ein weiteres Problem bei der Wirkungsgradmessung hinzu: Da Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Umrichters völlig verschiedene Frequenzen aufweisen, gibt es kein Messintervall, in das die Periodenlängen beider Größen als ganzzahliges Vielfaches hineinpassen. Zumindest dann nicht, wenn die Messdauer einen praktikablen Wert etwa zwischen 200 ms und 2 s betragen soll. Ein ganzzahliges Vielfaches wird jedoch von der Rechenvorschrift für Wirkleistung und Effektivwerte gefordert, da andernfalls starke statistische Schwankungen des Rechenergebnisses zu erwarten sind, den so genannten Abschneide-Effekt. Bei bisherigen Leistungsmessern mussten deshalb unterschiedlich lange Zeitfenster für Eingangs- und Ausgangsgrößen in Kauf genommen werden.

Exaktes Zeitfenster für Ein- und Ausgangsgrößen

Andererseits soll im Interesse stabiler Wirkungsgrade ein zeitlich exakt gleich langes Messfenster verglichen werden. Die Lösung dieses Zielkonfliktes hat Yokogawa mit der EAMP- (Exponential Average for Measuring Period-)Methode entwickelt, die beide Forderungen vereint. Dabei handelt es sich um eine digitale Filterfunktion, bei der die statistische Schwankungen zunächst auftreten, jedoch durch eine Folge schneller Messungen auf den „wahren“ Endwert digital extrapoliert werden. Der Erfolg dieser Methode spiegelt sich in einer stabilen, lückenlosen Messwerterfassung ohne die Notwendigkeit einer Synchronisationsquelle wieder. Eine weitere Neuerung betrifft die simultane Messung im breitband-



Einfluss des Winkelfehlers in Abhängigkeit der Phasenlage



Simultane Messung von Leistung P1, Grundschwingungsleistung P1(1) und Spannungs-Klirrfaktor Uthd1

digen und im frequenzselektiven Modus. Bei bisherigen Leistungsmessern musste je nach Messanforderung der Modus manuell gewechselt werden. So entstehen durch die notwendige Messung der Grundswingungsfrequenz auch Verzögerungen mit einem Datenverlust.

Dank eines digitalen Resamplings wird die Abtastfrequenz für die Oberschwingungsanalyse der gemessenen Grundswingungsfrequenz ständig nachgeführt. Die konstante Abtastfrequenz für die Breitbandmessung bleibt damit erhalten. Wahlweise kann die konventionelle Methode mit Synchronisation durch eine PLL (Phase Lock Loop) angewendet werden.

Der Vorteil in der Praxis ist besonders bei der Antriebstechnik spürbar, da jetzt breitbandig gemessene Leistungen und Effektivwerte gleichzeitig mit jedem beliebigen Oberschwingungswert, wie der Grundswingungsleistung bei E-Motoren, zur Verfügung stehen. Weitere Anwendungen finden sich bei Standby-Messungen oder Beleuchtungseinrichtungen, wo simultan Energieverbrauch und Klirrfaktoren von Spannung bzw. Strom ermittelt werden können.

(heh)
Yokogawa Tel. +49(0)8152 93100

www.elektronikpraxis.de

WT3000: Leistungsanalysator von Yokogawa

Produktvorstellung im Heft

InfoClick 341095