Die Spezifikationen breitbandiger Leistungsmessgeräte

Auf welche Eigenschaften eines Leistungsmessgerätes kommt es an und wie sind die verschiedenen Fakten der marktüblichen Spezifikationen zu bewerten? Wir geben einen Überblick.

UGUR GÜRSOY *

Der Markt präziser elektrischer Leistungsmessgeräte ist hart umkämpft. Der japanische Hersteller Yokogawa bietet seit mehr als 60 Jahren Leistungsmessgeräte und bringt nahezu jährlich ein neues Modell nach neuestem Stand der Technik auf den Markt. Die Erfindung eines elektrischen Strommessgerätes vor knapp 100 Jahren war der Grundstein.

Im Markt der Leistungsmessgeräte gibt es keine einheitlichen Spezifikationsvorschriften. Jeder Anbieter kann seine Bezugsgrößen frei definieren. Prozent- und Bandbreitenangaben sind ohne weiteres nicht vergleichbar. Die Bezugsgrößen müssen klar erkenntlich sein. Zum Teil sind auch Datenblattangaben nicht direkt vergleichbar, so dass für einen zukünftigen Anwender oder Einkäufer ein schneller, objektiver Vergleich ohne Detailwissen oder kompetente Beratung unmöglich wird. Es gibt viele Einflussfaktoren, die für die Ermittlung des möglichen Gesamtfehlers (= Messunsicherheit) berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen beispielsweise Amplitudengenauigkeit, Crest-Faktor- (CF-) Betrachtung, Phasenwinkelfehler (δ), Temperaturbereiche der Spezifikationen, Aufwärmzeit, Stabilität der Periodenerkennung oder Gleichtaktunterdrückung.

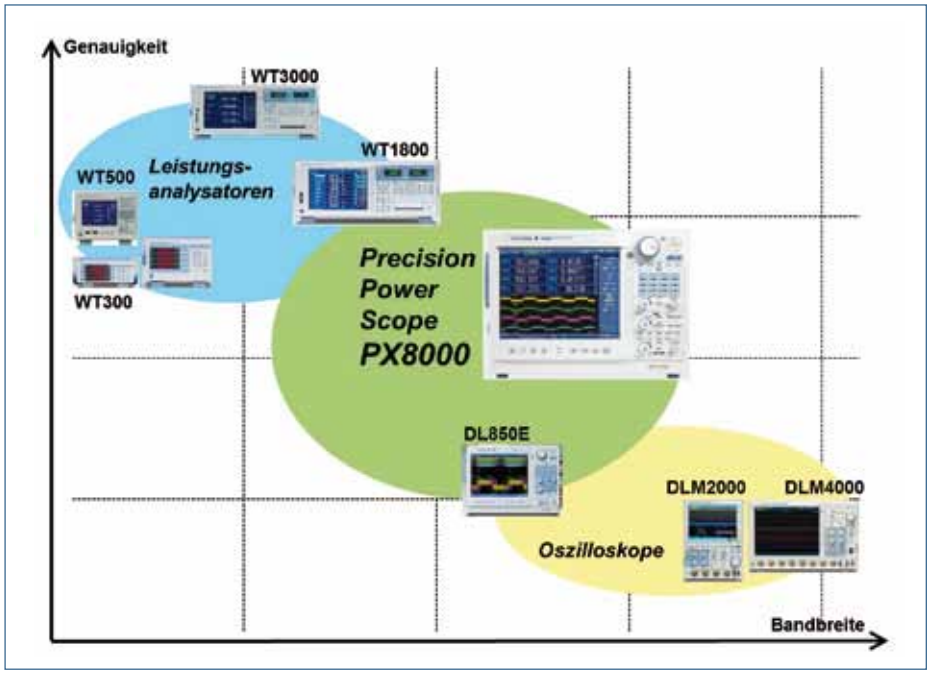
Yokogawa garantiert als einziger Hersteller seine Messunsicherheiten für jedes produzierte und kalibrierte Leistungsmessgerät. Die Genauigkeitsangaben der WT-Modelle gelten ab 1 bis zu 130 Prozent der Messbereichsausnutzung. Daher verwundert es nicht, dass die Messinstrumente in den Kalibrierprotokollen 5 bis 10 Mal besser sind als die Datenblattangaben. Können Hersteller die Genauigkeitsangaben nicht garantieren, beziehen sie sich auf ihre typischen Genauigkeiten. Unbekannte Randbedingungen von typischen Genauigkeitsangaben sind mit großer Vorsicht zu genießen.

Für die Harmonischen-Analyse kommt bei allen Yokogawa Power Analysatoren eine PLL – Phase Locked Loop zum Einsatz. Das ist ein zusätzlicher Oszillator mit Phasenregelschleife, der präzise die Grundfrequenz erfasst. Dank der Rechenleistung (DSP) der Leistungsmessgeräte können Frequenzspektren bis zur 500. Harmonischen analysiert werden – simultan zur normalen Leistungsmessung. Yokogawa gibt die Genauigkeitsangaben für die Harmonischen-Analyse an. Prinzipbedingt können für FFT-Analysen ohne PLL, die von vielen anderen Herstellern angewendet werden, keine Genauigkeiten spezifiziert werden. Somit sind die FFT-Analysen nicht kalibrierbar. Eventuelle Aussagen zur Normenkonformität von Harmonischen-Messungen sind häufig nicht belastbar, weil die entsprechenden Normen immer auch Anforderungen an die Messgenauigkeiten enthalten. Als Beispiel seien die Standby-Messungen nach IEC62301 erwähnt. Dafür wird eine Harmonischen-Analyse gefordert, um Total Harmonic Content und Total Harmonic Distorsion zu bestimmen.

Basis- und Amplitudengenauigkeit sowie Crest-Faktor

In den Datenblättern wird üblicherweise die Basis- oder Grundgenauigkeit beworben. Hierfür gibt es keinen einheitlichen Bezugspunkt unter den Herstellern. Sehr oft wird die Basisgenauigkeit auf die Genauigkeitsangaben bei Sinus 50/60 Hz und Leistungsfaktor = 1 bezogen. Hier weisen alle Power Meter ihre höchste Genauigkeit auf. Die Amplitudengenauigkeit wird für Strom, Span-

*** Ugur Gürsoy**
... ist Produktspezialist für Leistungsmessgeräte bei Yokogawa in Herrsching bei München.



Angebot an Leistungsmesstechnik: *Yokogawa hat mit dem PX8000 PrecisionPowerScope das weltweit einzige Messinstrument vorgestellt, welches die zeitbasierte Analysemöglichkeit eines Oszilloskops mit der rückführbaren Messgenauigkeit eines Leistungsmessgeräts vereint.*

Bilder und Grafiken: Yokogawa

nung und Leistung in Prozent vom Messwert (MW) plus Prozent vom Messbereich (MB) angegeben. Bei der Leistung ist für den MB das Produkt aus dem Spannungs- und Strommessbereich einzusetzen. Wie stark der Messbereichsfehler in den Gesamtfehler eingeht, ist von der Aussteuerung abhängig. Bei der Definition des Messbereichsfehlers gibt es jedoch Unterschiede, die jedem Anwender bewusst sein müssen.

Je nach Hersteller kann der Messbereich als Spitzenwert oder Effektivwert mit CF definiert sein. In der Theorie wird der CF eines Signals als Quotient von Spitzenwert zu Effektivwert definiert. Messbereiche der Leistungsmessgeräte Yokogawa sind als Effektivwert mit CF definiert. Der CF ist in diesem Fall ein Maß für die Dynamik eines Messeinganges in Bezug auf den Nominalwert. Der Standardwert ist 3 und umschaltbar auf 6. Bezogen auf die Definition anderer Hersteller wäre der Yokogawa CF somit 300, denn in einem Messbereich können bei effektiver Signalaussteuerung von nur 1 Prozent trotzdem Amplitudenspitzen mit ±300 Prozent ohne Beeinträchtigung verarbeitet werden. Beispiel: Im Messbereich 100 V_{eff} werden in der Einstellung CF = 3 Spitzen von ±300 V problemlos erfasst. Die garantierten Toleranzangaben gelten für eine untere Messbereichsausnutzung von 1 Prozent (bei CF = 6 sind es 2 Prozent), im Beispiel also 1 V_{eff}. 300 V_{peak} geteilt durch 1 V_{eff} ergibt einen CF von 300.

In der Leistungsmessung sind nach wie vor Effektivwerte sehr wichtige Messgrößen. Das spricht für eine Effektivwert-Messbereichseinstellung. Zusätzlich benötigt der Anwender die Information, welche Spitzenwerte zulässig sind. Das wird von Yokogawa durch den CF des Eingangs spezifiziert. Die Angabe eines festen Crest-Faktors (je nach Einstellung entweder 3 oder 6) für alle Strom- und Spannungsmessbereiche sprechen für das Hardware-Design. Umständlich ist das Handling bei Leistungsmessgeräten, bei denen der CF für jeden Messbereich unterschiedlich ist. Dort muss der Anwender die jeweilige Aussteuerungsgrenze für jeden Messbereich aus einer Messbereichstabelle entnehmen. Bei Geräten, die Messbereiche grundsätzlich nur über Spitzenwerte definieren, ist der CF des Einganges nach Yokogawa-Spezifikation 1.

Der Crest-Faktor und die Genauigkeitsangaben

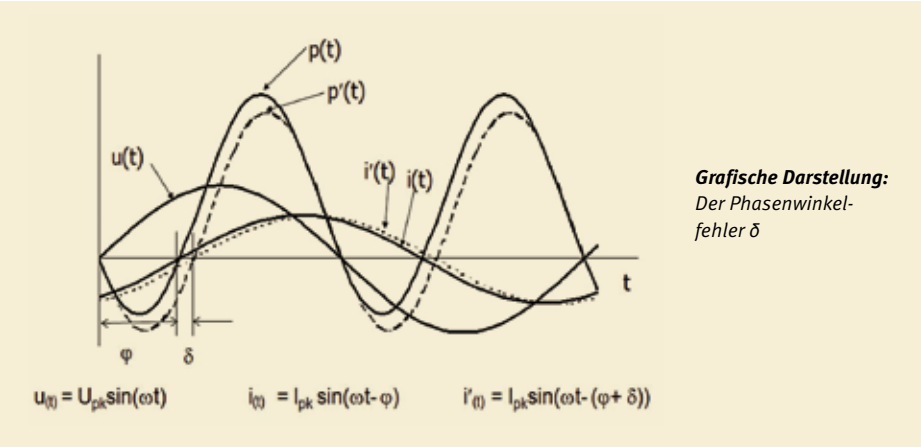
Warum ist diese Thematik zum CF in Zusammenhang mit Messunsicherheitsbetrachtungen so wichtig? Es gibt Leistungsmessgeräte mit Effektivwert-Messbereichen, die aber für die Fehlerberechnung Spitzenwert-Messbereiche heranziehen. Auch gibt es Power Meter, die sowohl für die Einstellung am Gerät und für die Fehlerberechnung Spitzenwert-Messbereiche benutzen. Beide sind unpraktisch, da Messungen und Genauigkeitsberechnungen von Effektivwerten im Vordergrund stehen. Wenn die Genauigkeitsangaben auf die Spitzenwerte bezogen werden, wirken die Prozentangaben zunächst überzeugend. Bezieht man die Prozentangaben auf Effektivwert-Messbereiche von Strom oder Spannung, so werden bei einem CF = 3 aus 0,1 Prozent plötzlich 0,3 Prozent. Ein Wert von 0,1 Prozent vom Spitzenwert-Messbereich entsprechen 0,3 Prozent vom Effektivwert-Messbereich bei CF = 3. Für die Wirkleistung als Produkt aus Strom und Spannung (und Leistungsfaktor) verstärkt sich dieser Effekt drastisch. Beim vorgenannten CF = 3 sowohl für Strom als auch für Spannung liegen die für die Genauigkeitsbetrachtung relevanten Leistungsmessbereiche um Faktor 9 auseinander. Aus einer Messunsicherheit von 0,1 werden 0,9 Prozent.

Yokogawa verwendet sowohl für die Messbereichseinstellung als auch für die Toleranzberechnung grundsätzlich die Effektivwert-Messbereiche. Das ist praktisch und hat sich bewährt. Häufig sind dem Anwender weder die Effektiv- noch die Spitzenwerte der zu messenden Signale bekannt. Bei Einsatz der Auto-Range-Funktion werden die Spitzen- sowie Effektivwerte überwacht um die Strom- und Spannungsmessbereiche automatisch und optimal einzustellen.

Die Leistungsmessung und Yokogawa im Besonderen

Für die präzise Leistungsmessung müssen die Nulldurchgänge der Perioden exakt erkannt werden. Dazu besitzen die Leistungsmessgeräte von Yokogawa eigene Frequenzmesskreise (Zero-Cross Detection), welche die Grundfrequenzen auch bei anspruchsvollen pulsweitenmodulierten PWM-Signalen von Frequenzumrichtern erkennen. Die Periodenerkennung ist für jedes Leistungsmessgerät essentiell. Messungen von Teilperioden würden zu prinzipiell kaum quantisierbaren Messfehlern führen. Dazu hat Yokogawa das Sychronisationsprinzip „Average for the Synchronous Source Period“ (ASSP) entwickelt. Messmethoden, die die Nulldurchgänge per Software ermitteln, können bei komplexen PWM-Signalen, die mit vielen Oberschwingungen behaftet sind, keine hohen Messgenauigkeiten für Strom, Spannung und Wirkleistung erreichen.

Moderne, digitale Leistungsmessgeräte tasten die zu messenden Signale diskret ab. Zur Ermittlung der elektrischen Wirkleistung



Grafische Darstellung: *Der Phasenwinkelfehler δ*

werden zunächst die Abtastwertepaare von Spannung und Strom miteinander multipliziert. Um ein präzises Ergebnis der Wirkleistung sicherzustellen ist der korrekte zeitliche Bezug zwischen Strom- und Spannungssample äußerst wichtig. Diese Augenblickswerte der Leistung werden anschließend innerhalb des definierten Messintervalls integriert und ergeben dann die elektrische Wirkleistung in analoger oder digitaler Betrachtung:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t) * i(t)\,dt = \frac{1}{T}\sum_{k=1}^{k=\frac{T}{\Delta t}} u(k) * i(k)\,\Delta t$$

Vor allem bei kleinen Leistungsfaktoren und/oder hohen Frequenzen ist die synchrone Abtastung von Strom und Spannung enorm wichtig. Jedes Power Meter weist systembedingt einen Phasenfehler auf, der keinesfalls unberücksichtigt bleiben darf. Das sei anhand der einfachen Wirkleistungsformel für rein sinusförmige Signalverläufe dargestellt

$P = (U_{eff}) * (I_{eff}) * \cos(\phi \pm \delta)$, δ stellt hier den Phasenfehler dar. Bevor u(t) und i(t) in den AD-Wandler eingespeist werden, müssen sie die analogen Eingangsschaltungen passieren. Zwei analoge Eingangsschaltungen sind allerdings nie zu 100 Prozent identisch. Schon minimale Laufzeitunterschiede wirken sich aus, wenn präzise Leistungsmessungen gefordert werden.

Den Strom messen als besondere Aufgabe

Eine besondere Herausforderung ist die Strommessung. Ein Strom-Shunt ist ein relativ großes Bauelement, das bauteilbedingt eine geringe Induktivität (wenige nH) und parasitäre Kapazitäten aufweist. Dies verursacht eine sehr kleine, zusätzliche Phasenverschiebung somit erfährt der Strom i(t) eine zusätzliche, zeitliche Verzögerung. Auch der Übergang in die digitale Welt erfordert ein perfektes Hardware-Design. Digitalsignale haben keine unendliche Flankensteilheit. Wenn sich Temperatureinflüsse auf Schwellwerte von A/D-Wandlern auswirken, führt das ebenfalls zu einer Veränderung des zeitlichen Bezugs. Alle Einflüsse sind im Phasenfehler δ [°] enthalten (Bild Seite 31). Das hat zwar keine Auswirkung auf U_{eff}, I_{eff} und Scheinleistung S, jedoch auf die Messung der Wirkleistung P und somit auf den Leistungsfaktor λ. Bei λ = 0,1 bewirkt ein Phasenfehler von 0,1° (das sind bei 500 Hz 556 ns) einen zusätzlichen Wirkleistungsfehler von 1,6 Prozent. Die unerwünschte Phasenverschiebung muss bei jedem Präzisions-Leistungsmessgerät spezifiziert sein. In der heutigen Zeit sind fast alle in der Industrie und auch im privaten Bereich auftretenden Signale weit von einem idealen Sinus entfernt, enthalten hohe Frequenzanteile und weisen Betriebszustände mit kleinen Leistungsfaktoren auf. Yokogawa betrachtet alle möglichen Randbedingungen, die zu einem Phasenwinkelfehler bzw. Messfehler führen können und berücksichtigt diese in den Spezifikationen.

Gleichtaktunterdrückung – Common Mode Rejection (CMR)

Die Gleichtaktunterdrückung beschreibt, wie sich ein Störsignal auswirkt, das beispielsweise an beiden Eingangsbuchsen eines Spannungseingangs gleichzeitig anliegt. Hierbei sind die beiden Eingangsbuchsen miteinander verbunden, Bezugspunkt ist die Gerätemasse. Idealerweise sollte dies keinen Einfluss auf das Messergebnis haben. Tatsächlich fließen Ableitströme, die in Abhängigkeit von der Symmetrie der Eingangsschaltung eine Störspannung bewirken. Dabei spielen parasitäre Kapazitäten eine große Rolle. Bei praktischen Messaufgaben überlagert sich diese Störspannung dem zu messenden Signal und führt zu Messfehlern.

Die Gleichtaktstörsignale sind vor allem bei Umrichteranwendungen ausgeprägt, denn hier treten hohe Spannungspotentiale mit hohen Frequenzanteilen gegen Masse auf. Grundsätzlich findet man diesen Effekt auch bei den Stromeingängen des Powermeters. Hier lässt er sich allerdings sehr einfach durch den Einsatz von Nullflussstromwandlern vermeiden, da prinzipbedingt keine Gleichtaktaussteuerung der Stromeingänge des Power Meters stattfindet. Regelmäßig machen uns Kunden auf die bemerkenswerte Gleichtaktunterdrückung der Yokogawa-Hardware im Vergleich zu anderen Messinstrumenten aufmerksam. Die Gleichtaktunterdrückung ist bei unseren Messgeräten spezifiziert und kann bei Messunsicherheitsbetrachtungen berücksichtigt werden.

Die garantierten Genauigkeiten gibt Yokogawa bei 23 °C ± 5 °C an. Das ist ein Indiz auf die langjährige Erfahrung in der Leistungsmessung, insbesondere in der Strommessung und der Stabilität der speziell entwickelten Shunt-Widerstände. Wenn ein Hersteller die Temperaturbereiche beispielsweise nur mit 23 °C ± 2 °C angibt, müssen die nicht unerheblichen zusätzlichen Fehler pro Kelvin immer dazu addiert werden, wenn der Messplatz nicht temperaturstabil ist. Die Leistungsmessgeräte können von allen freien Kalibrierlaboren kalibriert und bei Bedarf justiert werden. Dazu zählen die für Wirkleistung DAkkS-akkreditierten Kalibrierlabore. Bei solchen hohen Investitionskosten ist es hilfreich, sich unabhängige Meinungen von Dritten zu holen und vergleichbare Kalibrierprotokolle zu sichten. In Deutschland wird AC-Leistung bei 53 Hz kalibriert. Strom und Spannung können einzeln bei hohen Frequenzen rückführbar kalibriert werden. Abweichungen in der reinen Strom- oder Spannungskalibrierung bei hohen Frequenzen sind ein Indiz dafür, dass bei der Leistung die Power Meter außer Toleranz liegen werden.

Die Garantie und ihre Details sollte ebenfalls ein wichtiges Kaufkriterium darstellen. Die Herstellergarantie von Seiten Yokogawa beträgt für alle Leistungsanalysatoren drei Jahre. In unserem Servicelabor in Herrsching führen wir Kalibrierungen und bei Bedarf Reparaturen ohne lange Wartezeiten aus. Für die Überbrückung der Ausfallzeiten stehen für den Kunden Demogeräte zur Verfügung. Weiterhin muss die Kalibrierung und bei Bedarf die Justierung von unabhängigen Kalibrierlaboren zu gewährleisten sein. Die zukünftigen und regelmäßig anfallenden Kalibrierkosten sollten nicht unberücksichtigt bleiben. // **HEH**

Yokogawa
+49(0)8152 93100