

Leistungsmessverfahren

Es gibt zur Messung der elektrischen Leistung verschiedene Definitionen und entsprechende Messverfahren. Leider wird dies aus Unkenntnis oder "mal gehört, aber schon lange wieder vergessen" in dem Umgang mit Messgeräten oft nicht beachtet. So entstehen dann Missverständnisse oder Fehlinterpretationen der Messergebnisse, die im schlimmsten Fall zur falschen Dimensionierung von Betriebsmitteln wie z.B. Blindleistungskompensationsanlagen oder Verkabelungen führen können.

Die folgende Beschreibung soll einen kurzen Überblick über die Messverfahren und Anwendungsbereiche der Leistungsmessung mit dem EWS 94 geben. Für genaue Herleitungen und allgemeine Grundlagen zur Leistungsmessung gibt es Bücher und Formelsammlungen der Elektrotechnik.

Wirkleistung

Die grundsätzliche Definition der elektrischen Leistung für Gleichspannungen und Gleichströme ist:

$$P = U \cdot I \quad [1]$$

$$\text{mit } U = R \cdot I \text{ bzw. } I = \frac{U}{R}$$

Auf beliebige Wechsel- und Gleichspannungen und Ströme übertragen gilt:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad [2]$$

$$\text{mit } u(t) = Z \cdot i(t) \text{ bzw. } i(t) = \frac{u(t)}{Z}$$

wobei mit Z eine beliebige reelle, komplexe oder nichtlineare Impedanz bezeichnet wird.

Die Größe $p(t)$ gibt die Leistung eines elektrischen Objektes (Impedanz Z) als Funktion der Zeit, berechnet aus den Zeitfunktionen von Strom und Spannung zu jedem beliebigen Zeitpunkt an. Man könnte diese Funktion z.B. grafisch darstellen. Die PC-Software zu dem EWS 94 bietet genau diese Möglichkeit an. Sie erhalten damit aus (zeitlich begrenzten) Aufzeichnungen von Strom und Spannung den Verlauf der Leistung über der Zeit. Diese Darstellung stellt nur die Leistung $p(t)$ dar.

Die Wirkleistung ist nun der zeitliche Mittelwert von $p(t)$ und berechnet sich nach folgender Formel:

$$P = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} u(t) \cdot i(t) dt \quad [3]$$

Diese Definition ist allgemeingültig für beliebige Kurvenformen von Strom und Spannung und ergibt die in dem Zeitabschnitt T umgesetzte Wirkleistung. Für den Fall, daß periodische Spannungen und Ströme vorliegen, wird man üblicherweise für T ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer wählen.

In digitalen Messgeräten wie dem EWS 94 wird dieses Integral nach der Digitalisierung von Strom und Spannung berechnet. Für T wird im EWS 94 dabei die neunfache Periodendauer der gewählten Netzfrequenz verwendet. Dies gilt für die Messung der Wirkleistung in der Anzeige "Leistung" und "Leistung einphasig". Dieser Messwert gibt also laufend die über Zeitabschnitte von 9 Perioden gemessene Wirkleistung an.

Elektrodynamische Leistungsmessgeräte bilden das Produkt von Strom und Spannung und ersetzen die Integration durch eine Tiefpaßfilterung, so daß deren Anzeige eine kontinuierliche Funktion ist. Im Rahmen der Bandbreite und der Tiefpaßzeitkonstante zeigen diese analogen Messgeräte die Wirkleistung bei beliebigen Spannungen und Strömen an.

Für den Spezialfall, daß sowohl Strom als auch Spannung sinusförmig sind und die gleiche Frequenz haben, so gilt die Formel:

$$P = \frac{1}{2} \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \cos(\varphi) \quad [4]$$

wobei φ die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bezeichnet.

Bei sinusförmigen Größen kann man die Phasenverschiebung durch Messung des Abstandes der Nulldurchgänge von Strom und Spannung sowie die Größen \hat{u} und \hat{i} durch einen einfachen Spitzenwertgleichrichter bestimmen. Dieses Verfahren wird teilweise auch bei billigen (<100 DM) digitalen Messgeräten für den Hausgebrauch angewandt. Unter der Annahme, daß die damit gemessene Netzspannung einen relativ kleinen Klirrfaktor hat und der gemessene Strom vor der Gleichrichtung und Null-

durchgangsbestimmung tiefpaßgefiltert wird, ergibt das für viele Haushaltsgeräte relativ brauchbare Messwerte für die Wirkleistung.

Das EWS 94 bietet auch die Möglichkeit der Leistungsmessung nach [4]. Das dazu verwendete Verfahren basiert allerdings auf einer Fourier-Analyse von Strom und Spannung zur Berechnung von \hat{u} , \hat{i} und φ . Damit wird auch bei stärker verzerrten Strömen und Spannungen die Messung der bei einer bestimmten Frequenz (z.B. der Netzfrequenz von 50Hz) umgesetzten Wirkleistung möglich. Interessant ist die Messung der Wirkleistung einer Frequenz beispielsweise bei Motoren und Generatoren. Diese können nur die elektrische Leistung der Grundfrequenz in mechanische Leistung umsetzen. Die Wirkleistung aller anderer Frequenzen wird in Wärme umgesetzt (ein Teil der Grundswingungsleistung natürlich auch).

Das EWS 94 mißt die Wirkleistung nach diesem Verfahren in der Anzeige "Phase", Unterfunktion "Leistung". Dabei kann die Leistung der Grundswingung oder einer ausgewählten ganzzahligen Oberswingung gemessen werden.

Scheinleistung und Blindleistung

Während die Wirkleistung die Leistung ist, die im zeitlichen Mittel in andere Energieformen umgesetzt werden kann (z.B. Bewegung oder Wärme), handelt es sich bei der Blindleistung um eine Größe, die in der Elektrotechnik immer dann auftaucht, wenn der Strom in einer Impedanz keine reelle und lineare Funktion der anliegenden Spannung ist. Dies ist bei allen Impedanzen der Fall, die keinen idealen ohmschen Widerstand darstellen.

Ebenso wie die Wirkleistung ist die Blindleistung nur durch zeitliche Mittelung zu bestimmen.

Bei sinusförmigen Strömen und Spannungen berechnet sich die Blindleistung zu

$$Q = \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i} \sin(\varphi) \quad [5]$$

Für die Betrachtung von Verbrauchern gilt dabei, daß Q positiv ist, wenn Z überwiegend induktiv ist und Q bei kapazitiver Reaktanz negativ wird.

Die geometrische Summe von P und Q wird als Scheinleistung bezeichnet:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [6]$$

Ebenso gilt

$$S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \quad [7]$$

Bei sinusförmigen Größen gilt:

$$U_{\text{eff}} = \hat{u} \cdot \sqrt{2} \text{ bzw. } I_{\text{eff}} = \hat{i} \cdot \sqrt{2} \quad [8]$$

Allgemein ist der Effektivwert für Signale beliebiger Zeitfunktion definiert:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} u(t)^2 dt} \quad [9]$$

und entsprechend für I_{eff} .

Dabei wird man wie bei der Wirkleistung T zu einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer wählen oder das Integral durch eine Tiefpaßfilterung ersetzen.

Aus den Effektivwerten beliebiger Signale kann man auch die Scheinleistung beliebiger Signale entsprechend [7] berechnen. Durch Umstellen von [6] ergibt sich die Blindleistung dann zu

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad [10]$$

Diese Blindleistung hat kein Vorzeichen, also auch keine Unterscheidung zwischen kapazitiven und induktiven Verbrauchern.

Periodische Signale kann man mit einer Fourier-Analyse in ihre (sinusförmigen) Bestandteile bei den verschiedenen im Signal enthaltenen Frequenzen zerlegen. Im Gegensatz zu der Wirkleistung, die nur bei Strom- und Spannungsanteilen mit gleicher Frequenz umgesetzt wird, unterscheidet man die Blindleistung in Anteile, die bei gleicher Frequenz umgesetzt werden, sowie Anteile, die bei Strömen und Spannungen unterschiedlicher Frequenz stattfinden.

Die Blindleistung bei Spannung und Strom gleicher Frequenz wird nach [5] berechnet und als Verschiebungsblindleistung bezeichnet. Im Netz ist z.B. die Verschiebungsblindleistung bei der Grundfre-

quenz (50Hz) die maßgebende Größe für die Dimensionierung einer Blindleistungskompensationsanlage.

Das EWS 94 berechnet die Verschiebungsblindleistung [5] ebenso wie die Wirkleistung einer Frequenz [4] in der Anzeige "Phase", Unterfunktion "Leistung". In dieser Anzeige wird auch die Scheinleistung einer Frequenz nach [6] und der $\cos(\varphi)$ aus [4] angezeigt.

In den Anzeigen "Leistung" und "Leistung einphasig" berechnet das EWS 94 die Effektivwerte von Strom und Spannung nach [9] und daraus die Scheinleistung nach [7]. Dementsprechend wird aus der Wirkleistung nach [3] und der Scheinleistung die Blindleistung nach [10] berechnet und angezeigt.

Man sieht, daß es prinzipiell zwei verschiedene Definitionen zur Berechnung von Leistungen gibt, die beide von dem EWS 94 angeboten werden. **Daraus ergibt sich die Konsequenz, daß die Messwerte in der Anzeige "Leistung" und in der Anzeige "Phase", obwohl sie bei oberflächlicher Betrachtung den gleichen Namen haben, keineswegs gleichwertig sind.**

Für den Fall, daß eine der beiden Größen (Strom oder Spannung) eine relativ saubere Sinusform hat, wie dies für die Spannung meistens im Netz der Fall ist, kann man vereinfacht aus der gesamten Blindleistung nach [10] und der Verschiebungsblindleistung der Grundschwingung den Anteil der Blindleistung berechnen, der durch die Verzerrung der Sinusform der anderen Größe (Strom) verursacht wird:

$$Q_{\text{Verzerrung}} = \sqrt{Q_{\text{Gesamt}}^2 - Q_{\text{Verschiebung}}^2}$$

Diese Größe wird demnach als Verzerrungsblindleistung bezeichnet.

Leistungsfaktoren

Generell ist der Leistungsfaktor als das Verhältnis von Wirkleistung zur Scheinleistung definiert. Da es aber verschiedene Wirk- und Scheinleistungen gibt, gibt es auch verschiedene Leistungsfaktoren.

Für die Messung sinusförmiger Ströme und Spannungen gleicher Frequenz gilt der Verschiebungsfaktor

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S},$$

wobei φ die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung darstellt. P und S sind hier nach [4] bzw. [6] berechnet.

Für beliebige Zeitfunktionen ist der Leistungsfaktor

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

mit P und S nach [3] bzw. [7] definiert. Statt λ verwendet das EWS 94 die Bezeichnung "LF".

Messpraxis

In der Praxis ergeben sich folgende Zusammenhänge zwischen diesen Leistungsgrößen:

Bei rein sinusförmigem Strom und sinusförmiger Spannung sind die Werte von Wirkleistung und Scheinleistung nach beiden Verfahren gleich. Der Betrag der Blindleistungen ist ebenfalls gleich, bei der Blindleistung nach [10] fehlt das Vorzeichen. Dies ist zum Beispiel der Fall bei der Messung von linearen Impedanzen (Widerstände, Induktivitäten, Kapazitäten, Synchron- oder Asynchronmaschinen ohne Umrichter) an einen relativ unverzerrten Netz. Die nach den beiden Verfahren gemessenen Effektivwerte für Strom und Spannung sind ebenfalls (fast) gleich.

Wenn eine der beiden Größen sinusförmig ist und die andere nicht, so ergibt sich aus der Regel, daß Wirkleistung nur bei gleichen Frequenzen umgesetzt wird bei beiden Verfahren die gleiche Wirkleistung, aber meistens unterschiedliche Werte für Schein- und Blindleistungen. Dies kommt vor bei der Messung nichtlinearer Verbraucher (Fernsehgeräte, Energiesparlampen, Eingänge von Frequenzumrichtern usw.) an relativ sauberen Netzen (fast sinusförmige Spannung und verzerrter Strom) oder von Motoren am Ausgang von Frequenzumrichtern (stark verzerrte Spannung und annähernd sinusförmiger Strom). Die gemessenen Effektivwerte sind für die (fast) sinusförmige Größe (fast) gleich, für die nichtsinusförmige Größe meistens nicht.

Im letzten Fall, wenn sowohl Strom als auch Spannung nicht sinusförmig sind, gibt es keine generelle Übereinstimmung zwischen den beiden Messverfahren. In einem solchen Fall kann beispielsweise der gesamte Wirkleistungsumsatz eines Motors oder Generators nach [3] in der Anzeige "Leistung" gemessen werden und im Vergleich dazu der Wirkleistungsanteil bei der Grundschiwingung [4] in der Anzeige "Phase" bestimmt werden, der auch in mechanische Leistung umgesetzt werden kann. Die Effektivwerte nach beiden Verfahren sind hier üblicherweise nicht gleich.

Bei der Interpretation dieser Messwerte ist zu beachten, daß normalerweise nur die Wirkleistung der Grundschiwingung sinnvoll im Netz verwertet werden kann, aber auch Verschiebungsblindleistung vorhanden sein kann.

Auftretende Wirk- und Blindleistungen bei anderen Frequenzen können nicht von den einspeisenden Kraftwerken erzeugt werden, diese werden von nichtlinearen Verbrauchern oder Rundsteuersystemen verursacht. Wirk- und Verschiebungsblindleistung der Grundschiwingung sind für den Betrieb des Netzes notwendig, die Anteile bei anderen Frequenzen sind entweder Rundsteuersignale oder mehr oder weniger unerwünscht.

Für den Betrieb von Asynchronmaschinen ist Verschiebungsblindleistung der Grundschiwingung notwendig, Verzerrungsblindleistung ist hier nicht von Nutzen.

Bei Synchronmaschinen kann bei gegebener Spannung die Verschiebungsblindleistung durch die Erregung gesteuert werden.

Durch die Kapazitätsbeläge des Leitungsnetzes ergibt sich immer eine gewisse Verschiebungsblindleistung der Grundschiwingung, auch wenn kein einziger Verbraucher angeschlossen wäre.

Für die thermische Belastung des Leitungsnetzes ist der Effektivwert des Stromes nach [9] maßgebend bzw. die Scheinleistung nach [7], unabhängig davon, ob Wirk- oder Blindleistung umgesetzt wird. Ähnliches gilt für die Belastung von Transformatoren.

Für die Tarifabrechnung von industriellen Abnehmern wird üblicherweise neben der Wirkleistung die Blindleistung nach [5] verwendet. Dementsprechend legt man zur grundsätzlichen Dimensionierung von Kompensationskondensatoren die Blindleistung der Grundschiwingung zugrunde.

Blindleistungskompensationsanlagen erfahren eine erhöhte Strombelastung, wenn eine starke Verzerrung der Sinusform der Spannung vorliegt. Da dies meist mit einer verzerrten Stromaufnahme der kompensierten Verbraucher einhergeht, ist auch die Verzerrungsblindleistung ein Maß für die erhöhte Strombelastung der Kondensatoren. Üblicherweise beurteilt man diese Belastung aber durch die Messung des Oberschwingungsgehaltes der Spannung und des Zuleitungsstromes zu der Kompensationsanlage.

HAAG
Elektronische Messgeräte GmbH
Emil-Hurm-Str. 18-20
65620 Waldbrunn
Tel. 06436/4035, Fax 06436/3361