

Wechselstromgrößen

Zweileiter-Stromkreise

DIN
40 110
Teil 1

Quantities used in alternating current theory; two-line circuits

Teilweise Ersatz für
DIN 40 110/10.75

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	1	3.3.2 Komplexe Leistung bei Sinusgrößen, Wechselleistung	7
2 Spannung und Stromstärke	1	3.4 Weitere Zusammenhänge und Benennungen ..	7
2.1 Benennungen und Festlegungen bei periodischen Größen	1	3.5 Leistungsbestimmung bei verzerrten Spannungen und Stromstärken	8
2.2 Benennungen und Festlegungen bei Mischgrößen	2	3.5.1 Leistung bei Sinusspannung und nicht-sinusförmigem Stromverlauf	8
2.3 Benennungen und Festlegungen bei Wechselgrößen	3	3.5.2 Leistung bei nichtsinusförmigen Spannungs- und Stromverläufen	10
2.4 Benennungen und Festlegungen bei Sinusgrößen	3	3.5.3 Mittelwerte und Leistung bei unregelmäßig schwankenden Spannungen und Stromstärken	10
2.5 Sinusgrößen in komplexer Darstellung	4	4 Elektrische Arbeit, elektrische Energie	11
3 Elektrische Leistung	4	Anmerkungen	11
3.1 Leistungsbegriff, Wirkleistung, Scheinleistung	4	Zitierte Normen und andere Unterlagen	12
3.2 Leistungsbestimmung im allgemeinen Fall, Gesamtblindleistung	5	Frühere Ausgaben	13
3.3 Leistung bei Sinusgrößen	6	Änderungen	13
3.3.1 Zeitverläufe und Mittelwert, Verschiebungs- Blindleistung	6	Erläuterungen	13
		Stichwortverzeichnis	13

1 Anwendungsbereich und Zweck

In dieser Norm werden die Meß- und Rechengrößen von Wechselstromkreisen in ihren funktionalen Abhängigkeiten zusammenhängend dargestellt. Die Norm befindet sich dabei in Übereinstimmung mit anderen Normen – und sie ist auf diese abgestützt –, in welchen Teile dieser Größen unter anderen speziellen Gesichtspunkten betrachtet werden, z. B. deren Formelzeichen, Begriffserklärungen oder besondere Gruppenzusammenhänge.

Aus systematischen Gründen und wegen besserer Lesbarkeit sind manche Größen daher mehrfach besprochen. Die hiervon betroffenen Normen sind im Verzeichnis „Zitierte Normen“ enthalten.

Die Wechselstromgrößen und ihre Zusammenhänge werden in dieser Norm vom Allgemeinen her, d. h. zuerst ohne Benutzung der komplexen Darstellung (nur für Sinusgrößen), beschrieben. Die Formelzeichen für Spannung und Stromstärke werden unter Verwendung von Groß- und Kleinbuchstaben gebildet (siehe DIN 5483 Teil 2/09.82, Fall 1 in Tabelle 1). Die Festlegungen beziehen sich auf Systeme mit zwei Leitern, die in DIN 40 108 auch Einphasensysteme genannt werden.

2 Spannung und Stromstärke

2.1 Benennungen und Festlegungen bei periodischen Größen

Spannung und Stromstärke werden in dieser Norm als periodische Zeitfunktionen gleicher Periodendauer vorausgesetzt (Ausnahme: Abschnitt 3.5.3); zwischen ihren jeweiligen Kenngrößen brauchen im allgemeinen keine linearen Beziehungen zu bestehen. Siehe Anmerkungen.

Für die periodischen Augenblickswerte $u = u(t)$ einer Spannung oder $i = i(t)$ einer Stromstärke ergibt sich die Frequenz f als Kehrwert der Periodendauer T zu

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1)$$

Die arithmetischen Mittelwerte (linearen zeitlichen Mittelwerte) der Spannung und der Stromstärke sind

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u \, dt = U_{-1} \quad (2)$$

und

¹⁾ Siehe Seite 2

Fortsetzung Seite 2 bis 14

Normenausschuß Einheiten und Formelgrößen (AEF) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i \, dt = I_- \quad (3)$$

Diese Mittelwerte werden Gleichwerte (Gleichanteile, Gleichspannung, Gleichstromstärke, Gleichspannungsanteil, Gleichstromanteil) genannt.

Eine Wechselgröße (Wechselspannung, Wechselstrom) liegt vor, wenn der Gleichwert Null ist.

Eine Mischgröße (Mischspannung oder Mischstrom) liegt vor, wenn der Gleichwert U_- oder I_- von Null verschieden ist und einem Gleichanteil eine Wechselgröße $u_{\sim}$ bzw. $i_{\sim}$ (Wechselanteil, Wechselspannung, Wechselstrom) ²⁾ überlagert ist. Bild 1 zeigt als Beispiel den zeitlichen Verlauf einer Mischspannung $u = U_- + u_{\sim}$ (siehe Anmerkungen).

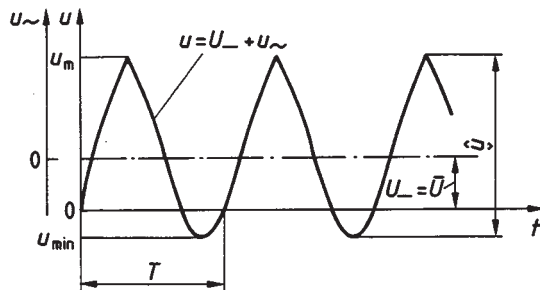


Bild 1

Der Gleichrichtwert einer Mischgröße oder einer Wechselgröße ist der lineare Mittelwert der Beträge der Augenblickswerte, gebildet über eine Periodendauer, also

$$|\bar{u}| = \frac{1}{T} \int_0^T |u| \, dt \quad \text{bzw.} \quad |\bar{i}| = \frac{1}{T} \int_0^T |i| \, dt \quad (4), (5)$$

Die zeitlichen quadratischen Mittelwerte von Mischgrößen oder von Wechselgrößen heißen Effektivwerte. Der Effektivwert einer Spannung u oder einer Stromstärke i ist

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 \, dt} \quad \text{bzw.} \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \, dt} \quad (6), (7)$$

Die Effektivwerte von Spannungen oder Stromstärken werden aus Anteilen mit orthogonalen Zeitfunktionen durch quadratische Addition ermittelt; bei nichtorthogonalen Anteilen ist geometrisch zu addieren (Zeiger), siehe Anmerkungen.

So ergibt sich z.B. der Effektivwert I der Stromstärke bei mehreren orthogonalen Anteilen $i_1 + i_2 + \dots = i$ aus

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \dots \quad (8)$$

andererseits z.B. bei zwei sinusförmigen nichtorthogonalen Anteilen aus

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \varphi_{21} \quad (9)$$

mit dem Phasenverschiebungswinkel

$$\varphi_{21} = \varphi_{i2} - \varphi_{i1}$$

2.2 Benennungen und Festlegungen bei Mischgrößen

Zur Kennzeichnung spezieller Werte der Mischgrößen werden die folgenden Begriffe verwendet; Beispiele sind hier zunächst nur mit Formelzeichen für Spannungen gegeben; Entsprechendes gilt hier für Begriffe und Formelzeichen bei Mischstromstärken.

Der Maximalwert $u_m, \hat{u}$ ist der größte Augenblickswert (Größtwert) der Mischgröße während einer Periodendauer, bei mehreren Maximalwerten heißt der größte der Maximalwerte Spitzenwert $u_{mm}, \hat{\hat{u}}$.

Der Minimalwert $u_{\min}, \hat{\bar{u}}$ ist der kleinste Augenblickswert (Kleinstwert) der Mischgröße während einer Periodendauer, bei mehreren Minimalwerten heißt der kleinste von ihnen der Talwert $u_v, \hat{\bar{u}}$ (siehe Anmerkungen).

Die Schwingungsbreite (Schwankung) u_e ist die Differenz zwischen Spitzenwert und Talwert, gegebenenfalls zwischen Maximal- und Minimalwert, sie heißt auch Spitze-Tal-Wert $\hat{\bar{u}}$.

Der Wechselanteil $u_{\sim}$ einer Mischspannung ergibt sich als Differenz aus ihrem Augenblickswert u und dem Gleichanteil U_- :

$$u_{\sim} = u - U_- \quad (10)$$

Der Wechselanteil einer periodischen Mischgröße kann, wie jede Wechselgröße, zerlegt werden in eine Grundschwingung (1. Harmonische) mit der Grundfrequenz f und die Oberschwingungen (höheren Harmonischen) mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz (siehe auch DIN 1311 Teil 1/02.74, Abschnitte 3.2 und 3.3). Ist z.B. I_1 der Effektivwert der Grundschwingung eines Wechselstromes oder eines Wechselstromanteils und sind I_2, I_3 , usw. die Effektivwerte der Oberschwingungen mit den Frequenzen $2f, 3f$ usw., so folgt aus den Gleichungen (7) und (8) für den Effektivwert des Mischstromes

$$I = \sqrt{I_-^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (11)$$

und für den Effektivwert des Wechselstromanteils

$$I_{\sim} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \sqrt{I^2 - I_-^2} \quad (12)$$

Entsprechendes gilt auch wieder für die Spannungen; ebenso können die nachstehenden Begriffe in gleicher Weise auf Mischspannungen wie auf Mischströme angewendet werden.

Die Anteile der Mischgrößen werden durch die folgenden Größenverhältnisse beschrieben:

Schwingungsgehalt, das Verhältnis Effektivwert des Wechselanteils zum Effektivwert der Mischgröße, z.B. für die Stromstärken eines Mischstromes

$$s_i = I_{\sim} / I \quad (13)$$

Welligkeit (effektive Welligkeit), das Verhältnis Effektivwert des Wechselanteils zum Betrag des Gleichwertes (siehe Anmerkungen)

$$r_i = I_{\sim} / |I_-| \quad (14)$$

Schwankungswelligkeit (Riffelfaktor), das Verhältnis Schwingungsbreite zum Betrag des Gleichwertes

$$q_i = \hat{\bar{u}} / |I_-| \quad (15)$$

Ist eine Mischgröße, z.B. eine Stromstärke $i = i_1 + i_2$ entstanden infolge Umbildung eines gegebenen Vorganges i_1 durch Überlagerung eines weiteren Vorganges i_2 , so heißt Überlagerungsfaktor das Verhältnis Scheitelwert des Überlagerungsanteils zum Scheitelwert der überlagerungsfreien Größe $\hat{i}_2 / \hat{i}_1$ (Scheitelwert siehe Abschnitt 2.3).

Ist der überlagerungsfreie Vorgang ein Gleichvorgang (I_-), so ist der Überlagerungsfaktor gleich dem halben Riffelfaktor.

Der Schwingungsgehalt kann Werte annehmen zwischen 0 (reiner Gleichvorgang) und 1 (reiner Wechselvorgang), die Welligkeit und die Schwankungswelligkeit zwischen 0 und ∞ (bei den gleichen Fällen) (Grenzwerte jeweils eingeschlossen).

1) Formelzeichen nach DIN 5483 Teil 2, IEC 27-1:1992 auch U_0 bzw. I_0 anstelle von U_- bzw. I_-

2) Formelzeichen nach DIN 5483 Teil 2 auch u_a bzw. i_a

3) In DIN IEC 50 Teil 131, 131-03-12 Formelzeichen r_u, r_i

2.3 Benennungen und Festlegungen bei Wechselgrößen

Bei der folgenden Behandlung reiner Wechselgrößen wird bei den Formelzeichen die Index-Kennzeichnung für „Wechselanteil“ $u_{\sim}$ bzw. $i_{\sim}$ fortgelassen.

Bei Wechselgrößen heißt der größte Betrag der Augenblickswerte

Scheitelwert: $\hat{u}$ Scheitelwert der Spannung, $\hat{i}$ Scheitelwert der Stromstärke;

bei sinusförmigem zeitlichem Verlauf (Sinusgröße) heißt der Scheitelwert Amplitude $\hat{u}$, $\hat{i}$ (siehe Abschnitt 2.4).

Beim Zerlegen in die Grundschwingung und die Oberschwingungen gilt z. B. für den Effektivwert der Wechselstromstärke entsprechend Gleichung (12)

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (16)$$

Die Oberschwingungsstromstärke oder Verzerrungsstromstärke i_d ist die Differenz der Augenblickswerte von Gesamtstrom und Grundschwingungsstrom

$$i_d = i - i_1 \quad (17)$$

bzw. bei Effektivwerten

$$I_d = \sqrt{I^2 - I_1^2} \quad (18)$$

Für Spannungen gilt Entsprechendes. 4)

Die Unterschiede zum reinen Sinusvorgang werden durch die folgenden Größenverhältnisse beschrieben, die in gleicher Weise auf Spannungen und Stromstärken angewendet werden:

Scheitelfaktor, das Verhältnis Scheitelwert zum Effektivwert der Wechselgröße $\hat{u}/U$ bzw. $\hat{i}/I$;

Grundschwingsgehalt, das Verhältnis Effektivwert der Grundschwingung zum Effektivwert der Wechselgröße

$$g_u = U_1/U \text{ bzw. } g_i = I_1/I; \quad (19), (20)$$

Oberschwingungsgehalt, Klirrfaktor oder auch Verzerrungsgehalt, das Verhältnis Effektivwert der Verzerrungsgröße zum Effektivwert der Wechselgröße

$$d_u = \frac{U_d}{U} = \sqrt{1 - g_u^2} = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U} \quad (21)$$

bzw.

$$d_i = \frac{I_d}{I} = \sqrt{1 - g_i^2} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I} \quad (22)$$

(siehe Anmerkungen).

Der Wert des Scheitelfaktors ist immer größer oder gleich eins; Grundschwingsgehalt und Oberschwingungsgehalt liegen zwischen 0 und 1 (gegenläufig) (Grenzwerte eingeschlossen).

Als Maß für den Anteil an Oberschwingungen wird auch die relative Abweichung vom Sinusverlauf benutzt. Dieser Wert ist gleich dem Maximalwert des Betrages der Verzerrungsspannung oder -stromstärke geteilt durch die Amplitude der Grundschwingung $|\hat{u}_d|/\hat{u}_1$ bzw. $|\hat{i}_d|/\hat{i}_1$.

Der Formfaktor einer Wechselgröße ist das Verhältnis ihres Effektivwertes zum Gleichrichtwert

$$F_u = \frac{U}{|u|} \text{ bzw. } F_i = \frac{I}{|i|} \quad (23), (24)$$

Der Wert des Formfaktors ist immer größer oder gleich eins (siehe Anmerkungen).

2.4 Benennungen und Festlegungen bei Sinusgrößen

Die Augenblickswerte von Spannung u und Stromstärke i bei zeitlich sinusförmigem Verlauf (kurz Sinusgröße, Sinusspannung, Sinusstrom) werden dargestellt durch

$$u = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_u) \quad (25)$$

und

$$i = \hat{i} \cos(\omega t + \varphi_i) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_i) \quad (26)$$

mit den Kennwerten der Sinusgrößen, das sind

Amplitude $\hat{u}$, $\hat{i}$ anstelle des Scheitelwertes nach Abschnitt 2.3,

Effektivwert U , I ,

Phasenwinkel $\varphi(t)$ als das linear zeitabhängige Argument der cos-Funktion, z. B. bei der Spannung

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_u, \quad (27)$$

$$\text{Kreisfrequenz } \omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (28)$$

und die

Nullphasenwinkel der Spannung φ_u bzw. der Stromstärke φ_i .

Siehe Anmerkungen.

Der Phasenverschiebungswinkel φ der Spannung u gegenüber der Stromstärke i — deutlicher φ_{ui} — ergibt sich als Differenz der beiden Nullphasenwinkel

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i. \quad (29)$$

Wenn dieser Winkel einen positiven Wert hat, $0 < \varphi \leq \pi$, so sagt man, die Spannung an dem betrachteten Stromkreisabschnitt eile dem Strom (Bezugsgröße) um diesen Winkel vor (oder auch: Der Strom eile der Spannung nach). Die entgegengesetzte Aussage: Nacheilung der Spannung gegenüber dem Strom (Bezugsgröße) gilt für den Fall negativer Werte des Phasenverschiebungswinkels, $-\pi \leq \varphi < 0$ (auch Voreilung Strom gegen Spannung). Siehe Bild 2.

Wenn die Bezugssinne geeignet gewählt werden und die Richtung des mittleren Energieflusses sich nicht umkehrt, ergeben sich die Winkelwerte nur im Bereich $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$.

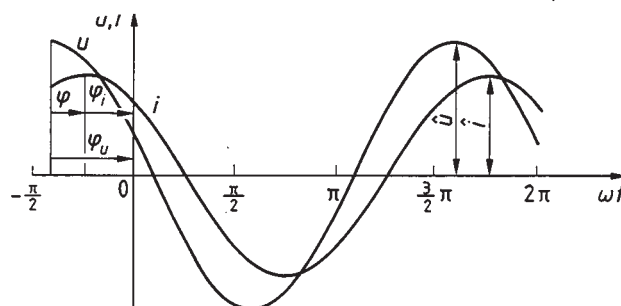


Bild 2

Bei Sinusgrößen ist
(Beispiel Spannung)

der Scheitelfaktor $\hat{u}/U = \sqrt{2} \approx 1,4$,

der Schwingsgehalt $s = 1$,

der Grundschwingsgehalt $g = 1$,

der Oberschwingungsgehalt $d = 0$,

der Gleichrichtwert $\overline{|u|} = \frac{2}{\pi} \hat{u} \approx 0,64 \hat{u}$,

$$\overline{|u|} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \approx 0,90 U,$$

der Formfaktor $F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,1$.

4) Wenn mit der Bedeutung des Index d für Gleichstrom bzw. Gleichspannung Verwechslungen möglich sind, kann ausgewichen werden auf den ausgeschriebenen Index dist oder die Indizes k oder h (siehe DIN 1304 Teil 1, DIN IEC 50 Teil 131 und IEC 27-1 : 1992).

5) In DIN IEC 50 Teil 131, 131-03-03 Formelzeichen f_u , f_i ; auch h_{1u} , h_{1i}

6) In IEC 27-2:1972 Formelzeichen auch k_u , k_i , in DIN IEC 50 Teil 131, 131-03-04 Formelzeichen h_u , h_i .

2.5 Sinusgrößen in komplexer Darstellung

Die folgenden Aussagen werden beispielhaft nur für eine Sinusspannung gemacht; die Benennungen und die Gleichungen gelten entsprechend auch für die Stromstärke (siehe DIN 5483 Teil 3, dort auch noch andere Schreibweisen).

Der komplexe Augenblickswert $\underline{u}$ der Spannung wird dargestellt durch

$$\begin{aligned}\underline{u} &= \hat{u} (\cos(\omega t + \varphi_u) + j \sin(\omega t + \varphi_u)) \\ &= \hat{u} e^{j(\omega t + \varphi_u)} = \sqrt{2} U e^{j(\omega t + \varphi_u)}\end{aligned}\quad (30)$$

mit den in Abschnitt 2.4 angegebenen Kennwerten oder mit der komplexen Amplitude $\hat{u}$ bzw. dem komplexen Effektivwert $\underline{U}$ als

$$\underline{u} = \hat{u} e^{j\varphi_u} e^{j\omega t} = \hat{u} e^{j\omega t} = \sqrt{2} U e^{j\omega t} \quad (31)$$

mit $\hat{u} = \hat{u} e^{j\varphi_u}$ und $\underline{U} = U e^{j\varphi_u}$. (32), (33)

Diese komplexen Größen werden als Drehzeiger entsprechend Gleichung (31) oder als ruhende Zeiger entsprechend Gleichung (32) und (33) in der komplexen Ebene dargestellt (siehe DIN 5483 Teil 3). Dabei werden vorzugsweise die komplexen Effektivwerte benutzt, also Zeiger mit einer dem Effektivwert entsprechenden Länge und mit den Nullphasenwinkeln wie in Bild 3 (siehe Anmerkungen).

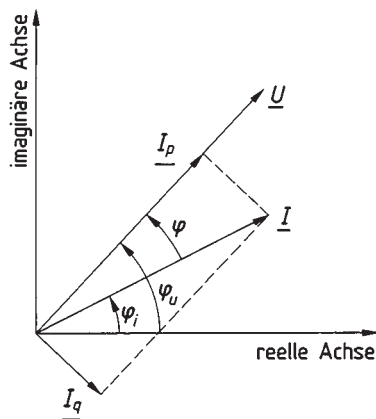


Bild 3

Die Rückführung vom komplexen Augenblickswert $\underline{u}$ auf den physikalischen Augenblickswert u ergibt sich über die Beziehungen

$$\begin{aligned}u &= \operatorname{Re} \underline{u} \\ &= \frac{1}{2} (\underline{u} + \underline{u}^*) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u),\end{aligned}\quad (34)$$

wobei $\underline{u}^*$ der konjugiert komplexe Augenblickswert der Spannung $\underline{u}$ ist.

3 Elektrische Leistung

3.1 Leistungsbegriff, Wirkleistung, Scheinleistung

Ist u der Augenblickswert der Spannung an einem beliebigen Abschnitt eines Stromkreises (Zweipol, Klemmenpaar) und i der Augenblickswert der Stromstärke in diesem Abschnitt, so ergibt sich der Augenblickswert der Leistung in diesem Abschnitt allgemein als Produkt der beiden Werte

$$P(t) = u \cdot i. \quad (35)$$

Dieses Produkt nimmt während einer jeden Periode im allgemeinen sowohl positive als auch negative Werte an, siehe Bild 4. Die positiven Werte, z. B. zwischen t_2 und t_3 im Bild 4, zeigen einen Energiefluß in der einen Richtung an;

negative Werte, z. B. zwischen t_1 und t_2 , zeigen einen Energiefluß in entgegengesetzter Richtung an. Eine dieser beiden Richtungen, z. B. die mit dem positiven Vorzeichen von $(u \cdot i)$, entspricht der Bezugsrichtung des Energieflusses in dem gewählten Bezugssystem; die entgegengesetzte Richtung bedeutet dann einen Energierücklauf.

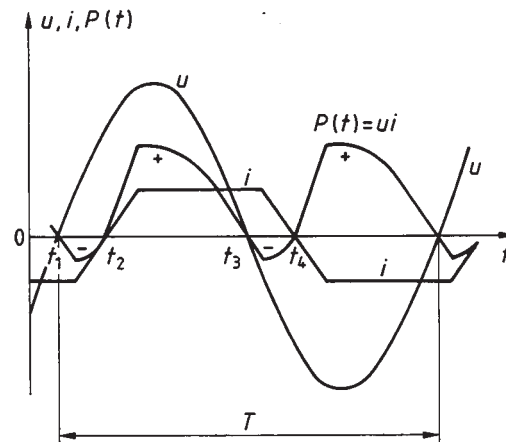


Bild 4

Für die Leistungsbestimmung wird je nach den gegebenen Verhältnissen, z. B. je nach überwiegender Energieflußrichtung, zweckmäßigerweise eine entsprechende Verbraucher- oder Erzeuger-Bepfehlung (siehe DIN 5489) gewählt mit jeweiligen Bezugssinnen für die Augenblickswerte von Spannung u , Stromstärke i und Leistung $P(t)$ nach den Bildern 5 und 6, welche gegebenenfalls auch für die Zeiger $\underline{u}$, $\underline{i}$ und den Leistungs-Mittelwert P gelten.⁸⁾

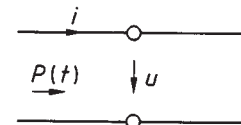


Bild 5

a) Erzeuger-Bepfehlung

b) Verbraucher-Bepfehlung

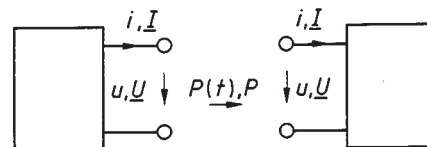


Bild 6

Die mittlere Leistung P oder Wirkleistung, auch kurz Leistung, wenn kein Mißverständnis möglich ist, ist der arithmetische Mittelwert der Augenblicksleistung, gebildet über eine Periodendauer, also

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (36)$$

Sie ergibt sich z. B. auch aus der Summe der positiven und negativen Werte der Flächen nach Bild 4.

Die Wirkleistung P sowie die Effektivwerte von Spannung und Stromstärke, U bzw. I , sind direkt meßbar. Das Produkt dieser Effektivwerte wird Scheinleistung S genannt, sie ist immer größer oder gleich dem Betrag der Wirkleistung:

$$S = UI \geq |P|. \quad (37)$$

⁷⁾ In DIN IEC 50 Teil 131, 131-03-15 Formelzeichen p

⁸⁾ Konventionen nach IEC 375 : 1972, Abschnitt 14

Das Verhältnis des Betrages der Wirkleistung zur Scheinleistung ist der Leistungsfaktor

$$\lambda = |P|/S \leq 1. \quad (38)$$

$S = |P|$ und $\lambda = 1$ gelten dann und nur dann, wenn Spannung u und Stromstärke i stets proportional zueinander sind; dann wird nur Wirkleistung aufgenommen (bzw. abgegeben).

3.2 Leistungsbestimmung im allgemeinen Fall, Gesamtblindleistung

Im allgemeinen Fall, wenn die Augenblickswerte von Spannung und Stromstärke nicht proportional sind, wird in folgender Weise verfahren:

Eine der beiden Größen des Leistungsproduktes wird als Bezugsgröße gewählt, in Versorgungsnetzen z. B. die Spannung u , weil diese als eingetragter Wert wenig von der Stromstärke abhängt und fast immer nahezu sinusförmig verläuft, der Strom dagegen im allgemeinen lastabhängig verzerrt ist. Die andere Größe, im Beispiel die Stromstärke i , wird dann so in zwei orthogonale Komponenten aufgespalten, daß die eine proportional zur Bezugsgröße ist, sie heißt Wirkkomponente z. B. Wirkstromstärke i_p (Effektivwert I_p). Die Differenz zum Gesamtwert ist dann die andere, die Blindkomponente z. B. die Blindstromstärke i_q (Effektivwert I_q) (siehe Anmerkungen).

Die Komponenten der Stromstärke bestimmen sich wegen der geforderten Proportionalität und des quadratischen Zusammenhangs der Effektivwerte bei Orthogonalität wie folgt:

$$i_p \sim u \quad \text{oder} \quad (39)$$

$$i_p = u \cdot G \quad \text{bzw.} \quad I_p = U \cdot |G| \quad \text{und} \quad (40), (41)$$

$$i_q = i - i_p \quad \text{bzw.} \quad I_q = \sqrt{I^2 - I_p^2} \quad (42), (43)$$

G ist der Proportionalitätskoeffizient mit der Dimension eines Leitwertes; er kann einen positiven oder negativen Wert entsprechend dem Vorzeichen der Wirkleistung P haben.

Die Aufspaltung in die Komponenten Wirk- und Blindstromstärke, i_p und i_q , entspricht einer Aufteilung des Stromkreisabschnittes in eine gedachte Parallelschaltung von einem „Wirkteil“ und einem „Blindteil“ an der gemeinsamen Spannung u , siehe Bild 7a). Im allgemeinen Fall besteht zwischen den Augenblickswerten der Spannung u und der Blindstromkomponente i_q kein einfacher, rechnerischer Zusammenhang; deshalb steht in den Bildern 7a) und b) am Blindteil kein Formelzeichen.

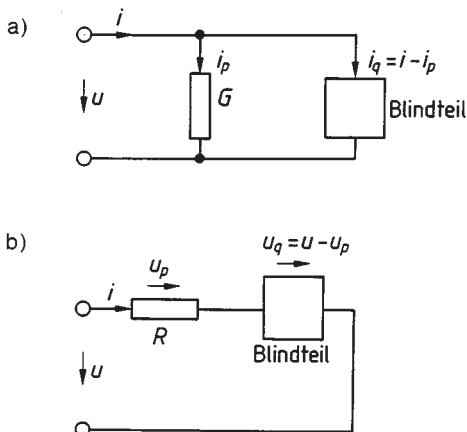


Bild 7

Nur in dem Wirkteil ergibt das Produkt aus der Bezugsgröße Spannung u mit der proportionalen Wirkstromstärke i_p einen von Null verschiedenen arithmetischen Mittelwert, also die Wirkleistung P . In dem anderen Zweig ist das Mittel aus dem Produkt mit der orthogonalen Blindstromstärke i_q immer Null, er liefert keinen Beitrag zur Wirkleistung. Diese wird nach Gleichung (36) und (40)

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T u (i_p + i_q) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i_p dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T u^2 G dt = U^2 G. \end{aligned} \quad (44)$$

Danach läßt sich auch der Leitwert G , z. B. aus Meßwerten, bestimmen:

$$G = P/U^2. \quad (45)$$

Der Betrag der Wirkleistung ergibt sich auch aus

$$|P| = U I_p. \quad (46)$$

Die gesamte Scheinleistung des Stromkreisabschnittes ist wegen der Quadratsumme der Komponenteneffektivwerte

$$S = U I = U \sqrt{I_p^2 + I_q^2} = \sqrt{U^2 I_p^2 + U^2 I_q^2}, \quad (47)$$

$$S^2 = P^2 + Q_{\text{tot}}^2 \quad \text{mit} \quad (48)$$

$$Q_{\text{tot}} = \sqrt{S^2 - P^2} = S \sqrt{1 - \lambda^2} = U I_q. \quad (49)$$

Die Stromstärke-Komponenten können auch angegeben werden mit

$$I_p = I \lambda \quad \text{und} \quad I_q = I \sqrt{1 - \lambda^2}. \quad (50), (51)$$

Die Größe Q_{tot} heißt Gesamtblindleistung, die nach Gleichung (49) nur positiv definiert ist; sie kann so, z. B. aus Meßwerten, bestimmt werden. Der Ausdruck $U I_q$ ist mit $U I_p$ für den Betrag der Wirkleistung nach Gleichung (46) formal vergleichbar. Die Definition mittels der Quadrate der Leistungsgrößen nach Gleichung (49) ist allgemein gültig. Sie gilt auch bei der dualen Aufspaltung in Spannungskomponenten bezüglich der Stromstärke („Reihenschaltung“, siehe Bild 7b)) in gleicher Weise mit

$$Q_{\text{tot}} = I U_q \quad (52)$$

(siehe Anmerkungen).

Die Effektivwerte von Spannung, Stromstärke und von deren Komponenten sowie die damit gerechnete Scheinleistung sind sämtlich nur mit positivem Vorzeichen definiert. Demgegenüber können der Proportionalitätskoeffizient G und die Wirkleistung P in den Gleichungen (40), (44) und (45) positive oder negative Werte annehmen, weil die Richtung des mittleren Energieflusses sich umkehren kann.

Das Aufspalten der Größen in Wirk- und Blindkomponenten und die quadratischen Zusammenhänge kann man für die Effektivwerte von Spannung und Stromstärke sowie für die Leistungsgrößen durch rechtwinklige Dreiecke veranschaulichen, deren Katheten den Wirk- und Blindkomponenten entsprechen. Beispiele nach den Gleichungen (43) und (48) siehe Bild 8a), b) und für den dualen Fall Bild 8c).

⁹⁾ Formelzeichen auch i_w, i_b, I_w, I_b statt i_p, i_q usw.; für u, U entsprechend (siehe DIN 1304 Teil 1)

¹⁰⁾ Ausweich-Formelzeichen für P : P_p, P_w ; für S : S_s ; für Q : Q_q, Q_b (siehe DIN 1304 Teil 1 und IEC 27-1:1992)