

Calmet C300 – Der Kalibrator für nicht sinusförmige Signalverläufe - Oberwellen

Erweiterte Spezifikationen

Calmet
Calibration

Anwendungsbericht

Was bedeutet Leistungs-/Energiekalibrierung bei nicht sinusförmigen Strömen/Spannungen

Elektrische und elektronische Messinstrumente sollten unter Bedingungen kalibriert werden, die den tatsächlichen Bedingungen am Einsatzort möglichst ähnlich sind – dies gilt insbesondere für elektrische Leistungsmessgeräte (EEM-Electronic Energy Meter). Ein wichtiger Bestandteil der Überprüfung der Genauigkeit von EEMs ist die Untersuchung des Einflusses von harmonischen Verzerrungen bei Strom und/oder Spannung.

Die EN 50470 fordert die Überprüfung der EEM mit nichtsinusförmigen Signalen, z.B. soll die Amplitude der 5. Harmonischen der Spannung 10% der Grundwelle und die Amplitude der 5. Harmonischen des Stromes 40% der Grundwelle betragen. Konfiguriert werden sollte der Test mit dreiphasiger symmetrischer Last, 50% des Nennstromes, Leistungsfaktor der Harmonischen $\cos\varphi_5=1$ sowie Grundwelle und Harmonische in Phase bei positivem Nulldurchgang.

Der C300 – Die Lösung mit der besten Genauigkeit für dreiphasige Leistungskalibrierung bei sinus- und nicht sinusförmigen Strömen/Spannungen in einem einzigen Gehäuse.

Der C300 erzeugt dreiphasig programmierbare Ströme und Spannungen zur Überprüfung von Netzqualitätsanalysatoren, Wattmetern, Schutzrelais, Stromwandlern und ähnlichen Ausrüstungen.

Er hat je drei unabhängige Strom- und Spannungskanäle, wobei Ströme bis 120A oder Spannungen bis 560V mit typischer Genauigkeit von 0,02% (200ppm) für sinusförmige Ausgangssignale generiert werden können. Ein zusätzlicher Stromverstärker ist nicht notwendig, die Last kann symmetrisch oder unsymmetrisch sein. Ebenso ist einphasiger Betrieb möglich, hier beträgt der maximale Quellenstrom 360A.

Der C300 kann für Strom und Spannung gleichzeitig Oberwellen verschiedener Ordnung bei unabhängiger Überlagerung der einzelnen Harmonischen bezüglich ihrer Phasenlage untereinander und zur Grundwelle erzeugen. Die Amplitude ist wählbar zwischen 0...100% und die Phasenverschiebung zwischen 0...360° bezogen auf die Grundwelle. **Dieser Anwendungsbericht informiert über die Berechnung der Messgenauigkeit von Strom, Spannung, Schein-, Wirk- und Blindleistung zur Bestimmung der Spezifikationen des C300 für sinus- und nicht sinusförmige (oberwellenhaltige) Ströme und Spannungen.**



Der C300 bietet die notwendige Genauigkeit über einen breiten Strom- und Spannungsbereich zur Überprüfung von Messgeräten für sinus- und nicht sinusförmige Größen

C300 Spezifikationen für sinusförmige Spannungen, Ströme und Leistungen

Parameter	Bereich	Einstellbereich	Auflösung	Genauigkeit ¹⁾		Maximale Bürde
				Klasse 0.02	Klasse 0.05	
Spannung U	70V	0.5...70V	0.0001V	±0.02% vom Einstellwert ±0.005% vom Bereich	±0.04% vom Einstellwert ±0.01% vom Bereich	560mA@70V
	140V	1...140V	0.001V			280mA@140V
	280V	2...280V	0.001V			140mA@280V
	560V	5...560V	0.001V			70mA@560V
Strom I	0,5A	0.005...0.5A	0.000001A	±0.02% vom Einstellwert ±0.005% vom Bereich	±0.04% vom Einstellwert ±0.01% vom Bereich	17V@0,5A
	6A	0.05...6A	0.00001A			8.5V@6A
	20A	0.2...20A	0.0001A			3.3V@20A
	120A	1...120A	0.001A			0.95V@60A 0.70V@120A
Frequenz f		40...99.999Hz	0.001Hz	±0.002Hz	±0.002Hz	
		100...500Hz	0.001Hz	±0.010Hz	±0.010Hz	
Phasenversch. φ		0...±360°	0.01°	±0.05° ²⁾	±0.10° ²⁾	
Wirkleistung P		0...3x67200W	0.00001-1W	±0.02% ^{2) 3)}	±0.05% ^{2) 3)}	
Blindleistung Q		0...3x67200var	0.00001-1var	±0.02% ^{2) 3)}	±0.05% ^{2) 3)}	
Scheinleistung S		0...3x67200VA	0.00001-1VA	±0.02% ²⁾	±0.05% ²⁾	
Energie	berechnet aus Einstellungen für Leistung und Zeit			±0.02% ^{2) 3)}	±0.05% ^{2) 3)}	

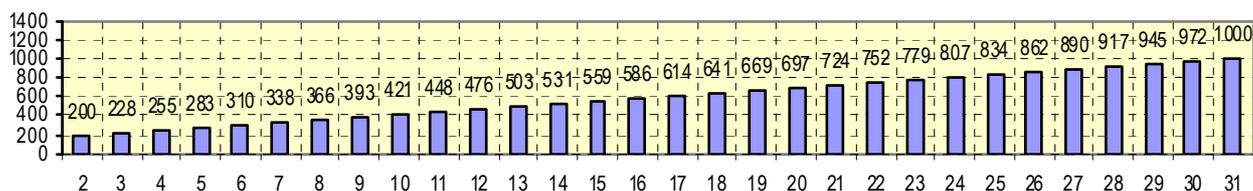
- ¹⁾ Absolute erweiterte Meßunsicherheit mit 95% Sicherheitsschwelle beinhaltet Meßunsicherheit der Referenz, Stabilität über 12 Monate, Einflußgrößen (Umgebungstemperatur +20...+26°C, Luftfeuchtigkeit, Schwankungsbereich der Stromversorgung, Frequenzbereich 45...65 Hz und Nichtlinearitäten). Für Frequenzen über 65 Hz steigt die Meßunsicherheit linear bis zum doppelten Wert bei 500 Hz.
- ²⁾ Ab 10% des Strombereichs und 30% des Spannungsbereichs, Frequenz 45-65Hz.
- ³⁾ Messunsicherheit der Leistung P(Q) bei cosφ(sinφ)=1, bei cosφ(sinφ)≠1 linearer Anstieg auf typisch 0.15% (Klasse 0.02) oder 0.30% (Klasse 0.05) bei cosφ(sinφ)=0.5. Bei Strom und Spannung unter 10% des Bereichs Meßunsicherheit 0.005% des Bereichs.

Spezifikation der Oberwellen

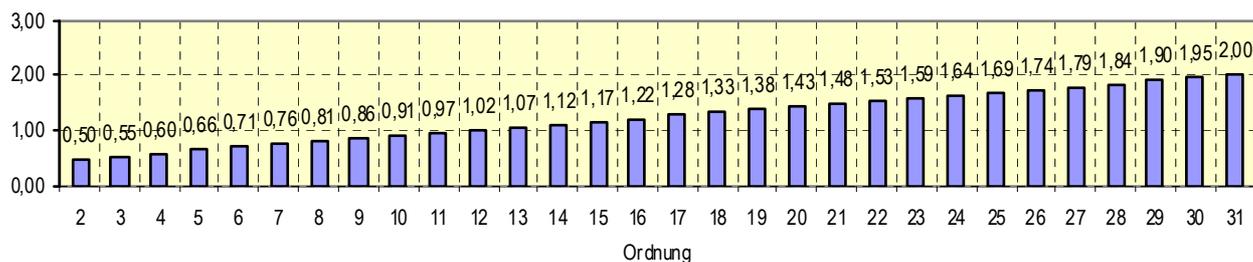
Parameter	Amplitude Einstellbereich	Phase Einstellbereich	Frequenz Einstellbereich	Genauigkeit ⁴⁾		Einstellmöglichkeiten
				Amplitude	Phase	
Oberwellen	0...100% der Grundwelle	0...±360°	Bis zur 31. Oberwelle oder max. 3200Hz	±0.02% des Einstellwertes	±0.5°	Unabhängig Überlagerung (Phasenlage) der harmonischen Komponenten bei Strom und Spannung

⁴⁾ 0.02% des Einstellwertes und 0.5° für die 2. Oberwelle und linearer Anstieg auf 0.10% des Einstellwertes und 2° bis zur 31.

Genauigkeit der Amplitude



Phasengenauigkeit [grad]



Theorie

Für die Berechnung der Genauigkeit bei nicht sinusförmigen Spannungen gelten folgende Gleichungen:

$$V_{RMS}^2 = \sum_1^N V_n^2$$

$$V_n = k_n \cdot V_1 \quad \text{Anm. 1)}$$

$$V_1 = \frac{V_{RMS}}{\sqrt{1 + k_2^2 + \dots + k_n^2}}$$

$$(V_{RMS} + u(V_{RMS}))^2 = \sum_1^N (V_n + u(V_n))^2$$

$$u(V_{RMS}) = \sum_1^N c_n \cdot u(V_n) = \sum_1^N \frac{V_n}{V_{RMS}} \cdot u(V_n)$$

Dabei sind:

- V_{RMS} – Effektivwert der Spannung (RMS),
- V_n – Effektivwert der n-ten Harmonischen,
- k_n – Koeffizient der harmonischen Verzerrungen,
- n – Ordnungszahl,
- V_1 – Effektivwert der Grundwelle,
- $u(V_n)$ – Messunsicherheit der Harmonischen,
- c_n – Sensitivitätskoeffizient,
- $u(V_{RMS})$ – Gesamtmessunsicherheit der Spannung unter Berücksichtigung des Oberwellengehalts

Anm. 1) Gemäß EN 50160:2007 soll der Koeffizient (Klirrfaktor) das Verhältnis Oberwelle V_n / Grundwelle V_1 abbilden und **nicht Oberwelle/Gesamteffektivwert V_{RMS}**

Beispiel für 110V/60Hz

Spannung 110V RMS mit 60Hz überlagert mit 30% 3. Oberwelle und 10% 25. Oberwelle generiert im 140V Bereich.

Effektivwert der Grundwelle:

$$V_1 = 110 / \sqrt{1 + 0.3^2 + 0.1^2} = 104.8809V$$

Messunsicherheit der Grundwelle:

$$u(V_1) = 200\text{ppm des Wertes} + 50\text{ppm des Bereichs} = 0.000200 \times 104.8809 + 0.000050 \times 140 = 0.027976V$$

3. Oberwelle:

$$V_3 = 30\% \times V_1 = 0.3 \times 104.8809 = 31.4643V$$

Messunsicherheit der 3. Oberwelle:

$$u(V_3) = 228\text{ppm} \times V_1 = 0.000228 \times 104.8809 = 0.023913V$$

25. Oberwelle:

$$V_{25} = 10\% \times V_1 = 0.1 \times 104.8809 = 10.48809V$$

Messunsicherheit der 25. Oberwelle:

$$u(V_{25}) = 834\text{ppm} \times V_1 = 0.000834 \times 104.8809 = 0.087471V$$

Gesamtmessunsicherheit:

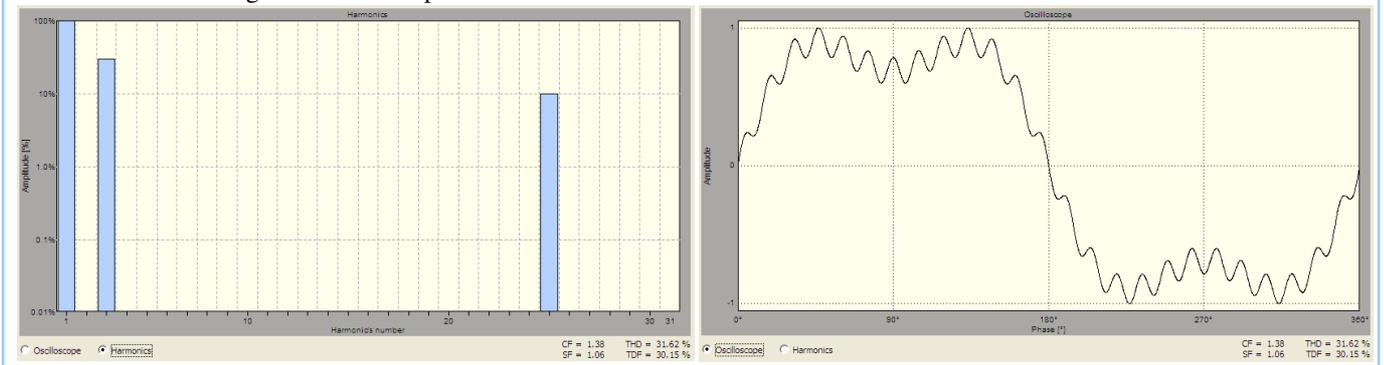
$$u(V_{RMS}) = (104.8809/110) \times 0.027976 + (31.4643/110) \times 0.023913 + (10.48809/110) \times 0.087471 = 0.026674 + 0.006840 + 0.008340 = 0.041854V$$

Oder

$$u(V_{RMS})/V_{RMS} = 0.041854/110 = 0.000380 \text{ (oder 380ppm)}$$

Die Genauigkeit der Ausgangsspannung beträgt 110V ±0.041854V

Grafische Darstellung für dieses Beispiel



Theorie

Für die Genauigkeitsberechnung gelten folgende Gleichungen:

$$S = \sqrt{\sum_1^N V_n^2 \cdot \sum_1^N I_n^2}$$

$$\frac{u(S)}{S} = \sqrt{\left[\frac{u(V_{RMS})}{V_{RMS}} \right]^2 + \left[\frac{u(I_{RMS})}{I_{RMS}} \right]^2}$$

$$\frac{u(V_{RMS})}{V_{RMS}} = \sum_1^N \frac{V_n}{V_{RMS}} \cdot \frac{u(V_n)}{V_{RMS}}$$

$$\frac{u(I_{RMS})}{I_{RMS}} = \sum_1^N \frac{I_n}{I_{RMS}} \cdot \frac{u(I_n)}{I_{RMS}}$$

Dabei sind:

- V_{RMS} – Effektivwert der Spannung,
- V_n, I_n – Effektivwert der n-ten Oberwelle,
- n – Ordnungszahl,
- $u(V_{RMS})/V_{RMS}$ Messunsicherheit Spannung,
- $u(I_{RMS})/I_{RMS}$ – Messunsicherheit Strom,
- $u(V_n)/V_n$ – Messunsicherheit Spannungsoberwelle,
- $u(I_n)/I_n$ – Messunsicherheit Stromoberwelle,
- $u(S)/S$ – Messunsicherheit Scheinleistung

Beispiel 110V/60Hz

Spannung 110V RMS/ 60Hz überlagert mit 14% 3. Oberwelle, generiert im 140V-Bereich, Strom 7A RMS/ 60Hz überlagert mit 10% 3. und 4., 29% 5. Oberwelle, generiert im 20A-Bereich

Effektivwert der Grundwelle (Spannung):

$$V_1 = 110 / \sqrt{1 + 0.14^2} = 108.9376V$$

Effektivwert der 3. Oberwelle:

$$V_3 = 14\% \times V_1 = 0.14 \times 108.9376 = 15.5126V$$

Messunsicherheit der Spannung: NOTE 2)

$$\begin{aligned} u(V_{RMS})/V_{RMS} &= \\ &= (V_1/V_{RMS}) \times \{ [u(V_1)]/V_{RMS} \} + (V_3/V_{RMS}) \times \{ [u(V_3)]/V_{RMS} \} \\ &= (108.9376/110) \times 0.000141 + \\ &+ (15.5126/110) \times 0.000228 = 0.000172 \text{ (or 172ppm)} \end{aligned}$$

NOTE 2) Die Strom- und Spannungsausgänge des C300 sind im Scheinleistungsmodus zusätzlich präzise justiert, um eine Genauigkeit von 200 ppm für sinusförmige Größen im Spannungsbereich von 21V (30% von 70V) bis 560V und im Strombereich von 0.05A (10% von 0.5A) bis 120A zu erreichen.

$$\begin{aligned} u(S_1)/S_1 &= \sqrt{\{ [u(V_1)]/V_1 \}^2 + \{ [u(I_1)]/I_1 \}^2} \\ 200\text{ppm} &= \sqrt{(141\text{ppm})^2 + (141\text{ppm})^2} \end{aligned}$$

Effektivwert der Grundwelle (Strom):

$$I_1 = 7 / \sqrt{1 + 0.1^2 + 0.0429^2} = 6.91809A$$

3. Oberwelle:

$$I_3 = 10\% \times I_1 = 0.1 \times 6.91809 = 0.691809A$$

5. Oberwelle

$$I_5 = 4.29\% \times I_1 = 0.0429 \times 6.91809 = 0.296786A$$

Messunsicherheit des Stromes: NOTE 2)

$$\begin{aligned} u(I_{RMS})/I_{RMS} &= \\ &= (I_1/I_{RMS}) \times \{ [u(I_1)]/I_{RMS} \} + \\ &+ (I_3/I_{RMS}) \times \{ [u(I_3)]/I_{RMS} \} + (I_5/I_{RMS}) \times \{ [u(I_5)]/I_{RMS} \} \\ &= (6.91809/7) \times 0.000141 + (0.691809/7) \times 0.000228 + \\ &+ (0.296786/7) \times 0.000283 = 0.000174 \text{ (or 174ppm)} \end{aligned}$$

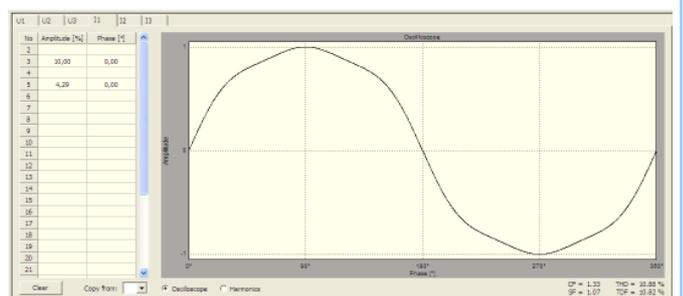
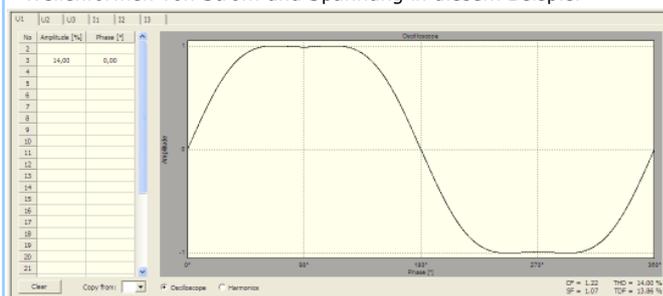
Messunsicherheit Scheinleistung:

$$u(S)/S = \sqrt{0.000172^2 + 0.000174^2} = 0.000244 \text{ (or 244ppm)}$$

$$u(S) = 0.000244 \times 770 = 0.1879VA$$

Die Messgenauigkeit der Scheinleistung beträgt 770VA ±0.1879VA

Wellenformen von Strom und Spannung in diesem Beispiel



Theorie

Für die Genauigkeitsberechnung gelten folgende Gleichungen:

$$P = \sum_1^N P_n = \sum_1^N V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$$

$$\frac{u(P_n)}{P_n} = \sqrt{\left[\frac{u(V_n)}{V_n}\right]^2 + \left[\frac{u(I_n)}{I_n}\right]^2 + [u(\varphi_n)]^2}$$

$$u(\varphi_n) = \frac{\cos(\varphi + u(\varphi)) - \cos \varphi}{\cos \varphi}$$

$$u(P) = \sum_1^N \frac{P_n}{P} \cdot u(P_n)$$

Dabei sind:

P – Wirkleistung,

P_n –Wirkleistung der n-ten harmonischen Komponente,

V_n – Effektivwert der Spannungs oberwelle,

I_n – Effektivwert der Strom oberwelle,

φ_n – Phasenwinkel der harmonischen Komponente,

n – Ordnungszahl,

$u(V_n)/V_n$ – Messunsicherheit der Spannungs oberwelle,

$u(I_n)/I_n$ – Messunsicherheit der Strom oberwelle,

$u(\varphi_n)$ – Messunsicherheit des Leistungsfaktors,

$u(P_n)/P_n$ – Messunsicherheit der harmonischen Komponente,

$u(P)$ – Messunsicherheit der Wirkleistung.

Beispiel Wirkleistung 110V/60Hz

Spannung 110V RMS / 60Hz überlagert mit 14% 3. Oberwelle, Phasenwinkel 0° zur Grundwelle, generiert im 140V-Bereich. Strom 7A RMS / 60Hz, überlagert mit 10% 3.Oberwelle, generiert im 20A-Bereich. Phasenverschiebung zwischen den Grundwellen von Spannung und Strom +12°.

Die 3. Oberwelle des Stromes ist um +25° gegen die Stromgrundwelle und somit um +61° (=25°+3x12°) gegen die Spannungsgrundwelle verschoben.

Spannung, Strom, Leistung der Grundwelle:

$$V_1 = 110 / \sqrt{1 + 0.14^2} = 108.9376V$$

$$I_1 = 7 / \sqrt{1 + 0.1^2 + 0.0429^2} = 6.91809A$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 =$$

$$= 108.9376 \times 6.91809 \times 0.978148 = 737.172W$$

Messunsicherheit von Spannung, Strom,

Leistungsfaktor und Leistung der Grundwelle: ^{Anm. 3)}

$$u(V_1)/V_1 = 141ppm$$

$$u(I_1)/I_1 = 141ppm$$

$$u(\varphi_1) = [\cos(12 + 0.05) - \cos(12)] / \cos(12) = 186ppm$$

$$u(P_1)/P_1 = \sqrt{141^2 + 141^2 + 186^2} = 273ppm$$

$$u(P_1) = 0.000273 \times 737.1727 = 0.201248W$$

Anm. 3) Die Strom- und Spannungsausgänge des C300 sind im Wirkleistungsmodus zusätzlich präzise justiert, um eine Genauigkeit von 200 ppm bei Leistungsfaktor=1 und für sinusförmige Größen im Spannungsbereich von 21V (30% von 70V) bis 560V und im Strombereich von 0.05A (10% von 0.5A) bis 120A zu erreichen.

$$u(P_1)/P_1 = \sqrt{\{[u(V_1)]/V_1\}^2 + \{[u(I_1)]/I_1\}^2 + \{u(\varphi_1)\}^2}$$

$$200ppm = \sqrt{(141ppm)^2 + (141ppm)^2 + (1ppm)^2}$$

Spannung, Strom, Leistung der 3. Oberwelle:

$$V_3 = 14\% \times V_1 = 0.14 \times 108.9376 = 15.5126V$$

$$I_3 = 10\% \times I_1 = 0.1 \times 6.91809 = 0.691809A$$

$$P_3 = V_3 I_3 \cos \varphi_3 =$$

$$= 15.5126 \times 0.691809 \times 0.484810 = 5.202863W$$

Messunsicherheit für Spannung, Strom,

Leistungsfaktor und Leistung der 3. Oberwelle:

$$u(V_3)/V_3 = 228ppm$$

$$u(I_3)/I_3 = 228ppm$$

$$u(\varphi_3) = [\cos(61 + 0.55) - \cos(61)] / \cos(61) = 17363ppm$$

$$u(P_3)/P_3 = \sqrt{228^2 + 228^2 + 17363^2} = 17366ppm$$

$$u(P_3) = 0.017366 \times 5.202863 = 0.09035W$$

Gesamtwirkleistung:

$$P = 737.172 + 5.2029 = 742.3749W$$

Messunsicherheit der Wirkleistung:

$$u(P) = (737.172/742.3749) \times 0.201248 +$$

$$+ (5.202863/742.3749) \times 0.09035 = 0.20047W$$

$$u(P)/P = 0.20047/742.3749 = 0.000270 \text{ (or 270ppm)}$$

Die Genauigkeit der Scheinleistung beträgt 742.3749W ±0.2005W

Theorie

Die Blindleistung bei sinusförmigen Größen berechnet sich wie folgt:

$$Q = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \sin \varphi$$

Für die Berechnung der Blindleistung bei nicht sinusförmigen Größen existieren mehrere Methoden- in der Standardversion des C300 wird die Budeanu-Methode genutzt:

$$Q = \sum_1^N Q_n = \sum_1^N V_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n ,$$

sowie die folgenden Gleichungen für die Berechnung der Genauigkeit der Blindleistung:

$$\frac{u(Q_n)}{Q_n} = \sqrt{\left[\frac{u(V_n)}{V_n}\right]^2 + \left[\frac{u(I_n)}{I_n}\right]^2} + [u(\varphi_n)]^2$$

$$u(\varphi_n) = \frac{\sin(\varphi + u(\varphi)) - \sin \varphi}{\sin \varphi}$$

$$u(Q) = \sum_1^N \frac{Q_n}{Q} \cdot u(Q_n) .$$

Dabei sind:

- Q – Blindleistung,
- Q_n – Blindleistung der n-ten harmonischen Komponente,
- V_n – Effektivwert der Spannungsoberecke,
- I_n – Effektivwert der Stromoberecke,
- φ_n – Phasenwinkel der harmonischen Komponente,
- n – Ordnungszahl,
- u(V_n)/V_n – Messunsicherheit der Spannungsoberecke,
- u(I_n)/I_n – Messunsicherheit der Stromoberecke,
- u(φ_n) – Messunsicherheit des Leistungsfaktors,
- u(Q_n)/Q_n – Messunsicherheit der Blindleistungskomponente,
- u(Q) – Messunsicherheit der Blindleistung.

Calmet.

Lösungen mit hoher Qualität zu vernünftigen Preisen

Calmet Ltd
Kukulcza 18, 65-472 Zielona Gora, Poland
Phone +48 68 324 04 56
Fax +48 68 324 04 57
E-mail: mail@calmet.com.pl
Web access: http://www.calmet.com.pl

Pub ID: C300 AN12 EN 2012-12 PK

Übersetzung der englischsprachigen Publikation von CALMET.
Ihr Vertriebspartner:



PK elektronik Poppe GmbH
Mess- und Prüftechnik
Ameisenweg 6
16727 Velten b. Berlin
Tel. 0 33 04 / 39 09 - 0
FAX 0 33 04 / 39 09 - 22
E-Mail: vertrieb@pk-elektronik.de

Beispiel Blindleistung 230V/50Hz

Spannung 230V RMS / 50Hz überlagert mit 10% 3. Oberwelle, Phase zur Grundwelle 0°, generiert im 280V-Bereich. Strom 100A RMS / 50Hz überlagert mit 40% 3. Oberwelle, generiert im 120A-Bereich. Phasenverschiebung zwischen den Grundwellen von Spannung und Strom +95°. Die 3. Oberwelle des Stromes ist um +5° gegen die Stromgrundwelle und somit um +110° (=95°+3x5°) gegen die 3. Spannungsoberecke verschoben.

Spannung, Strom, Leistung der Grundwelle:

$$V_1 = 230 / \sqrt{1 + 0.1^2} = 227.723V$$

$$I_1 = 100 / \sqrt{1 + 0.4^2} = 86.2069A$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1 = 227.723 \times 86.2069 \times 0.996195 = 19556.6var$$

Messunsicherheit von Spannung, Strom, Leistungsfaktor und Leistung der Grundwelle: Anm. 4)

$$u(V_1)/V_1 = 141ppm$$

$$u(I_1)/I_1 = 141ppm$$

$$u(\varphi_1) = [\sin(95 + 0.05) - \sin(95)] / \sin(95) = 77ppm$$

$$u(Q_1)/Q_1 = \sqrt{141^2 + 141^2 + 77^2} = 214ppm$$

$$u(Q) = 0.000214 \times 19556.6 = 4.18511var$$

Anm. 4) Die Strom- und Spannungsansätze des C300 sind im Blindleistungsmodus zusätzlich präzise justiert, um eine Genauigkeit von 200 ppm bei Leistungsfaktor=1 und für sinusförmige Größen im Spannungsbereich von 21V (30% von 70V) bis 560V und im Strombereich von 0.05A (10% von 0.5A) bis 120A zu erreichen.

$$u(Q_1)/Q_1 = \sqrt{\{[u(V_1)/V_1]^2 + \{[u(I_1)/I_1]^2 + \{u(\varphi_1)\}^2\}^2} \\ 200ppm = \sqrt{(141ppm)^2 + (141ppm)^2 + (1ppm)^2}$$

Spannung, Strom, Leistung der 3. Oberwelle:

$$V_3 = 10\% \times V_1 = 0.1 \times 227.723 = 22.7723V$$

$$I_3 = 40\% \times I_1 = 0.4 \times 86.2069 = 34.4828A$$

$$Q_3 = V_3 I_3 \sin \varphi_3 = 22.7723 \times 34.4828 \times 0.939693 = 737.896var$$

Messunsicherheit von Spannung, Strom, Leistungsfaktor und Leistung der 3. Oberwelle:

$$u(V_3)/V_3 = 228ppm$$

$$u(I_3)/I_3 = 228ppm$$

$$u(\varphi_3) = [\sin(110 + 0.55) - \sin(110)] / \sin(110) = 3540ppm$$

$$u(Q_3)/Q_3 = \sqrt{228^2 + 228^2 + 3540^2} = 3554ppm$$

$$u(P_3) = 0.003554 \times 737.896 = 2.62248var$$

Gesamtblindleistung:

$$Q = 19556.6 + 737.896 = 20294.5var$$

Messunsicherheit der Blindleistung

$$u(Q) = (19556.6 / 20294.5) \times 4.18511 +$$

$$+ (737.896 / 20294.5) \times 2.62248 = 4.12839var$$

$$u(Q)/Q = 4.12839 / 20294.5 = 0.000203 \text{ (oder 203ppm)}$$

Die Genauigkeit der Blindleistung beträgt 20294.5var ±4.18511var.