

Info-Brief Nr. 4

Summierung von Wechselströmen

Bei der Parallelschaltung von Stromquellen gilt das Überlagerungsprinzip, wenn alle Betriebsmittel ein lineares Verhalten aufweisen. Dieses Verhalten ist bei Stromwandlern innerhalb des zulässigen Bürdenbereiches und unterhalb von einigen tausend Hertz gegeben. Dabei ist zu beachten, dass prinzipiell und gerätetechnisch nur zeitgleiche Momentanwerte addiert werden, nicht jedoch Effektivwerte!

Durch den gemeinsamen Lastwiderstand R_L von parallel geschalteten Stromwandlern fließt ein Strom der jeweils der arithmetischen Summe der Momentanwerte aller Ströme entspricht. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Stromwandler eingeprägte Ströme liefern und die Frequenzgrenzen (höchste Ordnungszahl der Oberschwingungen) nicht überschritten werden.

Die arithmetische Summe der Momentanwerte ist nicht nur abhängig vom Betrag, sondern auch vom Vorzeichen der einzelnen Ströme, so dass bei der Summierung die Polung der Stromquellen beachtet werden muss. Bei Wechselströmen mit gleicher Energieflussrichtung bezieht sich die Polung auf die Sekundäranschlüsse S1(k) und S2(l) der Stromwandler.

Kurvenform des Summenstromes

Bei der Summierung von gleichfrequenten sinusförmigen Strömen hat die Kurvenform von i_Σ wiederum einen sinusförmigen Verlauf; bei Strömen mit ungleicher Frequenz ist die Kurvenform des Summenstromes i_Σ nicht mehr sinusförmig.

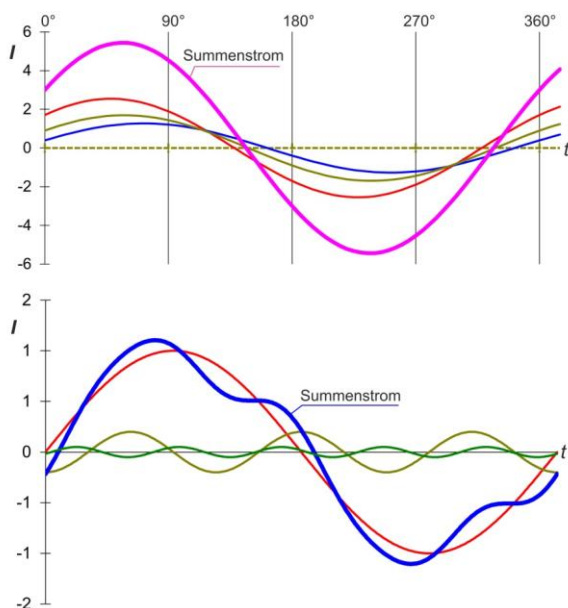


Bild 1 Kurvenform des Summenstromes bei der Summierung von jeweils drei Strömen
a) mit gleicher Frequenz,
b) mit ungleicher Frequenz

Summe der Momentanwerte

Für das Drehstrom-Dreileiternetz mit gleichfrequenten sinusförmigen Strömen ist die Summe der zeitgleichen Momentanwerte idealerweise gleich null.

Beispiel 1

Gegebene Daten:

$$I_1 = 3,85 \text{ A}, \varphi_1 = 41,0^\circ;$$

$$I_2 = 3,14 \text{ A}, \varphi_2 = 57,9^\circ;$$

$$I_3 = 2,65 \text{ A}, \varphi_3 = 35,0^\circ.$$

Wie groß ist die arithmetische Summe der zeitgleichen Momentanwerte?

Ergebnis (Berechnung mit Excel-Programm E-1.7.1)

$$i_\Sigma = 3,85 \text{ A} \sin(0^\circ - 41,0^\circ) + 3,14 \text{ A} \sin(-120^\circ - 57,9^\circ) + 2,65 \text{ A} \sin(+120^\circ - 35,0^\circ)$$

$$i_\Sigma = -2,526 \text{ A} - 0,114 \text{ A} + 2,640 \text{ A} = 0$$

Effektivwert des Summenstromes

Für die Berechnung des Effektivwertes des Summenstromes aus den Augenblickswerten von Strömen mit beliebiger Frequenz/Kurvenform gilt:

$$I_\Sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_0 + i_1 + i_2 \dots + i_n)^2 dt}$$

$i_0 + i_1 + i_2 \dots + i_n$ Arithmetische Summe der zeitgleichen Stromanteile

Für die Berechnung ausschließlich aus den Effektivwerten von Strömen mit ungleicher Frequenz (z.B. Gleichanteil/Grundschwingung mit Oberschwingungen) gilt auch:

$$I_\Sigma = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 \dots + I_n^2}$$

I_0 Effektivwert des Gleichstromes

I_1 Effektivwert der Grundschwingung

I_n Effektivwert der höchsten Oberschwingung

Messung des Summenstromes

Zur Ermittlung der Summe $i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_3$ im Drehstrom-Dreileiternetz werden jeweils die Anschlüsse S1(k) und die Anschlüsse S2(l) der Sekundärwicklungen der drei Stromwandler von den Leitern L1, L2, L3 verbunden (Holmgreen-Schaltung). Durch den Lastwiderstand fließt ein Strom der der arithmetischen Summe der Momentanwerte der drei Lastströme entspricht; deren Summe ist bei erdschlussfreiem Netz im Idealfall gleich null.

Messabweichung

Wegen der Amplituden- und Winkelfehler der Stromwandler weicht die Stromsumme i_Σ auch im erdschlussfreien Drehstrom-Dreileiternetz von null ab.

Beispiel 2

Gegebene Daten:

$$I_1 = 4,60 \text{ A}, \varphi_1 = 23,0^\circ (\cos \varphi = 0,92); + 0,5 \%, + 0,5^\circ$$

$$I_2 = 4,50 \text{ A}, \varphi_2 = 12,3^\circ (\cos \varphi = 0,98); - 0,5 \%, - 0,5^\circ$$

$$I_3 = 3,80 \text{ A}, \varphi_3 = 19,0^\circ (\cos \varphi = 0,95); + 0,5 \%, + 0,5^\circ$$

Wie groß ist die Abweichung des Summenstromes von null?

Ergebnisse (Berechnung mit Excel-Programm E-1.7.1)

Anstelle von $I_\Sigma = 0$ wird angezeigt $I_\Sigma^* = 0,07 \text{ A}$.

Das entspricht 1,4 % von 5 A. $\varphi_\Sigma = 15,6^\circ (\cos \varphi = 0,96)$

Kabelumbau-Stromwandler

Bei diesem Stromwandlertyp umfasst ein Eisenring, auf dem eine Wicklung aufgebracht ist, die drei Leiter des Kabels. Die magnetischen Felder der drei Leiter induzieren in der Wicklung einen Strom, dessen Stärke der arithmetischen Summe der Momentanwerte der Ströme proportional ist. Diese Summe ist bei erdschlussfreiem Netz im Idealfall gleich null. - Der bei der Holmgreen-Schaltung beschriebene Einflusseffekt durch die Fehler der Messwandler auf die Summe der Ströme ist beim Kabelumbau-Stromwandler nicht vorhanden.

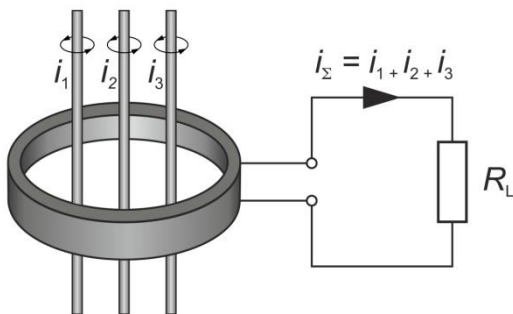


Bild 2 Kabelumbau-Stromwandler

Erdung bei Kabeln mit leitender Umhüllung

Um den Einflusseffekt des im Kabelmantel von den Leitern über C_{LE} fließenden Stromes I_{Mantel} zu eliminieren, muss die Erdleitung vom Endverschluss des Kabels durch den Eisenkern des Kabelumbau-Stromwandlers parallel zum Kabel, jedoch in entgegengesetzter Richtung auf Erde geführt werden. Dadurch heben sich die gegensinnigen Felder des im Kabelmantel und in der Erdleitung fließenden Stromes I_{Mantel} auf. Es wird somit nur die Summe von $i_1 + i_2 + i_3$ erfasst. - Um diese Wirkung zu erzielen, muss der Endverschluss des Kabels gegen Erde isoliert sein.

Summen-Stromwandler

Dieser Stromwandlertyp dient zur Summierung von gleichfrequenten Wechselströmen, die jedoch beliebige Phasenwinkel haben können. Der Summen-Stromwandler hat einen Ringkern, der mehrere Eingangswicklungen (Primärwicklungen) und die Sekundärwicklung trägt.

In gleichbelasteten Netzen mit gleicher Betriebsspannung kann die Gesamtleistung von n Abzweigen mit einem Summen-Stromwandler und nur einem Leistungsmessmittel erfasst werden.

Beispiel 3

Gegebene Daten:

Werte der Ströme jeweils in L1 in den drei Abzweigen A, B, C eines Drehstrom-Dreileiternetzes.

$$I_{1A} = 3,6 \text{ A}, \varphi_{1A} = 15^\circ;$$

$$I_{1B} = 2,8 \text{ A}, \varphi_{1B} = 45^\circ;$$

$$I_{1C} = 1,7 \text{ A}, \varphi_{1C} = 32^\circ.$$

Wie groß ist der Effektivwert des Summenstromes I_Σ ?

Ergebnisse (Berechnung mit Excel-Programm E-1.8.2)

$$I_\Sigma = 7,88 \text{ A}; \varphi_\Sigma = 28,9^\circ; \cos \varphi_\Sigma = 0,875$$

Für die Summe der Wirkleistungen in den Abzweigen A, B, C bei gleicher Betriebsspannung von 400 V ergibt sich

$$P_A = 1391 \text{ W}, P_B = 792 \text{ W}, P_C = 577 \text{ W},$$

$$P_A + P_B + P_C = 2760 \text{ W};$$

mit den Werten von I_Σ erhält man ebenfalls

$$P_\Sigma = 2760 \text{ W}.$$

Summenstrom bei einpoligem Erdschluss

Den in den Leitern fließenden Lastströmen sind die über die Leiter-Erde-Kapazitäten zur Erde abfließenden Erdströme überlagert. Für gleiche Werte der drei Leiter-Erde-Kapazitäten einer Leitung ergibt die Summe dieser „kapazitiven“ Erdströme bei erdschlussfreiem Betrieb den Wert null, sodass unter dieser Bedingung die Summe der Lastströme und der Erdströme null ist.

Bei einem einpoligen satten Erdschluss auf einem Leiter ist die Spannung und damit auch der Strom zwischen dem Leiter und Erde gleich null, sodass sich für die Summe der Leiterströme wegen $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, z.B. bei einem Erdschluss auf Leiter L1, für den Erdstrom $i_E = 0 + i_{2E} + i_{3E} \neq 0$ ergibt und somit nur die über die beiden Leiter-Erde-Kapazitäten fließenden Ströme der erdschlussfreien Leiter die Summe ergeben.

Wirkanteil des Erdstromes

Bei gleichen Beträgen der Leiter-Erde-Kapazitäten und gleichen Leiter-Erde-Spannungen hat der Erdstrom eine Winkeldifferenz von 90° gegenüber der Verlagerungsspannung. Bei ungleichen Beträgen und/oder wenn in Reihe zu den Leiter-Erde-Kapazitäten ein nennenswerter Wirkwiderstand liegt, beträgt die Winkeldifferenz nicht mehr genau 90° . Die Abweichung von 90° kann einige Grad in beiden Richtungen betragen, sodass dann der Erdstrom auch einen Wirkanteil hat. Dessen Betrag ist normalerweise sehr klein; das Vorzeichen ist von den genannten Gegebenheiten abhängig.

Wir regeln das.

Beispiel 4

Drehstrom-Dreileiternetz mit Erdschlusskompensation;
Erdschluss auf Leiter L1. Spannungen am Messort / Messmittel:

$$\underline{U}_{12} = 20,243 e^{j30^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{23} = 20,168 e^{-j90^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{31} = 20,393 e^{j150^\circ} \text{ kV}$$

Leiter-Erde-Kapazitäten:

$$C_1 = 5,9 \mu\text{F}; C_2 = 6,0 \mu\text{F}; C_3 = 6,2 \mu\text{F} \text{ (Unsymmetrie 3\%);}$$

Leitungsableitungen (Leiter-Erde):

$$R1 = 100 \text{ k}\Omega; R2 = 102 \text{ k}\Omega; R3 = 99 \text{ k}\Omega \text{ (Unsymmetrie 2\%);}$$

Erdschluss auf Leiter L1: $Z_F = 23 \Omega$;

Erdschluss-Löschspule:

$$\text{Impedanz } \underline{Z}_{NE} = 173 e^{j86^\circ} \Omega$$

(Induktivität $L = 0,55 \text{ H}$; Kupferwiderstand $R = 9 \Omega$;

Eisenverluste $R = 7000 \Omega$);

Wie groß ist der Erdstrom von den einzelnen Leitern zur Erde und wie groß ist die geometrische Summe dieser Ströme?

Ergebnisse

(Berechnung mit Programm E-1.7.2; siehe Anhang)

Leiter-Erde-Spannungen:

$$\underline{U}_{1E} = 0,14 e^{j8^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{2E} = 20,113 e^{-j150^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{3E} = 20,283 e^{j150^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{Z}_{1E} = 513,7 e^{-j90^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{2E} = 540,0 e^{-j90^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{3E} = 522,1 e^{-j90^\circ} \Omega;$$

$$\underline{I}_{1E} = 6 e^{j11^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{2E} = 38 e^{-j63^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{3E} = 39 e^{-j123^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_E = 66 e^{-j88^\circ} \text{ A (Wirkanteil: 2 A)}$$

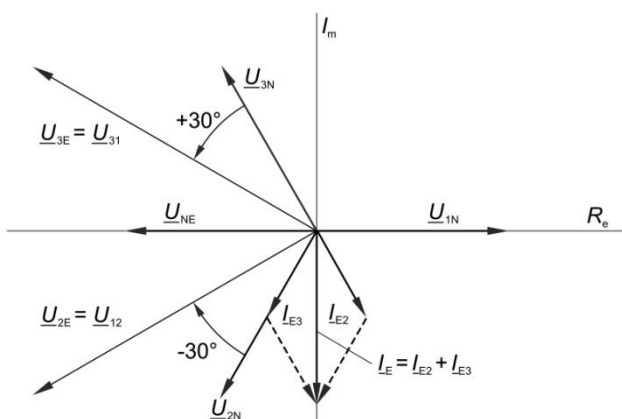


Bild 3 Erdstrom I_E bei Erdschluss von L1

Verfasser: Helmut Karger

Die für die Beispiele verwendeten EXCEL-Programme können abgerufen werden unter:

www.a-eberle.de

(Download Center)

Die Reihe wird fortgesetzt.

Fehlende Info-Briefe liefern wir Ihnen jederzeit gerne nach.

Ausgabe: 03-2013 / I004-1-D-1-001-04.docx