

Info-Brief Nr. 9

Spannungsregelung mit Stufen-Transformatoren im Parallelbetrieb an Sammelschienen (Teil 1)

Innerhalb einer Station sind die Transformatoren eng benachbart. Deshalb werden die Leitungsimpedanzen zwischen den sekundärseitigen Klemmen der parallel betriebenen Transformatoren zunächst vernachlässigt.

Allgemeine Abhängigkeiten beim Parallelbetrieb

Um die allgemein zu beachtenden Abhängigkeiten und Einsatzgrenzen beim Parallelbetrieb von Transformatoren anschaulich darzustellen, genügt es diese Beziehungen an zwei parallel betriebenen Spannungsquellen deutlich zu machen.

Zur Erhöhung der verfügbaren Leistung durch Parallelschaltung von Spannungsquellen ist im Idealfall die Gesamtleistung gleich der arithmetischen Summe der Einzelleistungen. Um die maximale Gesamtleistung zu erreichen, müssen jedoch die einzelnen Spannungsquellen gleiche Daten haben. Bei ungleichen Leerlaufspannungen fließt innerhalb der Parallelschaltung ein Ausgleichsstrom, der die Proportionen zwischen Laststrom und Nennleistung verändert. Diese Einschränkungen verringern die maximal erreichbare Gesamtleistung; sie gelten prinzipiell für den Parallelbetrieb von Gleich- und von Wechselspannungsquellen (Akkumulatoren, Generatoren, Transformatoren).

Die Hauptaufgaben beim Parallelbetrieb lauten daher:

- Vermeidung/Minimierung des Kreisstromes
- Vermeidung einer ungleichen relativen Belastung der Spannungsquellen Parallelbetrieb von Gleichspannungsquellen

Parallelbetrieb von Gleichspannungsquellen

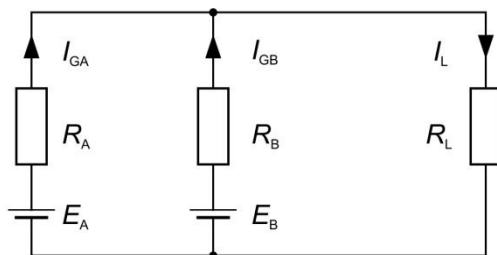


Bild 1 Parallelschaltung von zwei Gleichspannungsquellen

Spannungsquelle A:

EMK E_A , Innenwiderstand R_A , Strom I_{GA}

Spannungsquelle B:

EMK E_B , Innenwiderstand R_B , Strom I_{GB}

Strom im Außenkreis (Laststrom)

$$I_L = I_{LA} + I_{LB} = I_{GA} + I_{GB}$$

Widerstand im Außenkreis R_L (Lastwiderstand)

EMK und Innenwiderstand der parallelbetriebenen Spannungsquellen

Die beiden parallel betriebenen Spannungsquellen lassen sich durch eine einzige Spannungsquelle mit der EMK $E_{A,B}$ und dem Innenwiderstand $R_{A,B}$ ersetzen

$$E_{A,B} = E_A \left(\frac{R_B}{R_A + R_B} \right) + E_B \left(\frac{R_A}{R_A + R_B} \right)$$

$$R_{A,B} = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$$

Spannung an den Klemmen

Bei direkter Parallelschaltung der Anschlussklemmen der beiden Stromausgänge kann der Widerstand der Verbindungsleitung vernachlässigt werden, so dass für die Spannung an den Klemmen gilt:

$$U_{KI} = E_{A,B} - I_L R_{A,B}$$

oder

$$U_{KI} = \left(\frac{E_A}{R_A} + \frac{E_B}{R_B} - I_L \right) \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$$

Änderung der Klemmenspannung

Die Klemmenspannung ist neben R_A und R_B noch abhängig von E_A und E_B und I_L . Eine Forderung nach Änderung der Klemmenspannung U_{KI} bei konstantem Laststrom I_L kann erfüllt werden durch

- *alleinige* Änderung von E_A oder E_B
- *gemeinsame* Änderung von E_A und E_B .

Bei Änderung einer einzelnen EMK E_x um den Betrag ΔE_x wird die Klemmenspannung nicht um den gesamten Betrag $\Delta E_x [R_x / (R_A + R_B)]$ verändert.

Bei n gleichen Innenwiderständen also nur mit dem Faktor $1/n$.

Eine Änderung der Klemmenspannung ist somit möglich in Stufen, die kleiner sind als ΔE_x . Um die Klemmenspannung um einen bestimmten Betrag zu ändern, müssen demnach beide Spannungsquellen um den gleichen Betrag verändert werden. Prinzipiell lässt sich diese Spannungsänderung auch erreichen, wenn nur eine Spannungsquelle um den doppelten Betrag geändert wird. Die EMK der Spannungsquellen sind dann unterschiedlich. Unterschiedliche EMK verursachen jedoch einen zusätzlichen Strom (Kreisstrom) innerhalb der Parallelschaltung

Laststrom

Für einen gegebenen Wert des Lastwiderstandes R_L gilt

$$I_L \frac{E_A R_B + E_B R_A}{R_A R_B + R_L (R_A + R_B)} = \frac{U_{KI}}{R_L}$$

Verteilung des Laststromes

Der Laststrom I_L teilt sich bei ungleichen Innenwiderständen ungleich auf die Spannungsquellen auf. Das kann zur Überlastung einer Spannungsquelle führen.

Für die Verteilung gilt:

$$\frac{I_{LA}}{I_{LB}} = \frac{R_B}{R_A}$$

Die verfügbare Gesamtleistung ist somit bei ungleichen Innenwiderständen kleiner als die arithmetische Summe der beiden Einzelleistungen.

Kreisstrom

Die parallel betriebenen Spannungsquellen bilden einen Stromkreis, in dem bei einer Differenz $E_A - E_B \neq 0$ ein Strom fließt, der Kreisstrom I_{Kr} genannt wird. Die Kreisstromstärke ist ausschließlich abhängig von den Daten (EMK, R_x) der beiden Spannungsquellen, nicht jedoch vom Widerstand der Last. Auch bei fehlender Last ($R_L = \infty$) fließt dieser Kreisstrom.

$$I_{Kr} = \frac{E_A - E_B}{R_A + R_B}$$

Im Spezialfall $R_A = R_B$ ist die Kreisstromstärke

$$I_{Kr} = \frac{1}{2} (I_{GA} - I_{GB})$$

Wenn E_A und E_B nicht messbar sind gilt für den Kreisstrom:

$$I_{Kr} = I_{GA} - (I_{GA} + I_{GB}) \left(\frac{R_B}{R_A + R_B} \right)$$

Überlagerung von Laststrom und Kreisstrom

Der Kreisstrom überlagert sich in jeder Spannungsquelle dem Laststrom. Dabei gilt

$$(I_{LA} + I_{Kr}) + (I_{LB} - I_{Kr}) = I_{GA} + I_{GB} = I_{LA} + I_{LB} = I_L$$

Das Vorzeichen (die Richtung) von I_{Kr} wird durch die höhere EMK bestimmt. Bei gleicher Richtung (Polarität) von EMK und I_{Kr} werden in jeder Spannungsquelle die Ströme I_{Lx} und I_{Kr} addiert. In der Spannungsquelle mit der kleineren EMK haben EMK_x und I_{Kr} entgegengesetzte Vorzeichen. Deshalb wird der Kreisstrom I_{Kr} vom jeweiligen Laststrom I_{Lx} subtrahiert.

Ströme in den Spannungsquellen

Für die Verteilung des Gesamtstromes auf die Spannungsquellen gilt bei $E_A > E_B$ (bei $E_B > E_A$ kehren sich in den Formeln die Vorzeichen von I_{Kr} um)

$$I_{GA} = I_L \frac{R_B}{R_A + R_B} + I_{Kr}$$

$$I_{GB} = I_L \frac{R_A}{R_A + R_B} - I_{Kr}$$

Steuerung der Stromstärke in den Spannungsquellen

Durch entsprechende Einstellung von E_A und E_B kann der Betrag von I_{GA} und I_{GB} und damit deren Verhältnis so gesteuert werden, dass die Spannungsquellen proportional zu den Nennströmen (den Nennleistungen) belastet werden. Das Verhältnis der Ströme entspricht dann dem Verhältnis der Nennleistungen.

$$I_{GA} = \frac{E_A (R_B + R_L) - E_B R_L}{R_A R_B + R_L (R_A + R_B)}$$

Beispiel 1

$E_A = 122 \text{ V}$; $R_A = 0,1 \Omega$; $I_{NA} = 41,67 \text{ A}$;

$E_B = 120 \text{ V}$; $R_B = 0,05 \Omega$; $I_{NB} = 83,33 \text{ A}$;

$R_L = 1,3 \Omega$

Rechenwerte: $E_{A,B} = 121 \text{ V}$; $U_{Kl} = 118,5 \text{ V}$

Durch eine Erhöhung von E_A und / oder E_B in Stufen von $\Delta E_x = 1 \text{ V}$ ergeben sich die in der Tabelle 1 angegebene Erhöhungen der Klemmenspannung und die damit gekoppelten Veränderungen der Kreisstromstärke sowie die Veränderungen des Verhältnisses der Ströme in den Spannungsquellen zu den Nennströmen.

Tabelle 1

ΔE_A [V]	ΔE_B [V]	$\Delta E_{A,B}$ [V]	ΔU_{Kl} [V]	I_{Kr} [A]	I_{GA}/I_{NA}	I_{GB}/I_{NB}
0,00	0,00	0,000	0,000	13,33	0,95	0,47
+ 1,00	0,00	0,333	0,327	20,00	1,11	0,39
0,00	+ 1,00	0,666	0,653	6,67	0,79	0,55
+ 1,00	+ 1,00	1,000	0,979	13,33	0,95	0,47
0,00	+ 2,00	1,333	1,305	0,00	0,64	0,64

Beispiel 2

$E_A = 122 \text{ V}$; $E_B = 120 \text{ V}$; $I_L = 100 \text{ A}$; $R_A = 0,1 \Omega$; $R_B = 0,05 \Omega$

Rechenwerte:

$E_{A,B} = 120,67 \text{ V}$; $U_{Kl} = 117,33 \text{ V}$; $I_{Kr} = 13,33 \text{ A}$; $R_{A,B} = 0,033 \Omega$

Verteilung des Laststromes

$I_{LA} = 33,33 \text{ A}$; $I_{LB} = 66,67 \text{ A}$

Summe $I_L = I_{LA} + I_{LB} = 33,33 \text{ A} + 66,67 \text{ A} = 100 \text{ A}$

Ströme in den Spannungsquellen

$I_{GA} = I_{LA} + I_{Kr} = 46,67 \text{ A}$; $I_{GB} = I_{LB} - I_{Kr} = 53,34 \text{ A}$

Summe $I_L = I_{GA} + I_{GB} = 46,67 \text{ A} + 53,34 \text{ A} = 100 \text{ A}$

Fortsetzung des Themas

Teil 2 im Info-Brief Nr. 10 / Teil 3 im Info-Brief Nr. 11

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.