

# Sonderdruck

## REGSys™

### Parallelregelung von Transformatoren

Die Spannungsregelung an Transformatoren mit Stufenschaltern ist ein klassisches Thema der Energieversorgung und -verteilung. Heute werden diese Aufgaben elektronisch mit hoher Regelgüte erledigt. Zum Einsatz kommen digitale Regler, wie beispielsweise das freiprogrammierbare Spannungsregler-System REGSys™.

\* aus etz

Elektrotechnik + Automation  
Elektronische Zeitschrift 20/2000

# REGSys™

## Parallelregelung von Transformatoren

Das Herzstück des Spannungsreglersystems REGSys™ (Bild 1) ist der Spannungsregler REG-D™, der neben der eigentlichen Regelfunktion auch Mess-, Registrier- und Statistikfunktionen übernimmt. Die Parametrierung des Reglers



**Bild 1**  
Spannungsregelsystem REGSys™, bestehend aus Spannungsregler REG-D™, Überwachungseinheit PAN-D und Leittechnikanschlussbaugruppe REG-PED im 19-Zoll-Baugruppenträger

kann entweder über die Tastatur oder über PC mit Hilfe der Software WinREG menügeführt durchgeführt werden. Besonders wichtig für die Parallelregelung sind die Kommunikationsschnittstellen. Über den zweifach ausgelegten Reglerbus E-LAN (RS 485-Schnittstelle), der den Datenverkehr zwischen bis zu 255 Reglern ermöglicht, können alle relevanten Daten ausgetauscht werden. Auf diese Weise werden kostspielige Messzusätze bzw. Parallelsteuergeräte überflüssig.

Die seriellen Schnittstellen COM 1, COM 2 (RS232) und COM 3 (RS485) dienen der Ankopplung von PC, Modem, zusätzlichen Interface-Bausteinen und übergeordneter Leittechnik.

Es stehen analoge und binäre Ein- und Ausgänge für die vielfältigsten Mess- und Steuerfunktionen rund um den Transformator zur Verfügung. Auf diese Weise kann z.B. die Stufenrückmeldung oder eine Sollwertumschaltung realisiert werden. Die Möglichkeiten für den Ausbau des Systems bis hin zur Petersen-Spulen-Regelung und Erdschlussortung sind in Bild 2 dargestellt.

### Parallelregelung von Transformatoren

Die Regelung eines einzelnen Transformators ist leicht überschaubar, bei Parallelbetrieb werden die Verhältnisse unübersichtlich. Es gibt vielfältige Gründe, die für den Parallelbetrieb von Transformatoren sprechen: Die benötigte Leistung kann auf mehrere Trafos verteilt werden und bei Ausfällen sind Reserven vorhanden, um die benötigte elektrische Leistung zur Verfügung zu stellen. Sind mehrere Abzweige zu versorgen, können je nach Leistungsbedarf die Trafos auf verschiedene Sammelschienen parallel geschaltet werden, um so sehr flexibel Leistungsspitzen abzudecken.

In Bild 3 ist die Parallelschaltung von  $n$  Transformatoren als Ersatzschaltbild dargestellt. Dort ist zu erkennen, warum im Parallelbetrieb besondere Vorkehrungen notwendig sind. Wenn zum Beispiel die treibende Spannung  $u_1$  höher ist als  $u_2$  bis  $u_x$ ,  $f_1$  i.e. die Kreisströme  $i_{K12}$  bis  $i_{Krx}$ . Die Kreisströme sind abhängig von den Kurzschlussimpedanzen  $Z_{k1}$  bis  $Z_{kx}$  und den Differenzen der Leerlaufspannungen  $u_1 - u_2$  bis  $u_1 - u_x$ . Da die Impedanzen der Transformatoren in der Regel sehr klein sind, können bei entsprechend verstellten Transformatoren erhebliche Kreisströme fließen, die die Transformatoren im Grenzfall über- oder zumindest ungünstig auslasten können. Folgende Gleichungen verdeutlichen die Zusammenhänge:

$$\dot{I}_{T1} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{K12} + \dots + \dot{I}_{Krx} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{T2} = \dot{I}_2 - \dot{I}_{K12} \quad (2)$$

$$\dot{I}_{Tx} = \dot{I}_x - \dot{I}_{Krx} \quad (3)$$

Das Beispiel zeigt, dass der Transformator T1 zusätzlich mit allen Kreisströmen belastet wird, während alle anderen Transformatoren durch ihren jeweiligen Kreisstrom entlastet werden. Da die Transformator-Impedanzen stark induktiv sind, und der Wirkanteil vernachlässigbar ist, nennt man die Kreisströme auch

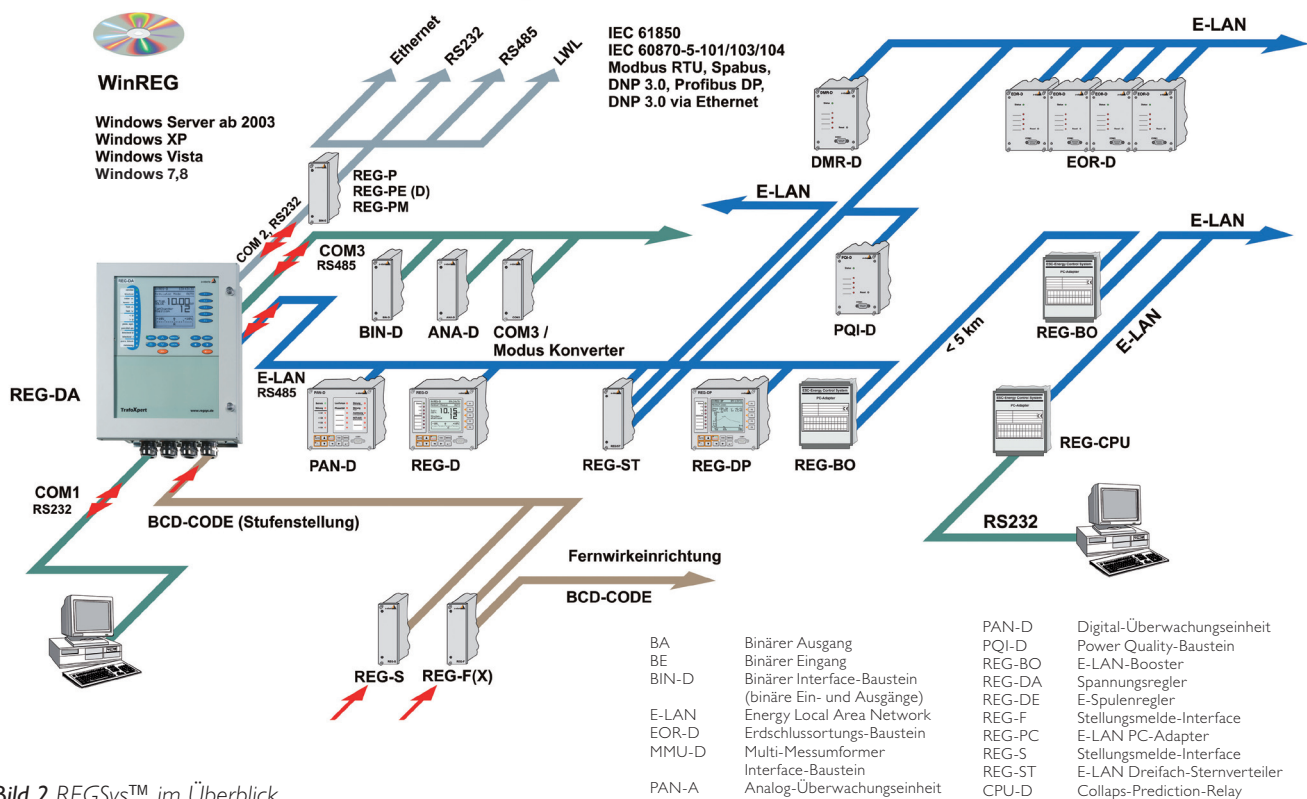


Bild 2 REGSys™ im Überblick

Kreisblindströme. Erschwerend wirkt zusätzlich, dass die Spannungsregelung an Empfindlichkeit verliert, da eine Änderung der einzelnen Leerlaufspannungen  $\underline{u}_i$  bis  $\underline{u}_x$  nur zum Teil in die Gesamtspannung an der Sammelschiene eingeht. Unterstellt, dass die Impedanzen  $Z_{k1}$  bis  $Z_{kx}$  gleich sind und einer der Transformatoren um  $\Delta \underline{u}_x$  zum Zwecke der Spannungsregelung verstimmt wird, ergibt sich:

$$\underline{u}'_{tot} = \underline{u}_{tot} + \Delta \underline{u}_x / n \quad (4)$$

Gleichung (4) zeigt, dass sich z. B. bei drei parallel geschalteten Trafos ( $n=3$ ) mit gleicher Impedanz die Spannungsänderung an einem Transformator nur zu einem Drittel an der Sammelschiene auswirkt. Dieser Umstand erschwert eine Spannungsregelung erheblich. Gleichen sich gar die Spannungen zu hoch gestuft mit zu niedrig gestuften Transformatoren aus, ist die Spannung zwar ausgeglichen, aber es fließen Kreisströme. Um auch derartigen Situationen gewachsen zu sein, müssen zusätzliche Messgrößen für die Parallelregelung herangezogen werden.

### Verfahren zur Spannungsregelung

Es kommen zwei grundsätzlich verschiedene Spannungsregel-Verfahren zum Einsatz: Verfahren, die ausschließlich die Spannung regeln, wie Master-Slave und Master-Follower und jene, die zusätzlich den Kreisblindstrom berücksichtigen, wie

$\Delta \sin \varphi$ ,  $\Delta \sin \varphi(S)$  und  $\Delta \cos \varphi$ -Verfahren. Die Anwendungen und Voraussetzungen der im REG-D™ implementierten Parallelregel-Verfahren sind in Bild 8 gegenübergestellt. Welches Verfahren für die jeweilige Aufgabenstellung das richtige ist, wird im folgenden dargestellt.

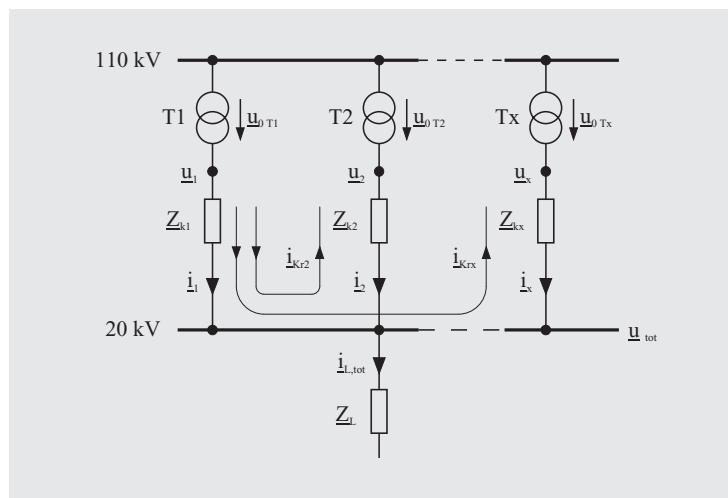


Bild 3 Parallelschaltung von Transformatoren – Ersatzschaltbild

### Master-Slave- und Master-Follower -Verfahren

Diese Verfahren regeln auf gleiche Stufenstellungen der Transformatoren. Ein Regler übernimmt dabei die Führung, während die anderen Regler dessen Stellbefehlen folgen (Master-Slave Regelung). Beim Master-Follower-Verfahren ist der Slave mit Zusatzintelligenz ausgestattet. Er kann aktiv die Stufe des Masters via E-LAN lesen und sich selbstständig auf dessen Stufe stellen. Eine zu Beginn der Parallelregelung vorliegende gewollte Stufendifferenz zwischen dem Master und den Slaves bleibt beim Master-Slave-Verfahren bestehen, während sie beim Master-Follower-Verfahren ausgeglichen wird.

Beide Verfahren eignen sich besonders für baugleiche Transformatoren. Auch Transformatoren unterschiedlicher Leistung können auf diese Weise betrieben werden, allerdings müssen dann gleiche Stufenstellungen zu gleichen Übersetzungsverhältnissen (= gleiche Leerlaufspannungen) führen. Damit gute Regelergebnisse erzielt werden können, dürfen die relativen Kurzschlussspannungen der Transformatoren nicht allzu stark (max. 10%) voneinander abweichen.

### Kreisblindstrom-Verfahren

Bei den Kreisblindstrom-Verfahren wird durch Messung der Ströme an der Einspeisung der Transformatoren der Kreisblindstrom ermittelt und durch gezielte Stufung der Transformatoren minimiert.

### $\Delta \sin\varphi$ -Verfahren

Um den Kreisblindstrom zu erhalten, genügt es nicht, einfach den Blindstrom am Transformator zu messen, denn dieser könnte auch durch einen induktiven Verbraucher bedingt sein (siehe ix in Bild 3). Bei zwei parallelaufenden Transformatoren ergibt sich der Kreisblindstrom durch die halbe Differenz zwischen den beiden gemessenen Blindströmen. Der Anteil, der durch den Verbraucher verursacht ist, wird dabei mathematisch eliminiert. Bei mehreren Transformatoren wird die Summe aller Blindströme gebildet und durch die Anzahl der Transformatoren geteilt. Man erhält dann den Blindstrom, den jeder Transformator abgeben müßte, um den Blindleistungsbedarf der Last zu decken. Gemäß Bild 3 gilt:

$$\dot{I}_{L,tot} = \dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2} + \dots + \dot{I}_{Tx} \quad (5)$$

Gleichungen (1) bis (3) eingesetzt in Gleichung (5):

$$\dot{I}_{L,tot} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{Kr2} + \dots + \dot{I}_{Krx} + \dot{I}_2 - \dot{I}_{Kr2} + \dot{I}_x - \dot{I}_{Krx}$$

Wie aus Gleichung (6) zu erkennen ist, fallen alle Kreisströme heraus. Daraus ergibt sich:

$$\dot{I}_{L,tot} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_x \quad (7)$$

Die Verhältnisse in Gleichung (5), (6) und (7) lassen sich auf die Blindanteile  $I_{Qx}$  übertragen. Durch die Addition der

Blindströme am Transformator ergibt sich die Summe der Lastblindströme (siehe Bild 4).

Zur Ermittlung des Soll-Blindstromes pro Transformator muß dieser Blindstrom durch die Anzahl n der Transformatoren geteilt werden. Den so ermittelten Soll-Blindstrom müßte jeder Transformator abgeben, um den Blindleistungsbedarf der Verbraucher abzudecken. Der Kreisblindstrom  $\dot{I}_{KrQx}$  eines Transformators ist somit die Differenz zwischen dem gemessenen Blindstrom und dem Soll-Blindstrom:

$$\dot{I}_{KrQx} = \dot{I}_{Qx} - \left( \dot{I}_{Q,tot} \frac{1}{n} \right) \quad (8)$$

$\dot{I}_{KrQx}$	Kreisblindstrom des Transformator Nr. x
$\dot{I}_{Qx}$	Blindstromanteil eines Transformators Nr. x
$\dot{I}_{Q,tot}$	Blindanteil des Gesamtstromes über alle Transformatoren

### $\Delta \sin\varphi$ (S)-Verfahren

Das  $\Delta \sin\varphi$ (S)-Verfahren ist eine Erweiterung des  $\Delta \sin\varphi$ -Verfahrens. Bei der Berechnung des Soll-Blindstroms werden auch die Nennleistungen der Transformatoren ausgewertet. Auf Grund dieser Zusatzinformation ist es möglich den Blindstrom entsprechend der Nennleistungen auf die Transformatoren zu verteilen (siehe Bild 5)

$$\dot{I}_{KrQx} = \dot{I}_{Qx} - \left( \dot{I}_{Q,tot} \frac{S_x}{S_{tot}} \right) \quad (9)$$

mit:  
 $S_x$  Nennleistung des Transformators Nr. x  
 $S_{tot}$  gesamte Nennleistung aller Transformatoren.

### $\Delta \cos\varphi$ -Verfahren

Eine Sonderstellung unter den Parallelregelungs-Programmen nimmt das  $\Delta \cos\varphi$ -Verfahren ein. Speisen mehrere Transformatoren in ein weitläufig vermaschtes Netz, können die Regler nicht via E-LAN miteinander kommunizieren. Damit entfällt die gegenseitige Abfrage

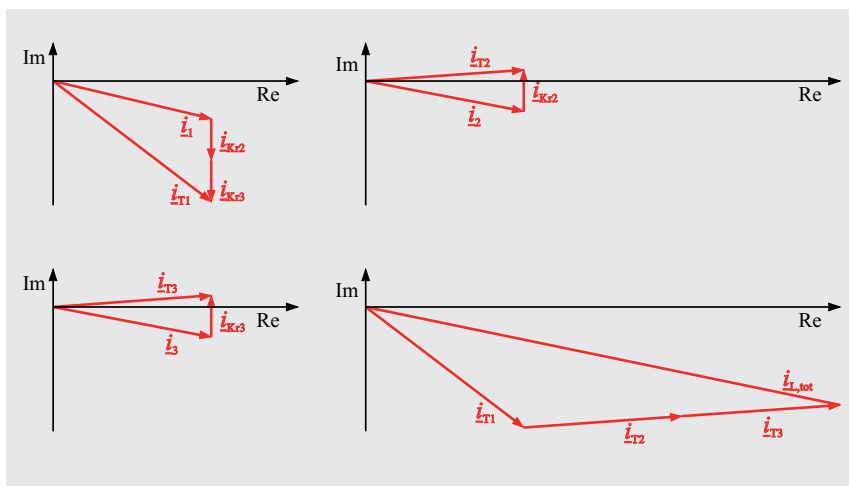


Bild 4 Vektordiagramme für n = 3

der Blindströme und die Möglichkeit der rechnerischen Kreisblindstromermittlung. Zunächst wird der Netz-cosφ (cosφ Netz) vom Betreiber als Sollwert vorgegeben. Aus der Sammelschienenspannung und dem Transformatorstrom kann der Blindstrom berechnet werden, der sich einstellen würde, wenn der cosφ am Transformator gleich dem cosφ des Netzes wäre. Ist der tatsächliche Blindstrom höher, wird der Transformator tiefer gestuft, ist er niedriger, wird höher gestuft. Der Kreisblindstrom errechnet sich dabei wie folgt (siehe Bild 6):

$$\dot{i}_{KrQx} = \dot{i}_{Tx} \sin\varphi_{ist} - \dot{i}_{Tx} \cdot \sin\varphi_{soll} \quad (10)$$

### Einbindung in die Spannungsregelung

Wie schon geschildert, ist die Spannungsregelung bei der Regelung parallelgeschalteter Transformatoren nicht ausreichend. Um Kreisblindströme zu vermeiden, wird die Kreisblindstromregelung der Spannungsregelung überlagert (Bild 7). Dabei ergeben sich die Stellgrößen  $Y_U$  und  $Y_P$  zu:

$$Y_U = (U_{ist} - U_{soll}) / \Delta U_{zul} \quad (11)$$

$$Y_P = I_{KrQx} / I_{KrQzul} \quad (12)$$

mit:

- $U_{ist}$  Istwert der Effektivspannung
- $U_{soll}$  Sollwert der Effektivspannung
- $\Delta U_{zul}$  Zul. Regelabweichung
- $I_{KrQzul}$  Zul. Kreisblindstrom

Zudem gilt für die resultierende Stellgröße  $Y$  (siehe Bild 7):

$$Y = Y_U + Y_P \quad (13)$$

Aus Gleichung (13) werden die Stellbefehle für die Regelung wie folgt abgeleitet: für  $Y > +1,0$  wird ein Stellbefehl TIEFER, für  $Y < -1,0$  wird ein Stellbefehl HÖHER ausgelöst. Dabei werden unabhängig voneinander die Spannung und der Kreisblindstrom auf die jeweils zulässigen Abweichungen geregelt. Stellbefehle, die bedingt durch die Kreisblindstrom-Minimierung zu einer unzulässigen Veränderung der Spannung führen, werden über die Gesamtheit der parallelgeschalteten Transformatoren ausgeregelt. Auf diese

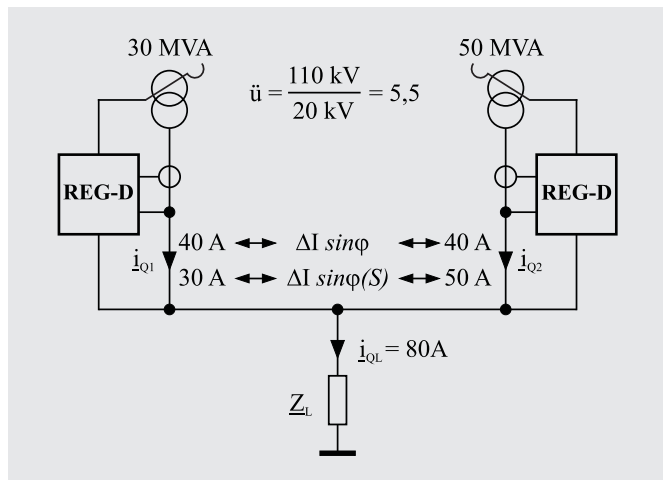


Bild 5 Blindstrombelastung parallelgeschalteter Transformatoren mit unterschiedlichen Nennleistungen

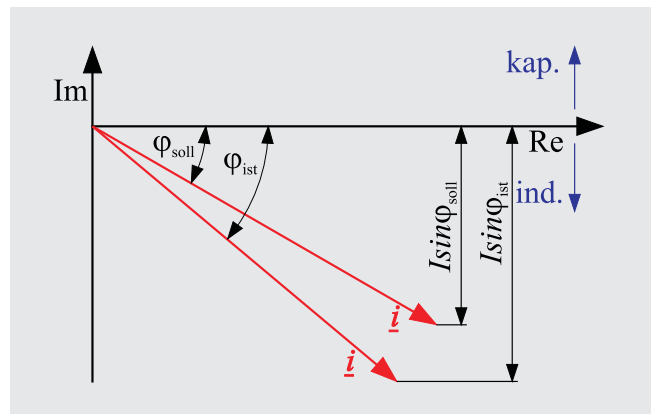


Bild 6 Zeigerdiagramm beim Δcosφ-Verfahren

Weise gibt es keine bleibende Regelabweichung für die Spannung.

Das Δcosφ-Verfahren nimmt auch hinsichtlich der Beeinflussung der Spannungsregelung durch die Kreisblindstromregelung eine Sonderstellung ein. Es ergibt sich auch dann eine Beeinflussung, wenn sich der cosφ des Netzes vom eingestellten Sollwert unterscheidet.

Die bleibende Regelabweichung ΔU ist abhängig von den beiden Phasenwinkeln φ\_soll und φ\_ist, vom Scheinstrom I, von der eingestellten zulässigen Regelabweichung ΔU\_zul und von dem eingestellten zulässigen Kreisblindstrom I\_KrQzul.

$$\Delta U = \Delta U_{zul} \cdot (\sin\varphi_{soll} - \sin\varphi_{ist}) \cdot I / I_{KrQzul} \quad (14)$$

Dieser Einfluß kann jedoch wie in Gleichung 16 gezeigt begrenzt werden.

In Bild 7 ist neben dem zulässigen Kreisblindstrom die Begrenzung b als Parameter angegeben; sie gibt an, wie groß  $y_p$  maximal werden darf.

$$I Y_p I \leq b \quad (15)$$

Dadurch wird die bleibende Regelabweichung ΔU begrenzt auf

$$\Delta U = b \cdot \Delta U_{zul} \quad (16)$$

Bei stark schwankenden Lasten und damit verbundenen Änderungen des Netz-cosφ ist es zudem möglich den Sollwert des cosφ durch ein selbstlernendes Verfahren anzupassen. Auf diese Weise werden bleibende Regelabweichungen der Spannung und unzulässig hohe Kreisblindströme verhindert.

### Sicherheitsvorkehrungen

Bei allen Verfahren (außer  $\Delta \cos\varphi$ -Verfahren) tauschen die an der Parallelschaltung beteiligten Regler die benötigten Daten über den E-LAN aus. Wenn die E-LAN-Verbindung unterbrochen ist, muß sichergestellt sein, dass auch weiterhin eine zuverlässige Regelung gewährleistet ist. Da das  $\Delta \cos\varphi$ -Verfahren ohne Busverbindung arbeitet, wird es als Notprogramm eingesetzt. Im Regler REG-D™ ist dieses Notprogramm standardmäßig implementiert. Die Funktionsweise lässt sich wie folgt beschreiben: Während des ungestörten Betriebs mit den Verfahren  $\Delta \sin\varphi$  und  $\Delta \sin\varphi(S)$  wird ständig der  $\cos\varphi$  des Netzes gemessen. Nach einer Busstörung wird der zuletzt gemessene  $\cos\varphi$  als Soll- $\cos\varphi$  interpretiert und das  $\Delta \cos\varphi$ -Verfahren gestartet.

Ist die Busstörung behoben, wird auf das vorher aktive Parallelprogramm zurückgeschaltet. Wird die Busverbindung beim Master-Slave- und Master-Follower-Verfahren gestört, schaltet sich der Slave selbständig in den Einzelreglerbetrieb zurück. Zur Signalisierung dieses Zustands wird eine Fehlermeldung abgesetzt.

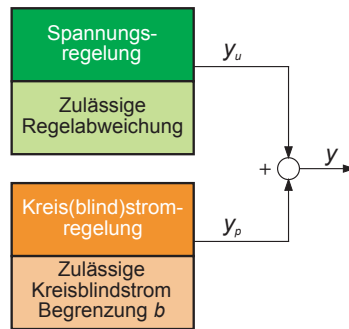


Bild 7 Einfluß der Kreis(blind)stromregelung auf die Spannungsregelung

### Simulations-Software

Welches Parallelregel-Verfahren für welche Anlage geeignet ist, kann aufgrund theoretischer Überlegungen (Bild 8) abgeschätzt werden. Die Software REGSim™ (Bild 9) bietet die Möglichkeit die Parallelregel-Verfahren in einer beliebigen Betriebskonstellation mit Transformatoren, Netz und Lasten zu simulieren. Dabei werden die im Regler implementierten Regelalgorithmen verwendet. Verschiedene Eckdaten (Nennspannung, Transformatorimpedanz etc.) können parametrisiert werden. So ist eine Simulation des Spannungsregelsystems REGSys™

in einer konkreten Anlagensituation möglich. Ohne in die Anlage einzugreifen kann ermittelt werden, wie sich die Regelung in Extremsituationen (Lastsprünge, Erdschluss) verhält. Auch die Güte der Regelung (Spannungskonstanz, Zahl der Schaltungen) kann bereits im Vorfeld abgeschätzt werden. Selbstverständlich eignet sich das Programm auch für Schulungszwecke.

### Automatischer Parallelbetrieb

Als Hilfsmittel für die automatische Vorbereitung von Parallelschaltungen und zur Online-Visualisierung der Schaltzustände dient der ParaGramer (Bild 10). Der ParaGramer bildet die am Parallelbetrieb beteiligten Transformatoren inkl. Leistungsschalter, Trenner, Quer- und Längskupplungen in einphasiger Darstellung ab.

Jedem Regler muß per Binäreingang ein vollständiges Sammelschienenabbild zugeführt werden. Auf Grund der Schaltzustände erkennt das System automatisch, welche Transformatoren mit welchem (welchen) anderen auf eine Sammelschiene parallel speisen. Über Querkupplungen verbundene Sammelschienen behandelt das System wie eine einzige Sammelschiene.

Betriebsart	Randbedingungen der Transformatoren			Voraussetzungen am Regler				REG-D™ Programm
	Spannungsänderung pro Stufe	Nennleistung	Abweichung der relativen Kurzschluss-spannung	Max. Stufenstellungsdifferenz im Betrieb	Strommessung vorhanden	Stufenstellung verfügbar	Busverbindung vorhanden	
Parallelbetrieb an einer Sammelschiene	gleich	gleich oder verschieden	$\leq 10\%$	keine	kann	muss	muss	Master-Follower
		gleich oder verschieden	$\leq 10\%$	fester Stufenoffset	kann	muss	muss	Master-Slave
	gleich oder verschieden	gleich	$\leq 10\%$	parametrierbar	muss	kann	muss	$\Delta \sin\varphi$
	gleich oder verschieden	verschieden	$\leq 10\%$	parametrierbar	muss	kann	muss	$\Delta \sin\varphi(S)$
Dezentrale Einspeisung in vermaschten Netzen	gleich oder verschieden	gleich oder verschieden	gleich oder verschieden	parametrierbar	muss	kann	kann	$\Delta \cos\varphi$

Bild 8 REG-D™-Programme für den Parallelbetrieb und deren Anwendungen

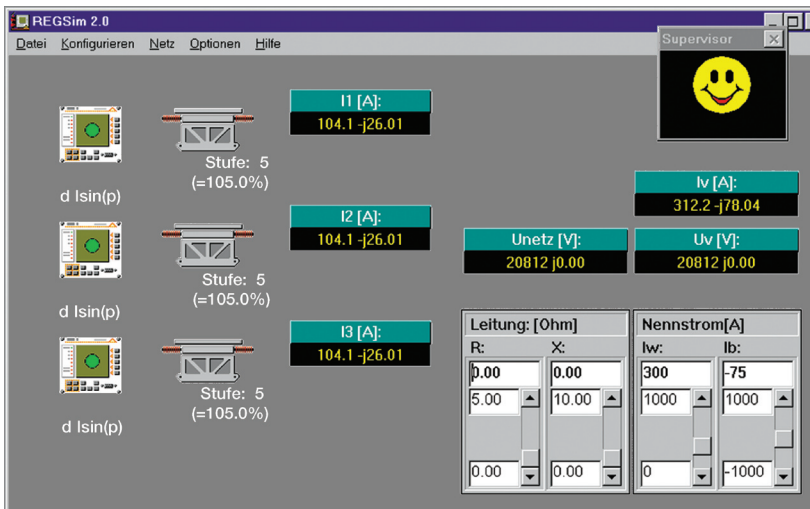


Bild 9 Die Oberfläche der Simulations-Software REGSim mit drei parallel geschalteten Transformatoren

Im Bild 10 arbeiten z. B. die Transformatoren T1 und T3 auf die Sammelschiene a, während Transformator T2 auf die Sammelschiene b speist. Mit Hilfe des ParaGramers ist es zudem möglich hochspannungsseitige Sammelschienen-Abbildungen zu realisieren. Der ParaGramer ist damit ein geeignetes Werkzeug, um die unterschiedlichsten Parallelschaltung aufwandarm und sicher zu realisieren.

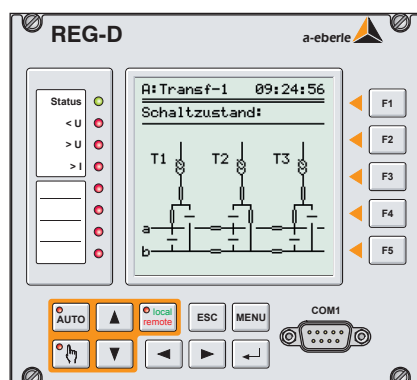


Bild 10 Der ParaGramer

## Autoren



Dipl.-Ing. (FH)

**Werner Haussel**

Leiter Qualitätsmanagement der  
A. Eberle GmbH & Co. KG



Dipl.-Ing. (FH)

**Peter Offergeld**

Inhaber Ingenieurbüro Offergeld  
und freiberuflicher Mitarbeiter der  
A. Eberle GmbH & Co. KG

Er war maßgeblich an der Entwicklung des Reglersystems REGSys™ beteiligt und entwirft nun Lösungen für spezielle Einsatzfälle des Reglers.

**A. Eberle GmbH & Co. KG**

Frankenstraße 160

D-90461 Nürnberg

Fon +49(0)911 628108-0

Fax +49(0)911 628108-96

[www.a-eberle.de](http://www.a-eberle.de)

[info@a-eberle.de](mailto:info@a-eberle.de)