

Leistung störungsfrei liefern

Lasten mit sehr hoher Leistung im Phasenanschnitt steuern

Bei der Ansteuerung von Lasten bietet sich das weit verbreitete Verfahren der Phasenanschnittsteuerung an. Allerdings treten bei hohen Lasten Störeffekte auf, die es zu kompensieren gilt. Dieser Artikel beleuchtet einige Aspekte vom Schaltschrankbau über die Einspeisung und die Leitungslängen bis hin zu den Leitungsquerschnitten.

Von Olaf Kammerer

Der Phasenanschnitt ist eine weit verbreitete Steuerungstechnik zum stufenlosen Stellen von elektrischen Lasten von 0 bis 100 %. Dabei wird jede Halbwellen direkt angeschnitten. Bei kleinen Lasten oder einer geringen Anzahl von Stellen im Schaltschrank ist der Einsatz des Phasenanschnitts auch relativ problemlos. Sobald jedoch viele Steller gleichzeitig oder hohe Lasten gefahren

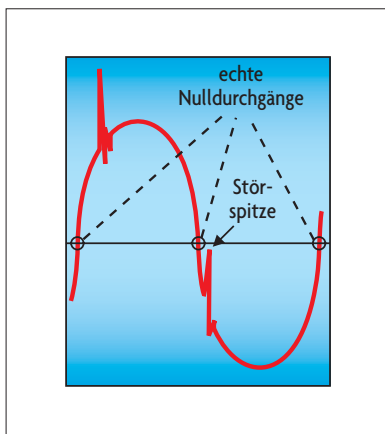


Bild 1. Die Störspitze in der negativen Halbwelle könnte einen falschen Nulldurchgang vortäuschen.

werden, stellen sich Störeffekte wie Spannungseinbrüche ein, verursacht z.B. durch die Leitungsinduktivität. Neben einer ungenauen Leistungsabgabe ist vor allem das damit verbundene Auftreten von Phantom-Nulldurchgängen für die Steuerung und damit für den Prozess ein Problem. Leis-

tungssteller der PS-Serie (bis 300 kW) des Leistungselektronik-Spezialisten Systemtechnik Leber sind so ausgestattet, dass sie diese Effekte kompensieren und eine gleichbleibend hohe Prozessqualität gewährleisten.

Nulldurchgänge sicher erkennen

In der Betriebsart Phasenanschnitt möchte man nur einen Teil einer jeden Halbwellen an die Last durchschalten. Dies lässt sich besonders einfach mit Thyristoren erledigen. Im Wechselspannungsnetz müssen lediglich die Nulldurchgänge gesucht, eine definierte Zeit gewartet und dann der Thyristor gezündet werden um die gewünschte Leistung von 0 bis 100 % zu stellen. Je besser die Nulldurchgänge von allgemeinen Störungen unterschieden werden können, desto sicherer arbeitet das System.

Bei Anlagen hoher Leistungen stellen sich weitere störende Effekte ein, wie z.B. Spannungseinbrüche durch Leitungsinduktivität, Übersprechen oder den Innenwiderstand von Kabeln.

Ein Nulldurchgang ist eigentlich der Zeitpunkt im versorgenden Wechselspannungsnetz, bei dem die Halbwellen von der einen Polarität in die andere Polarität wechselt. Für einen kurzen Moment hat dabei die Spannung den Wert 0 V. Der Versorgungsspannung können allerdings Störimpulse überlagert sein, die den Momentan-

wert der Spannung erhöhen oder auch vermindern können.

In der Praxis führen die meisten Störimpulse zu einer Spannungserhöhung, welche in der Regel von den eingebauten EMV-Komponenten beherrscht wird und somit keinen weiteren Schaden anrichtet. Unter gewissen Umständen können die Störimpulse allerdings auch zu einem Spannungseinbruch führen – und der kann einen falschen Nulldurchgang vortäuschen, wie in der negativen Halbwelle in **Bild 1** dargestellt.

Ursachen negativer Störspannungen

Negative Spannungseinbrüche (**Bild 2**) entstehen beim Zünden von Thyris-

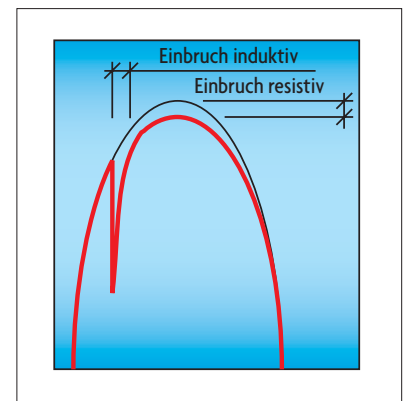


Bild 2. Induktive und resistive Spannungseinbrüche.

toren durch die Induktivitäten der Zuleitungen zur Anlage. Entscheidend ist neben der Höhe auch die Erholzeit des Spannungseinbruchs. Diese hängt von der Induktivität des Kabels und der Stromstärke ab. Eine Anlage mit einem Nennstrom von 1000 A benötigt je nach Art der Verlegung einen Mindestquerschnitt von $3 \times 240 \text{ mm}^2$ je Strang. Damit ergibt sich je Kabel eine Zuleitungsinduktivität von ca. $600 \mu\text{H}/\text{km}$ und damit ein induktiver Widerstand von $120 \text{ m}\Omega/\text{km}$. Dies führt zu Erholzeiten von 0,5 bis 1,5 ms. Wenn die Erholzeit zu lang dauert, dann lässt sich ein echter Nulldurchgang nicht mehr von einem falschen unterscheiden.

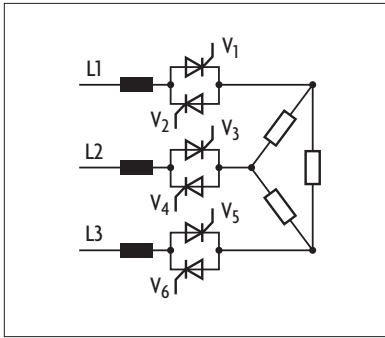


Bild 3. Typisches Drei-Phasen-Netz, bei dem jeder Außenleiter jeweils zwei Lasten versorgt.

Theoretisch geht der Spannungseinbruch bei unendlich steiler Schaltflanke tatsächlich bis auf 0 V. In der Praxis sind die Schaltflanken endlich steil und verschiedene Kapazitäten stützen die Spannung im Schaltschrank, so dass sich in etwa ein Spannungseinbruch von 1/2 bis 1/3 einstellt. Warum sind Spannungseinbrüche so tragisch, wenn sie in der Praxis doch nie bis auf 0 V gehen?

Verkettung im Drei-Phasen-Netz

In einem typischen Drei-Phasen-Netz versorgt jeder Außenleiter L1, L2 und L3 jeweils zwei Lasten (**Bild 3**). Der Zeitpunkt t_{21+} in **Bild 4** markiert für L2-L1 einen Nulldurchgang. Nach der Zeitverzögerung φ werden die Thyristoren V_3 und V_2 gezündet. Dies führt in L1 und L2 zu einem Spannungseinbruch. Dieser Spannungseinbruch ist für die Phasenbeziehung L2-L1 unkritisch, zumal die Spannung, wie in **Bild 4**, links, dargestellt, lediglich um ca. 30 % eingebrochen ist. Kurz nach

dem Zündzeitpunkt ereignet sich der Nulldurchgang zwischen L2 und L3 (t_{32+}).

Wäre der Strom größer oder die Zuleitung länger gewesen, hätten sich tiefere und längere Spannungseinbrüche ausgebildet. Wie in **Bild 4**, rechts, deutlich zu sehen ist, ist die Phasenbeziehung L1 nach L2 noch eindeutig, während der Einbruch auf L2 den momentanen Spannungsverlauf von L3 deutlich unterschneidet. An der Stelle $t_{32+ Phantom}$ entsteht ein Phantom-Nulldurchgang und an der Stelle t_{32+} ein echter Nulldurchgang. Dies führt in der Regel zum Kippen des Stellers oder zumindest zum Flackern.

Im rechten Beispiel sind nur die Einbrüche und die Folgen von zwei Zündvorgängen abgebildet. In einem W3-Steller wird aber je Vollwelle sechs Mal gezündet, wodurch sich auf den drei Außenleitern insgesamt zwölf Einbrüche ergeben. Typischerweise ereignen sich die Einbrüche alle zum gleichen relevanten Zeitpunkt. Wenn ein Einbruch zu einem Phantom-Nulldurchgang führt, dann führen alle zwölf Einbrüche zu einem Phantom-Nulldurchgang, da alle Ströme, Leitungslängen und Zündverzögerungen in etwa gleich sind.

Negative Spannungseinbrüche sind also vor allem in dreiphasigen Netzen von Bedeutung, wo schon ein Spannungseinbruch <100 % zu Phantom-Nulldurchgängen führen kann.

Möglichkeiten der Kompensation

Werden in einer Anlage sehr viele W1-Steller verbaut, ist je nach Einbausitua-

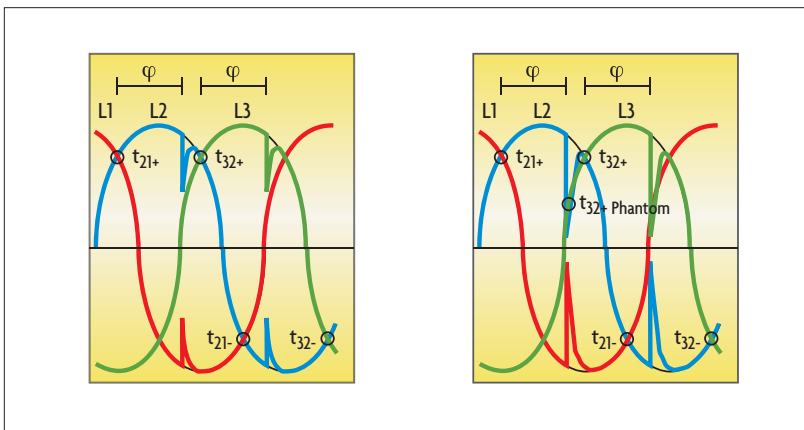


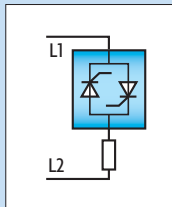
Bild 4. Spannungseinbrüche können zu Phantom-Nulldurchgängen führen.

Stellprinzipien im Überblick

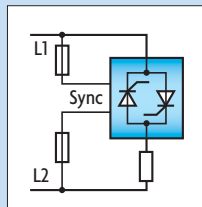
Die gängigsten Prinzipien zur Leistungsstellung sind der einfache W1-Steller mit und ohne Fremdsynchronisation sowie der W3-Steller.

W1-Steller – die einfachste Lösung

W1-Steller (Bild A) finden vorwiegend Einsatz bei Lasten bis zu 16 kW. Einer oder wenige Steller verursachen in der Regel keine nennenswerten Spannungseinbrüche. Die Nullpunktsynchronisation leitet der Steller in der Regel aus der Klemmenspannung der Thyristoren selbst ab. Daher benötigt er keine Fremdsynchronisation und ist somit die preiswerteste Art der Leistungsstellung. Für Lasten mit kapazi-



! Bild A. W1-Steller als einfachste Lösung.



! Bild B. W1-Steller mit Fremdsynchronisation.

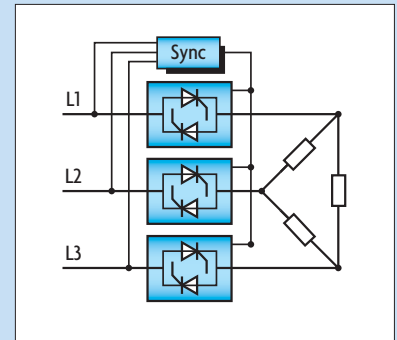
tiven oder induktiven Anteilen ist dieser Steller in der Regel nicht geeignet. Für 230-V(AC)-Anwendungen (L1 gegen N) ist die Beeinflussbarkeit durch Zündvorgänge auf anderen Phasen recht gering. Für 400-V(AC)-Anwendungen (L gegen L) ist die Beeinflussbarkeit hingegen voll ausgeprägt.

W1-Steller mit Fremdsynchronisation

Prinzipiell sind die Randbedingungen für fremdsynchronisierte Steller (Bild B) die gleichen wie für eigensynchronisierte. Die Fremdsynchronisation verbessert lediglich das Verhalten bei kapazitiven oder induktiven Lasten.

W3-Steller mit aufwendiger Nulldurchgangserkennung

W3-Steller (Bild C) werden normalerweise bei Lasten bis 300 kW eingesetzt. Sie bieten in der Regel eine integrierte Nulldurchgangserkennung für jede Phasenbeziehung. Die durch die hohen Ströme stark erhöhten Entstehungskosten gestatten es außerdem, für die Null-



! Bild C. W3-Steller verfügen häufig über eine aufwendige Nulldurchgangserkennung.

durchgangserkennung einen erheblich größeren Aufwand zu treiben. So wird in der Regel nicht mehr nur die Spannungsdifferenz zwischen den Phasen als Kriterium für einen Nulldurchgang herangezogen, sondern der Nulldurchgang mittels hochintelligenter, meist software-basierter Filter aus den aktuellen Netzsituationen herausgerechnet bzw. rekonstruiert. Ein solcher Aufwand ist bei den kleinen W1-Brüdern in der Regel nicht vertretbar.

tion schnell die Möglichkeit einer gegenseitigen Beeinflussung durch Zündungen gegeben. Besonders dann, wenn alle Steller zum gleichen Zeitpunkt zünden, addieren sich alle eigentlich kleinen Einbrüche zu einem großen.

Die Leitungsinduktivitäten können am einfachsten durch Kondensatoren kompensiert werden (Bild 5 und **Kasten** „Dimensionierung von Kondensatoren zur Kompensation“. Die Kon-

densatoren sollen keine Blindstromkompensation bewirken, sondern lediglich den Spannungseinbruch zurückschützen. Eine Blindstromkompensation durch Kondensatoren ist bei Phasenanschnitt in der Regel nicht möglich. Phasenanschnitt würde eine aktive Kompensation erfordern, welche je nach Zündwinkel die verschiedenen Oberwellen und deren Phasenlage einzeln kompensiert. Der Auf-

wand einer aktiven Kompensation ist meist erheblich größer als der, den die Steller verursachen, und kommt deshalb meist nicht in Betracht.

Ein Stützen durch Kondensatoren führt meist zum gewünschten Resultat. Dabei ist bei der Auswahl der Kondensatoren folgendes unbedingt zu berücksichtigen:

- ▶ Die Kondensatoren sollen an der Einspeisestelle hinter dem Haupt-

Dimensionierung von Kondensatoren zur Kompensation

Zur Dimensionierung der Kompensations-Kondensatoren dient folgende Faustregel:

$$\text{Kondensatorleistung [kVar]} = (\text{Phasenstrom [kA]} \times \text{Leitungslänge [m]})/4$$

Beispiel:

Eine Anlage mit einer Nennleistung vom 1000 kW und 400 V stellt insgesamt 700 kW per Phasenanschnitt bereit und ist über eine Leitung von 200 m versorgt. 700 kW ergeben ca. 1000 A Phasenstrom.

$$\text{Kondensatorleistung} = (1 \text{ kA} \times 200 \text{ m})/4 = 50 \text{ kVar}$$

Dieser Wert kann nur eine Abschätzung sein und muss unbedingt mit eigenen Erfahrungen und Kontrollmessungen abgeglichen werden. Insbesondere die Art und die Verlegung der Zuleitung beeinflussen noch die benötigte Kondensatorleistung:

- ▶ Das Verlegen von Zuleitungen mit größerem Querschnitt führt zu kleineren induktiven und resistiven Einbrüchen.

- ▶ Das Verlegen von mehrfach parallelen Einzeleleitern je Strang (Beispiel 4x 240 mm²) führt zu massiven Stromverdrängungseffekten in einzelnen Leitern, wenn die Leitungen über längere Strecken hinweg stur parallel verlegt werden. Die Lage der Einzeladern sollte öfters gewechselt werden. Der Kabelhersteller kann hierzu beraten.
- ▶ Das Verlegen von drei Strängen L1, L2 und L3 in paralleler Anordnung führt zu einer doppelt so hohen Induktivität wie das Verlegen in dreieckiger Anordnung.

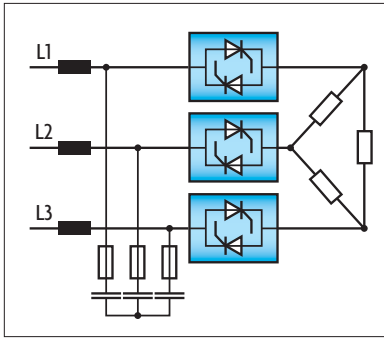


Bild 5. Kompensation der Spannungseinbrüche durch Kondensatoren.

schalter angeschlossen und montiert werden.

- ▶ Der Hauptschalter kann durch die Kondensatoren zerstört werden (hoher Stromstoß beim Einschalten).
- ▶ Daher sollen die Kondensatoren erst einige Sekunden nach dem Einschalten des Hauptschalters per Schütz zugeschaltet werden.
- ▶ Das Zusatzschütz muss zum Schalten von Kondensatoren geeignet sein (voreilende Wolframkontakte o.ä.).
- ▶ Die Kondensatoren müssen mit geeigneten Sicherungen abgesichert werden.
- ▶ Die Kondensatoren müssen mit ca. 7 % verdrosselt sein. Ansonsten würde die repetierende Flankensteilheit eines Phasenanschnitts die Kondensatoren überlasten.
- ▶ Die Kondensatoren müssen selbstheilend sein.
- ▶ Die Kondensatoren müssen mit einem Entladewiderstand ausgestattet sein. Wenn die Entladung länger als fünf Sekunden dauert, muss dies mit einem Hinweisschild gekennzeichnet werden.

Die so installierten Kondensatoren dienen hier vorwiegend zum Stützen der Versorgungsspannung. Insgesamt gesehen, stellen sie natürlich eine Blindleistungskompensation dar. Dieser zusätzliche Blindstrom geht nicht verloren. In der Regel fährt die zentrale Kompensationsanlage die Blindleistung um diesen Betrag zurück.

Nulldurchgangsbestimmung per Software-Berechnung

Das Stellen von Leistung im Phasenanschnitt ist auf den ersten Blick sehr einfach. Im Normalfall genügt eine klassische Auslegung auch den Erfordernissen. Sobald aber viele Steller gleichzeitig oder Steller mit hohen Lasten gefahren werden, treten unerwünschte Effekte auf. Verursacht werden diese durch Leitungsinduktivitäten

und daraus resultierende Spannungseinbrüche, was wiederum zu Phantom-Nulldurchgängen und damit zu massiven Problemen in der Steuerung des Prozesses und damit auch der Prozessqualität führt.

Diese negativen Effekte lassen sich einerseits über eine Kompensation mit Kondensatoren und andererseits über in den Leistungsstellern integrierte Mechanismen in den Griff bekommen. Dabei wird in der Regel nicht mehr

nur die Spannungsdifferenz zwischen den Phasen als Kriterium für einen Nulldurchgang herangezogen, sondern der Nulldurchgang durch hochintegrierte, meist software-basierte Filter aus den aktuellen Netzsituationen herausgerechnet bzw. rekonstruiert – ein Aufwand, der sich erst bei Leistungsstellern der oberen Leistungsklasse rechtfertigen lässt.

Die Leistungssteller der PS-Serie von Systemtechnik Leber (bis 300 kW, **Bild 6**) kompensieren diese unerwünschten Effekte. Darüber hinaus wird den Kunden Unterstützung bei der Implementierung von Kompensationsmaßnahmen gegeben. Eine elegante Lösung ist der Schritt vom Phasenanschnitt zum Sinusstellen. Damit vermeidet man einen Großteil der Probleme und erreicht eine auch unter EMV-Gesichtspunkten ideale Lösung.

gs



I Bild 6. Die Leistungssteller der PS-Serie von Systemtechnik Leber sind bis zu 300 kW Leistung einsetzbar.

Internet

[1] Homepage: www.powercontact.de/



**Dipl.-Kfm.
Olaf Kammerer**

ist gebürtiger Stuttgarter und wuchs in Nürnberg auf. Er studierte Internationale Betriebswirtschaft in Nürnberg und Valencia/Spanien. Nach ersten Berufserfahrungen im Investment Banking (Mergers & Acquisitions) ist er seit 2006 verantwortlich für den Bereich Marketing und Business Development bei Systemtechnik Leber.

okammerer@powercontact.de