

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 90 (1999)

**Heft:** 15

**Artikel:** Höhere Stromqualität in Verteilungsnetzen : Anwendungen der Leistungselektronik

**Autor:** Weinhold, Michael

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-901964>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 30.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Höhere Stromqualität in Verteilungsnetzen

## Anwendungen der Leistungselektronik

Die Qualität der elektrischen Energieversorgung, insbesondere die Spannungsqualität, spielt in vielen Industrieprozessen eine entscheidende Rolle. Kurzzeitige Spannungseinbrüche als Folge von Netzfehlern können zum Abschalten elektrischer Antriebe oder Rechner führen und damit kostspielige Betriebsunterbrechungen verursachen. In einer zunehmenden Anzahl von Fällen können herkömmliche Einrichtungen wie passive Filter nicht eingesetzt werden. In diesem Artikel werden die wichtigsten Probleme der Spannungsqualität in Netzen und deren Lösung mit einem auf moderner Leistungselektronik basierendem Gerät beschrieben.

Die zunehmende Anzahl von elektronischen Geräten hat eine tiefgreifende Auswirkung auf die Qualität der elektrischen Energieversorgung. Sowohl Industrielasten (z.B. Frequenzumrichter für drehzahlveränderbare Antriebe) und Verbraucher im Haushalt (z.B. Fernsehgeräte) verursachen Oberwellen in der Netzspannung. Darüber hinaus bewirken herkömmliche Verbraucher (z.B. grosse Lichtbogenöfen) und zweiphasige Verbraucher (z.B. Schweißmaschinen) Spannungsschwankungen, Spannungsasymmetrien und Flicker.

Gleichzeitig sind viele Geräte, welche die Störungen verursachen, gegenüber Abweichungen von der idealen sinusförmigen Netzspannung recht empfindlich. Daher können durch mangelnde Spannungsqualität hervorgerufene Probleme (international unter dem Sammelbegriff Power Quality zusammengefasst) ihren Ursprung im Netz haben, oder sie können vom Verbraucher selbst verursacht werden (Bild 1).

Bei einer zunehmenden Anzahl von Anwendungen erweisen sich herkömmliche Einrichtungen gegen Einbussen der Spannungsqualität als nicht ausreichend. Nichtlineare Verzerrungen wurden zum Beispiel herkömmlicherweise an der Quelle durch Einsatz passiver LC- oder LCR-Filterbatterien beseitigt. Der Einsatz passiver Filter für das Dämpfen von

Oberwellen kann jedoch zu Parallelresonanzen mit der Netzimpedanz führen. Ausserdem wird die Blindleistungspeisung passiver Filter nicht benötigt, wenn vorwiegend Diodengleichrichter mit kapazitiver Glättung verwendet werden. Der Einsatz eines parallel geschalteten Power Conditioners, der als aktives Oberwellenfilter arbeitet, kann diese Schwierigkeiten vermeiden und lässt sich darüber hinaus flexibler einsetzen. Für die Kompensation von Spannungseinbrüchen, die zum Beispiel durch Blitzeinschläge entstehen, können in Reihenschaltung angeschlossene Power Conditioner eine wirtschaftlichere Alternative als USV-Anlagen (Unterbrechungsfreie Stromversorgungen) sein.

Der vorliegende Aufsatz behandelt zunächst die Ursachen der Spannungsverzerrungen. Anschliessend werden Lösungen für das Verbessern der Spannungsqualität beschrieben, die auf dem Siemens Power Conditioner (Sipcon) basieren.

### Spannungsqualität

#### Spannungsqualität und Zuverlässigkeit

Die Qualität der Stromversorgung wird durch die Spannungsqualität und die Versorgungszuverlässigkeit bestimmt.

Unter einer idealen Versorgungsspannung ist ein rein sinusförmiger Verlauf mit der Grundfrequenz zu verstehen. Jede Abweichung von diesem Ideal kann ein verschlechtertes Lastverhalten zur Folge haben. Typische Probleme sind im folgenden Abschnitt «Probleme der Span-

nungsqualität» aufgelistet. Die Abweichungen können innerhalb der Kundenanlage oder im Übertragungs- und Verteilernetz entstehen.

Die Zuverlässigkeit der Versorgung ist durch ihre Fähigkeit gekennzeichnet, eine Last zu speisen; ferner durch die Sicherheit (Fähigkeit, plötzlichen Störungen wie Netzkurzschlüssen standzuhalten) und das Mass ihrer Verfügbarkeit (mit besonderer Beachtung von langen Unterbrechungen). Es werden weltweit verschiedene Indizes zur Bewertung benutzt. Beispielsweise bildet man einen Index für die mittlere Unterbrechungshäufigkeit und die mittlere Unterbrechungsdauer.

Nachstehend werden die häufigsten Probleme der Spannungsqualität beschrieben.

#### Probleme der Spannungsqualität

**Langsame Spannungsschwankungen.** Aufgrund wechselnder Netz-Belastungszustände im Verlauf eines Tages kann sich die Amplitude der Netzspannung ändern. Die Versorgungsunternehmen wirken diesen Schwankungen beispielsweise durch den Einsatz von Transformator-Stufenschaltern entgegen. Die Ergebnisse vieler Industrieprozesse hängen von der Spannungsqualität ab. Die Güte einer Schweißnaht kann zum Beispiel durch mangelnde Spannungsqualität während des Schweißprozesses beträchtlich leiden.

**Spannungsschwankungen und Flicker.** Sie verursachen unangenehme Änderungen der Beleuchtung im Bereich von 10 bis 20 Hz oder Störungen im Betrieb spannungsempfindlicher Geräte, zum Beispiel Computer. Spannungsschwankungen entstehen durch das Schalten

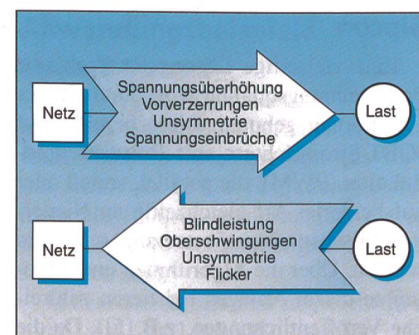


Bild 1 Ursachen von Spannungsqualitätsproblemen

#### Adresse des Autors

Dr. Michael Weinhold, Siemens AG, EV  
NP4, Postfach 3220, D-91050 Erlangen  
michael.weinhold@erls04.siemens.de

oder Ändern von Verbrauchern (wie Lichtbogenöfen, Kondensatorenbatterien), die im Vergleich zu der Kurzschlussleistung am Standort des Verbrauchers gross sind.

**Oberwellen.** Der Anteil an Verzerrungen in Verteilungsnetzen nimmt aufgrund der zunehmenden Anzahl leistungselektronischer Einrichtungen mit geringer Pulszahl (z.B. Fernsehgeräte) zu. Bei Industrieverbrauchern können aufgrund der vielfach eingesetzten Frequenzumrichter mit 6pulsiger Diodenbrücke insbesondere die 5. und 7., aber auch die 11. und 13. Oberwelle höhere Werte erreichen.

**Spannungseinbrüche und Versorgungsunterbrechungen.** Wenn in einem Netz ein Kurzschluss auftritt, häufig infolge eines Blitzeinschlags, fällt die Spannung beim Kunden in einer oder mehreren Phasen unter ihren Nennwert ab. Spannungseinbrüche bis herab zu 70% Restspannung sind wesentlich häufiger als Totalausfälle [1, 2]. Einbrüche oder vollständige Unterbrechungen dauern von einigen 100 ms bis zu Sekunden oder sogar länger. Die Unterbrechungsdauer hängt vom Netzaufbau und vom Schutzkonzept ab. Der Schaden, den ein einzelner Spannungseinbruch verursacht, kann recht beträchtlich sein, da durch Einsatz empfindlicher Geräte in weit querverzweigten und automatisierten Prozessen und durch den Einsatz von SPS (Speicherprogrammierbare Steuerungen) eine ganze Anlage ausfallen kann. Die CBEMA-Kurve [3] zeigt, wie empfindlich Computer gegen Abweichungen der Netzspannung von ihrem Nennwert sind. Wegen der hohen wirtschaftlichen Verluste sind Spannungseinbrüche das schwerwiegendste Problem der Spannungsqualität (siehe auch [4]).

**Unsymmetrie der Spannung.** Ursachen für die Unsymmetrie der Versorgungsspannungen sind einphasige Verbraucher, die ungleichmässig auf die drei Phasen verteilt sind. Diese Unsymmetrie kann zum Beispiel nachteilige Auswirkungen auf die Funktion von Umrichtern haben.

## Sipcon

Eine vielseitige Lösung für Probleme der Spannungsqualität wird durch Power Conditioner geboten. Diese beruhen auf IGBT-Stromrichtern mit Pulsweitenmodulation (PWM), die parallel, seriell oder auf beiderlei Art gleichzeitig an Nieder- und Mittelspannungsnetze angeschlossen werden. Über die Algorithmen und Topologien dieser Anlagen existieren zahlreiche Veröffentlichungen (z.B. [5]). Da die Topologien dieser Geräte den Topologien von Facts-Geräten für Übertragungsnetze

ähneln, werden Power Conditioner auch als Verteilungs-Facts-Geräte (D-Facts) bezeichnet. Der Power Conditioner Sipcon von Siemens ist für Niederspannungsnetze (LV-Netze) und Mittelspannungsnetze (MV-Netze) lieferbar.

Die Auswahl von Einrichtungen für das Verbessern der Spannungsqualität hängt, wie aus Bild 2 ersichtlich, von der Problemquelle ab. Im Fall einer LV-Anwendung beruht die Sipcon-Einrichtung auf den Standard-IGBT-Antriebsumrichtern Simovert Masterdrives, die in hohen Stückzahlen hergestellt werden. Wie aus Bild 2 hervorgeht, ist der in Reihenschaltung angeschlossene Power Conditioner Sipcon DVR am besten geeignet, um den Verbraucher vor einer mangelhaften Qualität der Versorgungsspannung zu schützen. Wenn angestrebt wird, die Netzstörungen durch verzerrte Lastströme zu verringern, dann ist der parallel angeschlossene von Sipcon D-Statcom besser geeignet. Es ist auch möglich, Energiespeicher wie chemische Batterien, Schwungmassenspeicher oder SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) über Sipcon an das Netz anzukoppeln. Energiespeicher müssen an den Gleichspannungskondensator angeschlossen werden.

Im Vergleich zu herkömmlichen Mitteln bieten Power Conditioner ein sehr schnelles Regelverhalten und weitergehende Flexibilität bei der Festlegung der für eine bestimmte Anwendung erforderlichen Regelaufgaben. Das Funktionsprinzip und die Leistungsfähigkeit von Power Conditioner werden im folgenden eingehender erläutert. Bild 3a zeigt die prinzipielle Schaltung einer Sipcon-D-Statcom-Anlage für Niederspannung (in Mittelspannungsnetzen wird ein Kuppeltransformator benötigt); Bild 3b zeigt

eine Sipcon-DVR-Anlage für Niederspannung (in Mittelspannungsnetzen wird anstelle des parallel angeschlossenen Diodengleichrichters eine Kondensatorbatterie verwendet).

Weltweit bestehen bereits zahlreiche Installationen von Sipcon in Niederspannungs- und Mittelspannungsnetzen.

## Sipcon D-Statcom

Die Ankoppelung von Sipcon D-Statcom ist dreiphasig und parallel zum Verbraucher. D-Statcom speist *Ströme* in den PCC (Point of Common Coupling = Verknüpfungspunkt) ein. Der eingespeiste Strom kompensiert unerwünschte Anteile des Verbraucherstromes. Es sind zwei Betriebsarten möglich: Standardbetrieb und Flickerbetrieb.

**Standardbetrieb.** Diese Betriebsart ist durch vier unterschiedliche Regelaufgaben gekennzeichnet. Der Kunde kann eine Prioritätenliste festlegen, durch die die wichtigsten Regelaufgaben für die vorliegende Anwendung definiert sind. Im Standardmodus kann D-Statcom folgende vier Aufgaben gleichzeitig ausführen:

**Aktive Oberwellenfilterung.** Der vom Verbraucher in das Netz fließende Strom wird gemessen und in die Anteile der Grundwelle und der Oberwellen aufgeteilt. Der Power Conditioner speist Ströme derart ein, dass die unerwünschten Oberwellenströme ausschliesslich mit dem Verbraucher ausgetauscht werden und daher nicht in das Netz fließen.

Im Gegensatz zu einer breitbandigen Oberwellenunterdrückung filtert der Power Conditioner bestimmte einzelne Oberwellen (zum Beispiel die fünfte und siebte) aus. Es können bis zu vier einzelne Oberwellen gleichzeitig gefiltert werden. Die höchste auf diese Weise er-

	Sipcon D-Statcom	Sipcon DVR
Ursache der Probleme		
	Oberschwingungsfilterung Blindleistungskompensation Lastsymmetrieren Flicker-Reduzierung	
		Spannungseinbrüche und -überhöhung Oberschwingungsblockierung Spannungssymmetrieren

Bild 2 Anwendungsgebiete und bevorzugte Sipcon-Typen zur Problemlösung

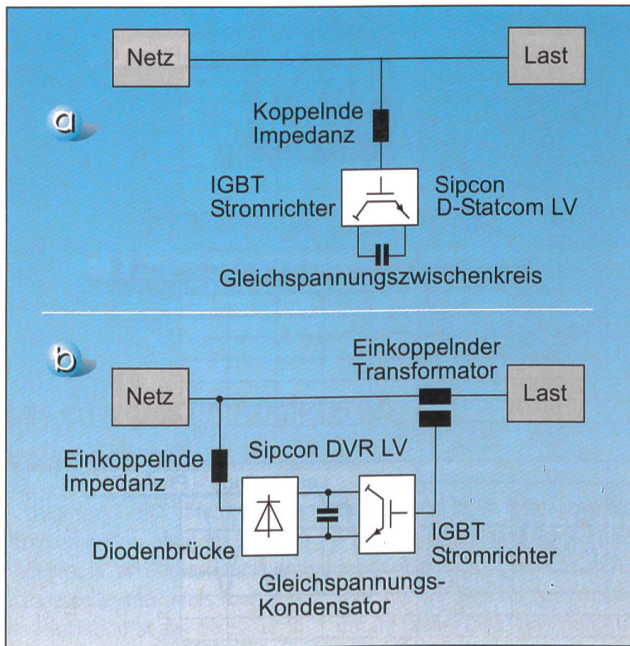


Bild 3 a: Sipcon D-Statcom LV, b: Sipcon DVR LV

ströme zur Verfügung stehen. Der Sipcon-Flicker-Regler weist eine Stromregelung mit einer Ansprechzeit von weniger als einer Halbperiode auf und besitzt damit die Fähigkeit, Schwankungen des Laststromes mit hoher dynamischer Leistungsfähigkeit auszugleichen.

*Nenndaten.* Der Sipcon D-Statcom LV ist mit Nennleistungen von 72 kVA bis 2000 kVA lieferbar, der Sipcon D-Statcom MV für 2 MVA bis 10 MVA und darüber.

**Sipcon DVR**

Wie vorstehend erläutert, verringert die Mehrzahl der Spannungseinbrüche die Versorgungsspannung in einer oder an mehreren Phasen um nicht mehr als 30%. Sipcon DVR stellt in solchen Fällen eine wirtschaftlich interessante Alternative zur USV dar, da keine Energiespeicherung (Batterie) erforderlich ist und die Gesamt-Nennleistung der Einzelteile geringer dimensioniert werden kann.

Sipcon DVR speist eine Spannung in Reihe mit der Versorgungsspannung ein und kann daher als geregelte Spannungsquelle betrachtet werden, welche Spannungseinbrüche und Spannungsüberhöhungen auf der Verbraucherseite ausgleicht. Die Ausregelzeit liegt in der Größenordnung von 3 ms und gewährleistet bei Ausgleichsvorgängen im Netz eine sichere Spannungsversorgung.

Das Einspeisen von Spannung mit gegenüber dem Laststrom beliebiger Phasenlage bedeutet im allgemeinen Wirkleistungsübertragung. Diese Wirkleistung wird über den Gleichspannungszwischenkreis übertragen und entweder von einer an das Drehstromnetz angeschlossenen Diodenbrücke (Bild 3), von einem IGBT-Stromrichter oder von einem Energiespeicher (z.B. Kondensatorenbatterie) geliefert.

Es ist möglich, gleichzeitig Mit- und Gegensystem-Spannungen zu erzeugen. Aus diesem Grunde kann Sipcon DVR auch unsymmetrische Spannungseinbrüche ausgleichen.

**Anwendungsbeispiele**

**Sipcon D-Statcom**

Eine Sipcon-D-Statcom-MV-Anlage in einem Steinbruch befindet sich am Ende einer Speiseleitung von 12,47 kV mit mehr als 18 km Freileitungen und mehr als 1000 anderen Kunden, die an das gleiche Mittelspannungsnetz angeschlossen sind.

In dem Steinbruch sind zahlreiche Motoren von 300–400 kW installiert. An einem normalen Arbeitstag traten infolge der Motorenanläufe und der Gesteins-

reichbare Oberwelle ist die dreizehnte. Da nur die problematischen Oberwellen gefiltert werden, wird die Nennleistung des Power Conditioner auf wirtschaftliche Weise ausgenutzt.

*Blindleistungskompensation.* Der Power Conditioner kann dynamisch und stufenlos sowohl kapazitive als auch induktive Blindleistung liefern. In dieser Betriebsart ist auch eine Leistungsregelung (cos  $\phi$ -Regelung) möglich.

*Dynamische Lastsymmetrierung.* Ströme des Mitsystems wie auch des Gegen-

systems können in den PCC eingespeist werden. Auf diese Weise ist eine dynamische Belastungssymmetrierung möglich.

*Wirkleistungsübertragung.* Ein Energiespeicher, der an den Gleichspannungskondensator angeschlossen ist, ermöglicht einen Energieaustausch mit dem Netz. Derartige Anlagen befinden sich bereits in Betrieb.

*Flicker-Betrieb.* Im allgemeinen muss für das Verringern des Flickers eine Einrichtung hoher Dynamik für das Kompensieren schwankender Verbraucher-

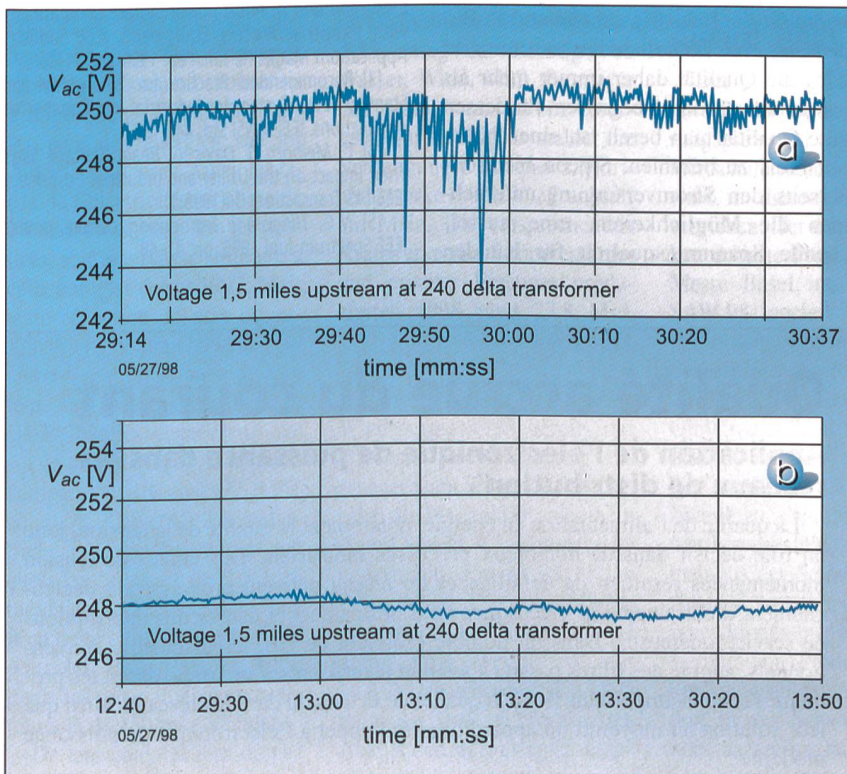


Bild 4 Spannung ohne und mit Sipcon D-Statcom MV (siehe Text)

brechvorgänge Spannungsschwankungen von bis zu 12% auf.

Die gemessene Spannung an einer parallelen Niederspannungs-Speiseleitung ist in Bild 4 dargestellt. Die obere Kurve zeigt die Spannung ohne Sipcon D-Statcom MV: sie weist hohe dynamische Schwankungen auf. Nach Einbau des Sipcon D-Statcom MV mit Spannungsregelaufgaben und einer Nennleistung von 0 bis +4 MVA (kapazitiv) wurde die Spannung stabilisiert, wie in Bild 4 unten ersichtlich. Es treten keine hohen dynamischen Spannungseinbrüche mehr auf.

Der Sipcon D-Statcom MV ist in Schritten von 2 MVA für Nennleistungen bis 10 MVA und darüber lieferbar.

### Sipcon DVR

Diesen Sipcon-Typ gibt es ebenfalls für Niederspannungs- und Mittelspannungsnetze.

Bild 5 zeigt einen Sipcon DVR MV mit einer Nennleistung von 2 MVA, der auf einem Anhänger montiert ist. Derartige Einheiten sind seit 1996 in vier verschiedenen Ländern mit Erfolg im Ein-



Bild 5 Mobiler 2 MVA Sipcon DVR

satz. Der Sipcon DVR MV verwendet als Energiespeicher eine Kondensatorbatterie. Während eines Spannungseinbruchs wird die benötigte Energie von den Kondensatoren geliefert. Die Dauer eines Einbruchs, den ein Sipcon DVR MV überbrücken kann, hängt vom Gesamtenergieverbrauch der Last und von der Tiefe des Einbruchs ab. Der Betrag des Einbruchs, den der Sipcon DVR MV kompensieren kann, hängt von der gewählten Anordnung der Transformatorwicklungen ab.

Bild 6 (obere Kurve) zeigt die von der 12,47-kV-Speiseleitung an die Anlage gelieferte Spannung. Der Spannungseinbruch weist eine Tiefe von 78% auf, so dass nur noch 22% der Nennspannung an den Verbraucher geliefert werden. Der Power Conditioner wurde in diesem Beispiel für das Kompensieren eines Einbruchs von maximal 50% der Nennspannung ausgelegt. Daher kann er nur 50%

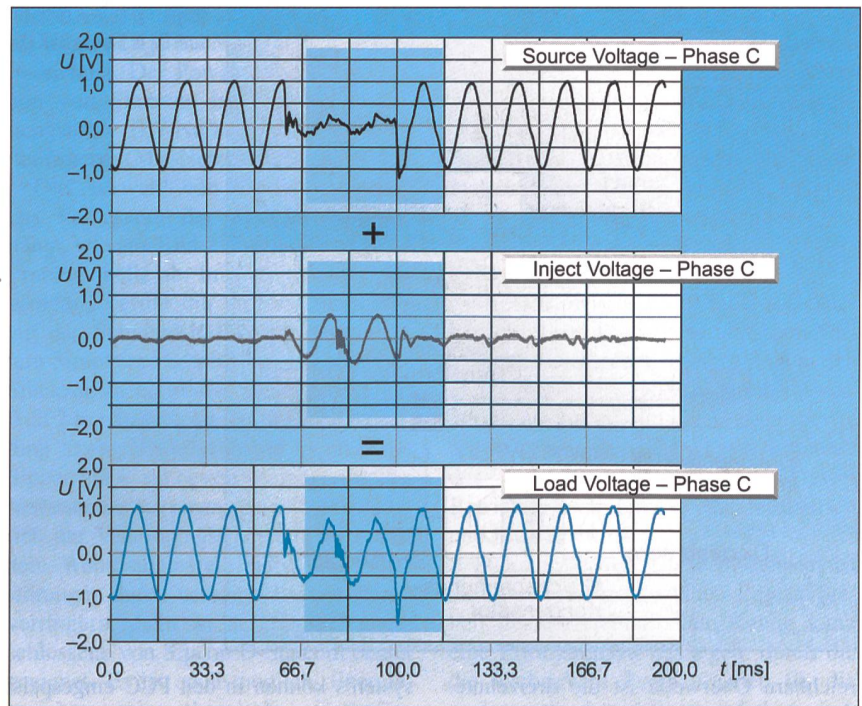


Bild 6 Kompensation eines Spannungseinbruchs durch einen 4 MVA Sipcon DVR MV in einer Papierfabrik

der Nennspannung einspeisen (mittlere Kurve). Das genügte jedoch, um die Verbraucherspannung von 22% auf etwa 75% zu erhöhen, und verhinderte ein unbeabsichtigtes Abschalten der angeschlossenen Anlage.

### Schlussfolgerung

Die Qualität der Netzspannung gewinnt für die Industrie zunehmend an Bedeutung. Im liberalisierten Strommarkt wird die Qualität daher immer mehr als handelbares Produkt begriffen, für dessen gute Qualität man bereit ist, einen höheren Preis zu bezahlen. Sipcon bietet einerseits den Stromversorgungsunternehmen die Möglichkeiten, eine ausreichende Spannungsqualität für Kunden

bereitzustellen, und andererseits den Kunden die Möglichkeit, innerhalb ihres Betriebs die geeignete Spannungsqualität selbst herzustellen.

### Literatur

- [1] EPRI Distribution Power Quality Project, EPRI RF3098-01.
- [2] V. Wagner, T. Grebe, R. Kretschmann, L. Morgan und A. Price: Power System Compatibility with Industrial Process Equipment. IEEE Industry Applications Magazine Jan./Feb. 1996, pp. 11-15.
- [3] Recommended Practice for Emergency and Standby Power System for Industrial and Commercial Applications. IEEE/ANSI Std. 446-1987.
- [4] C. Melhorn, T. Davis, G. Beam: Voltage Sags: Their Impact on the Utility and Industrial Customers. IEEE IAS Transactions 34(1998)3.
- [5] N.G. Hingorani: Introducing custom power. IEEE Spectrum Juni 1995, pp. 41-48

## Qualité accrue du courant

### Application de l'électronique de puissance dans les réseaux de distribution

La qualité de l'alimentation en énergie, notamment la qualité de la tension, joue un rôle décisif dans de nombreux processus industriels. Des chutes de tension momentanées résultant de défaillances du réseau peuvent provoquer le déclenchement d'entraînements électriques ou d'ordinateurs et causer des interruptions de service onéreuses. Dans un nombre croissant de cas, les dispositifs conventionnels comme des filtres passifs s'avèrent insuffisants. Cet article décrit les problèmes les plus importants liés à la qualité de la tension dans les réseaux, ainsi que leur solution au moyen d'un appareil qui fait appel à l'électronique de puissance moderne.