

Handbuch der Blindleistungs-Kompensation

Peter Riese



Information • Tabellen • Formeln
 Alles zum Thema Blindleistungs-Kompensation
 für Planer und Anwender

FRAKO Blindleistung-Kompensationsanlagen bieten einen wesentliche Beitrag zur Energieeffizienz und zur Reduzierung des CO₂-Ausstosses und sind somit in einer modernen elektrischen Energieversorgung unverzichtbar.

Kompensationsanlagen amortisieren sich bei den heute üblichen EVU-Tarifen in weniger als ein bis drei Jahren. Nach dieser Zeit erwirtschaftet eine Kompensationsanlage Monat für Monat Gewinn für Ihr Unternehmen und Ihre Energiebilanz. Deswegen ist es besonders wirtschaftlich, wenn Kompensationsanlagen eine lange Lebenserwartung haben. Je länger sie arbeiten umso größer der Ertrag für Ihr Unternehmen! **FRAKO** Kompensationsanlagen – und insbesondere die dort eingesetzten Leistungs-Kondensatoren – zeichnen sich besonders durch eine langjährige Nutzbarkeit aus.

FRAKO Leistungs-Kondensatoren beinhalten eine dreifache Sicherheit:

- Selbstheilende Kondensatorfolie zum Schutz gegen Spannungsspitzen
- Segmentierte Kondensatorfolie für höchste Betriebssicherheit
- Überdruck-Abreißsicherung schaltet bei starker Überlastung oder am Ende der Lebensdauer den Kondensator sicher vom Netz.

Die Belastung unserer öffentlichen Netze mit Oberschwingungen steigt stetig an. Ein wesentlicher Grund hierfür sind die vielen getakteten Netzgeräte in PC, TV, EVG und ähnlichen Geräten. Unsere Ingenieure beurteilen auf der Basis jahrzehntelanger Erfahrungen mit Netzmesungen und der Projektierung von Kompensationsanlagen im schwierigen Umfeld, gerne auch die in Ihrem Unternehmen spezifische Situation. Sie treffen die Auswahl für eine Blindleistung-Kompensationsanlage, die Ihren Bedingungen vor Ort entspricht. Dabei hilft die enorme Belastbarkeit unserer Leistungs-Kondensatoren.

- Überstrom: bis zum 2,7-fachen Nennstrom dauernd belastbar
- Einschaltstromspitzen: bis zum 450-fachen Nennstrom
- Umgebungstemperatur: bis zu 65°C
- Lebensdauer: bis zu 200.000 Stunden
- bis zu 100.000 Schaltspiele pro Jahr.

FRAKO ist nach den Normen ISO 9001, ISO 14001 und ISO 50001 zertifiziert. Die Qualität der hergestellten Produkte wird seit vielen Jahren in der Fertigung und im Feld registriert und dokumentiert. Dabei werden spezielle **FRAKO**-Produktnormen – die deutlich höhere Forderungen beinhalten als der Standard nach EN 60831 – zur Qualitätsbeurteilung angewendet. Nur auf diesem Wege kann ein Hersteller permanent höchste Qualität versprechen. Bei der Herstellung unserer Produkte aber auch bei deren Lebensende achten wir insbesondere auf Ressourcenschonung, Energieeffizienz und Umweltschutz.

Unsere Produktqualität und unser Anwendungs-Know-How sind die Basis für den optimalen Nutzen unserer Produkte bei unseren Kunden. Mit dem vorliegenden Handbuch für den interessierten Leser möchten wir die technischen Grundlagen, unsere Herstellungs-Philosophie und unsere Motive dokumentieren. Es soll das Basiswissen für die Auswahl, Installation und Anwendung unserer Blindleistung-Kompensationsanlagen vermitteln.

Teningen im März 2012



Peter Herbst, Geschäftsführer der
FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH

// Inhalt

Grundlagen	4
Wirkleistung/Wirk- und Blindleistung	4
Blindleistung/Scheinleistung/Leistungsfaktor ($\cos \varphi$)	5
Warum wird kompensiert?	6
Kompensationsarten	7
Einzelkompensation	7
Gruppenkompensation	7
Zentralkompensation	8
Gemischte Kompensation	8
Ermittlung der erforderlichen Kondensatorleistung	9
Stromtarife/Überschlägige Schätzung	9
Ermittlung der erforderlichen Kondensatorleistung durch Messung	10
Messung mit Wirk- und Blindleistungsschreiber	11
Ermittlung aus der Stromrechnung	13
Anwendungen	14
Einzelkompensation/Gruppenkompensation von Entladungslampen	14
Einzelkompensation von Transformatoren/Motoren	16
Blindleistungs-Regelanlagen	20
Leistungsmerkmale	21
Leistungs-Kondensatoren	21
Blindleistungsregler	23
Installation	27
Stromwandler	27
Sicherungen und Kabel	28
Schutzart	30
Berechnungsformeln zum Kondensator	31
Oberschwingungen	32
Was sind Oberschwingungen?	32
Wie entstehen Oberschwingungen?	34
Wann können gefährliche Netzresonanzen auftreten?	36
Einfluß der Netzkonfiguration	37
Spannungs- und Strombelastung unverdrosselter Kompensationsanlagen	37
Projektierung in Netzen mit Oberschwingungen	38
Maßnahmen gegen das Auftreten von Resonanzen	39
Oberschwingungsgrenzwerte	40
Projektierung in Netzen mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen	41
Einfluß von nicht verdrosselten Kompensationsanlagen	42
Einfluß von verdrosselten Kompensationsanlagen	43
Ausführungen von verdrosselten Kompensationsanlagen	44
Überwachung der Kompensationsanlagen im Betrieb	45
Aktive Oberschwingungs-Filter	46
Funktionsprinzip des Aktiven Oberschwingungs-Filters	47
Anwendung	47
„Aktivitäten“ gegen Oberschwingungen	48

// Grundlagen

Bevor auf Einzelheiten zur Projektierung von Blindleistungs-Regelanlagen näher eingegangen wird, sollen einige Grundkenntnisse der Wechselstromtechnik aufgefrischt werden.

Wirkleistung

Mit rein ohmscher Belastung, ohne induktive oder kapazitive Komponenten, z. B. bei einer elektrischen Heizung, decken sich die Nulldurchgänge von Spannungs- und Stromkurve (Bild 1). Spannung und Strom sind in „Phase“. Aus dem Produkt der Augenblickswerte von Spannung (U) und Strom (I) lässt sich die Leistungskurve (P) berechnen. Sie hat doppelte Netzfrequenz und verläuft voll im positiven Bereich, da auch das Produkt zweier negativer Zahlen positiv ist.

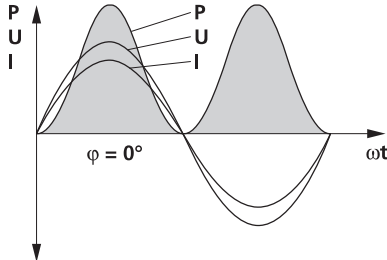


Bild 1: Spannung, Strom und Leistung bei rein ohmscher Belastung ($\varphi = 0^\circ$)

In unserem Fall:

$$(-U) \cdot (-I) = (+P).$$

„Wirkleistung ist der in nichtelektrische Form (z. B. Wärme, Licht, mechanische Leistung umgewandelte und vom Zähler registrierte Teil der Leistung“.

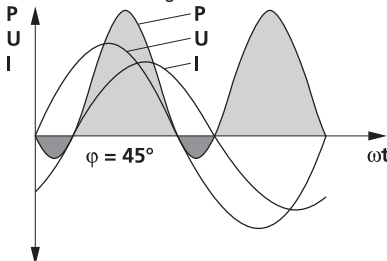
Bei rein ohmscher Belastung wird sie aus dem Produkt der Effektivwerte von Spannung [U] und Strom [I] berechnet:

$$P = U \cdot I \\ [\text{W}] \quad [\text{V}] \quad [\text{A}]$$

Wirk- und Blindleistung

In der Praxis tritt meist keine rein ohmsche Last auf, sondern es kommt zusätzlich eine induktive Komponente hinzu. Dies gilt für alle Verbraucher, die zur Funktion ein magnetisches Feld benötigen, z. B. Asynchronmotoren, Drosselspulen und Transformatoren. Auch Stromrichter benötigen zur Kommutierung Blindleistung. Der zum Aufbau und Umpolen des magnetischen Feldes benutzte Strom verbraucht sich nicht, sondern pendelt als Blindstrom zwischen Generator und Verbraucher hin und her.

Wie in Bild 2 gezeigt, decken sich die Nulldurchgänge von Spannung und Strom nicht mehr. Es tritt eine Phasenverschiebung auf. Bei induktiver Last eilt der Strom der Spannung nach, bei kapazitiver Last eilt der Strom der Spannung voraus. Berechnet man jetzt nach $(U) \cdot (I) = (P)$ die Augenblickswerte der Leistung, so erhält man immer dann negative Werte, wenn einer der beiden Faktoren negativ wird.



Hier wurde als Beispiel eine Phasenverschiebung von $\varphi = 45^\circ$ gewählt. Dies entspricht einem induktiven $\cos \varphi$ von 0,707. Die Leistungskurve verläuft zum Teil im negativen Bereich.

Die Wirkleistung errechnet sich in diesem Fall aus:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \\ [\text{W}] \quad [\text{V}] \quad [\text{A}]$$

Bild 2: Spannung, Strom und Leistung bei ohmscher und induktiver Last ($\varphi = 45^\circ$)

Blindleistung

Induktive Blindleistung tritt bei Motoren und Transformatoren im Leerlaufbetrieb auf, wenn man von Leitungs-, Eisen- und ggf. Reibungsverlusten absieht. Von beinahe rein kapazitiver Blindleistung kann man bei FRAKO Leistungs-Kondensatoren sprechen, da diese extrem niedrige Verluste (< 0,05%) aufweisen.

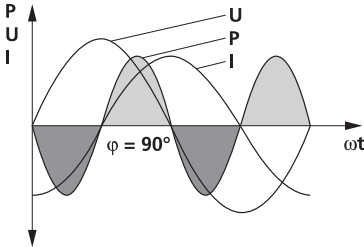


Bild 3: Spannung, Strom und Leistung bei reiner Blindlast ($\varphi = 90^\circ$)

Wenn Spannungs- und Stromkurve um 90° gegeneinander verschoben sind, verläuft die Leistungskurve zur einen Hälfte im positiven, zur anderen im negativen Bereich (Bild 3). Die Wirkleistung ist 0, da positive und negative Flächen sich gegenseitig aufheben.

„**Blindleistung** ist die zum Auf- und Abbau des magnetischen bzw. des elektrischen Feldes zwischen **Generator und Verbraucher** im Takt der Netzfrequenz **pendelnde Leistung**“.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

[var] [V] [A]

Scheinleistung

Die Scheinleistung ist entscheidend für die Belastung der elektrischen Leitungsnetze. Generatoren, Transformatoren, Schaltanlagen, Sicherungen und Leitungsquerschnitte müssen für die auftretende Scheinleistung dimensioniert sein.

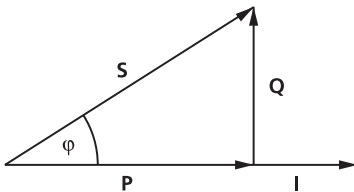


Bild 4: Leistungsdiagramm

„Die Scheinleistung ist das ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gewonnene Produkt aus Spannung und Strom“.

$$S = U \cdot I$$

[VA] [V] [A]

Die Scheinleistung ergibt sich aus der geometrischen Addition von Wirk- und Blindleistung:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

[VA] [W] [var]

Leistungsfaktor ($\cos \varphi$ und $\tan \varphi$)

Der Kosinus (\cos) des Winkels der Phasenverschiebung (φ) zwischen Strom und Spannung erlaubt einfaches Umrechnen von Wirk- und Scheinkomponenten für Leistungen, Spannungen und Ströme. In der Praxis hat sich die Bezeichnung "Leistungsfaktor" eingebürgert.

Bei elektrischen Maschinen ist üblicherweise der bei Vollast gültige Leistungsfaktor auf dem Typenschild angegeben.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad [\text{W}]/[\text{VA}]$$

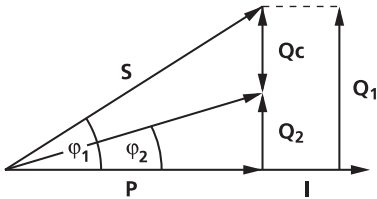
Der Tangens (\tan) des Phasenverschiebungswinkels (φ) erlaubt einfaches umrechnen von Blind- und Wirkeinheiten.

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad [\text{var}]/[\text{W}]$$

Kosinus und Tangens stehen in folgender Beziehung:

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{I}{I + \tan \varphi^2}} \quad \text{bzw.} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{I}{\cos \varphi^2} - I}$$

Da das elektrische Versorgungsnetz für die Scheinleistung ausgelegt sein muss, ist man bestrebt, diese so niedrig wie möglich zu halten. Schaltet man den Verbrauchern Kondensatoren in geeigneter Größe parallel, dann pendelt der Blindstrom zwischen Kondensatoren und Verbraucher. Das übrige Netz wird nicht mehr zusätzlich belastet. Erreicht man durch die Kompensation einen Leistungsfaktor von 1, so wird im Netz nur noch Wirkstrom übertragen.



Die vom Kondensator aufgenommene Blindleistung Q_c ergibt sich aus der Differenz der induktiven Blindleistung Q_1 vor der Kompensation und Q_2 nach der Kompensation, also ist: $Q_c = Q_1 - Q_2$.

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

[var] [W]

Bild 5: Leistungsdiagramm mit Kompensation

Warum wird kompensiert?

Der zwischen Generator (Elektrizitätswerk) und Verbraucher hin und her pendelnde Blindstrom wird im Leitungsnetz in Wärme umgesetzt. Generatoren, Transformatoren, Leitungen und Schalteinrichtungen werden zusätzlich belastet. Es treten Verluste und Spannungsfall auf. Bei hohem Blindstromanteil können die verlegten Querschnitte nicht voll zur Energieübertragung ausgenutzt werden bzw. müssen stärker dimensioniert sein. Aus der Sicht der EVU's (Versorgungsnetzbetreiber) steigen bei schlechtem Leistungsfaktor die Investitions- und Wartungskosten für das Versorgungsnetz. Diese Mehrkosten werden dem Verursacher, nämlich dem Stromabnehmer mit schlechtem Leistungsfaktor, in Rechnung gestellt. Deshalb installiert man neben dem Zähler für Wirkarbeit auch noch einen solchen für Blindarbeit.

$$\cos \phi = 0,7$$

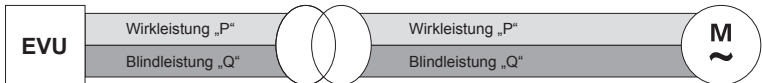
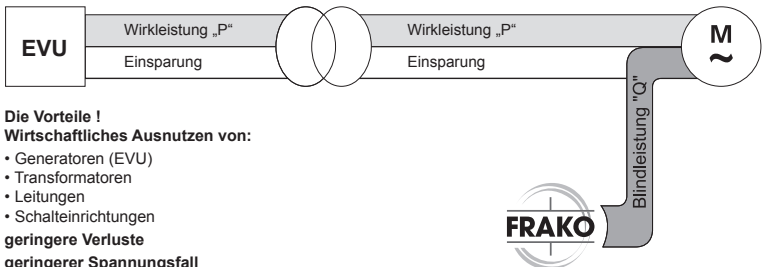


Bild 6: Wirk- und Blindleistung im Leitungsnetz: ohne Kompensation

$$\cos \phi = 1$$



Die Vorteile !

Wirtschaftliches Ausnutzen von:

- Generatoren (EVU)
- Transformatoren
- Leitungen
- Schalteinrichtungen

geringere Verluste

geringerer Spannungsfall

dadurch:

geringere Energiekosten !



Bild 7: Wirk- und Blindleistung im Leitungsnetz: mit Kompensation

// Kompensationsarten

Einzelkompensation

Im einfachsten Fall wird jedem induktiven Verbraucher ein Kondensator geeigneter Größe parallel geschaltet. Man erreicht damit eine volle Entlastung der Leitungen, einschließlich der Zuleitung zu dem kompensierten Verbraucher. Dafür nimmt man in Kauf, dass der Kondensator nur während des Zeitraumes ausgenutzt wird, in dem die betreffende Maschine in Betrieb ist. Außerdem ist es nicht immer einfach, die Kondensatoren direkt bei den zu kompensierenden Maschinen unterzubringen (Platzprobleme, Montagekosten).

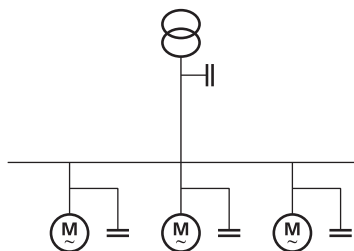


Bild 8: Beispiel für Einzelkompensation

Anwendung:

- zur Kompensation der Leerlauf-Blindleistung von Transformatoren
- für Antriebe im Dauerbetrieb
- bei Antrieben mit knapp ausgelegten oder langen Zuleitungen

Vorteile:

- das innerbetriebliche Netz wird voll vom Blindstrom entlastet
- niedrige Kosten pro kvar

Nachteile:

- die Kompensation ist über den ganzen Betrieb verstreut
- großer Installationsaufwand
- insgesamt ist eine größere Kondensatorleistung notwendig, da der Gleichzeitigkeitsfaktor unberücksichtigt bleibt

Gruppenkompensation

Maschinen, die stets gemeinsam eingeschaltet sind, können zu einer Gruppe zusammengefaßt und gemeinsam kompensiert werden. Anstelle mehrerer kleiner Kondensatoren wird ein einzelner Kondensator geeigneter Größe installiert.

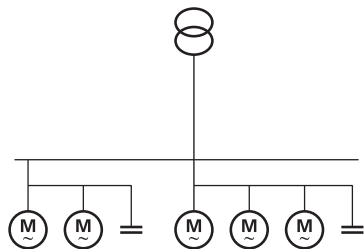


Bild 9: Beispiel für Gruppenkompensation

Anwendung:

- für mehrere induktive Verbraucher, wenn diese stets gemeinsam betrieben werden

Vorteile:

- ähnlich wie bei der Einzelkompensation, aber wirtschaftlicher

Nachteile:

- nur für Gruppen von Verbrauchern verwendbar, die immer gemeinsam betrieben werden

Zentralkompensation

Die gesamte Kompensation wird an zentraler Stelle, z.B. beim Niederspannungs-Hauptverteiler, angeordnet. Es wird damit der gesamte Bedarf an Blindleistung abgedeckt. Die Kondensatorleistung ist auf mehrere Schaltstufen aufgeteilt und wird durch einen automatischen Blindleistungsregler über Schaltschütze den Lastverhältnissen angepasst.

Dieser Weg wird heute in den meisten Fällen realisiert. Die zentral angeordnete Kompensation kann leicht überwacht werden. Moderne Blindleistungsregler gestatten eine laufende Kontrolle von Schaltzustand, $\cos \varphi$ und der Wirk- und Blindströme sowie der im Netz enthaltenen Oberschwingungen. Meist kommt man mit einer niedrigeren Gesamtleistung der Kondensatoren aus, da der Gleichzeitigkeitsfaktor des ganzen Betriebes bei der Auslegung berücksichtigt werden kann. Die installierte Kondensatorleistung wird besser ausgenutzt. Allerdings wird das betriebsinterne Leitungsnetz selbst nicht vom Blindstrom entlastet, was bei ausreichenden Querschnitten kein Nachteil ist.

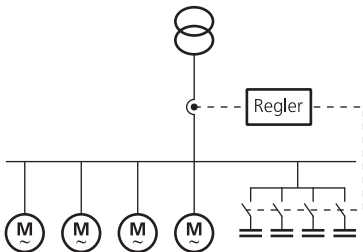


Bild 10: Beispiel für Zentralkompensation

Anwendung:

- kann immer eingesetzt werden, soweit das innerbetriebliche Leitungsnetz nicht unterdimensioniert ist

Vorteile:

- überschaubares Konzept
- gute Nutzung der installierten Kondensatorleistung
- meist einfachere Installation
- weniger Kondensatorleistung, da der Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt werden kann
- bei überschwingungshaltigen Netzen kostengünstiger, da geregelte Anlagen einfacher zu verdrosseln sind

Nachteile:

- das innerbetriebliche Netz wird nicht entlastet
- zusätzliche Kosten für die automatische Regelung

Gemischte Kompensation

Aus wirtschaftlichen Erwägungen ist es oft vorteilhaft, die drei beschriebenen Verfahren miteinander zu kombinieren.

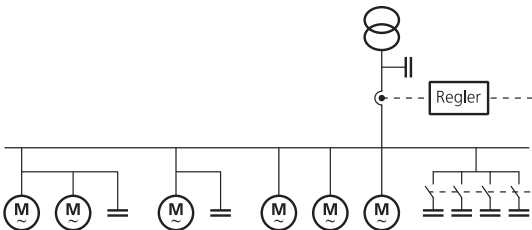


Bild 11: Beispiel für eine gemischte Kompensation

// Ermittlung der erforderlichen Kondensatorleistung

Stromtarife

Für kleinere Stromabnehmer gelten in der Regel feste Tarife des zuständigen EVU's (Energie-Versorgungs-Unternehmen), während mit Großabnehmern Sonderverträge abgeschlossen werden.

Bei den meisten Verträgen setzen sich die Stromkosten zusammen aus:

- Leistung [kW] – gemessen mit Maximumzähler,
z. B. Monats Maximum über 15 min. gemittelt.
- Wirkarbeit [kWh] – gemessen mit Wirkstromzähler,
meist Tag- und Nachtтарif getrennt.
- Blindarbeit [kvarh] – gemessen mit Blindstromzähler,
z. T. Tag- und Nachtтарif getrennt.

Bei Arbeitspreistarifen werden üblicherweise nur dann Kosten für die Blindarbeit berechnet, wenn diese 50 % der bezogenen Wirkarbeit überschreitet. Dies entspricht einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,9$. Es besteht nicht die Forderung, dass der Wert 0,9 niemals unterschritten werden darf. Als Basis gilt der Leistungsfaktor im Monatsmittel. In manchen EVU-Bezirken werden auch andere Leistungsfaktoren gefordert, z. B. 0,85 oder 0,95.

Bei anderen Tarifen wird die Leistung nicht in kW sondern in kVA berechnet. Die Kosten für die Blindarbeit sind dann im Leistungspreis enthalten. Zur optimalen Kostenreduzierung muss in diesem Fall ein Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 1$ angestrebt werden. Generell darf man davon ausgehen, dass bei richtig dimensionierter Kompensation die für die Blindarbeit anfallenden Kosten ganz eingespart werden.

Überschlägige Schätzung

Nachfolgend werden genaue Angaben darüber gemacht, wie die erforderliche Kondensatorleistung ermittelt werden kann. Manchmal ist es jedoch wünschenswert, schnell die Größenordnung zu kennen. Es soll auch Fälle geben, wo man zwar genau gerechnet hat, aber nicht sicher ist, ob sich irgendwo ein Denkfehler eingeschlichen hat. Dann kann durch Schätzung überprüft werden, inwieweit das gerechnete Ergebnis im Rahmen liegt.

Verbraucher	Kondensatorleistung
→ einzelkompensierte Motoren	→ 35 – 40 % der Motor-Nennleistung
→ einzelkompensierte Transformatoren	→ 2,5 % der Transformatorleistung → 5 % bei älteren Transformatoren
→ Zentralkompensation	→ 25 – 33 % der Transformatorleistung bei Ziel $\cos \varphi = 0,9$ → 40 – 50 % der Transformatorleistung bei Ziel $\cos \varphi = 1$

Tabelle 1: Schätzwerte für die erforderliche Kondensatorleistung

Auflisten von Verbrauchern

Bei Neueinrichtung eines Betriebes oder eines Betriebsabschnittes ist zunächst eine überschlägige Schätzung angebracht. Ein genaueres Bild verschafft eine Auflistung der zu installierenden Verbraucher und deren elektrische Daten, unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors. Im Zweifelsfalle sollte die Kompensation immer so geplant und ausgeführt werden, dass eine spätere Erweiterung ohne großen Aufwand möglich ist. Die Zuleitungen bzw. Sicherungsabgänge für die Kompensation sollten auf Zuwachs ausgelegt sein, außerdem sollten Platzreserven für zusätzliche Kondensatoreinheiten vorgesehen werden.

Ermittlung der erforderlichen Kondensatorleistung durch Messung

Messung von Stromstärke und Leistungsfaktor

Amperemeter und Leistungsfaktormesser sind häufig in der NS-Hauptverteilung eingebaut. Ebenso gut können auch Zangen-Messgeräte verwendet werden. Gemessen wird in der Hauptzuleitung (z. B. in der Einspeisung vom Transformator) bzw. in der Zuleitung des zu kompensierenden Betriebsteils. Gleichzeitige Messung der Netzspannung verbessert die Genauigkeit der Berechnung. Man kann aber auch einfach die Nennspannung (z. B. 380 bzw. 400 V) einsetzen.

Aus den Messwerten für Spannung U , Scheinstrom I_S und Leistungsfaktor lässt sich die Wirkleistung P berechnen:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_S \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3}$$

[kW] [V] [A]

Ist der gewünschte Ziel- $\cos \varphi$ festgelegt, kann man anhand der nachstehenden Formel die Kondensatorleistung berechnen. Einfacher ist es jedoch, den Faktor „ f “ aus Tabelle 2 (siehe Seite 12) zu entnehmen und mit der errechneten Wirkleistung zu multiplizieren.

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_{\text{Ist}} - \tan \varphi_{\text{Soll}})$$

[var] [W]

oder:

$$Q_C = P \cdot f$$

[var] [W]

Beispiel:

- Messwerte für Scheinstrom I_S : 248 A
- Leistungsfaktor $\cos \varphi_{\text{Ist}}$: 0,86
- Ziel- $\cos \varphi_{\text{Soll}}$: 0,92
- Spannung U : 397 V

Berechnung:

$$P = \sqrt{3} \cdot 397 \cdot 248 \cdot 0,86 \cdot 10^{-3}$$
$$P = 146,6 \text{ kW}$$

Aus Tabelle 2 entnehmen:

Faktor „ f “ = 0,17

Erforderliche Kondensatorleistung:

$$Q_C = 146,6 \cdot 0,17 = 24,9 \text{ kvar}$$

Hinweis:

Eine Messung, wie oben beschrieben, ergibt selbstverständlich nur Augenblickswerte. Die Lastverhältnisse können je nach Tages- und Jahreszeit stark unterschiedlich sein. Die Messung sollte deshalb jemand durchführen, der den Betrieb kennt. Man sollte mehrere Messungen durchführen und darauf achten, dass die zu kompensierenden Verbraucher wirklich eingeschaltet sind. Auch sollten die Messwerte schnell – möglichst alle Instrumente gleichzeitig – abgelesen werden, damit durch eine plötzliche Lastschwankung keine Verfälschung des Ergebnisses verursacht wird.

Messung mit Wirk- und Blindleistungsschreiber

Zuverlässigere Ergebnisse erhält man mit schreibenden Messgeräten. Die Werte können über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet werden, man erfasst hierbei auch Spitzenwerte. Die Kondensatorleistung wird wie folgt berechnet:

Q_C = erforderliche Kondensatorleistung

Q_L = gemessene Blindleistung

P = gemessene Wirkleistung

$\tan \varphi_2$ = der dem gewünschten $\cos \varphi$ entsprechende $\tan \varphi$

(kann aus Tabelle 2 entnommen werden, z. B. für $\cos \varphi = 0,92$ ist der entsprechende $\tan \varphi = 0,43$)

$$Q_C = Q_L - (P \cdot \tan \varphi_2)$$

[var] [var] [W]

Messung durch Ablesen der Zähler

Wirk- und Blindstromzähler werden zu Arbeitsbeginn abgelesen. 8 Stunden später werden beide Zähler wieder abgelesen. Falls eine Pause dazwischen liegt, müssen die 8 Stunden um die Pausenzeit verlängert werden.

BZ_1 = Blind-Zählerstand, Anfangsablesung

BZ_2 = Blind-Zählerstand, Endablesung

WZ_1 = Wirk-Zählerstand, Anfangsablesung

WZ_2 = Wirk-Zählerstand, Endablesung

$$\frac{BZ_2 - BZ_1}{WZ_2 - WZ_1} = \tan \varphi$$

Mit dem so errechneten Wert $\tan \varphi$ und dem Ziel- $\cos \varphi$ wird aus Tabelle 2 Faktor „f“ abgelesen, „k“ ist das Übersetzungsverhältnis der Zähler-Stromwandler. Daraus ergibt sich die erforderliche Kondensatorleistung:

$$Q_C = \frac{(WZ_2 - WZ_1) \cdot k}{8} \cdot f$$

Beispiel:

Es wurden folgende Zählerstände notiert:

- Wirkstromzähler (WZ₁) ... 115,3
(WZ₂) ... 124,6
- Blindstromzähler (BZ₁) ... 311,2
(BZ₂) ... 321,2

Die Zähler arbeiten mit Stromwandlern 150/5A, es ist also ein Stromwandlerfaktor von $k = 30$ zu berücksichtigen.

Berechnung:

$$\tan \varphi = \frac{321,2 - 311,2}{124,6 - 115,3} = 1,08$$

Für einen Ziel- $\cos \varphi$ von 0,92 wird Faktor „f“ abgelesen mit 0,65.

Die Kondensatorleistung ist:

$$Q_C = \frac{(124,6 - 115,3) \cdot 30}{8} \cdot 0,65 = 22,67 \text{ kvar}$$

Tabelle 2: Faktor n'' ($f = \tan \varphi_{\text{ist}} - \tan \varphi_{\text{sof}}$)

gegenwärtiger		geforderter Ziel-cos φ			← induktiv (l) →			← kapazitiv (c) →				
$\tan \varphi$	$\cos \varphi$	0,80i	0,85i	0,90i	0,92i	0,95i	0,98i	1,00	0,98c	0,95c	0,92c	0,90c
3,18 ↔ 0,30		2,43	2,56	2,70	2,75	2,85	2,98	3,18	3,38	3,51	3,61	3,66
2,96 ↔ 0,32		2,21	2,34	2,48	2,53	2,63	2,76	2,96	3,16	3,29	3,39	3,45
2,77 ↔ 0,34		2,02	2,15	2,28	2,34	2,44	2,56	2,77	2,97	3,09	3,19	3,25
2,59 ↔ 0,36		1,84	1,97	2,11	2,17	2,26	2,39	2,59	2,79	2,92	3,02	3,08
2,43 ↔ 0,38		1,68	1,81	1,95	2,01	2,11	2,23	2,43	2,64	2,76	2,86	2,92
2,29 ↔ 0,40		1,54	1,67	1,81	1,87	1,96	2,09	2,29	2,49	2,62	2,72	2,78
2,16 ↔ 0,42		1,41	1,54	1,68	1,73	1,83	1,96	2,16	2,36	2,49	2,59	2,65
2,04 ↔ 0,44		1,29	1,42	1,56	1,61	1,71	1,84	2,04	2,24	2,37	2,47	2,53
1,93 ↔ 0,46		1,18	1,31	1,45	1,50	1,60	1,73	1,93	2,13	2,26	2,36	2,41
1,83 ↔ 0,48		1,08	1,21	1,34	1,40	1,50	1,62	1,83	2,03	2,16	2,25	2,31
1,73 ↔ 0,50		0,98	1,11	1,25	1,31	1,40	1,53	1,73	1,94	2,06	2,16	2,22
1,64 ↔ 0,52		0,89	1,02	1,16	1,22	1,31	1,44	1,64	1,85	1,97	2,07	2,13
1,56 ↔ 0,54		0,81	0,94	1,07	1,13	1,23	1,36	1,56	1,76	1,89	1,98	2,04
1,48 ↔ 0,56		0,73	0,86	1,00	1,05	1,15	1,28	1,48	1,68	1,81	1,91	1,96
1,40 ↔ 0,58		0,65	0,78	0,92	0,98	1,08	1,20	1,40	1,61	1,73	1,83	1,89
1,33 ↔ 0,60		0,58	0,71	0,85	0,91	1,00	1,13	1,33	1,54	1,66	1,76	1,82
1,27 ↔ 0,62		0,52	0,65	0,78	0,84	0,94	1,06	1,27	1,47	1,59	1,69	1,75
1,20 ↔ 0,64		0,45	0,58	0,72	0,77	0,87	1,00	1,20	1,40	1,53	1,63	1,68
1,14 ↔ 0,66		0,39	0,52	0,65	0,71	0,81	0,94	1,14	1,34	1,47	1,56	1,62
1,08 ↔ 0,68		0,33	0,46	0,59	0,65	0,75	0,88	1,08	1,28	1,41	1,50	1,56
1,02 ↔ 0,70		0,27	0,40	0,54	0,59	0,69	0,82	1,02	1,22	1,35	1,45	1,50
0,99 ↔ 0,71		0,24	0,37	0,51	0,57	0,66	0,79	0,99	1,19	1,32	1,42	1,48
0,96 ↔ 0,72		0,21	0,34	0,48	0,54	0,64	0,76	0,96	1,17	1,29	1,39	1,45
0,94 ↔ 0,73		0,19	0,32	0,45	0,51	0,61	0,73	0,94	1,14	1,26	1,36	1,42
0,91 ↔ 0,74		0,16	0,29	0,42	0,48	0,58	0,71	0,91	1,11	1,24	1,33	1,39
0,88 ↔ 0,75		0,13	0,26	0,40	0,46	0,55	0,68	0,88	1,08	1,21	1,31	1,37
0,86 ↔ 0,76		0,11	0,24	0,37	0,43	0,53	0,65	0,86	1,06	1,18	1,28	1,34
0,83 ↔ 0,77		0,08	0,21	0,34	0,40	0,50	0,63	0,83	1,03	1,16	1,25	1,31
0,80 ↔ 0,78		0,05	0,18	0,32	0,38	0,47	0,60	0,80	1,01	1,13	1,23	1,29
0,78 ↔ 0,79		0,03	0,16	0,29	0,35	0,45	0,57	0,78	0,98	1,10	1,20	1,26
0,75 ↔ 0,80		-	0,13	0,27	0,32	0,42	0,55	0,75	0,95	1,08	1,18	1,23
0,72 ↔ 0,81		-	0,10	0,24	0,30	0,40	0,52	0,72	0,93	1,05	1,15	1,21
0,70 ↔ 0,82		-	0,08	0,21	0,27	0,37	0,49	0,70	0,90	1,03	1,12	1,18
0,67 ↔ 0,83		-	0,05	0,19	0,25	0,34	0,47	0,67	0,88	1,00	1,10	1,16
0,65 ↔ 0,84		-	0,03	0,16	0,22	0,32	0,44	0,65	0,85	0,97	1,07	1,13
0,62 ↔ 0,85		-	-	0,14	0,19	0,29	0,42	0,62	0,82	0,95	1,05	1,10
0,59 ↔ 0,86		-	-	0,11	0,17	0,26	0,39	0,59	0,80	0,92	1,02	1,08
0,57 ↔ 0,87		-	-	0,08	0,14	0,24	0,36	0,57	0,77	0,90	0,99	1,05
0,54 ↔ 0,88		-	-	0,06	0,11	0,21	0,34	0,54	0,74	0,87	0,97	1,02
0,51 ↔ 0,89		-	-	0,03	0,09	0,18	0,31	0,51	0,72	0,84	0,94	1,00
0,48 ↔ 0,90		-	-	-	0,06	0,16	0,28	0,48	0,69	0,81	0,91	0,97
0,46 ↔ 0,91		-	-	-	0,03	0,13	0,25	0,46	0,66	0,78	0,88	0,94
0,43 ↔ 0,92		-	-	-	-	0,10	0,22	0,43	0,63	0,75	0,85	0,91
0,40 ↔ 0,93		-	-	-	-	0,07	0,19	0,40	0,60	0,72	0,82	0,88
0,36 ↔ 0,94		-	-	-	-	0,03	0,16	0,36	0,57	0,69	0,79	0,85
0,33 ↔ 0,95		-	-	-	-	-	0,13	0,33	0,53	0,66	0,75	0,81
0,29 ↔ 0,96		-	-	-	-	-	0,09	0,29	0,49	0,62	0,72	0,78
0,25 ↔ 0,97		-	-	-	-	-	0,05	0,25	0,45	0,58	0,68	0,73
0,20 ↔ 0,98		-	-	-	-	-	-	0,20	0,41	0,53	0,63	0,69
0,14 ↔ 0,99		-	-	-	-	-	-	0,14	0,35	0,47	0,57	0,63
0,00 ↔ 1,00		-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,33	0,43	0,48

Ermittlung aus der Stromrechnung

Relativ leicht und mit guter Genauigkeit lässt sich die Kondensatorleistung aus der monatlichen Stromrechnung des EVU's ermitteln. Ist der Stromverbrauch das ganze Jahr über konstant, kann die Jahresabrechnung oder eine beliebige Monatsrechnung (aber nicht gerade die, in welche die Betriebsferien fallen) zugrundegelegt werden. Treten saisonbedingte Schwankungen auf, dann muss selbstverständlich eine Rechnung aus der Hauptbetriebszeit gewählt werden. Werden Tag- und Nachttarif (HT und NT) getrennt gemessen, setzt man zur Berechnung meist die HT-Werte ein. Man kann davon ausgehen, dass die Kondensatorleistung zur Deckung des nachts anfallenden Blindstroms ausreicht. In Sonderfällen, wo überwiegend mit preisgünstigerem Nachtstrom gearbeitet wird, dürfen jedoch die NT-Werte nicht vernachlässigt werden.

Arbeitspreis-Tarif

Beim Arbeitspreis-Tarif werden

- Vorhalteleistung
- Wirkarbeit
- Blindarbeit getrennt in Rechnung gestellt.

In den meisten Verträgen bleibt für die Blindarbeit der Anteil von 50% der Wirkarbeit ohne Berechnung. Nur was darüber liegt muss bezahlt werden. Dies entspricht in etwa einem $\cos \varphi$ von 0,9. Es empfiehlt sich aber, für die Berechnung einen etwas höheren Wert z. B. 0,92 einzusetzen, um bei der Kondensatorleistung etwas Leistungsreserve zu erhalten.

Berechnungsbeispiel, Werte aus der Stromrechnung:

- Wirkleistung 99 kW
- Wirkarbeit (HT) 17820 kWh
- Blindarbeit (HT) 19245 kvarh

$$\tan \varphi = \frac{\text{Blindarbeit (HT)}}{\text{Wirkarbeit (HT)}} = \frac{19245 \text{ kvarh}}{17820 \text{ kWh}} = 1,08$$

Der Istwert für den $\cos \varphi$ kann nun aus der Tabelle 2 entnommen werden. Für den errechneten $\tan \varphi$ von 1,08 ergibt sich ein $\cos \varphi_1$ von 0,68.

Für einen **Ziel-cos** $\varphi_2 = 0,92$ wird der Tabelle 2 ein Faktor „f“ von **0,65** abgelesen.

Die erforderliche Kondensatorleistung errechnet sich aus:

Wirkleistung x Faktor „f“

$$99 \text{ kW} \cdot 0,65 = 64,35 \text{ kvar}$$

In diesem Fall ist eine Kondensatorleistung von 75 kvar zu wählen. Um eine evtl. Erweiterung des Betriebs mitabzudecken, kann auch eine etwas höhere Leistung (z. B. 100 kvar) gewählt werden.

Leistungspreis-Tarif

In diesem Fall legt das EVU den während eines Monats angefallenen Höchstwert der Leistung für die Abrechnung zugrunde. Wird dabei nicht die Wirk-, sondern die Scheinleistung berechnet, empfiehlt es sich, die Kondensatorleistung für einen Ziel-cos φ von 1 auszulegen.

Berechnungsbeispiel, Werte aus der Stromrechnung:

- Wirkleistungsmaximum 104 kW
- $\cos \varphi_1$ 0,62

$$\frac{\text{Wirkleistungs-Maximum}}{\cos \varphi} = \frac{104 \text{ kW}}{0,62} = 168 \text{ kVA}$$

Für den Istwert $\cos \varphi_1 = 0,62$ und den Zielwert $\cos \varphi_2 = 1$ ergibt sich aus Tabelle 2 ein Faktor „f“ von 1,27.

Die erforderliche Kondensatorleistung errechnet sich aus:

Wirkleistung x Faktor „f“

$$104 \text{ kW} \cdot 1,27 = 132,08 \text{ kvar}$$

Hier eignet sich eine Blindleistungs-Regelanlage mit einer Kondensatorleistung von 150 bis 175 kvar in fein abgestufter Ausführung.

Anwendungen

Einzelkompensation von Entladungslampen

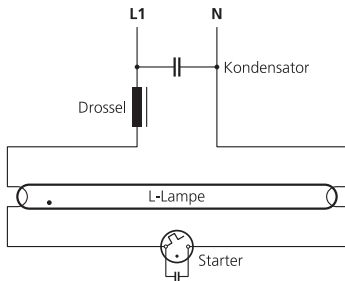


Bild 12: Einzelschaltung, der Kondensator wird parallel zur Lampe geschaltet, z. B. LPM (Parallelkondensator) mit Nennspannung 230V.

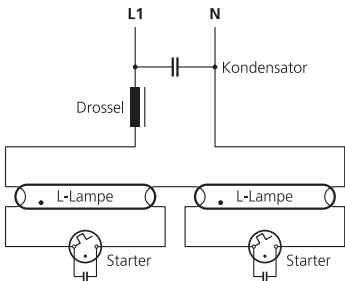


Bild 13: Reihenschaltung (Tandemschaltung), der Kondensator wird parallel zu den Lampen geschaltet, z. B. LPM mit Nennspannung 230V.

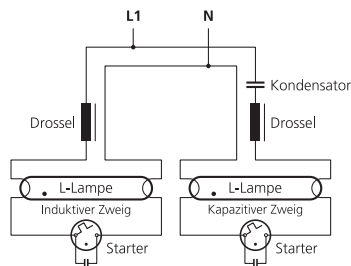


Bild 14: Duoschaltung, der Kondensator wird in Reihe zu den Lampen geschaltet, z. B. LPM (Reihen Kondensator) mit Nennspannung 450V.

Entladungslampen müssen mit strombegrenzenden Vorschaltgeräten betrieben werden. Streufeldtransformatoren werden überwiegend bei Natriumdampf-Niederdrucklampen eingesetzt, alle anderen Entladungslampen erhalten Drosselspulen als Vorschaltgerät. Durch die Induktivität ergibt sich ein Leistungsfaktor von $\cos \varphi$ etwa 0,5 bei Drosseln und ca. 0,3 bei Streufeldtransformatoren. **Elektronische Vorschaltgeräte** für Leuchtstofflampen benötigen **keine Kompensation**.

Wichtig: Durch die nichtlineare Stromaufnahme muss, besonders bei einer großen Anzahl von Lampen, mit Oberschwingungsproblemen gerechnet werden (siehe Thema Oberschwingungen).

Zur Kompensation von induktiven Vorschaltgeräten können einphasige Kondensatoren parallel oder in Reihe geschaltet werden.

Bei der **Einzelschaltung** mit einer Lampe und der **Reihenschaltung** aus zwei Lampen (Tandemschaltung) wird der Kondensator **parallel** zur Lampe geschaltet, die Kondensator-Nennspannung (**230 V**) ist gleich der Netzspannung.

Wichtig: Netzparallele Kondensatoren bilden mit den reaktiven Netzimpedanzen einen Schwingkreis. Dadurch können vorhandene Oberschwingungen verstärkt und Tonfrequenz-Rundsteueranlagen gestört werden (siehe separates Thema).

Bei der besonders wirtschaftlichen **Duoschaltung** wird nur ein Kondensator für zwei Lampen benötigt. Der eine Zweig wird induktiv belassen, wobei das zweite Vorschaltgerät kapazitiv kompensiert wird. Der Kondensator muss wegen der auftretenden Spannungserhöhung durch die **Reihenschaltung** aus Induktivität und Kapazität für eine höhere Nennspannung (**450 V**) ausgelegt sein.

Resonanzbedingte Störungen, wie mit parallel geschalteten Kondensatoren, treten nicht auf. Darüberhinaus wird die Gesamtwelligkeit der einzelnen Lampen verbessert und die bei rotierenden Maschinen möglichen stroboskopischen Effekte vermieden.

Deshalb ist die Reihenschaltung aus Kondensator und Vorschaltgerät bei vielen Energieversorgungsunternehmen gefordert und grundsätzlich zu empfehlen.

Auswahltable für Entladungslampen

Die Tabelle gibt zu den verschiedenen Lampentypen den jeweils passenden Kondensator an.

Wichtig: Bei verlustarmen Vorschaltgeräten werden Reihen-kondensatoren mit kleinerer Kapazität eingesetzt, als in der Tabelle angegeben. Die Werte können je nach Lampenhersteller voneinander abweichen. Maßgebend ist immer der auf der Drossel angegebene Kapazitätswert.

Die gängigsten Reihen-kondensatoren für verlustarme Vorschaltgeräte:

18 W	2,7 µF / 480 V	
36 W	3,4 µF / 450 V	3,5 µF / 450 V
58 W	5,3 µF / 450 V	5,4 µF / 450 V

Lampen-Leistung in W	Parallel-Kon. Kapazität in µF	Reihen-Kon. Kapazität in µF
----------------------	-------------------------------	-----------------------------

Leuchtstofflampen

4bis 16	2,0 / 230 V	-
18bis 20	4,5 / 230 V	2,9 / 450 V
36bis 40	4,5 / 230 V	3,6 / 450 V
58bis 65	7,0 / 230 V	5,7 / 450 V

Halogen Metall-dampflampen

35	6,0 / 230 V	-
70	12,0 / 230 V	-
150	20,0 / 230 V	-
250	32,0 / 230 V	-
400	35,0 / 230 V	-
1000	85,0 / 230 V	-
2000	60,0 / 380 V	-
3500	100,0 / 380 V	-

Lampen-Leistung in W	Parallel-Kon. Kapazität in µF	Reihen-Kon. Kapazität in µF
----------------------	-------------------------------	-----------------------------

Quecksilberdampf-Hochdrucklampen

50	7,0 / 230 V	-
80	8,0 / 230 V	-
125	10,0 / 230 V	-
250	18,0 / 230 V	-
400	25,0 / 230 V	-
700	40,0 / 230 V	-
1000	60,0 / 380 V	-

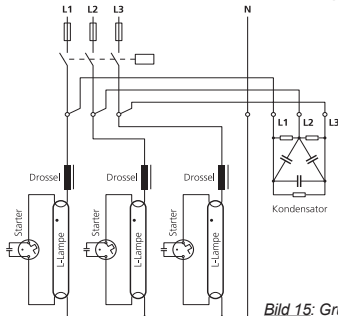
Natriumdampf-Niederdrucklampen

18	5,0 / 230 V	-
35	20,0 / 230 V	-
55	20,0 / 230 V	-
90	25,0 / 230 V	-
135	45,0 / 230 V	-
150	20,0 / 230 V	-
180	40,0 / 230 V	-

Natriumdampf-Hochdrucklampen

50	8,0 / 230 V	-
70	12,0 / 230 V	-
100	12,0 / 230 V	-
150	20,0 / 230 V	-
250	32,0 / 230 V	-
400	50,0 / 230 V	-
1000	100,0 / 230 V	-

Gruppenkompensation von Entladungslampen



Schaltet man mehrere Entladungslampen gleichzeitig, kann bei einer symmetrischen Aufteilung auch ein gemeinsamer, dreiphasiger Gruppen-kondensator mit einer Nennspannung von 440 V verwendet werden.

Kondensatorleistung:

$$Q_c = n \cdot C \cdot 0,015$$

Q_c = Kondensatorleistung in kvar

n = Lampenanzahl, dreiphasig aufgeteilt

C = Parallelkapazität pro Lampe in µF

Beispiel: 24 Leuchtstofflampen mit je 58 W

$$24 \cdot 7 \mu\text{F} \cdot 0,015 = 2,52 \text{ kvar}$$

Bild 15: Gruppenkompensation von mehreren dreiphasig aufgeteilten Entladungslampen (z. B. mit Leistungs-Kondensator LKT mit Zubehör).

Einzelkompensation von Transformatoren

Die Richtlinien der EVU's über die zulässige Größe fest mit dem Transformator verbundener Kondensatoren sind regional unterschiedlich. Deshalb ist vor Installation einer solchen Kompensation Rücksprache mit dem zuständigen EVU zu empfehlen. Transformatoren moderner Bauart besitzen Kernbleche, die nur geringe Leistung für die Ummagnetisierung benötigen. Ist die Kondensatorleistung zu hoch, kann es bei Leerlaufbetrieb zu Spannungserhöhungen kommen. Gut geeignet sind Kondensatoren mit eingebauten Sicherungslasttrennern. Wenn Kondensatoren mit Sicherungslasttrenner direkt an die Klemmen des Transformators angeschlossen werden, muss man sich darüber im klaren sein, dass die Zuleitung zum Kondensator für die volle Kurzschlussleistung auszulegen ist.

Transformator-Nennleistung [in kVA]	Kondensatorleistung [in kvar]
100 – 160	2,5
200 – 250	5,0
315 – 400	7,5
500 – 630	12,5
800	15,0
1000	20,0
1250	25,0
1600	35,0
2000	40,0

Table 3: Richtwerte für die Einzelkompensation von Transformatoren nach VDEW

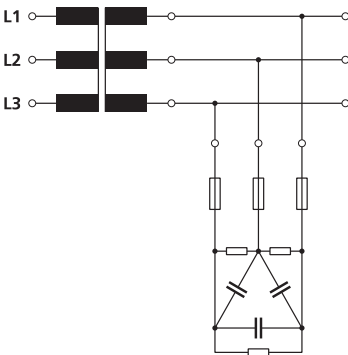
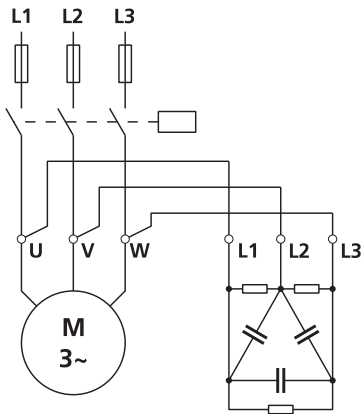


Bild 16: Beispiel für eine Trafo-Festkompensation

Der Kondensator mit Sicherungslasttrenner kann direkt an die Klemmen des Transformators angeschlossen werden. Die Zuleitung zum Kondensator muss für die volle Kurzschlussleistung ausgelegt sein.

Wichtig: Die Sicherungslasttrenner werden mit rein kapazitiver Last betrieben. Um gefährliche Lichtbögen zu vermeiden, dürfen sie deshalb nie unter Last gezogen werden!

Soll eine Trennung des Kondensators auch bei eingeschaltetem Transformator möglich sein, muss ein Leistungs-Kondensator mit Leistungs-Selbstschalter eingesetzt werden.



Asynchron-Motor 25 kW
mit Drehzahl 1500 min⁻¹

Leistungskondensator
10 kvar z. B.: LKN 10-400-D32

Bild 17: Beispiel für eine Motor-Festkompensation

Reduzierter Auslösestrom:

$$I_{th} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \cdot I_N$$

I_{th} = neu einzustellender
Auslösestrom [in A]

I_N = Motor-Nennstrom lt.
Typenschild [in A]

$\cos \varphi_1 = \cos \varphi$ lt. Typenschild

$\cos \varphi_2 = \cos \varphi$ mit Kompensation (ca. 0,95)

Durch den niedrigen ohmschen Widerstand der Motorwicklung, wird der Kondensator direkt entladen, Entladewiderstände sind nicht dringend erforderlich.

Einzelkompensation von Aufzug- und Hebezeugmaschinen

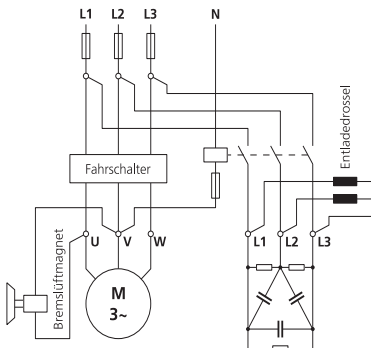


Bild 18: Aufzugmotor mit eigenem Kondensatorschütz und Einrichtung für Schnellentladung

Aufzug- und Hebezeugmaschinen arbeiten mit Sicherheitseinrichtungen, z. B. mit einem Bremsluftmagnet, der bei Stromausfall eine schnell wirkende Bremse auslöst. Ein direkt zum Motor parallel liegender Kondensator könnte durch seine Restenergie die einwandfreie Abbremsung verzögern oder ganz verhindern. Die Kondensatoren dürfen deshalb nur **vor** den Schaltgeräten angeschlossen werden. Für den Kondensator sollte ein eigenes Schütz mit einer Schnellentladeeinrichtung verwendet werden. Die Schnellentladung kann entweder durch eine direkt am Kondensator angeschlossene Entladendrossel oder mit dem Kondensatorschütz geschaltete Schnellentladewiderstände erfolgen.

Durch eine steuerungsseitige Verriegelung muss ein Wiedereinschalten des Kondensators vor dem Ablauf der Entladezeit verhindert werden.

Aufgrund der Schalthäufigkeit und dem damit verbundenen Schützverschleiß empfiehlt sich der Einsatz von Kondensatorstufen mit elektronischen Schaltern. Die Kondensatoren werden im Nulldurchgang zu- und abgeschaltet, damit können Reaktionszeiten im Millisekundenbereich realisiert werden.

Stern-Dreieckschalter

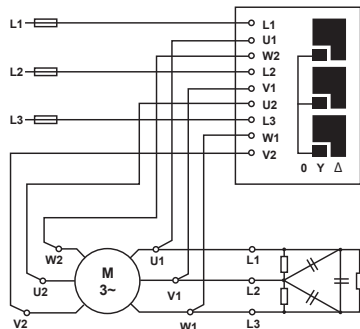


Bild 19: Handbetätigter Stern-Dreieckschalter in Sonderausführung für einzelkompensierte Motoren

Handbetätigte Stern-Dreieckschalter müssen bei Verwendung dreiphasiger Leistungs-Kondensatoren in einer Ausführung gewählt werden, die zum Schalten von Motoren mit Einzelkompensation ausgelegt sind.

Die Kontaktbrücken müssen so ausgeführt sein, dass während der Umschaltung von Stern auf Dreieck **keine** Kurzunterbrechung auftritt, die den Kondensator auf „Phasenopposition“ schaltet.

Dabei entstehen zu hohe Umladeströme, die sowohl den Kondensator, als auch den Schalter zerstören können.

Liegt der Schalter in Nullstellung (ausgeschaltet), darf die Sternbrücke nicht geschlossen sein, damit der Kondensator nicht kurzgeschlossen wird.

Stern-Dreieck-Schützkombinationen

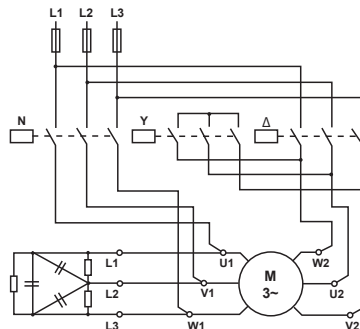


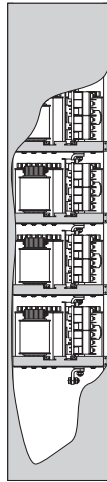
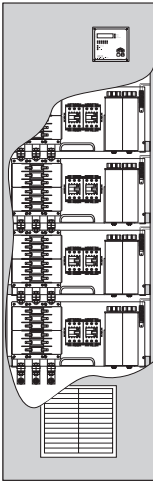
Bild 20: Einzelkompensierter Motor mit Stern-Dreieckschütz

Bei Stern-Dreieck-Schützkombinationen ist, ebenso wie beim Stern-Dreieckschalter, zu beachten, dass keine Kurzunterbrechung während der Umschaltung auftritt, d.h. das Netzschütz muss angezogen bleiben. Bei ausgeschaltetem Motor muss die Sternbrücke offen sein. Der Kondensator kann an die Ausgangsseite des Netzschützes oder an die Klemmen U1 - V1 - W1 des Motors angeschlossen sein, aber nicht an die Klemmen W2 - U2 - V2, wo er durch die Sternbrücke kurzgeschlossen würde.

Wichtig: Die Kondensatorleistung darf keinesfalls zu hoch ausgelegt werden. Dies gilt vor allem dann, wenn die Maschine große Schwungmassen besitzt und nach dem Ausschalten nachläuft. Der parallel liegende Kondensator kann die Maschine als Generator erregen und es treten gefährliche Überspannungen auf. Es können Schäden sowohl am Kondensator, als auch am Motor auftreten. Deshalb ist bei Stern-Dreieck-Anlauf zu vermeiden, dass die Sternbrücke im ausgeschalteten Zustand geschlossen bleibt. Wenn die Maschine in Sternschaltung als Generator erregt wird, sind noch höhere Spannungen zu erwarten als bei Dreieckschaltung.

Blindleistungs-Regelanlagen

Blindleistungs-Regelanlagen bestehen aus folgenden Komponenten:



- Blindleistungsregler
- über Schütz oder elektronische Schalter betätigte Kondensatorstufen
- ggf. Filterkreisdrosseln
- ggf. Tonfrequenz-Sperrkreise
- Gruppensicherungen
- bei verdrosselten Anlagen mit thermostat-geregeltem Filterlüfter

Die Komponenten werden wahlweise auf Montageplatte oder, bei geforderter Erweiterbarkeit in Modultechnik, in einem Schaltschrank ausgebaut.

Eine Blindleistungs-Regelanlage wird in Netzen mit ständig schwankendem Blindleistungsbedarf eingesetzt. Die Kondensatorleistung ist auf mehrere Schaltstufen aufgeteilt und wird durch einen automatischen Blindleistungsregler über Schaltschütze oder elektronische Schalter den Lastverhältnissen angepasst.

Die zentral angeordnete Kompensation kann leicht überwacht werden. Moderne Blindleistungsregler gestatten eine laufende Kontrolle von Schaltzustand, $\cos \varphi$ und der Wirk- und Blindströme sowie der im Netz enthaltenen Oberschwingungen.

Bild 21: Beispiel für eine Blindleistungs-Regelanlage in Modultechnik

Meist kommt man mit einer niedrigeren Gesamtleistung der Kondensatoren aus, da der Gleichzeitigkeitsfaktor des ganzen Betriebes bei der Auslegung berücksichtigt werden kann. Die installierte Kondensatorleistung wird optimal ausgenutzt.

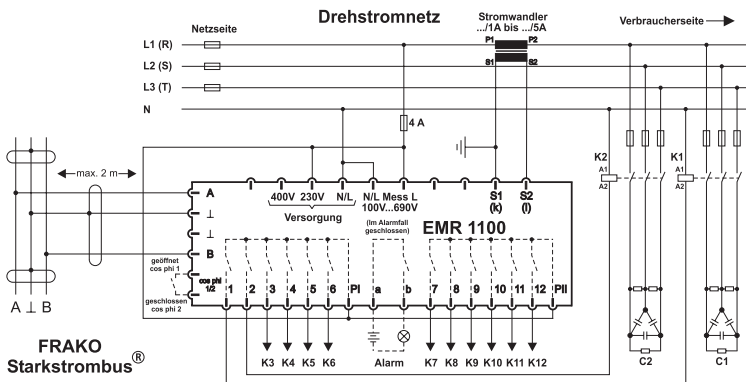


Bild 22: Schaltbeispiel für eine Blindleistungs-Regelanlage

Leistungs-Kondensatoren

FRAKO Leistungs-Kondensatoren der Typenreihe LKT sind PCB-frei. Sie besitzen ein selbstheilendes Dielektrikum. Kommt es durch Überlastung (z.B. Überspannung) zu einem Durchschlag, so heilt der Wickel selbst aus. Darüber hinaus besitzt jeder Kondensator als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme eine zuverlässig funktionierende interne Sicherung, die auf Überdruck anspricht.

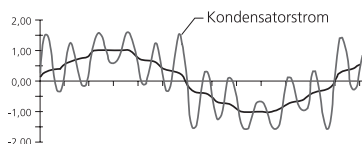
Für den Betrieb der Leistungs-Kondensatoren in Starkstromnetzen sind hauptsächlich drei Dinge wichtig:

- **hohe Belastbarkeit,**
- **hohe Lebenserwartung** und
- **hohe Sicherheit** bei Überlastung

Leistungs-Kondensatoren sind Bauelemente mit einer sehr hohen Leistungsdichte. **In einem Liter Volumen sind heute ca. 16 kvar Blindleistung unterzubringen!** Dies wird durch einen sehr geringen Verlustfaktor und durch eine hohe Ausnutzung des Dielektrikums erzielt. Um dennoch eine hohe Lebenserwartung zu erreichen, müssen Teilentladungen (das sind geringe elektrische Entladungen im Inneren des Dielektrikums) unterdrückt werden.

Strombelastbarkeit

In überschwingungsbelasteten Netzen muss man beim Auftreten von Resonanzen mit Überspannungen und vor allem mit einer hohen Effektivstrombelastung rechnen:



Tritt z.B. in einem Netz die 11. Oberschwingung mit 8% der Netzennspannung auf, dann ist der Effektivwert der Netzspannung nur um etwa 0,3% erhöht, der Strom in den Kondensatoren entspricht jedoch bereits dem 1,33-fachen seines Nennstromes. Deshalb ist eine hohe Strom-Belastbarkeit noch wichtiger als die Spannungs-Belastbarkeit.

Bei 400 Volt Netzspannung werden bei **FRAKO** in der Regel nur Leistungs-Kondensatoren mit einer Nennspannung von mindestens 440 Volt eingesetzt. Deren zulässige Strombelastbarkeit beträgt:

- bis zum 2,2-fachen des Nennstromes dauernd und
- bis zum 300-fachen dieses Nennstromes bei kurzzeitigen Stromspitzen.

Spannungsbelastbarkeit

FRAKO Leistungs-Kondensatoren sind nach EN 60831-1 und -2 sowie IEC 831-1 und -2 mit Überspannungen wie folgt belastbar:

Nennspannung	300 V	400 V	440 V	480 V	525 V	615 V
8 h täglich	330 V	440 V	484 V	528 V	578 V	677 V
30 min täglich	345 V	460 V	506 V	552 V	604 V	707 V
5 min täglich	360 V	480 V	528 V	576 V	630 V	738 V
1 min täglich	390 V	520 V	572 V	624 V	683 V	800 V

Lebensdauer

Überspannungen, Übertemperatur und Oberschwingungen verkürzen die zu erwartende Lebensdauer. Nur äußerste Reinheit in der Produktion und äußerste Reinheit der verwendeten Materialien verhindern eine Verschlechterung des Verlustfaktors und damit eine Reduzierung der Spannungsfestigkeit und der Strombelastbarkeit. Dauerspannungsversuche unter sehr scharfen Prüfbedingungen (1,5-fache Nennspannung, 60 °C Umgebungstemperatur, starke Oberschwingungsbelastung) werden mit Kondensatoren aus der laufenden Fertigung ständig durchgeführt: Der Kapazitätsverlust liegt deutlich unter 1%, die Ausfallrate ist verschwindend, und die Verlustfaktoren bleiben auf sehr niedrigem Niveau stabil.

Wir geben die Lebenserwartung unserer Leistungs-Kondensatoren LKT mit 100.000 bis 170.000 Betriebsstunden je nach Kondensatortypenreihe an.

Sicheres Verhalten am Ende der Lebensdauer

Selbstverständlich gehört dazu auch, dass im Falle einer Überlastung des Kondensators und am Ende der Lebenserwartung von den Kondensatoren keine Gefahr für Anlagen und Bediener ausgeht. Diese Sicherheit bieten nur moderne Leistungs-Kondensatoren mit einem Abschalter, der:

- bei innerem Überdruck anspricht,
- den Kondensator vom Netz trennt und
- dadurch eine Zerstörung des Kondensator-Behchers verhindert.

Wegen der hohen Leistungsdichte moderner Kondensatoren verwendet **FRAKO** den aufwendigsten und wirkungsvollsten Abschalter, den gebördelten Membrandeckel.

Alubecher und Deckel sind zusammen eingerollt und mit einem elastischen Dichtmittel verklebt. Der gebördelte Membrandeckel hält das Anschlußteil im Normalbetrieb sicher in seiner Position. Ab einem Überdruck von ca. 3 bar im Innern des Kondensators, wölbt der Deckel nach außen und erreicht weit unterhalb des kritischen Druckbereichs einen Hub von etwa 10 mm! In den meisten Fällen sind die Anschlussdrähte schon bei einem Hub von ca. 5 mm sicher und rückzündungsfrei vom Netz getrennt. Die Fertigungssicherheit dieser Funktion wird bei **FRAKO** in Typ- und regelmäßigen Stichprobenprüfungen überwacht. Die Prüfbedingungen sind in EN 60831-2 festgelegt.

FRAKO Leistungs-Kondensatoren bieten somit hohe Sicherheit bei Überlastung und am Ende ihrer Lebenserwartung!

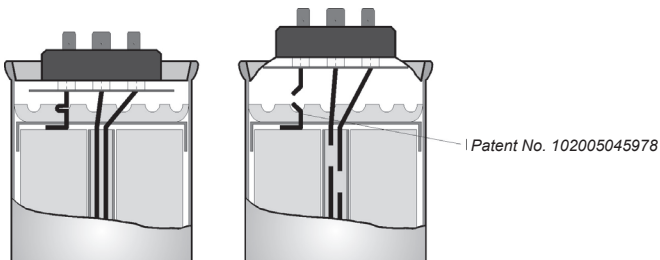


Bild 23: Das Bild zeigt die Funktion des Überdruckabschalters bei einem **FRAKO** Leistungs-Kondensator.

Blindleistungsregler



Bild 24: Blindleistungsregler EMR 1100

Die mikroprozessorgesteuerten Blindleistungsregler EMR 1100, EMR 1100 S und RM 9606 von **FRAKO** lösen komplexe Aufgaben, die weit über die reine Blindleistungsregelung auf einen vorgewählten Ziel-cos-phi hinausgehen. Das innovative Regelverhalten löst alle Anforderungen moderner Industrienetze und macht diese Regler universell einsetzbar.

Hervorzuheben ist die hohe Genauigkeit und Sensibilität, auch in stark überschwingungsbelasteten Netzen, ebenso wie das Beherrschen von dauerhafter oder sporadischer Rückspeisung in Netzen mit Eigenstromerzeugung.

Alle Bauteile der Kompensationsanlage werden durch diese Regler schonend betrieben und vor Überlastung geschützt. Dies führt zu einer wesentlich längeren Lebenserwartung der Anlage.

Die Leistungsmerkmale im Einzelnen:

- **Präzise Messung des Cos-phi auch in stark überschwingungsbehafteten Netzen von 0,02 A bis 5 A im Messkreis.**

Durch die exakte Messung des Leistungsfaktors der Grundschiwingung, auch bei sehr kleinen Messströmen, wird eine cos-phi-Regelung hoher Präzision erreicht.

- **Einhaltung des gewählten Soll-cos-phi als Mindestwert bei gleichzeitiger Vermeidung von Überkompensation bei Schwachlast.**

Diese konträre Regeleigenschaft wird durch die patentierte abknickende Regelkennlinie erreicht. Sie stellt sicher, dass bei normaler Netzbelastung auf den gewählten Leistungsfaktor kompensiert und bei Schwachlast die oft problematische Überkompensation vermieden wird.

- **Messung und Überwachung der Oberschwingungen in Niederspannungsnetzen (5., 7., 11. und 13. Harmonische).** Durch diese Überwachung wird der Betreiber ständig über die Netzqualität informiert und bekommt rechtzeitig die Überschreitungen von Grenzwerten gemeldet. Dadurch kann frühzeitig sich abzeichnenden Netz- und Verbraucherstörungen durch geeignete Maßnahmen begegnet werden.

- **Überstromabschaltung bei überhöhter Effektivstromaufnahme nicht verdrosselter Kompensationsanlagen.**

Diese Funktion dient als Überlastungsschutz nicht verdrosselter Kompensationsanlagen und schützt die gesamte elektrische Anlage vor Überschwingungs-Resonanzen. Die Abschaltung erfolgt, wenn der eingestellte Grenzwert mehr als 75 Sekunden lang überschritten wird. Die Überstromabschaltung ist damit flinker als die vorgeschaltete Laststrom-Sicherung, die aufgrund der hohen Strombelastbarkeit der Kondensatoren nur einen Kurzschlusschutz sicherstellen kann.

- **Regelverzögerungszeit in Abhängigkeit des Leistungsbedarfs.**

Starke Lastwechsel werden schnell, geringe Lastwechsel langsamer ausgeregelt. Dabei wird sichergestellt, dass nur vollständig entladene Kondensatorstufen ans Netz geschaltet werden. **Gezielte, dem Leistungsbedarf entsprechende Zuschaltung mit den geringst möglichen Schalthandlungen – Kreisregelung bei allen gleichwertigen Stufen.**

- Dieses kombinierte Regelverhalten führt zu geringst möglichen Schaltungen, damit zu einem verschleißarmen Betrieb und zu einer längeren Lebenserwartung der Kompensationsanlage.
- Gleichzeitig werden kritische Netzkonstellationen vermieden, indem – entgegen dem klassischen Pilgerschrittverfahren – die Kondensatorleistung bei starken Lastwechseln schnell und gezielt dem Bedarf angepasst wird.
- Beim Ausregeln starker Lastminderung wird eine zu lange Überkompensation unbelasteter Transformatoren verhindert.
- In überschwingungsbehafteten Netzen wird in kürzest möglicher Zeit das Absaugen der Oberschwingungsströme durch die Filterkreisanlage gewährleistet. Damit wird zuverlässig vermieden, dass bei starken Lastwechseln eines Stromrichters der zulässige Oberschwingungspegel überschritten wird.

■ **Nullspannungs- und Nullstromauslösung.**

Diese Sicherheitsschaltung trennt die Kompensationsanlage bei Unterbrechung im Spannungs- oder Strommesskreis vom Netz. Dadurch wird verhindert, dass z. B. nach einer kurzzeitigen Spannungsunterbrechung die Anlage sofort mit ihrer gesamten Leistung an den unbelasteten Transformator geschaltet wird. Der Regler schaltet nach Spannungswiederkehr die Kondensatorstufen entsprechend dem Leistungsbedarf wieder zu.

■ **Blindleistungsregelung bei netzparalleler Eigenstromerzeugung mit Rückspeisung von Wirkarbeit.**

Für diesen Betrieb sind die Regler mit einem Vier-Quadranten-Messwerk ausgerüstet. Außerdem können für **Bezug und Rückspeisung von Wirkarbeit unterschiedliche Regelkennlinien** eingestellt werden. So wird sichergestellt, dass bei Bezug nicht überkompensiert und bei Rückspeisung kein Blindstrom bezogen wird. Nur diese kombinierte Regeleigenschaft stellt sicher, dass bei längerer Rückspeisung keine Blindleistungskosten entstehen.

■ **Feststufen zur lastunabhängigen Kompensation.**

Es können Stufen festgelegt werden, die nicht im Regelprozeß integriert sind, sondern ständig zugeschaltet bleiben, solange am Regler die Betriebsspannung anliegt. Sämtliche Sicherheitsfunktionen, wie die Nullspannungs- und Nullstromauslösung sowie die Überstromabschaltung sind auch für die programmierten Feststufen wirksam.

■ **Zwei getrennt arbeitende, über externen Kontakt umschaltbare Regelprogramme.**

Die beiden Regelprogramme können mit unterschiedlicher Soll-cos-phi-Einstellung und mit unterschiedlichen Regelkennlinien programmiert werden. Damit werden die Forderungen der EVU, z. B. nach hoher Kompensation am Tage und niedriger Kompensation während der Nacht, erfüllt.

Inbetriebnahme und Bedienung

- **Automatische Anpassung an das Netz und die zu regelnde Kompensationsanlage.**
Die Inbetriebnahme wird dadurch wesentlich vereinfacht, da sie der Regler selbst durchführt. Es bleibt dem Installateur freigestellt, in welchem Außenleiter der Stromwandler montiert und mit welcher Polarität der Wandler mit dem Blindleistungsregler verbunden wird. Die Phasenlage und die Stromflussrichtung werden während des Einmessvorganges vom Regler ermittelt. Gleichzeitig werden die Leistungen der angeschlossenen Kondensatorstufen gemessen und nicht belegte Steuerkontakte des Reglers gesperrt.

Bei Installationsfehlern informiert der Regler gezielt darüber, was für einen ordnungsgemäßen Betrieb fehlt.

Bei späterer Leistungsaufstockung der Kompensationsanlage sollte der Einmessvorgang wiederholt werden, damit neu hinzu gekommene Kondensatorstufen sofort in den Regelprozess integriert werden. Wird dies unterlassen, so erkennt dies der Regler nach einigen Tagen selbst und integriert die betreffenden Stufen selbstständig.

Umgekehrt verfährt der Regler, wenn er während des Betriebes eine defekte Stufe erkennt. Er nimmt diese aus dem Regelprozeß heraus und kennzeichnet sie.

- **Anzeigen und Meldungen.**

Alle Messwerte des Reglers können im Display angezeigt werden. Im laufenden Betrieb zeigt das Display den aktuellen Ist-cos-phi am Einbaort des Messwandlers. Auf die folgenden Messwerte kann die Anzeige umgeschaltet werden:

- Schein-, Wirk- und Blindstrom des gemessenen Außenleiters
- Relative Oberschwingungspegel der 5., 7., 11. und 13. Harmonischen, bezogen auf die angeschlossene Messspannung
- Die aufgetretenen Maximalwerte der Grenzwertüberschreitungen (Überstrom, Oberschwingungen, und cos-phi) können in der Anzeige abgerufen werden.

- **Zählen und Anzeigen der Schaltspiele jedes Steuerkontaktes und Meldung, wenn vorgegebener Grenzwert erreicht ist.**

Schaltkontakte unterliegen beim Schalten kapazitiver Lasten hohen Beanspruchungen. Prellende Schaltkontakte führen zu hohen Umladeströmen in den Kondensatoren und hohem Verschleiß des Schaltkontaktes. Rechtzeitiges Wechseln der Schaltschütze kann die Lebenserwartung der Kompensationsanlage erheblich verlängern. Der Blindleistungsregler meldet den optimalen Zeitpunkt für den anstehenden Schützwechsel und spart somit Kosten. Zur vorbeugenden Wartung kann der Betreiber die Anzahl der bisher aufgelaufenen Schaltspiele jeder einzelnen Stufe in der Anzeige abrufen.

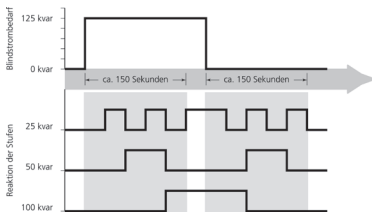


Bild 25: Regelverfahren eines klassischen Blindleistungsreglers mit Pilgerschrittverfahren

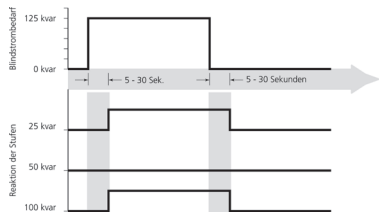


Bild 26: Regelverfahren von modernen FRAKO Blindleistungsreglern RM 9606, EMR 1100 S und EMR 1100

Anzeigen, Meldungen und Alarme	<i>Mitteilung als</i>	<i>Anzeigeform</i>	<i>Alarmmeldekontakt</i>
Ist-cos-phi	Anzeige	Display	
Schein-, Wirk-, Blindstrom (Echtwert)	Anzeige	Display	
Oberschwingungen (5., 7., 11., 13. Harmonische)	Anzeige	Display	
Oberschwingungen (5., 7., 11., 13. Harmonische)	Alarm	Display / LED	schließt
Überstrom (einstellbar von $1,05 I_{Nenn}$ bis $3,0 I_{Nenn}$)	Alarm	Display / LED	schließt
Ist-cos-phi außerhalb der Regelkennlinie mit Anzeige der fehlenden Kondensatorleistung	Alarm	Display / LED	schließt (abschaltbar)
Anzahl der Schaltspiele je Steuerkontakt	Anzeige	Display	
Grenzwerte der Schaltspiele überschritten	Alarm	Display / LED	schließt
Fehlende Messspannung	Alarm	Display	schließt
Fehlender Messstrom	Meldung	Display	
Regler registriert an keinem Steuer- kontakt Kondensatorleistung	Alarm	Display	schließt
Zugeschaltete			
Kondensatorstufen	Anzeige	LED	
Fehlende Betriebsspannung			schließt

Stromwandler

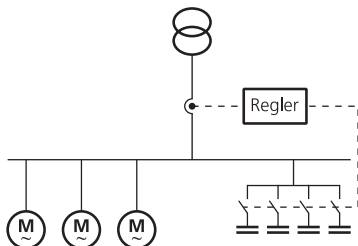


Bild 27: Richtig angeordneter Stromwandler, erfasst Verbraucher- und Kondensatorstrom

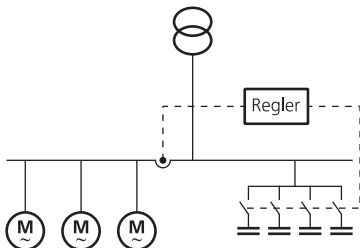


Bild 28: Falsch! Der Wandler erfasst nur Verbraucherstrom, die Anlage schaltet zu, aber nicht wieder ab. Der Blindleistungsregler meldet "C = 0" (kein Kondensatorstrom messbar)!

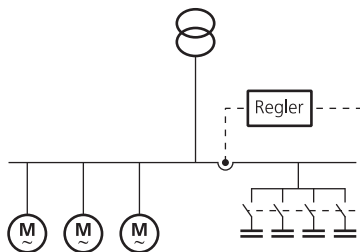


Bild 29: Falsch! Der Wandler erfasst nur Kondensatorstrom, die Anlage schaltet nicht zu. Der Blindleistungsregler meldet "I = 0" (kein Strom im Wandlerkreis)!

Für den Betrieb von Blindleistungs-Regelanlagen ist ein Stromwandler erforderlich. Dieser ist im Lieferumfang **nicht** enthalten, kann jedoch nach Klärung der kundenseitigen Erfordernisse mitgeliefert werden. Der Primärstrom des Wandlers wird durch die Stromaufnahme der Verbraucher bestimmt. Die Auslegung richtet sich nach der maximalen Strombelastung bzw. nach dem Anschlusswert des Transformators. Der Strompfad des Blindleistungsreglers ist für einen Stromwandler .../1 bis .../5 A mit einer Leistung von 5 VA, Klasse 3 ausgelegt. Werden Strommessgeräte in Reihe zum Regler geschaltet, muss ein Wandler mit entsprechend höherer Leistung verwendet werden. Der Eigenverbrauch im Regler-Strompfad beträgt ca. 1,8 VA bei 5 A Wandler-Nennstrom.

Falls am selben Wandler weitere Messgeräte betrieben werden sollen, muss dies bei der Auslegung seiner Leistung berücksichtigt werden.

Auch in den Stromwandler-Leitungen treten Verluste auf, die bei längeren Strecken zwischen Wandler und Blindleistungsregler gleichfalls beachtet werden müssen.

Eigenverbrauch von Wandlerleitungen
aus Kupfer, bezogen auf 5A Sekundärstrom:

Querschnitt in mm ²	Eigenverbrauch je 1 m Doppelleitung in VA
2,5	0,36
4,0	0,22
6,0	0,15
10,0	0,09

Wichtig: Der Stromwandler muss in einem beliebigen Außenleiter so eingebaut werden, dass er vom gesamten Strom der zu kompensierenden Verbraucher und vom Kondensatorstrom durchflossen wird (beachten Sie bitte die nebstehenden Bilder). Anschluss P1 (K) liegt auf der Seite der Einspeisung, der Anschluss P2 (L) auf der Seite der Verbraucher.

Vorsicht: Bei Unterbrechung des Strompfades treten Überspannungen auf, die den Wandler zerstören können. Schließen Sie daher vor dem Öffnen des Wandlerkreises die Anschlüsse S1 (k) und S2 (l) kurz.

Sicherungen und Kabel

Für die Ausführung der Installationsarbeiten sind die Vorschriften VDE 0100, VDE 0105, die allgemeinen Richtlinien der VDEW und die Anschlussbedingungen des zuständigen EVU's zu beachten. Nach VDE 0560 Teil 46 müssen Kondensatoreinheiten für einen Dauer-Effektivstrom vom 1,3-fachen des Stromes geeignet sein, der sich bei sinusförmiger Nennspannung und Nennfrequenz einstellt". Unter Berücksichtigung der Kapazitätstoleranz von $1,1 \times C_N$ kann der maximal zulässige Strom Werte bis $1,38 \times I_N$ erreichen. Diese Überlastbarkeit sowie der hohe Einschaltstrom der Kondensatoren sind bei der Dimensionierung von Sicherungen und Kabelquerschnitten zu berücksichtigen.

Wichtig: FRAKO Leistungs-Kondensatoren bieten eine Strombelastbarkeit bis zu $2,2 \times I_N$.

Tabelle 5: Sicherungen und Zuleitungsquerschnitte nach VDE 0298 Teil 4, Verlegeart C

Leistung in kvar	400 V/50 Hz			525 V/50 Hz			690 V/50 Hz		
	Strom		Querschnitt in mm ²	Strom		Querschnitt in mm ²	Strom		Querschnitt in mm ²
	in A	Sicherung in A		in A	Sicherung in A		in A	Sicherung in A	
2,5	3,6	10	4 x 1,5	2,7	10	4 x 1,5	2,1	10	4 x 1,5
5	7,2	10	4 x 1,5	5,5	10	4 x 1,5	4,2	10	4 x 1,5
6,25	9,0	16	4 x 2,5	6,9	10	4 x 1,5	5,2	10	4 x 1,5
7,5	10,8	16	4 x 2,5	8,2	16	4 x 2,5	6,3	10	4 x 1,5
10	14,4	20	4 x 2,5	11,0	16	4 x 2,5	8,4	16	4 x 2,5
12,5	18,0	25	4 x 4	13,7	20	4 x 2,5	10,5	16	4 x 2,5
15	21,7	35	4 x 6	16,5	25	4 x 4	12,6	20	4 x 2,5
17,5	25,3	35	4 x 6	19,2	35	4 x 6	14,6	25	4 x 4
20	28,9	50	4 x 10	22,0	35	4 x 6	16,7	25	4 x 4
25	36,1	50	4 x 10	27,5	50	4 x 10	20,9	35	4 x 6
27,5	39,7	63	4 x 16	30,2	50	4 x 10	23,0	35	4 x 6
30	43,3	63	4 x 16	33,0	50	4 x 10	25,1	35	4 x 6
31,25	45,1	63	4 x 16	34,4	50	4 x 10	26,1	50	4 x 10
37,5	54,1	80	3 x 25/16	41,2	63	4 x 16	31,4	50	4 x 10
40	57,7	80	3 x 25/16	44,0	63	4 x 16	33,5	50	4 x 10
43,75	63,1	100	3 x 35/16	48,1	80	3 x 25/16	36,6	63	4 x 16
45	65,0	100	3 x 35/16	49,5	80	3 x 25/16	37,7	63	4 x 16
50	72,2	100	3 x 35/16	55,0	80	3 x 25/16	41,8	63	4 x 16
52,5	75,8	125	3 x 50/25	57,7	80	3 x 25/16	43,9	63	4 x 16
60	86,6	125	3 x 50/25	66,0	100	3 x 35/16	50,2	80	3 x 25/16
62,5	90,2	125	3 x 50/25	68,7	100	3 x 35/16	52,3	80	3 x 25/16
67,5	97,4	160	3 x 70/35	74,2	125	3 x 50/25	56,5	80	3 x 25/16
68,75	99,2	160	3 x 70/35	75,6	125	3 x 50/25	57,5	80	3 x 25/16
75	108,3	160	3 x 70/35	82,5	125	3 x 50/25	62,8	100	3 x 35/16
87,5	126,3	200	3 x 95/50	96,2	160	3 x 70/35	73,2	125	3 x 50/25
93,75	135,3	200	3 x 95/50	103,1	160	3 x 70/35	78,4	125	3 x 50/25
100	144,3	200	3 x 95/50	110,0	160	3 x 70/35	83,7	125	3 x 50/25
112,5	162,4	250	3 x 120/70	123,7	200	3 x 95/50	94,1	160	3 x 70/35
125	180,4	250	3 x 120/70	137,5	200	3 x 95/50	104,6	160	3 x 70/35
150	216,5	315	3 x 185/95	165,0	250	3 x 120/70	125,5	200	3 x 95/50
175	252,6	400	2x 3 x 95/50	192,5	315	3 x 185/95	146,4	250	3 x 120/70
200	288,7	400	2x 3 x 95/50	219,9	315	3 x 185/95	167,3	250	3 x 120/70
225	324,8	500	2x 3 x 120/70	247,4	400	2x 3 x 95/50	188,3	315	3 x 185/95
250	360,8	500	2x 3 x 120/70	274,9	400	2x 3 x 95/50	209,2	315	3 x 185/95
275	396,9	630	2x 3 x 185/95	302,4	500	2x 3 x 120/70	230,1	400	2x 3 x 95/50
300	433,0	630	2x 3 x 185/95	329,9	500	2x 3 x 120/70	251,0	400	2x 3 x 95/50
350	505,2	800	2x 3 x 240/120	384,9	630	2x 3 x 185/95	292,9	500	2x 3 x 120/70
375	541,3	800	2x 3 x 240/120	412,4	630	2x 3 x 185/95	313,8	500	2x 3 x 120/70
400	577,4	800	2x 3 x 240/120	439,9	630	2x 3 x 185/95	334,7	500	2x 3 x 120/70
500	721,7	1000	3x 3 x 185/95	549,9	800	2x 3 x 240/120	418,4	630	2x 3 x 185/95

Table 6: Außendurchmesser von Kabeln und Leitungen

Leiterquerschnitt in mm ²	NYM Ø in mm	NYY Ø in mm	NYCY/NYCWY Ø in mm	H05VV-F Ø in mm	H07RN-F Ø in mm
2 x 1,5	9,0	11,0	12,0	10,5	11,5
2 x 2,5	10,5	13,0	14,0	12,5	13,5
3 x 1,5	10,0	11,0	13,0	11,0	12,5
3 x 2,5	11,0	13,0	14,0	13,0	14,5
3 x 4,0	12,5	15,0	16,0	-	16,0
3 x 6,0	14,0	16,0	17,0	-	20,0
3 x 10,0	17,0	19,0	18,0	-	25,5
3 x 16,0	20,0	21,0	21,0	-	29,0
4 x 1,5	10,5	13,0	14,0	12,5	13,5
4 x 2,5	12,0	14,0	15,0	14,0	15,5
4 x 4,0	14,0	16,0	17,0	-	18,0
4 x 6,0	15,0	17,0	18,0	-	22,0
4 x 10,0	18,0	20,0	20,0	-	28,0
4 x 16,0	23,0	23,0	23,0	-	32,0
4 x 25,0	27,5	27,0	28,0	-	37,0
4 x 35,0	31,0	30,0	29,0	-	42,0
4 x 50,0	-	35,0	34,0	-	48,0
4 x 70,0	-	40,0	37,0	-	54,0
4 x 95,0	-	45,0	42,0	-	60,0
4 x 120,0	-	50,0	47,0	-	-
4 x 150,0	-	53,0	52,0	-	-
4 x 185,0	-	60,0	60,0	-	-
4 x 240,0	-	71,0	70,0	-	-
5 x 1,5	11,0	13,5	15,0	13,5	15,0
5 x 2,5	13,0	15,0	17,0	15,5	17,0
5 x 4,0	15,0	16,5	18,0	-	19,0
5 x 6,0	18,0	19,0	20,0	-	24,0
5 x 10,0	20,0	21,0	-	-	30,0
5 x 16,0	24,0	23,0	-	35,0	-
7 x 1,5	-	13,5	-	-	-
10 x 1,5	-	17,0	-	-	-
12 x 1,5	-	17,5	-	-	-
14 x 1,5	-	18,0	-	-	-
16 x 1,5	-	19,0	-	-	-
24 x 1,5	-	23,0	-	-	-

NYM Mantelleitung

NYY Kabel mit Kunststoffmantel

NYCY Kabel mit konzentrischem Leiter und Kunststoffmantel

NYCWY Kabel mit konzentrischem, wellenförmigem Leiter und Kunststoffmantel

H05VV-F Leichte Gummischlauchleitung (NLH, NMH)

H07RN-F Schwere Gummischlauchleitung (NSH)

Tabelle 7: Leitungseinführung mittels Kabelverschraubungen

Metrisches Gewinde	Pg	Leitungsaußen- durchmesser in mm	Durchgangs- bohrung
M 16 x 1,5	11	6,5 - 10,5	19,0
-	13,5	8,0 - 12,5	21,0
M 20 x 1,5	16	10,0 - 15,0	23,0
M 25 x 1,5	21	12,0 - 20,0	29,0
M 32 x 1,5	29	19,0 - 26,5	38,0
M 40 x 1,5	36	29,0 - 34,0	48,0
-	42	34,0 - 41,0	55,0
M 50 x 1,5	48	40,0 - 45,0	60,0

Schutzart

Für die Schutzarten-Kennzeichnung nach EN 60529, werden zwei Buchstaben und eine zweistellige Zahl verwendet. IP steht für "International Protektion" (Protektion = Sicherheit). Die gebräuchlichsten Kurzzeichen:

Tabelle 8: Bedeutung der Kurzzeichen für Schutzarten

Schutzart	Berührungsschutz	Schutz gegen Fremdkörper	Wasserschutz
IP 00	keinen	keinen	keinen
IP 10	gegen zufälliges oder versehentliches Berühren	über 50 mm Durchmesser	keinen
IP 20	mit Fingern und Gegenständen max. 80 mm lang	über 12,5 mm Durchmesser	keinen
IP 30	mit Werkzeugen und Drähten mit Dicke > 2,5 mm	über 2,5 mm Durchmesser	keinen
IP 31	mit Werkzeugen und Drähten mit Dicke > 2,5 mm	über 2,5 mm Durchmesser	gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
IP 40	mit Drähten oder Bändern mit Dicke > 1 mm	über 1 mm Durchmesser	keinen
IP 41	mit Drähten oder Bändern mit Dicke > 1 mm	über 1 mm Durchmesser	gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
IP 42	mit Drähten oder Bändern mit Dicke > 1 mm	über 1 mm Durchmesser	gegen Tropfwasser, bis 15° gegen die Senkrechte
IP 43	mit Drähten oder Bändern mit Dicke > 1 mm	über 1 mm Durchmesser	gegen Sprühwasser, bis 60° gegen die Senkrechte
IP 54	vollständiger Schutz	Staubablagerung	gegen Spritzwasser aus allen Richtungen
IP 65	vollständiger Schutz	Staubeintritt	gegen Wasserstrahl aus allen Richtungen

Es bedeutet:

U = Spannung in V

I = Strom in A

f_n = Netzfrequenz in Hz

f_r = Reihenresonanzfrequenz in Hz

p = Verdrosselungsfaktor in %

Q_c = Kondensatorleistung in var

C = Kapazität in F (Farad)

P = Wirkleistung in W

S = Scheinleistung in VA

Q = Blindleistung in var

→

// Berechnungsformeln zum Kondensator

Kondensatorleistung
einphasig

$$Q_c = C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Beispiel: 83 μF bei 400 V / 50 Hz
 $0,000083 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 4.172 \text{ var} = 4,17 \text{ kvar}$

Kondensatorleistung
bei Dreieckschaltung

$$Q_c = C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Beispiel: 3 x 33,2 μF bei 400 V / 50 Hz
 $3 \cdot 0,0000332 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 5 \text{ kvar}$

Kondensatorleistung
bei Sternschaltung

$$Q_c = C \cdot (U/\sqrt{3})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Beispiel: 3 x 33,2 μF bei 400 V / 50 Hz
 $3 \cdot 0,0000332 \cdot 231^2 \cdot 314,16 = 1,67 \text{ kvar}$

Kondensatorstrom
im Außenleiter

$$I = \frac{Q}{U \cdot \sqrt{3}} \quad \text{oder:} \quad Q_c = I \cdot U \cdot \sqrt{3}$$

Beispiel: 25 kvar bei 400 V
 $25.000 / (400 \cdot 1,73) = 36 \text{ A}$

Reihenresonanz-
frequenz (f_r) und
Verdrosselungsfaktor (p)
von verdrosselten
Kondensatoren

$$f_r = f_n \cdot \sqrt{\frac{I}{p}} \quad \text{oder:} \quad p = \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2$$

Beispiel: $p = 0,07$ (7% Verdrosselung) im
50 Hz-Netz $f_r = 189 \text{ Hz}$

Wirksame
Kondensatorleistung
dreiphasig in
verdrosselter
Ausführung

$$Q_c = \frac{C \cdot 3 \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{1 - p}$$

Beispiel: 3 x 332 μF bei 400 V / 50 Hz
mit $p = 7\%$ verdrosselt
 $0,000332 \cdot 3 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 1 - 0,07 = 53,8 \text{ kvar}$

Leistungsfaktor
und Umrechnung
cos und tan

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{oder:} \quad \cos \varphi = \sqrt{\frac{I}{I + \tan^2 \varphi}} \quad \text{oder:} \quad \cos \varphi = \sqrt{\frac{I}{I + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad \text{oder:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{I}{\cos^2 \varphi} - I} \quad \text{oder:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{I}{\left(\frac{P}{S}\right)^2} - I}$$

// Oberschwingungen

Was sind Oberschwingungen?

In modernen Niederspannungsnetzen findet man zunehmend Verbraucher, die dem Netz einen nichtsinusförmigen Strom entnehmen. Diese Verbraucherströme erzeugen an den Netzimpedanzen einen Spannungsabfall, der die ursprünglich sinusförmige Netzspannung verzerrt. Diese Überlagerungen können nach Fourier in die Grundschiwingung (Netzfrequenz) und die einzelnen Oberschwingungen (Harmonische) zerlegt werden. Die Frequenzen der Oberschwingungen sind ganzzahlige Vielfache der Grundschiwingung und werden mit der Ordnungszahl „n“ oder „v“ gekennzeichnet (Beispiel: Netzfrequenz = 50 Hz → 5. Harmonische = 250 Hz).

lineare Verbraucher sind:

- ohmsche Widerstände (Widerstandsheizungen, Glühlampen etc.)
- Drehstrommotoren
- Kondensatoren

nichtlineare Verbraucher (Oberschwingungserzeuger) sind:

- Transformatoren und Drosseln
- Stromrichter
- Gleich- und Umrichter, besonders bei drehzahlgeregelten Asynchronmaschinen
- Induktions- und Lichtbogenöfen, Schweißgeräte
- unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV-Anlagen)
- Einphasige, getaktete Stromversorgungen für moderne elektronische Verbraucher, wie Fernseher, Videogeräte, Computer, Bildschirme, Drucker, Faxgeräte, elektronische Vorschaltgeräte, Kompakt-Energiesparleuchten

Jedes periodische Signal der Frequenz „f“, (unabhängig von der Kurvenform) besteht aus der Summe:

- der Sinuskomponente der Frequenz „f“, genannt "Grundschiwingung" oder „h₁“.
- der Sinuskomponenten der ganzzahligen, mehrfachen Frequenz „f“, genannt "Harmonische" „h_n“.
- und ggf. einer DC Komponente (falls vorhanden).

$$y_{(t)} = h_{1(t)} + h_{3(t)} \dots$$

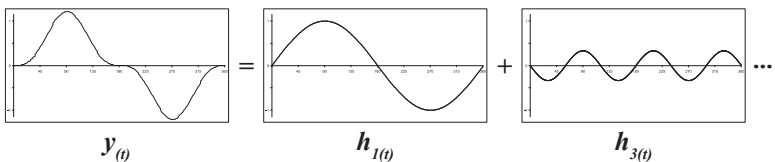
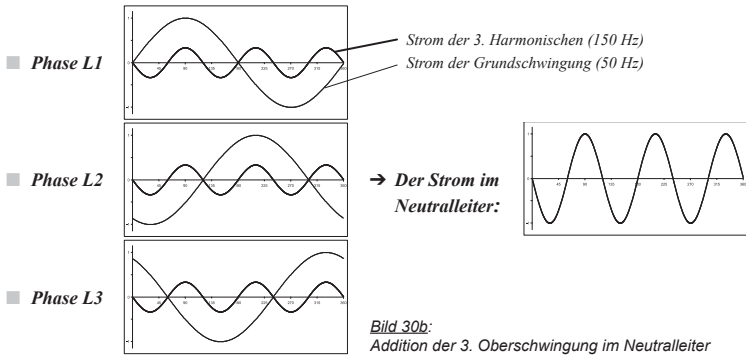


Bild 30a: Aufteilung eines periodischen Signals in Harmonische

Oberschwingungen können unterteilt werden in:

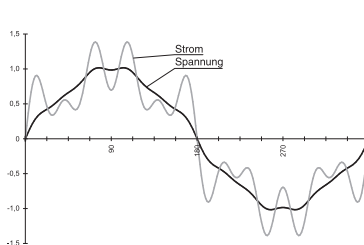
- **geradzahlige Harmonische** (2., 4., 6. usw.)
entstehen bei großen Lastsprüngen oder Fehler in Umrichtern
- **ungeradzahlige Harmonische** (3., 5., 7. usw.)
→ **durch 3 teilbare Harmonische** (3., 9., 15. usw.)
entstehen durch unsymmetrische Last und einphasige OS-Erzeuger
Typisch: Bürogebäude, Krankenhäuser, Softwarehäuser, Banken ...
Fabriken mit zweiphasigen Schweißanlagen
Problem: diese Oberschwingungen addieren sich im Neutralleiter!



- **nicht durch 3 teilbare Harmonische** (5., 7., 11., 13. usw.)
entstehen durch dreiphasige Oberschwingungserzeuger
5. und 7. Oberschwingung: beim Einsatz von 6-pulsigen Umrichtern
11. und 13. Oberschwingung: beim Einsatz von 12-pulsigen Umrichtern
Problem: die Oberschwingungen werden über den Transformator übertragen!

Der Gesamtoberschwingungspegel **THD** (Total Harmonic Distortion) ergibt sich aus der geometrischen Summe aller vorhandenen Oberschwingungen, steht in der Regel im Verhältnis zur Grundschwingung - der THD erlaubt einen schnellen Überblick über die Netzqualität.

Jede Oberschwingung ist für sich als eigenes System mit unterschiedlicher Phasenlage zu sehen! Daraus ergibt sich eine generelle Differenz zwischen **cos φ** (der Grundschwingung) und **PF** (Powerfaktor, über alle OS).



Oberschwingungen werden nicht nur in Industrienetzen, sondern auch zunehmend in privaten Haushalten erzeugt.

Von den Oberschwingungserzeugern werden in der Regel nur ungeradzahlige Harmonische eingespeist, es treten daher hauptsächlich die 3., 5., 7., 9., 11. usw. Harmonische auf.

Bild 30c: Netzstrom und -spannung mit einer Überlagerung von: 5% der 5. Oberschwingung, 4% der 7. Oberschwingung und 2,5% der 11. Oberschwingung

Wie entstehen Oberschwingungen?

- im eigenen Niederspannungsnetz, besonders wenn geregelte Antriebe installiert sind.
- in jedem Haushalt: in jedem Fernseher, Computer und in Kompakt-Energiesparleuchten mit elektronischem Vorschaltgerät. Durch die Vielzahl dieser Verbraucher und durch die phasengleichen Ströme entstehen in den Abendstunden hohe Oberschwingungspegel in manchen Mittelspannungsnetzen.

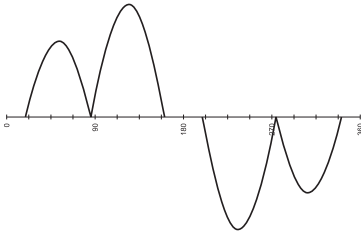


Bild 31: Netzstrom eines Umrichters für Asynchronmaschinen

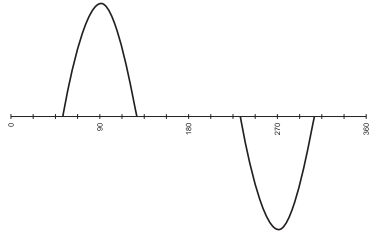


Bild 32: Strom eines Netzgleichrichters

Wie hoch sind diese Oberschwingungen, wenn noch keine Kompensationsanlage installiert ist?

a) *im eigenen Niederspannungsnetz:*

je nach Leistung der installierten Umrichter und Stromrichter.

Wenn z. B. ein großer 6-puls-Umrichter im Netz installiert ist, dessen Leistung 50% der Trafo-Nennleistung beträgt, dann entstehen dadurch etwa

- **4% der 5. Harmonischen (250 Hz) und**
- **3% der 7. Harmonischen (350 Hz)**

Üblicher ist es, dass mehrere nicht miteinander gekoppelte kleine Stromrichter in einem Netz installiert sind. Durch die unterschiedliche Phasenlage der Ströme der einzelnen Stromrichter sind die resultierenden Oberschwingungs-Spannungen geringer.

Wenn z. B. mehrere Stromrichter mit einer Leistung von zusammen ca. 25% der Trafo-Nennleistung installiert sind, entstehen dadurch ca.

- **1 - 1,5% der 5. Harmonischen und**
- **0,7 - 1% der 7. Harmonischen.**

Dies sind Richtwerte für eine erste Abschätzung, ob eine verdrosselte Kompensationsanlage installiert werden muss.

b) *im Mittelspannungsnetz:*

Dies wird heute in den meisten Netzen überwiegend durch die Oberschwingungserzeuger in den privaten Haushalten (im wesentlichen Fernsehgeräte) beeinflusst, was sich auch am Tagesverlauf der 5. Oberschwingung verdeutlicht:

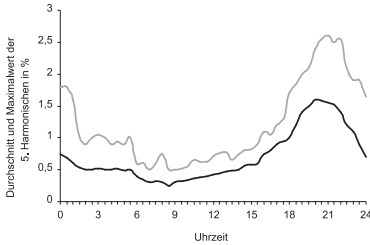


Bild 33: Durchschnitt und Maximalwert der 5. Harmonischen

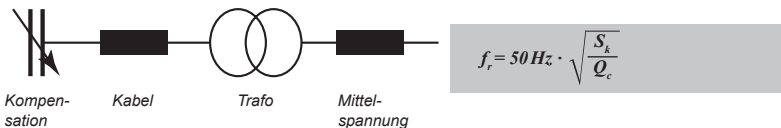
Der Oberschwingungspegel im Mittelspannungsnetz einer Stadtversorgung mit Industrieanteil an Werktagen.

Durchschnittswert und Maximalwert einer Messreihe, die in den Jahren 1985-87 von der FGH durchgeführt wurde. Diese Werte sind heute mit Sicherheit höher. Der Anstieg am Abend rührt von der Vielzahl von Fernsehern und anderen nichtli- neren Verbrauchern in den privaten Haushalten.

In Ballungsgebieten können der Mittelspannung in den Abendstunden über **4% 250 Hz und bis ca. 1,5% 350 Hz** überlagert sein. Die höheren Harmonischen sind meist vernachlässigbar. Der Pegel ist nur begrenzt vorhersehbar!

Welchen Einfluß hat eine Kompensation in einem Netz mit Oberschwingungen?

Eine unverdrosselte Kompensationsanlage bildet mit den reaktiven Netzimpedanzen einen Schwingkreis. Für die Resonanzfrequenz gibt es eine einfache Faustformel:



S_k = Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt der Kompensationsanlage
 Q_c = Leistung der Kompensationsanlage

Die Kurzschlussleistung S_k am Anschlusspunkt der Kompensationsanlage wird

- im wesentlichen durch den Trafo bestimmt (S_n / u_k),
- um etwa 10% durch die Impedanz des Mittelspannungsnetzes reduziert
- kann stark durch lange Zuleitungen zwischen Trafo und Kompensation reduziert werden.

Beispiel:

- Trafo 1000 kVA, $u_k = 6\%$
- Kurzschlussleistung des Mittelspannungsnetzes 150 MVA, $S_k \approx 2,6$ MVA
- Kompensation 400 kvar in 8 Stufen, unverdrosselt

Kondensatorleistung (Q_c)	Resonanzfrequenz (f_r)
100 kvar	562 Hz
250 kvar	355 Hz
400 kvar	281 Hz

Beim Zuschalten der Stufen der Kompensationsanlage verändert sich die Resonanzfrequenz „ f_r “ des Netzes erheblich und ist mehrfach in der Nähe der Frequenz einer Netzoberschwingung. Ist die Eigenresonanz dieses Schwingkreises in der Nähe einer vorhandenen Netzoberschwingung, so sind resonanzbedingte Anhebungen der Oberschwingungsspannungen zu erwarten. Unter Umständen können diese bis zum Faktor der Netzgüte (in Industrienetzen ca. 5-10!) multipliziert werden:

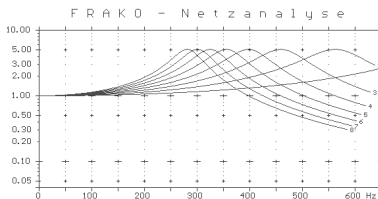


Bild 34: Verstärkungsfaktor der Oberschwingungsspannungen bei einer unverdrosselten Kompensation am Niederspannungsnetz

Wann können gefährliche Netzresonanzen auftreten?

Anhand des vorstehenden Diagramms kann abgeschätzt werden, ob Resonanzprobleme mit Oberschwingungen auftreten können, hierfür genügen einfache Regeln:

1.) Liegt die Resonanzfrequenz

- 10% unter-/oberhalb einer Netzoberschwingung, dann wird diese in einem Netz hoher Güte (z. B. abends und nachts) um **bis zu einem Faktor über 4 verstärkt**.
- 20% oberhalb einer Netzoberschwingung, dann wird diese in einem Netz hoher Güte **deutlich, um einen Faktor bis zu 2,5 verstärkt**.
- 30% oberhalb einer Netzharmonischen, dann wird diese nur gering, **um einen Faktor bis ca. 1,7 verstärkt**.

2.) In einem Netz ohne eigene Oberschwingungserzeuger, jedoch mit deutlichen Oberschwingungen auf dem Mittelspannungsnetz können

- bei einer Resonanzfrequenz unter 400 Hz Resonanzüberhöhungen der 7. Harmonischen,
- **bei einer Resonanzfrequenz unter 300 Hz gefährliche Resonanzüberhöhungen der 5. Harmonischen (250 Hz) auftreten.**

Welchen Einfluß hat die Netzkonfiguration auf die Oberschwingungsproblematik?

Die Netzkurzschlussleistung bestimmt die Resonanzfrequenz und bei Oberschwingungserzeugern im eigenen Netz die Höhe der Oberschwingungen auf der Netzspannung.

- Problematisch ist eine **zu niedrige Netzkurzschlussleistung** am Anschlusspunkt der Kompensation.
- Problematisch ist eine **stark veränderte Kurzschlussleistung** aufgrund veränderter Schaltzustände.

Beispiel:

In vielen Großbetrieben werden die Niederspannungsstationen zur Sicherung der Energieversorgung über eine Ringleitung verbunden. Dieses Netz hat eine hohe Kurzschlussleistung. Auch bei größerer Kompensationsleistung und höherer Stromrichterlast bestehen kaum Oberschwingungsprobleme, da die Resonanzfrequenz hoch ist und die Oberschwingungsströme mit geringem Spannungsabfall ins Mittelspannungsnetz abfließen. Beim Auftrennen der Ringleitung, z. B. zu Wartungsarbeiten, sinkt die Kurzschlussleistung unter Umständen deutlich, die Resonanzfrequenz kann unter 300 Hz sinken!

Spannungs- und Strombelastung unverdrosselter Kompensationsanlagen

Beim Auftreten einer Resonanz erhöht sich der Effektivwert der Netzspannung nur geringfügig, der Effektivwert des Kondensatorstromes jedoch erheblich. Bei einer Resonanz mit der 5. Harmonischen kann diese z. B. auf 15% ansteigen, dann erhöht sich:

- der Effektivwert der Netzspannung um 1%
- der Scheitelwert der Netzspannung um 10-15% (je nach Phasenlage)
- **der Effektivwert des Kondensatorstroms um 25%!**

Bei einer Resonanz mit der 11. Harmonischen kann diese z. B. auf 10% ansteigen, dann erhöht sich:

- der Effektivwert der Netzspannung um 0,5%
- der Scheitelwert der Netzspannung um 6-10%
- **der Effektivwert des Kondensatorstroms um 50%!**

Deshalb ist eine hohe Strombelastbarkeit der Kondensatoren eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale!

FRAKO Kondensatoren sind bis zum 2,7-fachen des Nennstromes dauernd belastbar!

Projektierung in Netzen mit Oberschwingungen

Was ist zu tun, wenn eine Resonanz möglich, aber wenig wahrscheinlich ist?

Darunter fällt heute ein wesentlicher Teil der projektierten Anlagen, z. B.:

- Keine eigenen Oberschwingungserzeuger im Netz, keine Oberschwingungen auf dem Mittelspannungsnetz, aber eine Resonanzfrequenz unter 400 Hz.
- Durch Verändern der Netzkonfiguration, z. B. bei Wartungsarbeiten, kann die Resonanzfrequenz unter 400 Hz sinken, auf dem Mittelspannungsnetz sind Oberschwingungen vorhanden.
- Es ist geplant, später Anlagen mit Stromrichtern anzuschaffen.

Um eine nicht verdrosselte Anlage vor dem Auftreten einer auch nur gelegentlichen Resonanz zu schützen, ist das **Netzüberwachungsgerät EMA 1101** von größtem Nutzen. Es überwacht das Netz in allen 3 Außenleitern, setzt bei Überschreiten eines gefährlichen Oberschwingungspegels die Anlage außer Betrieb und schaltet sie automatisch bei Unterschreiten des kritischen Pegels wieder zu. Die aufgetretenen Maximalwerte bleiben aber gespeichert und können über den Busanschluß des EMA 1101 ausgelesen werden.

In Netzen mit symmetrischer Belastung kann auch der **Blindleistungsregler EMR 1100** eingesetzt werden. Er überwacht das Auftreten von Resonanzen. Der Blindleistungsregler EMR 1100 ermittelt die Oberschwingungs-Spannungen der Messphase und errechnet den Effektivstrom der Kondensatoren. Beim Überschreiten eines programmierbaren Grenzwertes wird die Anlage abgeschaltet und beim Unterschreiten wieder zugeschaltet.

In solchen Fällen werden häufig **nachverdrosselbare Kompensationsanlagen** eingesetzt.

Projektierung von Kompensationsanlagen in Netzen mit Oberschwingungen

Die beste Information über das Betriebsverhalten einer geplanten Kompensation erhält man durch die Kombination von zwei Maßnahmen:

- Messung der Oberschwingungs-Spannungen und -Ströme über mehrere Tage, ohne Kompensation.
- Theoretische Berechnung des Resonanzverhaltens des Netzes.

In dem gemessenen Netz sind dann mit Kompensation folgende Oberschwingungspegel zu erwarten:

Beispiel:

Ein durchschnittliches Niederspannungsnetz mit einem 1000 kVA Trafo. Die Schaltanlage ist über zwei parallel verlegte, 20 m lange Kabel angeschlossen (entspricht der Impedanz von 10 m Kabel). Als Last darf nur rein ohmsche Last berücksichtigt werden, da z. B. Asynchronmotoren keine Dämpfung auf Oberschwingungen darstellen. Bei voll eingeschalteter Anlage mit 400 kvar wird die 5. Harmonische (250 Hz) etwa um den Faktor 3 verstärkt. Bei 250 kvar wird die 7. Oberschwingung ca. um den Faktor 4 verstärkt!

Tagsüber, bei höherer Netzdämpfung, sind diese Faktoren geringer, abends und am Wochenende kann der Verstärkungsfaktor der 7. Harmonischen höher sein.

Maximalwert der Messung ohne Kompensation, multipliziert mit dem Resonanzfaktor aus der Netzanalyse.

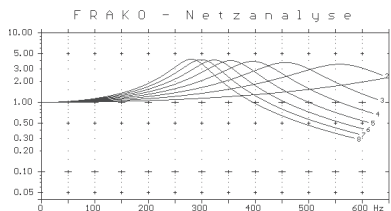


Bild 35: Anhebung der Oberschwingungsspannungen in Abhängigkeit von den Kondensatorstufen

Maßnahmen gegen das Auftreten von Resonanzen

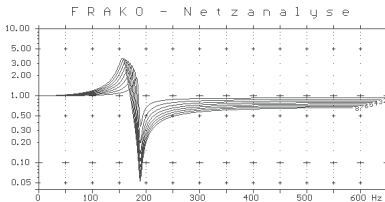
Sind bei der Projektierung einer Kompensationsanlage durch resonanzbedingte Verstärkungen der Harmonischen höhere Spannungspegel als:

4,0 %	der	3. Harmonischen	(150 Hz)
5,0 %	der	5. Harmonischen	(250 Hz)
4,0 %	der	7. Harmonischen	(350 Hz)
3,0 %	der	11. Harmonischen	(550 Hz)
2,1 %	der	13. Harmonischen	(650 Hz)

zu erwarten, können gravierende Störungen im Niederspannungsnetz auftreten:

- Probleme mit EDV-Anlagen und CNC-Maschinen
- Beschädigung von Stromrichtern bzw. Umrichtern
- unkontrolliertes Auslösen von Leistungsschaltern und Sicherungen
- Abschaltungen von unverdrosselten Kompensationsanlagen
- Spannungsanhebungen im Netz
- erhöhte Wirbelstromverluste in Transformatoren und Asynchronmotoren

Wenn der Pegel einzelner Oberschwingungen ohne Kompensation mehr als 1,5% (7. und höhere Harmonische) bzw. 2% (5. Harmonische) beträgt und wenn die Resonanzfrequenz des Netzes in der Nähe dieser Oberschwingungen liegen kann, dann muss damit gerechnet werden, dass diese zulässigen Grenzwerte durch resonanzbedingte Verstärkung überschritten werden. Um die Betriebssicherheit des Niederspannungsnetzes nicht zu gefährden, müssen in solchen Situationen ausschließlich verdrosselte Kompensationsanlagen eingesetzt werden.



Die Verdrosselung setzt die Resonanzfrequenz auf einen Wert unterhalb 250 Hz herab. Alle Oberschwingungen oberhalb der Resonanzfrequenz der Verdrosselung werden abgeschwächt.

Bild 36: Dämpfung der Oberschwingungsspannungen in Abhängigkeit von den verdrosselten Kondensatorstufen

Ein verdrosselter Kondensator ist eine Reihenschaltung aus Kondensator und Filterkreisdrossel, dessen Reihenresonanzfrequenz durch die Auslegung der Filterkreisdrossel so gewählt wird, dass sie unterhalb der 5. Harmonischen (250 Hz) liegt. Damit wirkt diese Kombination für alle Frequenzen oberhalb der Reihenresonanzfrequenz induktiv, Resonanzen zwischen den Kondensatoren und den reaktiven Netzimpedanzen sind nicht mehr möglich. Eine verdrosselte Anlage saugt einen Teil der Oberschwingungsströme ab. Um eine Überlastung durch die auf dem Netz immer vorhandene 5. Harmonische zu vermeiden, legt man heute die Resonanzfrequenz der Verdrosselung üblicherweise auf 189 Hz und darunter.

Die Verdrosselung wird entweder nach der Resonanzfrequenz Kondensator-Drossel oder nach dem relativen Spannungsabfall „p“ an der Drossel benannt. Beide Werte sind nach der folgenden Formel miteinander verknüpft:

$$f_r = 50 \text{ Hz} \cdot \sqrt{\frac{I}{p}}$$

zum Beispiel: $p = 0,07$ (7%)
 $f_r = 189 \text{ Hz}$

// Oberschwingungsgrenzwerte

Für die Beurteilung der Netzqualität kann - je nach Anwendungsart - eine Vielzahl von Normen herangezogen werden. Für normale Niederspannungsnetze, die an öffentlichen Netzen angeschlossen sind, gelten im wesentlichen zwei Normen:

- **EN 50160** "Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen" berücksichtigt Oberschwingungs-Spannungen bis zur 25. Ordnung
- **EN 61000-2-2** "Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen" berücksichtigt Oberschwingungs-Spannungen bis zur 50. Ordnung

Tabelle 9: Oberschwingungsgrenzwerte nach EN 50160 und EN 61000-2-2 im Vergleich

EN 50160		EN 61000-2-2	EN 50160		EN 61000-2-2
gerade Harmonische:			ungerade Harmonische:		
2. (100 Hz)	2,00%	2,00%	(durch 3 teilbar)		
4. (200 Hz)	1,00%	1,00%	3. (150 Hz)	5,00%	5,00%
6. (300 Hz)	0,50%	0,50%	9. (450 Hz)	1,50%	1,50%
8. (400 Hz)	0,50%	0,50%	15. (750 Hz)	0,50%	0,40%
10. (500 Hz)	0,50%	2,50%	21. (1050 Hz)	0,50%	0,30%
12. (600 Hz)	0,50%	2,13%	27. (1350 Hz)	-	0,20%
14. (700 Hz)	0,50%	1,86%	33. (1650 Hz)	-	0,20%
16. (800 Hz)	0,50%	1,66%	39. (1950 Hz)	-	0,20%
18. (900 Hz)	0,50%	1,50%	45. (2250 Hz)	-	0,20%
20. (1000 Hz)	0,50%	1,38%	ungerade Harmonische:		
22. (1100 Hz)	0,50%	1,27%	(nicht durch 3 teilbar)		
24. (1200 Hz)	0,50%	1,19%	5. (250 Hz)	6,00%	6,00%
26. (1300 Hz)	-	1,12%	7. (350 Hz)	5,00%	5,00%
28. (1400 Hz)	-	1,05%	11. (550 Hz)	3,50%	3,50%
30. (1500 Hz)	-	1,00%	13. (650 Hz)	3,00%	3,00%
32. (1600 Hz)	-	0,95%	17. (850 Hz)	2,00%	2,00%
34. (1700 Hz)	-	0,91%	19. (950 Hz)	1,50%	1,76%
36. (1800 Hz)	-	0,88%	23. (1150 Hz)	1,50%	1,41%
38. (1900 Hz)	-	0,84%	25. (1250 Hz)	1,50%	1,27%
40. (2000 Hz)	-	0,81%	29. (1450 Hz)	-	1,06%
42. (2100 Hz)	-	0,79%	31. (1550 Hz)	-	0,97%
44. (2200 Hz)	-	0,76%	35. (1750 Hz)	-	0,83%
46. (2300 Hz)	-	0,74%	37. (1850 Hz)	-	0,77%
48. (2400 Hz)	-	0,72%	41. (2050 Hz)	-	0,67%
50. (2500 Hz)	-	0,70%	43. (2150 Hz)	-	0,63%
Für beide Normen gleich:			47. (2350 Hz)	-	0,55%
Spannungsklirrfaktor THDu: max. 8%			49. (2450 Hz)	-	0,52%
Stromklirrfaktor THDi: Empfehlung, max. 20%					

// Projektierung in Netzen mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen

Die Impedanz des verdrosselten Kondensators ist bei 250 Hz um den Faktor x kleiner als die Impedanz des nicht verdrosselten Kondensators.

Für die 5. Oberschwingung hat die verdrosselte Kompensationsanlage:

- Saugkreis-Verhalten bei $x > 1$
- Sperrkreis-Verhalten bei $x < 1$

Bei stärkerem Saugkreisverhalten muß der maximal zulässige 250 Hz-Anteil begrenzt werden, um die Filterkreisdrossel nicht zu überlasten.

→ $p = 5,7\%$	$f_r = 210 \text{ Hz}$	$x = 2,4$	→ $u_{250 \text{ max}} = 4\%$
→ $p = 7\%$	$f_r = 189 \text{ Hz}$	$x = 1,33$	→ $u_{250 \text{ max}} = 5\%$
→ $p = 8\%$	$f_r = 177 \text{ Hz}$	$x = 1,0$	→ $u_{250 \text{ max}} = 5\%$
→ $p = 14\%$	$f_r = 134 \text{ Hz}$	$x = 0,42$	→ $u_{250 \text{ max}} = 5\%$

Beispiel: Sind der Netzspannung 4 % der 5. Harmonischen überlagert, dann saugt eine verdrosselte Kompensationsanlage die 5. Harmonische folgendermaßen ab:

→ bei 7%	-Verdrosselung:	mit $4\% \times 5$	$\times 1,33 = 0,27 \times I_n$
→ bei 5,7%	-Verdrosselung:	mit $4\% \times 5$	$\times 2,40 = 0,48 \times I_n$
→ bei 14%	-Verdrosselung:	mit $4\% \times 5$	$\times 0,42 = 0,08 \times I_n$

($I_n = 50 \text{ Hz-Nennstrom der Anlage}$)

Grundsätzlich ist bei der Auswahl von verdrosselten Kompensationsanlagen folgendes zu beachten:

- Es dürfen keine verdrosselten und unverdrosselten Kondensatoren am gleichen Niederspannungsnetz parallel betrieben werden.
- Der Parallelbetrieb von Filterkreisanlagen mit unterschiedlichen Verdrosselungsfaktoren (p) ist möglich, die Belastung der Filterkreise ist jedoch unterschiedlich und sollte bei hohen Pegeln genau analysiert werden.
- Handelt es sich um galvanisch getrennte Niederspannungsnetze (Transformatoren, niederspannungsseitig nicht koppelbar), so kann je nach Erfordernis, das eine Netz verdrosselt und das andere unverdrosselt kompensiert werden.
- Die gewählte Ausführung muss den Anforderungen des betreffenden EVU's genügen.

Blindleistungs-Kompensation in Netzen mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen (TRA)

Tonfrequenz-Rundsteueranlagen werden in Versorgungsnetzen der EVU's installiert, um über angeschlossene Empfänger Schaltungen, z. B. Tarifwechsel, durchzuführen. Dem Versorgungsnetz werden dazu höherfrequente Steuerspannungen (Tonfrequenzimpulse) überlagert, üblich sind Frequenzen im Bereich von 166 bis 1350 Hz.

Um die Funktion solcher Rundsteueranlagen nicht zu gefährden, dürfen die Steuerspannungspegel durch die Kundenanlage nicht unzulässig gestört werden. Hierzu wurden von Mitgliedern der VDEW, VSÖ und VSE „**Empfehlungen zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung**“ ausgearbeitet.

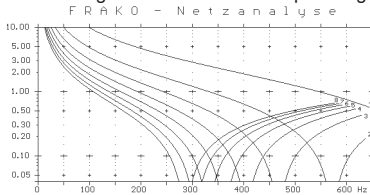
Für die Beurteilung von Netzen mit installierten Kompensationsanlagen wird ein Impedanzfaktor α^* zugrunde gelegt.

Der Impedanzfaktor α^ ist die auf die Trafoanschlussleistung bezogene Impedanz von Trafo und Kompensation.*

Bei einem Impedanzfaktor $\alpha^* \geq 0,5$ ist nicht mit Störungen von Rundsteueranlagen zu rechnen.

Einfluß von nicht verdrosselten Kompensationsanlagen

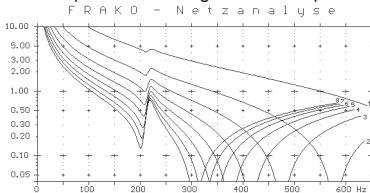
Eine unverdrosselte Kompensationsanlage bildet mit den reaktiven Netzimpedanzen einen Schwingkreis. Die Resonanzfrequenz „ f_r^* “ dieses Schwingkreises sinkt mit steigender Kompensationsleistung. In der Nähe der Resonanzfrequenz ist die Impedanz des Schwingkreises sehr niederohmig und kann den Steuerspannungspegel der Tonfrequenz erheblich abschwächen.



Bei voll eingeschalteter Kompensationsanlage wird ein Impedanzfaktor von $\alpha^* \geq 0,5$ nur noch für eine Rundsteuerfrequenz von 166 Hz erreicht.

Bild 37: Impedanzfaktor α^* in Abhängigkeit von zugeschalteten Kondensatoren

Kann der Impedanzfaktor nicht eingehalten werden, muss der Kompensation ein Tonfrequenz-Sperrkreis (TFS) vorgeschaltet werden. Ein Tonfrequenz-Sperrkreis ist ein Parallelschwingkreis aus Sperrdrossel und Resonanz-Kondensator. Er ist ausgelegt für die Nennleistung der Kompensation und deren Nennspannung. Ein Tonfrequenz-Sperrkreis erhöht die Impedanz der Kompensationsanlage bei Tonfrequenz auf einen Impedanzfaktor von $\alpha^* \geq 0,5$.



Bei eingeschalteter Kompensationsanlage wird ein Impedanzfaktor von $\alpha^* \geq 0,5$ für eine Rundsteuerfrequenz von 216,7 Hz sicher erreicht.

Bild 38: Impedanzfaktor α^* in Abhängigkeit von zugeschalteten Kondensatoren beim Einsatz eines vorgeschalteten Tonfrequenz-Sperrkreises für 216,67 Hz

Kritische Rundsteuerfrequenzen im Bereich von 270 bis 425 Hz

Durch den vorgeschalteten Tonfrequenz-Sperrkreis werden die Resonanzfrequenzen der Kompensationsanlage verändert. Insbesondere hat eine unverdrosselte Kompensationsanlage eine zweite Reihenresonanzfrequenz unterhalb der gesperrten Rundsteuerfrequenz. Im Tonfrequenz-Bereich von 270 bis 425 Hz können sich gefährliche, resonanzbedingte Anhebungen von Oberschwingungen ergeben.

In solchen Fällen gilt grundsätzlich:

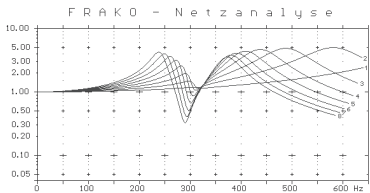


Bild 39: Verstärkung der Harmonischen beim Einsatz einer unverdrosselten Kompensation mit TF Sperrkreis für 316,7 Hz

Werden Tonfrequenz-Sperrkreise im Bereich von 270 Hz bis 425 Hz vor unverdrosselte Kompensationsanlagen geschaltet, so besteht verstärkte Resonanzmöglichkeit in unmittelbarer Nähe der 5. und 7. Harmonischen. Damit dadurch der Tonfrequenz-Sperrkreis als auch die nachgeschaltete Kompensation nicht überlastet werden, darf der Pegel der 5. Harmonischen (250 Hz) und der 7. Harmonischen (350 Hz) je 1% der Netzspannung nicht überschreiten. Bei höherem Pegel müssen verdrosselte Kompensationsanlagen installiert werden.

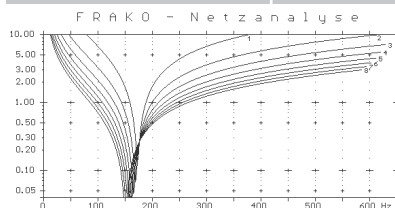
Einfluß von verdrosselten Kompensationsanlagen

Die Verdrosselung von Kompensationsanlagen setzt die Resonanzfrequenz, wie anfangs bereits näher beschrieben, auf einen Wert unterhalb 250 Hz herab. Alle Oberschwingungen oberhalb der Resonanzfrequenz der Verdrosselung werden nicht mehr verstärkt, sondern abgeschwächt. Für Rundsteuerfrequenzen mit genügendem Abstand zur Resonanzfrequenz der Verdrosselung ergeben sich ausreichende Impedanzfaktoren α^* .

Je nach Ausführung können Rundsteuerfrequenzen beim Einsatz von verdrosselten Kompensationsanlagen auch ohne Tonfrequenz-Sperrkreis sicher gesperrt werden.

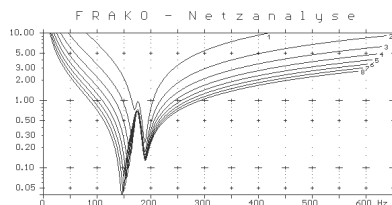
Im Hinblick auf höchste Betriebssicherheit von Kompensationsanlagen und die störungsfreie Übertragung von Rundsteuersignalen durch das EVU, empfehlen wir bei einem Kompensationsgrad (Verhältnis Trafo- zu Kompensationsleistung) bis 50 % folgende Ausführungen:

EVU-Rundsteuerfrequenz (in Hz)	Ausführung (Verdrosselungsgrad)
166 bis 183,3	$p = 7\%$ (fr = 189 Hz) mit Tonfrequenz-Sperrkreis
190 bis 210	$p = 8\%$ (fr = 177 Hz) mit Tonfrequenz-Sperrkreis
Wirtschaftlichste Ausführungen:	
≥ 166	$p = 14\%$ (fr = 134 Hz) ohne Tonfrequenz-Sperrkreis
$\geq 216,67$	$p = 8\%$ (fr = 177 Hz) ohne Tonfrequenz-Sperrkreis
≥ 228	$p = 7\%$ (fr = 189 Hz) ohne Tonfrequenz-Sperrkreis



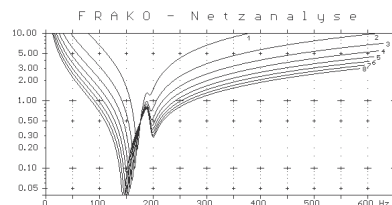
Für Frequenzen $\geq 216,7$ Hz wird in diesem Fall ein Impedanzfaktor von $\alpha^* \geq 0,5$ auch ohne Tonfrequenz-Sperrkreis sicher erreicht.

Bild 40: Beispiel 1 Impedanzfaktor α^* in Abhängigkeit von den zugeschalteten Kondensatoren, mit 7% verdrosselt



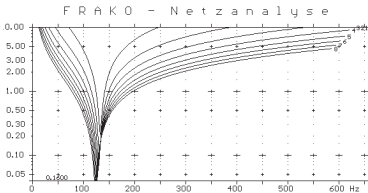
Bei 175 Hz wird der Impedanzfaktor von $\alpha^* \geq 0,5$ in allen Stufen sicher erreicht.

Bild 41: Beispiel 2 Impedanzfaktor α^* in Abhängigkeit von den zugeschalteten Kondensatoren, mit 7% verdrosselt und Tonfrequenz-Sperrkreis für 175 Hz



Auch in diesem Fall wird bei 190 Hz der Impedanzfaktor von $\alpha^* \geq 0,5$ in allen Stufen sicher erreicht.

Bild 42: Beispiel 3 Impedanzfaktor α^* in Abhängigkeit von den zugeschalteten Kondensatoren, mit 8% verdrosselt und Tonfrequenz-Sperrkreis für 190 Hz



Für alle Frequenzen ≥ 166 Hz (also alle gängigen Rundsteuerfrequenzen) wird der Impedanzfaktor von $\alpha^* \geq 0,5$ wird in allen Stufen sicher erreicht!

Bild 43: Beispiel 4
Impedanzfaktor α^* in Abhängigkeit von den zugeschalteten Kondensatoren, mit 14 % verdrosselt.

Diese Empfehlungen basieren auf mehrjährigen praktischen Erfahrungen und entsprechen den von Mitgliedern der VDEW, VSÖ und VSE ausgearbeiteten „Empfehlungen zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung“ von 1993.

Ausführungen von verdrosselten Kompensationsanlagen

1.) 7 und 8% Verdrosselung:

Kompensationsanlagen mit 7% verdrosselt haben sich für die meisten Industrieanwendungen bestens bewährt. Die Resonanzfrequenz liegt optimal, um Industrieüberschwingungen (im wesentlichen 5. und 7. Harmonische) abzusaugen, bietet gleichzeitig aber genügend Abstand um nicht überlastet zu werden. Für annähernd symmetrisch belastete Industriernetze mit normalen Oberschwingungspegeln und Rundsteuerfrequenzen oberhalb 228 Hz die ideale Lösung!

Die Verdrosselung mit 8% ist eine Variante für Netze mit 216,67 Hz Rundsteuerfrequenz.

2.) 12,5 bis 14% Verdrosselung:

Ausführungen mit 12,5 bis 14% verdrosselt, eignen sich auch ohne Tonfrequenz-Sperrkreis für Netze mit Rundsteuerfrequenzen zwischen 166 und 210 Hz. Die Nachteile dieser Ausführung liegen zum einen in höheren Kosten der benötigten Drosseln und Kondensatoren, zum anderen in der recht geringen Saugwirkung auf die Industrieüberschwingungen. In Niederspannungsnetzen mit hohem Pegel der 5. Harmonischen sollte (besonders bei Anlagen > 200 kvar) vom Einsatz dieser Ausführungen abgesehen und dafür eine Ausführung mit 7% oder 8% gewählt werden. Die Ausnahme bilden Niederspannungsnetze mit extrem hohem Pegel der 3. Oberschwingung (150 Hz). Die 3. Harmonische wird in der Regel durch ein stark unsymmetrisch belastetes Niederspannungsnetz erzeugt (z.B. Betrieb von einphasigen Verbrauchern, wie Schweißmaschinen, USV-Anlagen oder einer großen Anzahl von Lampen mit elektronischen Vorschaltgeräten und Netzteilen von Computern und anderen Bürogeräten). Hohe Pegel auf der 3. Oberschwingung findet man deshalb oft bei Bürokomplexen, Banken, Kranken- und Kaufhäusern usw. Um Resonanzen auf dieser Frequenz zu vermeiden, **muss** in solchen Fällen eine Verdrosselung mit Resonanzfrequenz unterhalb 150 Hz eingesetzt werden. Am besten eignet sich hierfür die Ausführung mit 14% verdrosselt, Ausführungen mit 7 oder 8% verdrosselt dürfen in diesen Netzen generell **nicht** eingesetzt werden.

3.) 5 bis 5,67% Verdrosselung:

Diese Ausführung wird in der Regel wegen der erhöhten Saugwirkung auf Harmonische eingesetzt. Werden jedoch hohe Oberschwingungspegel vom Mittelspannungsnetz eingespeist, sollte (um Überlastungen zu vermeiden) vom Einsatz der 5 bis 5,67% verdrosselt

selten Ausführung abgesehen und dafür eine Ausführung mit $p = 7\%$ gewählt werden. Bei sehr extremen Pegeln können auch speziell ausgelegte Filterkreise projiziert werden.

4.) **Kombinierte Verdrosselung:**

Diese Variante von Kompensationsanlagen wird mit Filterkreis-Stufen unterschiedlicher Resonanzfrequenzen (in der Regel 12,5/14% und 5/5,67%) aufgebaut. Die Anzahl und Nennleistung der Filterkreis-Stufen wird so gewählt, dass das Leistungsverhältnis annähernd 1:1, also gleich ist. Kombinierte Verdrosselungen können in Netzen mit Rundsteuerfrequenzen im Bereich von 166 bis 190 Hz als einfachere Variante anstelle von verdrosselten Anlagen mit Tonfrequenz-Sperrkreis eingesetzt werden.

Drei wichtige Nachteile sind bei der kombinierten Verdrosselung jedoch zu beachten:

- um den Sperrfaktor sicher einzuhalten, muss bei geregelten Anlagen das Prinzip der Kreisschaltung unterdrückt werden.
- Die Saugwirkung auf Harmonische ist geringer als bei verdrosselten Anlagen mit Tonfrequenz-Sperrkreis.
- Die eine Hälfte der Anlage hat eine geringe Saugwirkung, die andere Hälfte wirkt als Filterkreis 210 bzw. 223 Hz wie ein Saugkreis. Bei hohem Oberschwingungsanteil auf dem Mittelspannungsnetz oder im eigenen Netz ist die eine Hälfte der Filterkreisstufen immer thermisch voll belastet, die zweite Hälfte dagegen nicht. Durch diese Belastungsverhältnisse ergibt sich naturgemäß auch eine unterschiedliche Lebenserwartung. Aus diesem Grunde ist eine kombinierte Verdrosselung nur dann empfehlenswert, wenn, um Resonanzen zu verhindern, verdrosselt werden muß, eine Tonfrequenz zwischen 166 und 183 Hz vorhanden ist, aber nur ein geringer Oberschwingungs-Spannungsanteil mit max. 3% erwartet wird.

Die technisch ausgereifere Lösung ist eine gleichmäßig verdrosselte Ausführung mit $p=14\%$. Oberschwingungen werden gleichmäßig über sämtliche Stufen gesperrt und: alle regeltechnischen Vorteile von modernen Blindleistungsreglern können voll ausgenutzt werden.

Überwachung der Kompensationsanlagen im Betrieb

So wichtig wie die Projektierung ist auch die spätere Überwachung und Wartung der Anlagen. Nach der Inbetriebnahme der Kompensation geraten diese häufig in Vergessenheit. An das Verschleißteil Kondensatorschütze erinnert man sich meist erst wieder, wenn unschöne Ausfall-effekte stattgefunden haben. **Schaltschütze unterliegen beim Schalten kapazitiver Lasten hohen Beanspruchungen.** Prellende Schaltkontakte führen zu hohen Umladeströmen in den Kondensatoren und hohem Verschleiß der Schaltkontakte. Rechtzeitiges Wechseln der Schaltschütze verlängert die Lebenserwartung der Kompensationsanlage erheblich. Um **rechtzeitige** Information über den Verschleiß der Schütze zu erhalten, wurde in modernen Blindleistungsreglern wie RM 9606, EMR 1100 S und EMR 1100 eine **Schaltspielzählung** integriert. Der Blindleistungsregler meldet den optimalen Zeitpunkt für den anstehenden Schützwechsel und spart somit Kosten. Zur vorbeugenden Wartung kann der Betreiber die Anzahl der bisher aufgelaufenen Schaltspiele jeder einzelnen Stufe in der Anzeige abrufen.

Auch durch veränderte Netzverhältnisse können Störungen in der gesamten Niederspannungsanlage entstehen. Ziel einer Netzüberwachung ist es, solche Störungen frühzeitig zu erkennen. **Netzüberwachungsgeräte der EM-PQ Serie** bieten Ihnen die Möglichkeit vor dem Ausfall von Anlagen oder Anlagenteilen, frühzeitig alarmiert zu werden. Sämtliche sicherheitsrelevanten Messgrößen in Mittel- und Niederspannungsnetzen, Temperaturen empfindlicher Anlagenteile, sowie die verbrauchte Wirk- und Blindarbeit werden erfasst, analysiert, überwacht und gemeldet.

// Aktive Oberschwingungs-Filter

Was, wenn der Oberschwingungsgehalt groß, der Blindleistungsbedarf aber klein ist?

Grundsätzlich gibt es in solchen Fällen mehrere Lösungen zur Begrenzung von Oberschwingungsströmen, die durch den Einsatz von überschwingungserzeugenden Verbrauchern hervorgerufen werden.

Zu den bekannten Maßnahmen gehören vor allem der Einsatz von

- mehreren aufeinander abgestimmten passiven Filtern (abgestimmte Saugkreise) oder
- die Zusammenfassung stark nichtlinearer Lasten und empfindlicher Verbraucher zu getrennten Gruppen und Einspeisung jeder Gruppe über jeweils einen separaten Transformator

Diese Lösungen bringen jedoch zwei Hauptnachteile mit sich:

- Die Verbesserung des Netzurückwirkungsverhaltens ergibt sich nur für die jeweils konkrete Installation, durch jede Erweiterung kann die Anfangsinvestition verloren gehen.
- Die praktische Umsetzung dieser Lösungen ist in bestehenden Installationen oft sehr schwierig durchzuführen.

Häufig entstehen zu hohe Oberschwingungspegel durch den Einsatz nicht verdrosselter Kondensatoren in überschwingungsbelasteten Netzen.

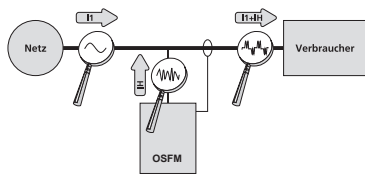
Die kostengünstigste Lösung hierzu ist auch heute noch der Einsatz von hochbelastbaren **FRAKO** Filterkrisenanlagen.

Bei Problemen mit:

- zu hohen Pegeln der 3., 9. und 15. Harmonischen und daraus resultierendem hohem Neutralleiterstrom oder
- der Forderung nach abgestimmten Saugkreisen, um den im Mittelspannungsnetz zurückgespeisten Oberschwingungsstrom unter einem vorgegebenen Grenzwert zu halten oder
- bei niedrigem Blindleistungsbedarf und hohen Oberschwingungsströmen, z. B. durch einen großen Anteil von umrichter-gesteuerten Asynchronmaschinen ist das Aktive Oberschwingungs-Filter OSFM oder eine Kombination aus einer **FRAKO** Filterkrisanlage mit einem Aktiven Oberschwingungs-Filter die optimale Lösung.

Der entscheidende Vorteil eines Aktiven Oberschwingungs-Filters liegt darin, dass die Kompensation von Netzurückwirkungen auch bei späteren Erweiterungen einer Installation wirksam bleibt. Aufgrund der Flexibilität der Aktiven Filter von **FRAKO** kann die Nenngröße einfach vom aktuellen Bedarf gewählt werden. Zusätzlicher Bedarf, aufgrund von Installations-erweiterungen, kann jederzeit durch Hinzufügen weiterer Komponenten aufgefangen werden.

Funktionsprinzip des Aktiven Oberschwingungs-Filters



Das parallel zu den Oberschwingungserzeugern angeschlossene Aktive Filter analysiert den von nichtlinearen Verbrauchern erzeugten Oberschwingungsstrom und liefert den gegenphasigen Kompensationsstrom, entweder das gesamte Spektrum der 2. bis 25. Harmonischen oder aber gezielt ausgewählte Harmonische. Dadurch werden die entsprechenden Ober-

I_1 = Grundschwingungsstrom

I_H = Oberschwingungsstrom

Bild 44: Funktionsprinzip eines Aktiven Filters Typenreihe OSFM

schwungungsströme am Anschlußpunkt im Rahmen der Auslegung vollständig neutralisiert. Die Kombination Oberschwungs-Filter und -Verbraucher wird vom Netz als eine insgesamt lineare Last angesehen, die einen sinusförmigen Strom verbraucht. Die Installation ist denkbar einfach. Es muss lediglich eine dreiphasige Einspeisung mit oder ohne Neutraleiter vorhanden sein und die Stromwandler auf der Zuleitung der nichtlinearen Verbraucher installiert werden.

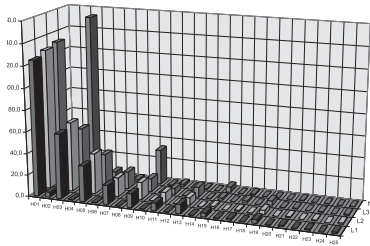


Bild 45: Oberschwungungsmessung ohne Filter

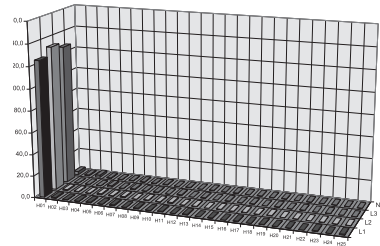


Bild 46: Oberschwungungsmessung mit Filter

Anwendung

Typische Anwendungsfälle sind:

- Niederspannungsnetze mit vielen Umrichtern, bei denen die Auflage besteht, nur begrenzt Oberschwungsströme ins überlagerte Netz zurückzuspeisen, z. B. bei langen Stichleitungen zu abgelegenen Anlagen.
- Moderne Umrichterantriebe mit hoher Oberschwungsrückspeisung, aber nur einem geringen Blindleistungsbedarf. In einem Niederspannungsnetz mit einem 1000 kVA Trafo und dem Einsatz von vielen kleineren Asynchronmotoren wird durchaus eine Blindleistungs-Regelanlage mit einer Nennleistung von 400 kvar benötigt. Mit dem Einsatz moderner Umrichter liegt der Bedarf noch etwa bei 100 kvar.
- Niederspannungsnetze mit einem hohen Anteil der 3. Harmonischen durch den Einsatz von einphasigen Verbrauchern. Diese Niederspannungsnetze zeigen einen außerordentlich hohen Nulleiterstrom, der bei annähernd symmetrisch verteilter ohmscher Last gegen 0 A betragen sollte. Aufgrund der elektronischen Last, addieren sich neben den möglichen Unsymmetrien der ohmschen Lasten die harmonischen Oberschwungsströme der drei Phasen auf dem Neutraleiter, da die Oberschwungung der 3., 9. und 15. Ordnung auf den drei Phasen dieselbe Phasenlage haben. Das Resultat ist ein Neutraleiterstrom, der unter Umständen größer als der Phasenstrom ist und den nicht dafür ausgelegten Neutraleiter überlastet.

// „Aktivitäten“ gegen Oberschwingungen

Fachaufsatz „Aktivitäten“ gegen Oberschwingungen

Bisher gibt es kaum Mittel, um die Oberschwingungen in Energie-Netzen mit vertretbarem Aufwand zu minimieren. Meist wird versucht, sie bereits am erzeugenden Gerät durch passive Elemente zu beseitigen oder abzuschwächen. Für jede Oberschwingung muss dazu jedoch ein abgestimmter Saugkreis aus Induktivitäten und Kapazitäten eingesetzt werden, um die unerwünschten Auswirkungen zu reduzieren. Mit Hilfe eines aktiven Oberschwingungs-Filters lässt sich das Problem komfortabel lösen.

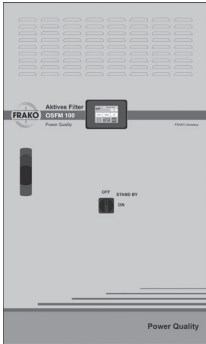


Bild 47: Aktives Oberschwingungs-Filter OSFM als kompakte Anlage

Alle ganzzahligen Vielfachen einer Grundschwingung werden als Oberschwingung oder Harmonische bezeichnet. Meist wird der betreffenden Oberschwingung noch die entsprechende Ordnungszahl „n“ vorangestellt. Ausgehend von der Frequenz der Netzspannung von 50 Hz hat damit die fünfte Harmonische eine Frequenz von 250 Hz. Grundlage dieser Darstellung ist die mathematische Tatsache, dass jede beliebige sich kontinuierlich wiederholende Schwingungsform in viele ganzzahlige reine Sinusschwingungen zerlegt werden kann. Die Oberschwingungen entstehen beim Betrieb von Verbrauchern mit nicht sinusförmiger Stromaufnahme. Die Kurvenform der Stromaufnahme dieser Verbraucher ist bestimmend für Anzahl und Amplitude der Oberschwingungen. Je größer die Abweichung vom Sinus, desto mehr Oberschwingungen werden vom Verbraucher ins Netz zurückgespeist und desto höher ist die Amplitude der einzelnen Oberschwingungen. Die Zerlegung einer Kurvenform erfolgt durch die sogenannte Fourier-Analyse, bei der jeder Oberschwingung die entsprechende Ordnungszahl und Amplitude zugeordnet wird.

Eine einfache Methode zur Bestimmung einzelner Oberschwingungen ist das Messen mit dem Zangenamperemeter, das einzelne Oberschwingungen aus dem gemessenen Signal herausfiltern und darstellen kann. Auf diese Weise kann zwar immer nur eine Harmonische dargestellt werden, es lässt sich jedoch relativ schnell und einfach ein grober Überblick über die Amplituden der einzelnen Oberschwingungen gewinnen. Es gibt eine Reihe von Effekten, die auf die Anwesenheit von Oberschwingungen hindeuten: PC steigen aus, Festplattenfehler treten auf, Bildschirme flimmern, der N-Leiter überhitzt, an Kompensationsanlagen treten Schäden auf oder in anderen Anlagenteilen wird Korrosion bemerkt.

Funktionsprinzip eines Aktiven Oberschwingungs-Filter

Grundgedanke beim Einsatz eines Oberschwingungs-Filters OSFM ist die aktive Kompensation. Dabei werden keine Ströme abgesaugt, sondern je nach Bedarf zusätzliche Ströme eingespeist. Zuerst misst ein Wandler den momentan aufgenommenen Strom des Verbrauchers. Dann analysiert die Steuereinheit des OSFM diesen Strom in Bezug auf Amplitude und Harmonische und speist anschließend einen Strom in das Versorgungssystem ein, der in Amplitude und Ordnungszahl der einzelnen Harmonischen exakt dem Strom des Verbrauchers entspricht. Die Phasenlage des Einspeisestroms ist jedoch um 180° gegenüber dem Verbraucherstrom verschoben. Somit heben sich die harmonischen Ströme gegenseitig auf, das speisende Netz muss nur die Grundschwingung liefern und wird nicht mit Harmonischen

belastet. Ein großer Vorteil des Aktiven Filters gegenüber herkömmlicher Technik besteht in der flexiblen Anpassung der Kompensationsleistung. Je nach Bedarf kann das Filter mehr oder weniger Kompensationsstrom liefern.

Selbst bei Überlastung schaltet das Filter nicht ab, sondern geht in die Strombegrenzung, d.h. das Filter liefert seinen maximalen Strom und kompensiert so einen Großteil der Oberschwingungen. Wechselwirkungen mit anderen Systemkomponenten wie verdrosselten Blindleistungs-kompensationen oder USV-Anlagen sind dadurch auf ein unkritisches Minimum reduziert. Eine Erweiterung oder Kombination mehrerer Filter ist problemlos möglich. Ändern sich die Betriebs- oder Netzbedingungen, passt sich das Filter im Rahmen seiner Nennbetriebsdaten automatisch an.

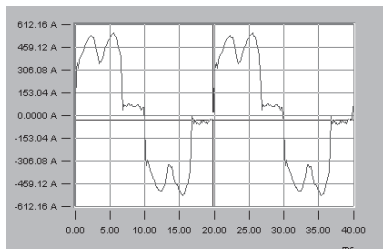


Bild 48: Kurvenform des Stroms ohne OSFM

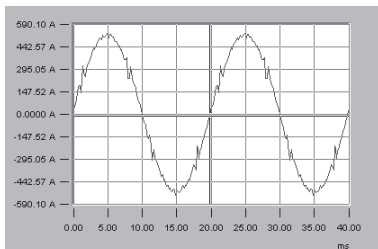


Bild 49: Kurvenform des Stroms mit OSFM

Die Bedeutung der Anlageninstallation

Von elementarer Wichtigkeit für die Funktion einer Oberschwingungs-Kompensation ist eine fachgerecht ausgeführte Elektroinstallation. Sowohl die Art des Netzes als auch die Ausführung kann nicht nur die Wirksamkeit des OSFM beeinträchtigen, sondern auch Störungen in der Energieversorgung begünstigen, ja sogar hervorrufen. Jede elektrische Anlage hat ihren Ursprung in der Erdung. Eine funktionsfähige und konsequent angewandte Erdung ist die Grundlage jeder Energieversorgungsanlage. Steckt in der Erdungsanlage der „Wurm“, finden Spannungsverschleppungen, elektromagnetische Störfelder und nicht zuletzt auch Oberschwingungen ideale Voraussetzungen, um sich ungehindert auszubreiten. Die Hauptaufgabe der Erdung besteht in der Gewährleistung, dass im Fehlerfall keine gefährliche Berührungsspannung entsteht, und dass der Strom ungehindert gegen Erde abfließen kann. Nur dann ist sichergestellt, dass ein vorgeschaltetes Überstromschutzorgan innerhalb der vorgegebenen Zeit abschaltet. Weiter soll die Erdungsanlage verschiedene Betriebsmittel auf einem einheitlichen, möglichst niedrigen Niveau halten und eventuell vorhandene Potenzialunterschiede ausgleichen.

Strikte Trennung von N und PE

Wird diese Funktion gestört, z.B. weil Betriebsströme auf dem PE-Leiter fließen, bilden sich elektromagnetische Felder um die Schutz- und Potenzialausgleichsleiter, was zu erheblichen Beeinträchtigungen führen kann. Da sich solche Felder dann beispielsweise auch in der Abschirmung von Datenleitungen bilden, können Störungen zu Datenverlusten führen. Die Verbindung des PE-Leiters mit anderen leitfähigen Systemen wie Wasser-, Gas- oder Heizungsanlagen bringt zusätzliche Betriebsströme auf diese Anlagenteile. Die Folgen sind Potenzialverschleppungen und Korrosion.

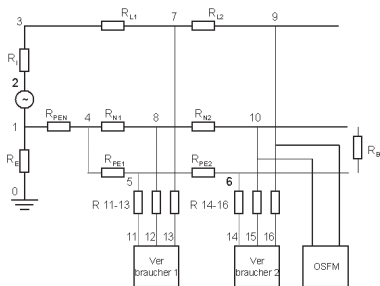


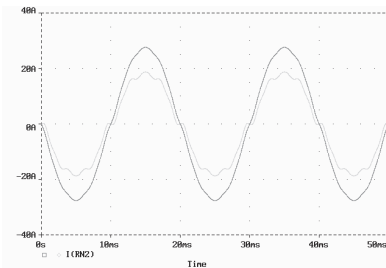
Bild 50: Prinzipielle Darstellung eines simulierten Einphasensystems

Die wesentliche Forderung an ein modernes Stromversorgungssystem, so früh wie möglich auf eine Trennung zwischen N- und PE-Leiter zu achten und auf die konsequente Einhaltung dieser einmal begonnenen isolierten Verlegung dieser beiden Leitungen zu achten. In einem konkreten Fall wurden durch Oberschwingungen Telefone gestört und Bildschirme zum Flimmern gebracht. Die Messung der Oberschwingungen ergab einen starken Anteil der dritten Harmonischen von bis zu 35% des Nennstroms; allerdings nicht nur auf dem N-, sondern vor allem auch auf dem PE-Leiter. Bevor in einem solchen Fall Maßnahmen gegen die Harmonischen ergriffen werden können, muss eine Optimierung des Leitungssystems nach den genannten Kriterien erfolgen. Leider schreibt das derzeit (2001) gültige Regelwerk die Trennung von N und PE nicht zwingend vor. Es gibt lediglich Empfehlungen, vor allem aus der EDV und Telekommunikations-Branche sowie dem Verband der Sachversicherer, zur konsequenten Verdrachtung in 5-Leiter-Technik. Filterströme sind auf dem PE-Leiter natürlich nicht zu vermeiden, sofern jedoch keine Betriebsströme oder Oberschwingungen hinzukommen, sind sie zu tolerieren. Durch die EMV-Richtlinien ist heute sowohl der Anlagen- als auch der Geräte- Konstrukteur in einer technischen Zwickmühle. Einerseits sollen die Geräte und Anlagen möglichst wenig Störungen in das Netz einleiten, andererseits müssen sie störungsfrei arbeiten und die erzeugten Störströme sollen abgeleitet werden. Meist geschieht diese Ableitung über Filterkondensatoren direkt gegen den Schutzleiter. Bei festangeschlossenen Anlagen kann eventuell auch gegen den Neutralleiter abgeleitet werden, bei steckbaren Verbrauchern mit Schukosteckern geht dies nicht, da der Stecker um 180° gedreht werden kann.

Ein Beispiel

Ein herkömmlicher PC mit einem 250 W-Netzteil hat einen Ableitstrom von etwa 1 mA. Dieser besteht aus der 50 Hz- Grundschiwingung und diversen Oberschwingungen. Die Ableitströme bewirken eine Verunreinigung auf dem PE-Leiter, sind jedoch im allgemeinen unkritisch für die Betriebssicherheit einer Anlage. 100 PC haben entsprechend etwa 0,1 A Ableitstrom. Geht man von einem PE-Widerstand von etwa 1 Ω aus, ergibt sich gerade ein Spannungsabfall von 0,1 V. Meist ist das gesamte Schutzleitersystem niederohmig. (Eine Leitung mit 10 mm² Querschnitt hat pro Meter einen Widerstand von 0,0012 Ω oder $1,2 \times 10^{-3} \Omega$). In einem System mit einem Verbrauchernennstrom von 100 A kann dagegen durchaus ein Oberschwingungsstrom der dritten Harmonischen von 40 A fließen, aus dem dann ein Spannungsfall von immerhin 40 V resultiert.

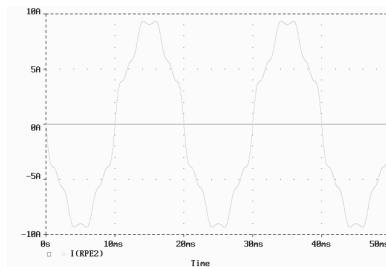
Hier liegt der klassische Anwendungsfall für ein Aktives Filter OSFM vor. Die Kompensation von Verbrauchern, die große Oberschwingungsströme erzeugen, entlastet das Leitungssystem von Oberschwingungen und schützt andere Verbraucher vor den Auswirkungen der Harmonischen. Funktionieren kann dies jedoch nur, wenn eine strikte Trennung von N- und PE-Leiter gewährleistet ist. In der Praxis hat sich gezeigt, dass durch den Einsatz von OSFM eine Reduktion der Oberschwingungen von mehr als 30% auf etwa 5% möglich ist. Und dies bei Verbrauchern, die stark verformte Stromaufnahmekurven haben und die zudem noch mit Stromspitzen behaftet sind.



Exit Mid_trace Remove_trace X_axis V_axis Plot_control Display_control
 Macros Hard_copy Cursor Zoom Label config_colors

Bild 51:

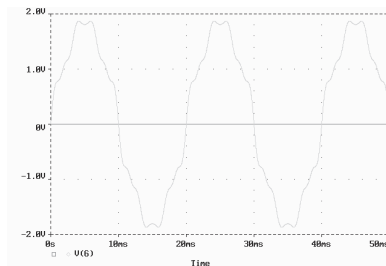
Strom in R_{N2} ohne und mit Brückenwiderstand R_B



Exit Mid_trace Remove_trace X_axis V_axis Plot_control Display_control
 Macros Hard_copy Cursor Zoom Label config_colors

Bild 52:

Strom in R_{PE2} ohne und mit Brückenwiderstand R_B



Exit Mid_trace Remove_trace X_axis V_axis Plot_control Display_control
 Macros Hard_copy Cursor Zoom Label config_colors

Bild 53: Spannung an PE bei Verbraucher 2 gegen Erde gemessen

Eine Simulation der unterschiedlichen Netzverhältnisse kann die Auswirkungen auf den Gehalt der Oberschwingungen verdeutlichen. Für die Darstellung genügt der Einfachheit halber ein einphasiges Netz mit N- und PE-Leiter. Das System wird mit zwei Verbrauchern belastet, wobei der Erste Oberschwingungen in das Versorgungssystem zurückspeist, der Zweite jedoch keine Oberschwingungen verursacht oder diese durch ein OSFM kompensiert sind. Im Idealfall besteht die Belastung der PE-Leiter nur aus den Filterströmen der Verbraucher, die z.B. von Schaltnetzteilen oder Netzeingangsfiltren verursacht werden.

Natürlich werden auch Oberschwingungen über diese Filter auf den PE abgeleitet. Um die Simulation möglichst praxisnah durchzuführen, wurden die je-weiligen Amplituden und Ordnungszahlen der Oberschwingungen aus einer Netzanalyse übernommen.

Die Kurvenform des Stroms entspricht nahezu den tatsächlich vorhandenen Gegebenheiten eines belasteten Stromversorgungssystems. Der Filter-Ableitstrom liegt trotz der Oberschwingungsbelastung im mA-Bereich und beeinträchtigt deshalb die Funktion des PE-Leiters nur wenig. Wird nun die Trennung von N und PE aufgehoben, weil z.B. in einem Unterverteiler eine Brücke zwischen N- und PE-Schiene eingefügt wird, dann fließen auf dem PE Betriebsströme. Weil N und PE parallelgeschaltet sind, teilen sich die Ströme gemäß den Widerstandsverhältnissen umgekehrt proportional auf.

Durch die Verbindung zwischen N und PE werden sich auch auf Abschirmungen, Armierungen, Wasser-, Heizungs- und Gasleitungen Spannungspotenziale und dadurch elektromagnetische Felder aufbauen. Alle metallischen Gebäudeteile können so zu Störquellen werden. Der Schutzleiter wird nun durch Betriebsströme belastet und auf ein Potenzial gegenüber Erde angehoben. Je nach Strom und Widerstand können Spannungen bis in den 100 V Bereich auftreten.

Durch die Belastung des Schutzleiters mit Oberschwingungsströmen kann die Stromstärke beachtlich über den eigentlichen Nennstrom eines Verbrauchers ansteigen. Neben Betriebsstörungen kommt es auch zu unzulässig hoher Erwärmung der PE/N-Leitungen. Im schlimmsten Fall sogar zum Abbrennen dieser Leitungen. Logischerweise folgt die Spannung am PE dem Stromverlauf, so dass sich eine Spannung des PE gegen Erde aufbauen kann. Der PE führt dann kein Erdpotenzial mehr, er kann seine Aufgabe nicht mehr erfüllen.

Das Resümee

Eine wirksame Maßnahme zur Reduzierung von Oberschwingungen und deren Folgen auf der Stromversorgung ist der Einsatz Aktiver Oberschwingungs-Filter. Genau so wichtig ist jedoch auch eine einwandfreie, übersichtlich ausgeführte Elektroinstallation. In der Praxis ist eine Messung der Ströme auf dem Schutzleiter deshalb unerlässlich. Durch diese Messung können unzulässige Ströme sofort festgestellt werden. Aufwendiger ist dagegen die Lokalisierung der überzähligen Verbindungspunkte von N und PE. Hierfür sind genaue Kenntnisse über Leitungsführung und Gebäudekonstellation erforderlich. Nur durch die Einhaltung der genannten Maßnahmen kann eine gezielte „Säuberung“ des Versorgungssystems erreicht und die Spannungsqualität verbessert werden.

*FRAKO senkt
Ihre Energiekosten!*



■ Blindleistungs-Kompensation

schnell, verschleißfrei.
höchste Leistungsdichte
auf kleinstem Raum



■ Power Quality

Erfassung, Dokumentation und
Bewertung von elektrischen Daten.
Verbesserung der Netzqualität.



■ Energiekostenerfassung

Abrechnung von Kostenstellen.
Verschafft Transparenz und liefert
Daten für Ihr Öko-Audit.



■ Energie-Management-Systeme

Optimierungsrechner, Zeitschaltsysteme,
Erfassung, Speicherung, Visualisierung
und Dokumentation von Energie- und
Prozessdaten



Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH

Tscheulinstr. 21a · 79331 Teningen · Germany
Tel. +49-7641-453-0 · Fax +49-7641-453-535
<http://www.frako.com> · E-Mail: info@frako.com

