

Wirtschaftliche Gesichtspunkte bei der Beseitigung von Stromrichternetzrückwirkungen

Autor(en): **Parnitzki, D.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **69 (1978)**

Heft 4

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-914843>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Wirtschaftliche Gesichtspunkte bei der Beseitigung von Stromrichternetzrückwirkungen

Von D. Parnitzki

621.314.5 : 621.38.026 : 621.391.823;

Stromrichter erzeugen Stromoberwellen beachtlicher Grösse, die ins Netz fliessen und zu störenden Netzspannungsoberwellen führen können, wenn sie nicht durch Oberwellensaugkreise abgeleitet werden. Letztere bestehen aus Kondensatoren und Drosseln in Serie. Allein eingesetzt sind Kondensatoren zur Kompensation von Stromrichterblindleistung wegen Netzresonanzgefahr schlecht geeignet. Auch hierzu dienen Oberwellensaugkreise. Die mittels Blindleistungskompensation erzielbaren Wirkleistungseinsparungen sind verhältnismässig gering; jedoch werden die Kosten einer Oberwellensaugkreisanlage durch Einsparung hoher Blindenergiekosten rasch amortisiert.

Les redresseurs produisent d'importantes harmoniques de courant qui pénètrent dans le réseau et peuvent donner lieu à des harmoniques de tension gênantes, si elles ne sont pas dérivées par des circuits d'absorption constitués par des condensateurs et des réactances en série. A cause du risque de résonance dans le réseau, les condensateurs seuls ne conviennent pas pour la compensation de la puissance réactive de redresseurs; là aussi, il faut des circuits absorbant les harmoniques. Les gains en puissance active qui peuvent être obtenus par la compensation de la puissance réactive sont relativement peu importants, mais le coût d'une installation d'absorption des harmoniques est rapidement amorti par l'économie du coût élevé de l'énergie réactive.

1. Einleitung

Die Stromrichternetzrückwirkungen bestehen aus Blindleistungsverbrauch, Stromoberwellenerzeugung sowie Spannungsverzerrungen (Netzspannungseinbrüche von einigen 100 μ s und niederfrequente Spannungsoberwellen) [1]¹⁾. Diese Netzurückwirkungen können zu Störeffekten führen, wie Netzspannungsschwankungen, Lichtflackern (wegen schnellen und starken Blindleistungsschwankungen), erhöhten Kosten für Blindenergiebezug, Störungen von Rundsteueranlagen und anderen Geräten, die eine oberwellenarme Netzspannung voraussetzen. Sind direkt ans Netz zugeschaltete Blindleistungskondensatoren vorhanden, so kommen noch weitere mögliche Störeffekte hinzu:

- Auftreten einer Netzresonanz; daraus ergeben sich Überlastungen von Blindleistungskondensatoren und stark erhöhte Netzspannungsverzerrungen.
- Überlastung von Blindleistungskondensatoren durch Absaugen hoher Oberwellenströme aus dem Mittelspannungsnetz.
- Unzulässige Erhöhung des Netzkurzschlußstromes.
- Zerstörung von Stromrichterteilen durch kurzzeitige, energiereiche Überspannungen beim Zuschalten von Blindleistungskondensatoren.

Zur Beseitigung von Störungen wegen Stromrichternetzrückwirkungen empfehlen sich folgende Abhilfemassnahmen:

1. Einsatz von Blindleistungskondensatoren, die nicht direkt ans Netz angeschlossen werden, sondern durch Seriedrosseln zu Oberwellensaugkreisen ergänzt werden.
2. Bei besonderen Anforderungen an die Oberwellenarmut der Netzspannung in einem bestimmten Frequenzbereich (z. B. Rundsteuerfrequenz): Zusätzlicher Einsatz eines Oberwellensperkkreises.

Die beschriebenen Störeffekte erscheinen zunächst selten, nämlich solange nur einige wenige Stromrichter in einem Netzbereich betrieben werden. Mit zunehmender Stromrichterleistung treten Störungen häufiger und hartnäckiger auf, jedoch scheinbar regellos, da für das Zustandekommen von Störungen viele voneinander unabhängige Faktoren verantwortlich sind, vor allem die wechselnde Belastung der Stromrichter und die Schaltzustände des Netzes und der eventuell zugeschalteten Blindleistungskondensatoren. Solche Störungen können den Ausfall von Netzeinrichtungen und eigener oder fremder Geräte mit sich bringen und damit gar zu unvorhersehbaren Produktionsausfällen führen. Sie sind zu erwarten, sobald die Stromrichterleistung grösser wird als etwa 1% der minimalen

Netzkurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt mit weiteren Stromverbrauchern und sofern keine Massnahmen zur Beseitigung der Stromrichteroberwellen getroffen wurden. Der Wert von 1% gilt für Niederspannungsnetze; für Mittel- und Hochspannungsnetze wird 0,6% eingesetzt. Bei grösseren Stromrichterleistungen müssen gezielte Massnahmen zur Beseitigung der Stromrichteroberwellen sicherstellen, dass die Richtlinien des VSE bezüglich «Oberwellenspannungserhöhungen» [2] eingehalten werden. Diese schreiben folgende zulässige Erhöhung der Netzspannungsoberwellen am Netzanschlusspunkt eines Verbrauchers bezogen auf die Grundwelle vor:

Ungerade Ordnungszahlen

3.	Oberwelle	0,85 %
5.	Oberwelle	0,65 %
7.	Oberwelle	0,6 %
9. und 11.	Oberwelle	0,4 %
13.	Oberwelle	0,3 %
15. bis 39.	Oberwelle	0,25 %

Gerade Ordnungszahlen

2. bis 40.	Oberwelle	0,2 %
------------	-----------	-------

Diese Richtlinien sind ein Kompromiss zwischen der Forderung nach Vermeidung von gegenseitigen Störungen verschiedener Stromverbraucher und der Forderung nach möglichst geringem Aufwand zur Beseitigung von Stromrichternetzrückwirkungen. Üblicherweise sind sie Bestandteil des Stromlieferungsvertrages zwischen Elektrizitätswerk und Verbraucher. Ihre Einhaltung kann natürlich nicht dauernd und in jedem Fall überprüft werden. Ein eventueller Störungserzeuger ist jedoch zu Abhilfemassnahmen auf eigene Kosten verpflichtet.

Im internen Netz von Industrieanlagen können grundsätzlich höhere Spannungsoberwellen toleriert werden, solange am Anschlusspunkt die VSE-Richtlinien eingehalten werden. Da aber mit höheren Netzspannungsoberwellen Störungen zu erwarten sind und ein kontinuierlicher Produktionsablauf dadurch gefährdet ist, empfiehlt es sich dennoch, die Werte des VSE auch intern nicht zu überschreiten.

Ist eine Stromrichteranlage leistungsmässig in einem gewissen Netzbereich dominierend (z. B. Seilbahnanlage in schwachem Ortsnetz), so ist es auch oft das lokale Elektrizitätswerk, das die Einhaltung der Oberwellenmaximalwerte vorschreibt und auch eine Abnahmemessung verlangt. Viele grössere Elektrizitätswerke verfügen über Frequenzanalytoren [3; 4] und über geschultes Personal, um die entsprechenden Messungen durchzuführen. Ebenso sind die Hersteller von Oberwellen-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

saugkreisen normalerweise in der Lage, Oberwellenmessungen durchzuführen, um Oberwellensaugkreise abzustimmen und um deren Wirksamkeit zu überprüfen. Abnahmemessungen sollen zeigen, dass bei allen «Netzzuständen» die Werte der VSE-Richtlinien eingehalten werden. Wenn nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden kann, bei welchem «Netzzustand» die grössten Spannungsüberwellen auftreten, so muss man eine ganze Messreihe bei den verschiedenen Schaltzuständen von Blindleistungskondensatoren und von eventuellen Netzeinspeisungen durchführen – ein oft langwieriges Unterfangen [5].

2. Technische und wirtschaftliche Argumente für Oberwellensaugkreise

Bei jedem Ausbau der installierten Stromrichterleistung sollte die Frage gestellt werden, ob zukünftige und eventuell auch bestehende Stromrichteranlagen mit Oberwellensaugkreisen ausgerüstet werden sollen. Technische Gründe sprechen dafür, wenn die zu erwartenden Spannungsüberwellen so hoch sind, dass Störungen zu erwarten sind.

Aus wirtschaftlichen Gründen setzt man Oberwellensaugkreise ein, wenn die von Stromrichtern verbrauchte Blindleistung kompensiert werden soll. Die altbekannte Blindleistungskompensation, bei der eine variable Zahl Kondensatorstufen ans Netz zugeschaltet wird, um variable Blindleistung zu kompensieren, ist für Stromrichteranlagen schlecht geeignet, denn die Resonanzfrequenz des aus Netzinduktivität und Kompensationskapazität gebildeten Parallelschwingkreises ändert mit der Zahl zugeschalteter Kondensatorstufen. Wenn eine dieser Resonanzfrequenzen in der Nähe einer Oberwellenfrequenz des Stromrichters liegt, entsteht eine Netzresonanz mit den beschriebenen möglichen Folgen [1]. Oberwellensaugkreise dagegen eignen sich zur Blindleistungskompensation von Stromrichtern: Sie verhindern Netzresonanzen, sind in Stufen schaltbar und halten erst noch den Oberwellenpegel auf tiefem Niveau. Es ist kaum möglich, den Wert einer unverzerrten, oberwellenarmen Netzspannung in einer Industrieanlage in Geldwerten anzugeben. Jedoch ist eine saubere Sinusspannung normalerweise eine unumgängliche Voraussetzung für einen sicheren, unterbruchsfreien Produktionsablauf.

Die klassischen Argumente für und wider Blindleistungskompensation gelten auch für Oberwellensaugkreise: Gegen den Einbau sprechen natürlich die Anlagekosten, also einmalig aufzubringende Kosten für die Berechnung, den Bau und die Inbetriebnahme von Oberwellensaugkreisen. Unterhaltskosten treten während der Lebensdauer nicht auf. Für den Einbau sprechen drei Kostenfaktoren:

- Kosten für Blindenergiebezug werden reduziert.
- Kosten werden gespart durch Wirkenergieeinsparungen (Verluste des Blindenergie transportes).
- Kapitalkosten können gespart werden durch Verschiebung des Ausbaus der Netzeinrichtungen (Transformatoren, Zuleitungen, Schalter, Sicherungen) um einige Jahre bei steigendem Stromverbrauch.

3. Größenordnung der Kosteneinsparungen durch Blindleistungskompensation

Da die Blindleistung von Stromrichtern wegen deren Oberwellen (Netzresonanzgefahr) nicht mit Kondensatoren allein, sondern mit Oberwellensaugkreisen kompensiert werden muss, stellen sich die altbekannten wirtschaftlichen Fragen der Blindleistungskompensation in einem neuen Zusammenhang. Dem

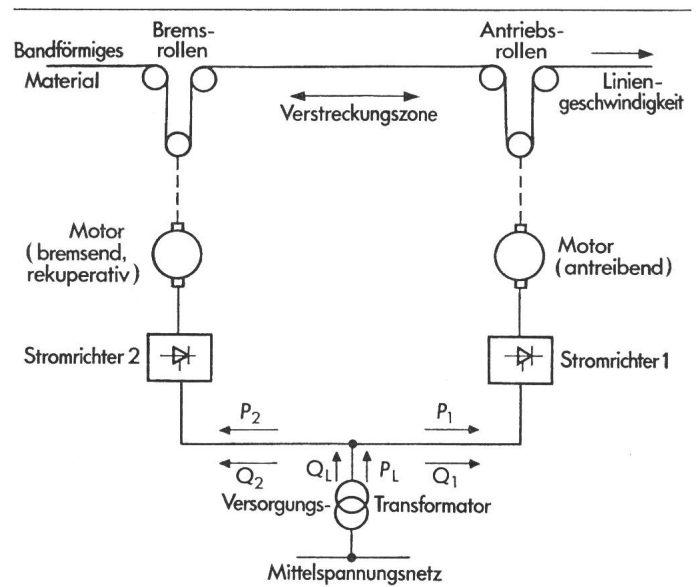


Fig. 1 Schema einer Verstreckungsanlage

Die eingezeichneten Pfeile für P und Q bezeichnen die Richtungen für positiven Wirk- und Blindleistungsfluss

vergrösserten Kreis von Personen, die sich mit diesen Problemen zu befassen haben, dürften die beiden folgenden Beispiele nützlich sein. Sie sollen ein Gefühl vermitteln für die Grösse des Stromrichterblindleistungsverbrauches sowie für die Größenordnung von Kosteneinsparungen für reduzierten Wirk- und Blindenergiebezug, die durch Blindleistungskompensation ermöglicht werden. Der Weg der Berechnung (vgl. Anhang) lässt sich auch auf andere Beispiele übertragen.

3.1 Erstes Beispiel

Ein Teil einer Industrieanlage wird durch einen 2-MVA-Transformator aus dem Mittelspannungsnetz versorgt (vgl. Anhang 1 und 2). Die Transformatorbelastung besteht aus einer 1-MVA-Stromrichteranlage mit sehr induktivem Lastverhalten. Eine derartige Last mit einem $\cos \varphi$ von 0,05 ist z. B. eine Streckrichtanlage für Aluminium, bei der die Bremsrollen als Generatoren nahezu die ganze Wirkleistung der Antriebsrollen ans Netz zurückgeben (Fig. 1). Das Zeigerdiagramm für Wirk- und Blindleistung einer solchen Anlage bei etwa halber Nennliniengeschwindigkeit ist in Fig. 2 dargestellt.

Dass bereits ein einzelner Stromrichterantrieb beträchtlich Blindleistung verbrauchen kann, ergibt sich aus der Lage des Scheinleistungszeigers S_1 ($\cos \varphi = 0,65$) des motorisch arbeitenden Stromrichters 1 (Anhang 3). Der ausserordentlich niedrige Leistungsfaktor der Gesamtanlage entsteht dadurch, dass sich die Wirkleistungen P_1 und P_2 weitgehend kompensieren. Die geringe verbleibende Wirkkomponente P_{L1} der Gesamtlast dient dazu, die Verstreckungsenergie zu liefern und Reibungs- und andere Verluste zu decken. Im Gegensatz zu den Wirkleistungen addieren sich die Blindleistungen Q_1 und Q_2 ; somit ist die gesamte Blindleistung Q_{L1} annähernd gleich der gesamten Scheinleistung S_L . Im Beispiel wird S_L zu 1 MVA angenommen, und der Leistungsfaktor betrage $\cos \varphi = 0,05$.

Im Anhang 4 und 5 sind die absoluten und relativen Verlustleistungen des Beispiels mit und ohne Blindleistungskompensation berechnet. Die Verlustleistung im Transformator (ohne Blindleistungskompensation) ist sehr klein bezüglich der Scheinleistung der Last ($P_{01}/S_L = 0,42\%$), jedoch beacht-

lich im Vergleich mit der Wirkleistungskomponente ($P_{01}/P_{L1} = 8,4\%$). Mit der Blindleistungskompensation entlastet man Transformator und Zuleitungen von einem Blindenergiefluss von rund 1 Mvar, eine begrenzte Über- oder Unterkompensation ist zulässig. Damit kann die Transformatorverlustleistung nahezu eliminiert werden, was einer Wirkenergieeinsparung von 8,4% entspricht. Selbst bei Dauerbetrieb der Anlage sind jedoch die jährlichen Kostenersparnisse für Wirkenergie klein im Vergleich zu den Anlagekosten der Oberwellensaugkreisanlage (Anhang 6, 7); sie betragen bei den getroffenen Annahmen nur 6,67%. Diese Wirkenergieeinsparungen mögen damit zwar etwa den jährlichen Kapitalzins decken; sie sind jedoch kaum ein starkes Argument zugunsten der Blindleistungskompensation.

Die Kosteneinsparungen für reduzierten Blindenergiebezug fallen wesentlich stärker ins Gewicht. Die Elektrizitätsgesellschaften sind üblicherweise nicht geneigt, den grossen Blindleistungsbedarf von Stromrichteranlagen über lange Zuleitungen aus ihrem Netz zu decken, da dabei vermeidbare hohe Verluste entstehen. Der Blindleistungsbezug ist daher oft recht hoch taxiert, und ist in manchen Fällen auch nur in Grenzen zulässig. Im Anhang sind Richtwerke für die Blindenergiekosten sowie die Anlagekosten für eine Oberwellensaugkreisanlage angegeben, die dem ersten Beispiel entsprechen. Daraus ergibt sich eine etwa einjährige Amortisationsdauer. Nach Ablauf der Amortisationszeit sind Oberwellensaugkreise wertvolle Geldsparer mit hoher Lebensdauer.

3.2 Zweites Beispiel

Es wird angenommen, dass ein Transformator mit den gleichen Daten wie im ersten Beispiel eine Stromrichteranlage mit einer Scheinleistung $S_L = 1$ MVA mit $\cos \varphi = 0,5$ speist (Anhang 1 und 10). Dies entspricht etwa dem Betriebszustand eines einzelnen Stromrichtergleichstromantriebs des ersten Beispiels, allerdings bei höherer Leistung. Der zehnmal bessere Leistungsfaktor erlaubt bei gleicher Scheinleistung der Last nur eine geringfügige Verkleinerung der Kondensatoren (um 14%). Die relative Verlustleistung ist wesentlich kleiner ($P_{02}/P_{L2} = 0,83\%$) als im ersten Beispiel und kann mittels Blindleistungskompensation von 0,83% auf 0,21% verringert werden. Die verbleibenden 0,21% relative Verlustleistung sind durch den Wirkenergiefluss im Transformator bedingt. Die absoluten Kosteneinsparungen für Wirkenergieverluste sind

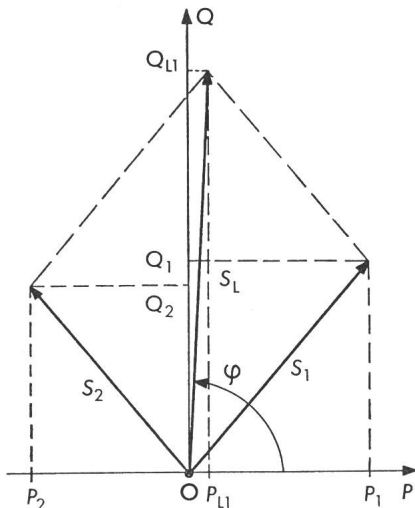


Fig. 2 Zeigerdiagramm für Wirk- und Blindleistung einer Verstreckungsanlage nach Fig. 1

kleiner als im ersten Beispiel, jedoch sind die Anlagekosten auch etwas kleiner. Also sind auch hier die Kosteneinsparungen für reduzierten Blindenergiebezug wirtschaftlich ausschlaggebend.

Literatur

- [1] D. Parnitzky: Einsatz von Blindleistungskondensatoren in Netzen mit Stromrichtern. Bull. SEV/VSE, 67(1976)16, S. 835...839.
- [2] Richtlinie für die Mitglieder des VSE über die Aufnahme von Vorbehalten in Verträgen zwischen Elektrizitätswerken und den Grossbezugern betreffend Anschluss von halbleitergesteuerten Geräten. Zürich, Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, 1973.
- [3] J. Weiler: Oberschwingungsanalyse in der elektrischen Energietechnik. Bull. SEV/VSE 66(1975)24, S. 1372...1376.
- [4] L. Wehrli: Oberschwingungsanalysator für diskrete Netzoberwellen. Bull. SEV/VSE 66(1975)24, S. 1377...1380.
- [5] H. Kümmerly: Methoden der Messung von niederfrequenten Oberwellen. Bull. SEV/VSE 66(1975)1, S. 19...24.

Adresse des Autors

Dipl. El.-Ing. David Parnitzki, Reliance Electric AG, 6036 Dierikon.

Anhang

1. Daten des angenommenen Versorgungstransformators:

Spannungsübersetzung: Mittelspannung (6...10 kV) / Niederspannung (380...660 V)

Nennscheinleistung: $S_n = 2$ MVA

Relative Kurzschlußspannung: $u_c = 5\% = 0,05$

Kurzschlussleistungsfaktor: $\cos \varphi_c = 0,5$; $\varphi_c = 60^\circ$

2. Last im ersten Beispiel: überwiegend induktiv

Scheinleistung: $S_L = 1$ MVA

Leistungsfaktor: $\cos \varphi_1 = 0,05$

Wirkleistung: $P_{L1} = S_L \cdot \cos \varphi_1 = 50$ kW

3. Leistungsfaktor von Stromrichtergleichstromantrieben:

Der Leistungsfaktor beträgt in erster Näherung:

$$\cos \varphi = U_a / U_{di}$$

U_a Stromrichtergleichspannung, Ankerspannung

U_{di} theoretisch erreichbare Spannung bei Vollaussteuerung. Für Sechspulsstromrichter beträgt $U_{di} = 1,35 U$, wobei U der Effektivwert der verketteten Netzspannung ist.

Bei Gleichstromantrieben ohne Feldschwächung steigt U_a linear mit der Drehzahl. Daraus folgt, dass bei niedriger Drehzahl ($U_d \approx 0$) der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ etwa gleich null ist und mit zunehmender Drehzahl proportional wächst.

4. Absolute und relative Verlustleistung im

2-MVA-Transformator bei Anschluss der Last des ersten Beispiels:

$$P_{01} = \frac{S_L}{S_n} \cdot \frac{u_c}{3} \cdot \cos \varphi_c \cdot S_L = 4,2 \text{ kW}$$

$$P_{01}/S_L = 0,42\% \quad P_{01}/P_{L1} = \frac{4,2}{50} = 8,4\%$$

5. Verminderung der Verlustleistung

durch Blindleistungskompensation im ersten Beispiel:

Die relative Abnahme der Verlustleistung berechnet sich zu:

$$\frac{\Delta P_{01}}{P_{01}} = 1 - \left(\frac{\cos \varphi \text{ ohne Kompensation}}{\cos \varphi \text{ mit Kompensation}} \right)^2$$

Wenn auf $\cos \varphi = 1$ kompensiert wird, beträgt

$$\Delta P_{01}/P_{01} = 1 - 0,0025 \approx 100\%$$

Die Verlustleistung kann also um nahezu 100% verringert werden. Dies bedeutet, dass, bezogen auf den Wirkenergiebezug der Last, eine Energieeinsparung von 8,4% möglich ist.

6. Daten der Oberwellensaugkreisanlage:

Kapazitive Blindleistung: $Q = 1 \text{ MVA}$

Saugkreisresonanzfrequenzen:

5. Oberwelle: 2 Filterkreise

7. Oberwelle: 1 Filterkreis

Ungefähre Kosten für Oberwellensaugkreisanlage (inklusive Kondensatoren, Drosseln, Sicherungen, Schränke und «Engineering»): $C_{0w} = 60000 \text{ Fr.}$

Verhältnis Drossel- zu Kondensatorpreis: etwa 1 : 4

7. Eingesparte Energiekosten:

Es wird angenommen, die Anlage arbeite im Dauerbetrieb. Dann berechnen sich die dank Blindleistungskompensation eingesparten Energiekosten pro Jahr:

$$C_0 = p \cdot P_{01} \cdot T = 4000 \text{ Fr.}$$

p Preis für Wirkenergiebezug, es wird $p = 0,11 \text{ Fr./kWh}$ angenommen.

T Anzahl Betriebsstunden pro Jahr. Bei Dauerbetrieb ist $T = 8640 \text{ h.}$

Die jährlich eingesparten Energiekosten verhalten sich gegenüber dem Kapital für eine Oberwellensaugkreisanlage wie $C_0/C_{0w} = 6,67\%$

8. Kosten für Wirk- und Blindenergiebezug:

Die Energiepreise variieren einerseits von Ort zu Ort recht stark ($\pm 40\%$) und sind andererseits von einer Reihe technischer Gegebenheiten (z.B. jährliche und tägliche Belastungskurve des Stromverbrauchers) abhängig. Die nachfolgenden Werte sind lediglich als Anhaltspunkte zu verstehen.

Wirkenergiebezug: $0,08 \dots 0,15 \text{ Fr./kWh}$

Blindenergiebezug: $0,015 \dots 0,025 \text{ sFr./kvarh}$

Es ist anzumerken, dass oft Blindenergiebezug nicht verrechnet wird, solange der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ besser als $0,9 \dots 0,95$ ist. Höherer Blindenergieverbrauch muss normalerweise bezahlt werden. Blindenergieverbrauch bei $\cos\varphi$ kleiner als etwa $0,8$ wird in vielen Fällen von den Elektrizitätswerken gar nicht zugelassen.

9. Amortisationszeit für Oberwellensaugkreisanlagen:

Anlagekosten der Oberwellensaugkreisanlage: $C_{0w} = 60000 \text{ Fr.}$

Kompensierte Blindleistung: $Q = 1 \text{ Mvar}$

Angenommener Preis für Blindenergiebezug: $p = 0,02 \text{ Fr./kvarh}$

Die Amortisationszeit beträgt (Zinskosten vernachlässigt):

$$T = \frac{C_{0w}}{p \cdot Q} = 3000 \text{ h}$$

Bei Dauerbetrieb ist dies rund $1/3$ Jahr. Geht man von einer Betriebsdauer von 30% aus, so beträgt die Amortisationszeit rund ein Jahr.

10. Last im zweiten Beispiel:

Scheinleistung: $S_L = 1 \text{ MVA}$

Leistungsfaktor: $\cos\varphi_2 = 0,5$

Wirkleistung: $P_{L2} = S_L \cdot \cos\varphi_2 = 500 \text{ kW}$

11. Relative Verlustleistung

bei Anschluss der Last des zweiten Beispiels:

$$\frac{P_{02}}{P_{L2}} = \frac{\cos\varphi_c}{\cos\varphi_2} \cdot \frac{S_L}{S_n} \cdot \frac{u_c}{3} = 0,83\%$$

12. Vermeidbare Verlustleistung

durch Blindleistungskompensation im zweiten Beispiel:

Es wird wieder eine Kompensation auf $\cos\varphi = 1$ angenommen.

$$\frac{\Delta P_{02}}{P_{02}} = 1 - \left(\frac{0,5}{1}\right)^2 = 75\%$$