



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 26. Januar 2012

Verluste von Frequenzumrichtern im Motorenbereich

Potenzialabschätzung

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

keine

Auftragnehmer:

Schnyder Ingenieure AG
Bösch 23
CH-6331 Hünenberg
www.schnyderingenieure.ch

Autoren:

Peter Mauchle, Schnyder Ingenieure AG, peter.mauchle@sing.ch
Gilbert Schnyder, Schnyder Ingenieure AG, gilbert.schnyder@sing.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertragsnummer: SI/500159 -01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	4
Resumé.....	5
Abstract	6
1 Ausgangslage	8
2 Frequenzumrichter im Motorenbereich	8
2.1 Aufbau von Frequenzumrichter	8
2.2 Netzurückwirkungen von Frequenzumrichter	9
2.3 Möglichkeiten zur Reduktion der Netzurückwirkungen von Frequenzumrichter	9
3 Diplomarbeiten der HES-SO Wallis	11
3.1 Diplomarbeiten der HES-SO Wallis	11
3.2 Abschätzung der Verluste durch die Oberschwingungen	11
3.3 Einfluss der Zwischenkreisdrossel	12
3.4 Messungen im 6 kV Netz Lalden der Lonza AG	13
3.5 Frequenzumrichter in der Industrie.....	14
4 Bestimmung der Oberschwingungsverluste im Netz.....	14
5 Potenzialabschätzung für die Schweiz	17
5.1 Energiebezug der Frequenzumrichter im Motorenbereich	17
5.2 Berechnung der durch Oberschwingungsströme verursachten Netzverluste	18
5.3 Beurteilung und Vorschlag von Massnahmen	19
6 Referenzen.....	20

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Erhöhung der Effizienz, bzw. für die Reduktion von Betriebskosten von Antriebssystemen mit elektrischen Motoren, werden Frequenzumrichter eingesetzt. Die Frequenzumrichter eliminieren aus der Sicht des Netzes die Grundsicherungsblindleistung des angetriebenen Motors, produzieren aber Obersicherungsströme, die wiederum Obersicherungsblindleistung verursachen. Der Wirkfaktor $\cos \varphi$ von Frequenzumrichtern beträgt somit annähernd 1.0, der Leistungsfaktor PF kann hingegen abhängig von der Grösse der Obersicherungsströme weit unter 1.0 liegen.

Die Obersicherungsströme von Frequenzumrichtern verursachen Verluste im Verteilnetz. In diesem Projekt werden diese Netzverluste in der Schweiz abgeschätzt und beurteilt. Zudem werden Massnahmen aufgezeigt, wie die Netzverluste reduziert werden können.

Im Rahmen des Projektes wurden durch die HES-SO Wallis zwei Diplomarbeiten durchgeführt. In den Diplomarbeiten werden die Frequenzumrichter und auch die möglichen Massnahmen zur Reduktion der Obersicherungsströme erläutert.

Basierend auf vorhandenen statistischen Daten und Erhebungen im Rahmen der Diplomarbeiten wurde der elektrische Energieverbrauch durch Motoren mit Frequenzumrichtern in der Schweiz abgeschätzt. Die Auswertung der unterschiedlichen Daten zeigte, dass dieser Energieverbrauch nicht eindeutig festgelegt werden kann und aktuell zwischen 3 TWh und 6 TWh pro Jahr liegt.

Ausgehend vom abgeschätzten Energieverbrauch der Motoren mit Frequenzumrichter und dem in den Diplomarbeiten erfassten Anteil der Obersicherungsströme am Grundsicherungsstrom konnte berechnet werden, dass die durch die Obersicherungsströme verursachten Netzverluste pro Jahr aktuell zwischen 15 GWh und 48 GWh liegen. Dies entspricht 0.25 ‰ bis 0.8 ‰ des Elektrizitätsverbrauchs der Endverbraucher der Schweiz.

Massnahmen zur Reduktion der Netzverluste, die durch Obersicherungsströme von Frequenzumrichtern verursacht werden, sind somit nicht dringend notwendig. Trotzdem kann für den Einsatz von Frequenzumrichtern empfohlen werden, dass nur Typen mit Drosseln eingesetzt werden und auch netzseitige Filter zur Reduktion der Obersicherungsströme der 5. und 7. Ordnung eingesetzt werden sollen. Damit kann eine sehr grosse Reduktion der durch die Obersicherungsströme verursachten Netzverluste bewirkt werden.

Die Substitution der Grundsicherungsblindleistung von Motoren durch die Obersicherungsblindleistung beim Einsatz eines Frequenzumrichters hat zur Folge, dass die entsprechenden Netzverluste auf einen Drittel reduziert werden können. Da jedoch die Grundsicherungsblindleistung von Motoren vielfach zu einem grossen Teil kompensiert wird, bleiben die Netzverluste, die durch die Grundsicherungsblindleistung oder durch die Obersicherungsblindleistung verursacht werden, in etwa gleich gross, d.h. die Frequenzumrichter verursachen keine zusätzlichen Netzverluste.

Die Reduktion der Obersicherungsströme von Frequenzumrichtern ist nicht nur im Hinblick auf eine Reduktion der Netzverluste anzustreben, sondern liegt auch im eigenen Interesse des Endverbrauchers, um die Spannungsqualität seines Netzanschlusses nicht selbst zu verschlechtern.

RESUMÉ

Les convertisseurs de fréquence sont de plus en plus fréquemment utilisés dans l'alimentation des moteurs électriques: ils contribuent à augmenter l'efficacité des systèmes d'entraînement et en réduisent les frais d'exploitation. Les convertisseurs de fréquence sont composés d'un redresseur, d'un circuit intermédiaire continu et d'un onduleur. Du point de vue du réseau de distribution, les convertisseurs de fréquence éliminent la puissance réactive du moteur entraîné. Cependant ils produisent des courants harmoniques qui provoquent une puissance réactive de distorsion. Le $\cos(\varphi)$ du convertisseur de fréquence est approximativement égal à 1.0, le facteur de puissance PF peut cependant être bien en-dessous de 1.0 en fonction des courants harmoniques.

Les courants harmoniques des convertisseurs de fréquence provoquent des pertes dans le réseau de distribution. Ce projet a pour objectif de caractériser et d'estimer ces pertes pour l'ensemble de la Suisse et de proposer des actions susceptibles de les réduire. L'insertion de selfs dans le circuit intermédiaire continu ou dans l'alimentation, ainsi que l'installation de filtres passifs et actifs et la compensation du facteur de puissance peuvent réduire ces courants harmoniques.

Deux étudiants de la HES-SO Valais ont récemment effectué leur travail de diplôme dans ce domaine, avec ces mêmes objectifs. L'objectif était la création d'une base de connaissance pour la détermination du potentiel de réduction des pertes dans le réseau de distribution provoquées par les courants harmoniques.

A partir de données statistiques et des résultats des études de la HES-SO Valais, la consommation d'énergie électrique des moteurs avec des convertisseurs de fréquence en Suisse a été estimée. L'évaluation des données différentes a montré que la valeur de cette consommation d'énergie ne peut pas être spécifiée précisément. Actuellement cette valeur est située entre 3 TWh et 6 TWh par an.

L'estimation de la consommation d'énergie des moteurs avec des convertisseurs de fréquence estimée et la proportion des courants harmoniques trouvée dans les travaux de diplôme ont permis de calculer les pertes provoquées par les courants harmoniques dans le réseau de distribution. La valeur se trouve entre 15 GWh et 48 GWh par année. Ceci correspond à une fourchette de 0.25 ‰ à 0.8 ‰ de la consommation d'électricité finale de la Suisse.

Ces chiffres montrent que les pertes dans le réseau de distribution provoquées par les courants harmoniques des convertisseurs de fréquence ne sont pas critiques et ne nécessitent pas impérativement la prise de mesures correctives. Néanmoins, une recommandation sur la conception des convertisseurs de fréquence pourrait être proposée: les appareils devraient être munis de selfs dans le circuit intermédiaire et de filtres dans l'alimentation; ils permettraient la réduction des courants harmoniques du 5ème et 7ème ordre, et par voie de conséquence, des pertes dans le réseau de distribution.

La substitution de la puissance réactive des moteurs entraînés par la puissance réactive de distorsion des convertisseurs de fréquence a pour conséquence que les pertes correspondant au réseau peuvent être réduites à un tiers. Toutefois, puisque la puissance réactive des moteurs entraînés est souvent compensée dans une large mesure, les pertes de réseau restent à peu près la même taille comme la puissance réactive de distorsion des convertisseurs de fré-

quence. Ça veut dire que les convertisseurs de la fréquence ne causent pas des pertes de réseau supplémentaire.

La réduction des courants harmoniques des convertisseurs de fréquence aura comme effet principal de réduire les pertes mais elle servira aussi l'intérêt du consommateur en maintenant une qualité de la tension dans le réseau suffisante pour le bon fonctionnement des appareils électriques.

ABSTRACT

For the increase of the efficiency, respectively for the reduction of operating cost of drive systems with electrical engines, motor drives are used. The motor drives consist of electric rectifier, DC voltage intermediate circuit and an inverter. The motor drives eliminate the reactive power of the propelled engine from the view of the distribution net, produce however harmonic currents, which cause again harmonic reactive power. The $\cos \varphi$ of motor drives amounts to thus approximately of 1.0, the power factor PF can however dependently of the size of the harmonic currents be much below 1.0.

The harmonic currents of motor drives cause losses in the distribution net. In this project these losses of the distribution net in Switzerland are estimated and judged. Besides actions are pointed out, how to reduce the losses.

In the context of the project two studies were done by the HES-SO Valais. In the studies the motor drives and also the possible actions to reduce the harmonic currents are described.

Based on existing statistic data and collections in the context of the studies done by the HES-SO Valais the electrical energy consumption of the motors with drives in Switzerland was estimated. The evaluation of the different data showed the fact that this energy consumption cannot be specified clearly and figures at the moment between 3 TWh and 6 TWh per year.

On the basis of the estimated energy consumption of the motors with drives and the harmonic currents according to the studies, it could be calculated that the losses of the distribution net per year, caused by the harmonic currents, lay at the moment between 15 GWh and 48 GWh. This corresponds to 0.25 % to 0.8 % of the electricity consumption of the final consumers of Switzerland.

Actions to reduce the losses of the distribution net, which are caused by harmonic currents of motor drives, are not urgently necessary. Nevertheless it can be recommended for the use of motor drives that only types with inductive coils are used and also filters at the feed for the reduction of the harmonic currents of the 5th and 7th order are used. Thus a very large reduction of the losses of the distribution net caused by the harmonic currents can be realized.

The substitution of the fundamental reactive power of motors due to the harmonic reactive power when using a motor driver has the consequence that the corresponding losses in the distribution net can be reduced to one third. However, since the reactive power of motors is often compensated to a large extent, the losses in the distribution net remain roughly the same size as the power losses caused by the harmonic currents of the motor drives. This means that the motor drives do not cause additional losses in the distribution net.

The reduction of the harmonic currents of motor drives is not only to be aimed at regarding a reduction of the losses, but lies also in the own interest of the final consumer, in order not to worsen the net quality of its mains connection.

1 AUSGANGSLAGE

Zur Erhöhung der Effizienz, bzw. für die Reduktion von Betriebskosten von Antriebssystemen mit elektrischen Motoren, werden Frequenzumrichter eingesetzt. Die heute eingesetzten Frequenzumrichter (FU) bestehen aus leistungselektronischen Anschnitt Steuerungen, die Quellen von Oberschwingungen darstellen. Sofern die Oberschwingungen nicht mit Zusatzeinrichtungen im FU gefiltert werden, bewirken diese im speisenden elektrischen Verteilnetz Verluste. Diese Verluste schmälern die durch den FU angestrebten Effizienzsteigerungen. Nicht alle eingesetzten FU weisen Aktivfilter aus, die zur praktisch gänzlichen Reduktion der Oberschwingungen führen.

Ein vermehrter Einsatz von Frequenzumrichtern führt daher im schweizerischen Stromverteilnetz zu einem durch die Oberschwingungen erhöhten Blindleistungsfluss und damit zu zusätzlichen Verlusten auf den Verteilnetzen.

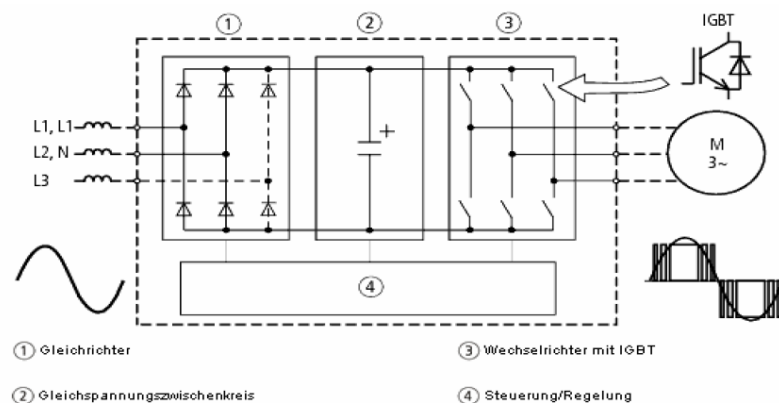
Die übergeordnete Zielsetzung des Projektes ist die Quantifizierung des Potentials der Reduktion der durch die Oberschwingungen verursachten Blindleistung, das durch konsequente Anwendung effizienter Massnahmen gegen Netzzrückwirkungen bei Frequenzumrichtern erzielt werden kann.

2 FREQUENZUMRICHTER IM MOTORENBEREICH

2.1 Aufbau von Frequenzumrichter

Die Beschreibung des Aufbaus von Frequenzumrichter und die in den folgenden beiden Kapiteln beschriebenen Netzzrückwirkungen von Frequenzumrichtern und die Möglichkeiten zu deren Reduktion sind teilweise Zusammenfassungen der entsprechenden Ausführungen der beiden Diplomarbeiten [1] und [2], die im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurden.

Im Allgemeinen besteht ein Frequenzumrichter gemäss Abbildung 1 aus einem Eingangsgleichrichter, einem Gleichspannungszwischenkreis sowie einem Wechselrichter.



Quelle: <http://www.schaltungsbuch.de/drives079.html>

Abbildung 1: Prinzipschema eines Frequenzumrichters

Im Eingangsgleichrichter wird die Netzspannung gleichgerichtet, oft mit einem Diodengleichrichter, welcher nicht rückspeisefähig ist. Hierbei muss im Zwischenkreis ein so genannter Bremschopper vorhanden sein, ein Widerstand, welcher die Bremsenergie des Motors vernichten kann. Es gibt jedoch auch aktive, rückspeisefähige Gleichrichter, die die Bremsenergie des Motors zurück ins versorgende Netz abgeben können. Im Gleichspannungszwischenkreis ist ein Kondensator zur Speicherung der Energie vorhanden. Der Ausgangswechselrichter formt die Gleichspannung mittels schnell schaltenden IGBTs wieder zu einer Wechselspannung mit variabler Frequenz um, so dass der Motor mit einem dreiphasigen Spannungssystem mit der erforderlichen Frequenz versorgt wird.

2.2 Netzurückwirkungen von Frequenzumrichter

Wird ein dreiphasiger Wechselstrommotor direkt ab dem Netz versorgt, so bezieht er im Nennlastbetrieb Wirk- und Blindleistung entsprechend den für den Motor festgelegten Nennleistung und $\cos \varphi$. Im Teillastbereich verschlechtert sich der $\cos \varphi$, d.h. der Blindleistungsanteil in Bezug zur Scheinleistung wird grösser als im Nennlastbetrieb.

Wird ein dreiphasiger Wechselstrommotor über einen Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis versorgt, so entfällt der Blindleistungsbezug der Grundschiwingung weitgehend, so dass der netzseitige $\cos \varphi$ des Frequenzumrichters beinahe 1.0 beträgt. Ein Frequenzumrichter verursacht jedoch Oberschwingungsströme, so dass die aus dem Netz bezogene Stromform nicht mehr einem annähernd reinen Sinus entspricht, wie dies bei einem direkt ab dem Netz versorgten Motor der Fall ist. Die aus dem Netz bezogene Blindleistung eines Frequenzumrichters ist somit nicht mehr ein Teil des Stromes der Grundschiwingung sondern wird durch die Oberschwingungsströme verursacht. Anstelle der Kenngrösse $\cos \varphi$ tritt der für Frequenzumrichter relevante Leistungsfaktor PF, der das Verhältnis der Wirkleistung zur gesamten Scheinleistung ist. In der Wirkleistung und der gesamten Scheinleistung sind auch die Oberschwingungen bei nicht sinusförmigen Strömen und Spannungen sowie die Störströme enthalten. Der Leistungsfaktor kann abhängig von der Ausgestaltung der Frequenzumrichter und der Auslastung einiges kleiner als 1.0 sein.

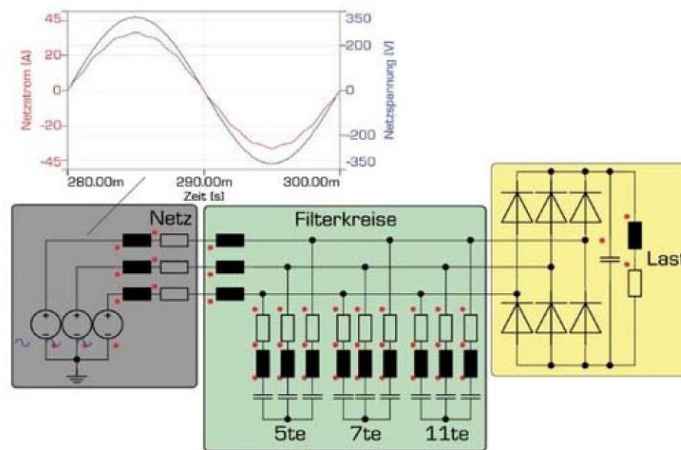
Die Oberschwingungsströme der Frequenzumrichter verursachen Verluste im Verteilnetz, worauf der Fokus dieses Projektes gerichtet ist.

2.3 Möglichkeiten zur Reduktion der Netzurückwirkungen von Frequenzumrichter

Zur Reduktion der Netzurückwirkungen von Frequenzumrichtern bestehen die im Folgenden aufgelisteten Möglichkeiten, die in den beiden Diplomarbeiten [1] und [2] noch weitergehend erläutert sind.

- Die Zwischenkreisdrossel dient für eine erste Glättung der Gleichrichterströme. Eine Zwischenkreisdrossel reduziert die Oberschwingungsströme höherer Ordnung markant, ist jedoch nicht bei allen Frequenzumrichtern enthalten.
- Die Netzdrossel hat dieselbe Wirkung wie die Zwischenkreisdrossel, ist jedoch auf der Netzseite des Frequenzumrichters installiert.

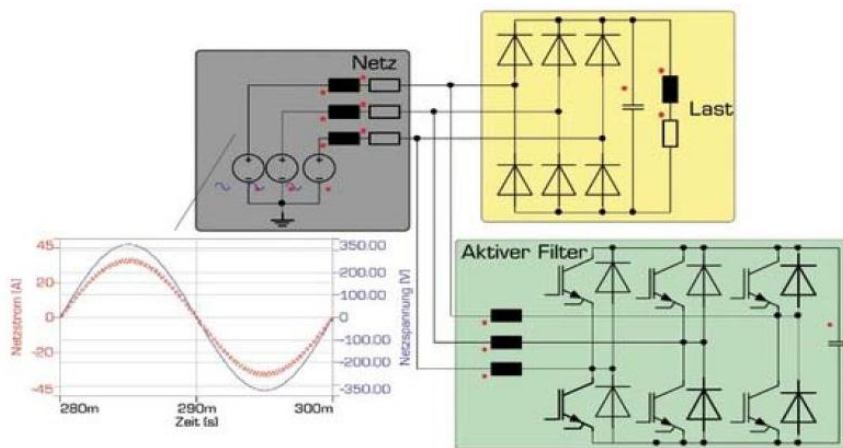
- Passive Filter (Abbildung 2) werden auf der Netzseite des Frequenzumrichters installiert und sind auf bestimmte Oberschwingungsströme abgestimmt.



Quelle: http://www.elektroniknet.de/power/technik-know-how/netzgeraete/article/706/1/So_bleibt_das_Netz_sauber/

Abbildung 2: Passive Filter (aus [1])

- Aktive Filter (Abbildung 3) werden auf der Netzseite des Frequenzumrichters installiert. Sie speisen kontinuierlich Oberschwingungsströme ein, um die vom Frequenzumrichter verursachten Oberschwingungsströme zu kompensieren. Dadurch wird ein sehr guter Leistungsfaktor PF von nahezu 1.0 erreicht.



Quelle: http://www.reo.co.uk/files/cmw905_200_1200_ds.pdf

Abbildung 3: Aktive Filter (aus [1])

- Bei den mehrpulsigen Lösungen (Abbildung 4) werden Transformatoren mit unterschiedlichen Schaltgruppen parallel geschaltet, um Oberschwingungsströme bestimmter Ordnungen annähernd zu eliminieren. Bei einem 12-pulsiger Gleichrichter treten noch die Oberschwingungsströme der 11. und 13. Ordnung und weitere nach der Formel $(n \cdot 12 \pm 1)$ auf, bei einem 24-pulsiger Gleichrichter treten noch die Oberschwingungsströme der 23. und 25. Ordnung und weitere nach der Formel $(n \cdot 24 \pm 1)$ auf (siehe Abbildung 5). Die mehrpulsigen Lösungen werden in den Versorgungsnetzen der Verteilnetzbetreiber kaum eingesetzt. Der Einsatzbereich beschränkt sich auf die Industrienetze.

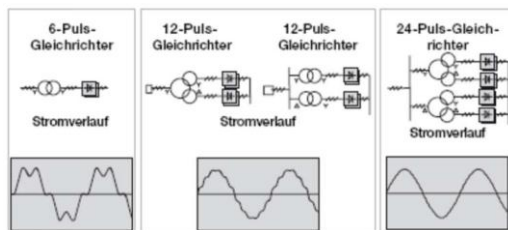


Abbildung 4: 6-, 12- und 24-pulsige Gleichrichter (aus [2])

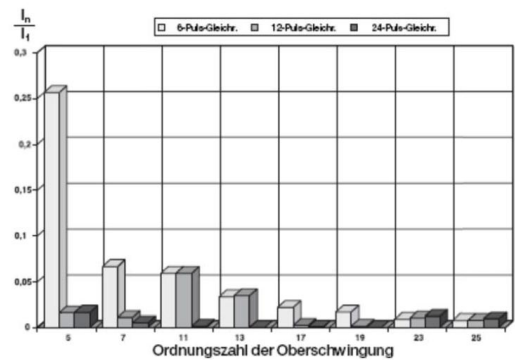


Abbildung 5: Stromoberschwingungen bei mehrpulsigen Gleichrichtern (aus [2])

- Die Gleichrichter mit Power Factor Correction (PFC) werden so geregelt, dass sie aus dem Netz einen sinusförmigen Strom entziehen und somit einen Leistungsfaktor PF von 1.0 erreichen.

3 DIPLOMARBEITEN DER HES-SO WALLIS

3.1 Diplomarbeiten der HES-SO Wallis

Im Rahmen des Projektes wurden durch die HES-SO Wallis zwei Diplomarbeiten durchgeführt, um die Grundlagendaten zur Potenzialabschätzung zu bestimmen. Die Diplomarbeiten beinhalten Messungen an der Netzseite von Frequenzumrichtern verschiedener Leistungsklassen in der Laborumgebung der HES-SO und im Industrienetz der Lonza AG. Dabei sind verschiedene Messorte mit unterschiedlichen Konstellationen von Frequenzumrichtern berücksichtigt worden.

Die für die Bestimmung der durch Frequenzumrichter im Motorenbereich verursachten Oberschwingungsverluste relevanten Erkenntnisse aus den beiden Diplomarbeiten werden im Folgenden aufgeführt und erläutert.

3.2 Abschätzung der Verluste durch die Oberschwingungen

Die durch die Frequenzumrichter verursachten Oberschwingungsströme müssen von der Energieversorgung geliefert werden. Dabei verursachen vor allem die Harmonischen der 5. und 7. Ordnung mit den relativ hohen Amplitudenwerten zusätzlich zur Grundschiwingung zu berücksichtigende Verlustleistungen auf dem Verteilnetz. Für die Abschätzung der Verlust-

leistung auf der Leitung vom Generator bis zum Verbraucher wird das vereinfachte Modell gemäss Abbildung 6 berücksichtigt. Die Leitung wird dabei als ohmscher Widerstand simuliert, der Verbraucher wird als ideale Stromquelle für die Grundschiwingung und die Oberschwingungen angenommen.

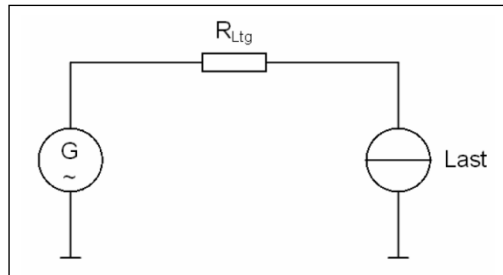


Abbildung 6: Vereinfachtes Modell Stromnetz (Quelle: [1] Abb. 25.1)

Mittels der Formel 1 kann der prozentuale Anteil der Leitungsverluste der Oberschwingungen gegenüber den durch die Grundschiwingung verursachten Leitungsverlusten ermittelt werden.

$$\frac{P_{tot}}{P_{v,h}} = \frac{I_{L1}^2 \cdot R_{Ltg}}{I_h^2 \cdot R_{Ltg}} = \left(\frac{I_{L1}}{I_h} \right)^2 \Rightarrow P_{v,h} = P_{tot} \cdot \left(\frac{I_h}{I_{L1}} \right)^2$$

Formel 1: Leitungsverluste der Oberschwingungen in Funktion der Leitungsverluste der Grundschiwingung P_{tot} (aus [1] Formel 25.1)

Mit dem vereinfachten Netzmodell und der Formel 1 können die durch die Oberschwingungen verursachten Leitungsverluste abgeschätzt werden.

3.3 Einfluss der Zwischenkreisdrossel

Mit Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Oberschwingungsströme beim Einsatz einer Zwischenkreisdrossel im Frequenzumrichter sehr stark gedämpft werden können. So reduziert sich die Total Harmonic Distortion des Stromes THDi von 140 % bei einem Frequenzumrichter ohne Zwischenkreisdrossel auf einen THDi von 30 % bei der Berücksichtigung einer Zwischenkreisdrossel.

Wird die Zuleitung mit in die Simulation einbezogen, so zeigt sich, dass ohne Zwischenkreisdrossel die Oberschwingungsströme von der Leitungslänge, d.h. von der Leitungsinduktivität abhängig sind. Bei kurzen Leitungen, d.h. bei geringer Leitungsinduktivität werden die Oberschwingungsströme tiefer Ordnung verstärkt, da die Leitungsinduktivität mit dem Kondensator im Zwischenkreis einen Schwingkreis bildet. Wird eine Zwischenkreisdrossel in der Simulation mit berücksichtigt, so zeigt sich, dass die Leitungsinduktivität der Einspeisung fast keinen Einfluss mehr hat und der THDi wiederum 30 % beträgt. Zudem konnte auch gezeigt werden, dass die Leitungsverluste lediglich noch linear von der Leitungslänge abhängig sind und auch viel geringer ausfallen als dies bei einem Frequenzumrichter ohne Zwischenkreisdrossel der Fall ist. Der Unterschiede der Oberschwingungsströme ohne und mit Zwischenkreisdrossel ist in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt.

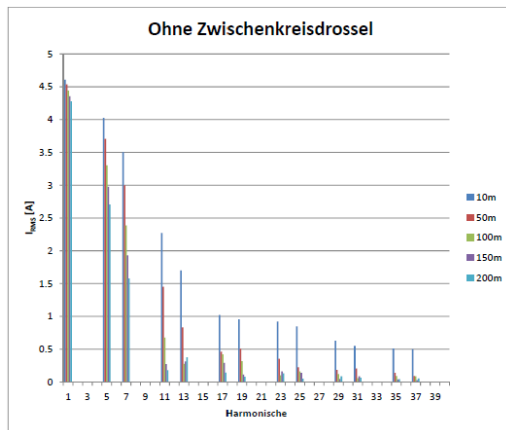


Abbildung 7: Oberschwingungsströme mit Leitung ohne Zwischenkreisdrossel (aus [2])

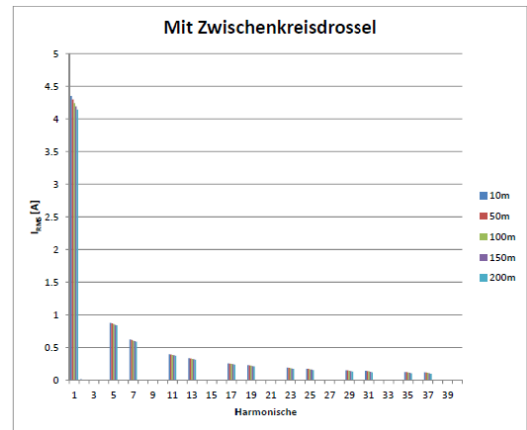


Abbildung 8: Oberschwingungsströme mit Leitung mit Zwischenkreisdrossel (aus [2])

3.4 Messungen im 6 kV Netz Lalden der Lonza AG

Mit einer Messung der primär- und sekundärseitigen Oberschwingungsströme eines 6 kV/0.69 kV Transformators wurde aufgezeigt, dass der Transformator auf Grund seiner Induktivität dämpfend auf die Oberschwingungsströme wirkt. So werden die Oberschwingungen der 5. und 7. Ordnung um 15 %, resp. um 20 % sowie die Oberschwingungen der 11. und höheren Ordnung über 30 % gedämpft. Das Messschema und die Messresultate sind in Abbildung 9 bis Abbildung 12 ersichtlich.

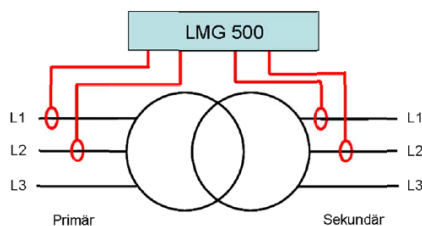


Abbildung 9: Messschema (aus [2])



Abbildung 10: gemessener Trafo 6 kV / 0.69 kV (aus [2])

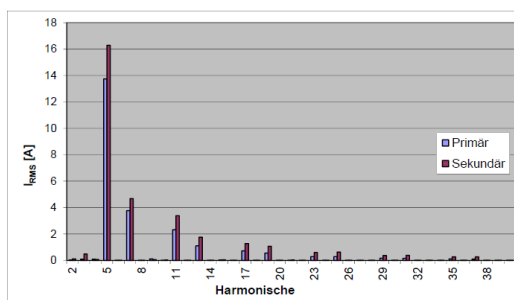


Abbildung 11: Oberschwingungsströme bezogen auf die 6 kV Ebene (aus [2])

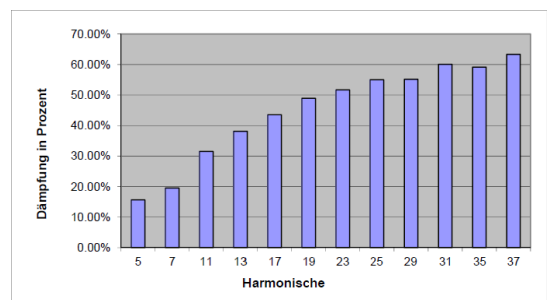


Abbildung 12: Dämpfung der Oberschwingungsströme durch den Trafo (aus [2])

3.5 Frequenzumrichter in der Industrie

Als Hilfe zur Abschätzung der Oberschwingungsverluste in der Schweiz wurden von zwei Unternehmen die installierte Leistung der Frequenzumrichter und die installierte Motorenleistung erfasst.

Im Jahre 2011 waren bei der Lonza AG 776 Frequenzumrichter im Leistungsbereich von 0.18 kW bis 1'500 kW installiert. Die gesamte installierte Leistung der Frequenzumrichter betrug 15.42 MW. Auf der Niederspannungsebene sind 6'462 Motoren mit einer Leistung von 91.1 MW installiert. Davon wird eine Motorenleistung von 14.8 MW über Frequenzumrichter angesteuert. Somit sind auf der Niederspannungsseite 16.2 % aller Motoren mit Frequenzumrichter ausgerüstet. Der Anteil Motoren mit Frequenzumrichter ist auf der Mittelspannungsebene, d.h. der 6 kV und der 3 kV Ebene viel geringer. Einer installierten Leistung der Frequenzumrichter von 0.62 MW steht eine Leistung der 74 Mittelspannungsmotoren von 55.02 MW gegenüber, was lediglich 1.1 % entspricht. Insgesamt steht somit bei der Lonza AG in Visp einer installierten Leistung der Frequenzumrichter von 15.42 MW eine Motorenleistung von 146.12 MW gegenüber, was einem Anteil von 10.6 % Frequenzumrichtern entspricht.

Bei der Abwasserreinigungsanlage ARA Radet in Leuk sind am Hauptstandort 46 Drehstrommotoren auf der Niederspannungsseite installiert, die teilweise über Frequenzumrichter gespeist werden. Die gesamte installierte Motorenleistung beträgt 381.8 kW. Von diesen Motoren werden 8 Stück über Frequenzumrichter angespeist. Die installierte Leistung der Frequenzumrichter beträgt 101.6 kW, was einem Anteil von 26.6 % entspricht.

4 BESTIMMUNG DER OBERSCHWINGUNGSVERLUSTE IM NETZ

Basierend auf den beiden im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Diplomarbeiten werden die Oberschwingungsverluste im Netz wie folgt berechnet.

Für die einzelnen Oberschwingungen kann die Verlustleistung gemäss Formel 1 aus dem Verhältnis des Oberschwingungsstroms zum Grundschwingungsstrom und den Netzverlusten der Grundschwingung berechnet werden. Für die Summe aller Oberschwingungsverlustleistungen resultiert somit Formel 2.

$$\text{Gesamte Oberschwingungsverlustleistung } P_{VO\ tot} = P_{V1} * \sum_{h=2}^{40} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = P_{V1} * THDi^2 \quad \text{Formel 2}$$

In der ersten Diplomarbeit [1] wurden mehrere Frequenzumrichter auf der Niederspannungsebene ausgemessen und die Verzerrung des Stromes THDi ermittelt. Aus diesen Messwerten kann ein mittlerer THDi für die Niederspannungsebene abgeleitet werden.

Die Oberschwingungsströme werden durch die Transformation auf die höhere Netzebene gedämpft, so dass auch der THDi entsprechend reduziert wird. Die Dämpfung der einzelnen Oberschwingungsströme wurde in der zweiten Diplomarbeit [2] Kap. 9.4 ermittelt. Unter Berücksichtigung der Grösse der einzelnen Oberschwingungsströme ergibt sich daraus ein Faktor von 0.76 für den THDi auf der höheren Spannungsebene. Der Faktor ist nicht geringer, da

der Transformator vor allem die Oberschwingungsströme höherer Ordnung dämpft und die stromstarken Oberschwingungen der 5. und 7. Ordnung lediglich um 15 %, resp. um 20 % reduziert werden. Zudem wiesen die einzelnen MS/NS-Transformatoren eines Verteilnetzbetreibers meistens identische Schaltgruppen auf, womit im Verteilnetz keine Zwölfpulsigkeit erfolgt, die die Oberschwingungen der 5. und 7. Ordnung auf der Mittelspannungsebene zusätzlich reduzieren würden. Lediglich in Industrienetzen werden teilweise Stern/Stern- und Dreieck/Stern-Transformatoren eingesetzt, um so Dank der Zwölfpulsigkeit die Oberschwingungen der 5. und 7. Ordnung auf der Mittelspannungsebene stark zu reduzieren.

Die Erfahrung basierend auf Auswertungen von Energiebilanzen mehrerer Verteilnetzbetreiber zeigt, dass für 100 % abgesetzte elektrische Energie an Endverbraucher auf der Niederspannungsseite vom vorliegenden Netzbetreiber ab dem Unterwerk auf der Mittelspannungsebene im Durchschnitt etwa 105 % Energie beschafft werden muss. Diese Erfahrungswerte basieren auf gemessenen Grössen, die jeweils zur Energieverrechnung benutzt werden, und betreffen die Wirkenergie der Grundschiwingung. Somit ergeben sich im Durchschnitt für die Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie über das Mittelspannungsnetz, über die Transformation und über das Niederspannungsnetz Netzwirkverluste von 5 % des Verbrauches der Endverbraucher. Die eigenen Verlustanteile des Verteilnetzes, d.h. die Blindleistung der Leitungen sowie die Leerlaufverluste und die Blindleistungsverluste der Transformatoren werden dabei vernachlässigt, da deren Verhältnis zum Verbrauch der Endverbraucher sehr gering ist. Der prozentuale Anteil der Netzverluste lässt sich somit in einer ersten Näherung auch auf die Grundschiwingung der Frequenzumrichter anwenden, so dass für die Verlustleistung der Grundschiwingung die Formel 3 gilt.

$$\text{Verlustleistung Grundschiwingung } P_{V1} = 5\% * P_{FU}$$

Formel 3

Die gesamten Netzverluste teilen sich auf die Netzebenen auf, wobei die eine Hälfte der Netzverluste der Niederspannungsebene und die andere Hälfte der Transformations- und der Mittelspannungsebene zugeordnet werden kann.

Die einzelnen Schritte zur Berechnung der Netzverluste der Oberschwingungsströme von Frequenzumrichtern in Prozent der Wirkleistung P_{FU} sind in Tabelle 1 ersichtlich.

	Parameter	Verluste	Bemerkungen
THDi auf Niederspannungsebene	40%		Mittlerer, basierend auf [1] geschätzter Wert
THDi² auf Niederspannungsebene	16%		
Netzverluste auf der Niederspannungsebene Anteil der bezogenen Wirkleistung der FU (v_{NS})	2.5%		50 % der gesamten Netzverluste der Grundschiwingung
Oberschwingungsverlustleistung auf der Niederspannungsebene in Prozent der bezogenen Wirkleistung der FU ($v_{NS} * THDi^2$)		0.40%	$P_{VO\ tot} = (v * THDi^2) * P_{FU}$
Faktor THDi primär/THDi sekundär	0.76		Basierend auf Messungen in [2]
THDi auf Transformations- und höheren Netzebenen	30%		
THDi² auf Transformations- und höheren Netzebenen	9%		
Netzverluste auf Transformations- und Mittelspannungsebene Anteil der bezogenen Wirkleistung der FU (v_{TS_MS})	2.5%		50 % der gesamten Netzverluste der Grundschiwingung
Oberschwingungsverlustleistung auf Transformations- und Mittelspannungsebene in Prozent der bezogenen Wirkleistung der FU ($v_{TS_MS} * THDi^2$)		0.23%	$P_{VO\ tot} = (v * THDi^2) * P_{FU}$
Oberschwingungsverlustleistung gesamt in Prozent der bezogenen Wirkleistung der FU ($v * THDi^2$)		0.63%	Mittlerer Wert für die Berechnung der durch die Oberschwingungsströme verursachten Netzverluste

Tabelle 1: Herleitung der Netzverluste der Oberschwingungsströme in Prozent der Wirkleistung von Frequenzumrichtern

Basierend auf den Messungen der Diplomarbeiten wird ein mittlerer THDi von 40 % abgeleitet. Ausgehend von diesem THDi, der Aufteilung der Netzverluste auf die einzelnen Spannungsebenen und der Dämpfung der Oberschwingungsströme durch die Transformations-ebene wird für die Netzverluste, die durch die Oberschwingungsströme von Frequenzumrichtern verursacht werden, ein Anteil von 0.63 % des Energieverbrauchs der Motoren mit Frequenzumrichter ermittelt.

Als Vergleichsgrösse wird in Tabelle 2 abgeschätzt, wie gross die Reduktion der Netzverluste eines Motors ist, die durch die Vermeidung der Grundschiwungsblindleistung erreicht werden kann. Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern mit Gleichspannungszwischenkreis kann die Grundschiwungsblindleistung von Motoren fast vollständig eliminiert werden, was einen $\cos \varphi$ von nahezu 1.0 zur Folge hat. An die Stelle der Grundschiwungsblindleistung treten dafür die Oberschwiwungsblindleistungen, die einen Leistungsfaktor PF weit unter 1.0 verursachen können.

	Parameter	Verluste	Bemerkungen
Wirkstrom der Motoren I_{Wirk}	100%		Ausgangslage für die Abschätzung
Mittlerer $\cos \varphi$ aller Motoren	0.85		Angenommener Mittelwert bei unterschiedlichen Belastungen
Blindstrom der Motoren I_{Blind}	62%		Berechnet aus Wirkstrom und mittlerem $\cos \varphi$
Effektiver Strom der Motoren I_{eff}	118%		$I_{\text{eff}} = \sqrt{(I_{\text{Wirk}}^2 + I_{\text{Blind}}^2)}$
Netzverluste auf Niederspannungs-, Transformations- und Mittelspannungsebene bezogen auf die Wirkleistung der Endverbraucher und somit auf die Motoren	5%		
Netzverluste verursacht durch den Wirkstrom der Motoren		5.0%	$P_{\text{vW}} = R_{\text{tg}} \cdot I_{\text{Wirk}}^2$; entspricht der Ausgangslage
Netzverluste verursacht durch den Blindstrom der Motoren		1.9%	$P_{\text{vB}} = R_{\text{tg}} \cdot I_{\text{Blind}}^2$
Netzverluste verursacht durch den effektiven Strom der Motoren		6.9%	$P_{\text{v}} = R_{\text{tg}} \cdot I_{\text{eff}}^2 = P_{\text{vW}} + P_{\text{vB}}$

Tabelle 2: Abschätzung der durch die Grundschiwungsblindleistung von Motoren verursachten Netzverluste

Die Netzverluste die durch die Grundschiwungsblindleistung der Motoren verursacht wird, werden somit auf 1.9 % der Wirkleistung der Motoren abgeschätzt. Durch den Einsatz von Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis werden diese Netzverluste der Grundschiwung eliminiert und durch die Netzverluste der Oberschwiwungsströme ersetzt. Die durch die Blindleistung verursachten Netzverluste werden somit von 1.9 % auf 0.63 % der Wirkleistung der Motoren, resp. der Motoren mit Frequenzumrichter reduziert. Durch die Reduktion der Oberschwiwungsströme können die entsprechenden Netzverluste weiter reduziert werden.

Häufig wird jedoch die Blindleistung der direkt gespeisten Motoren, vor allem wenn diese einen grossen Anteil der Last eines Endverbrauchers ausmachen, mittels Blindleistungskompensatoren reduziert. Diese Blindstromkompensation erfolgt jedoch nicht immer vollständig, d.h. nicht immer auf $\cos \varphi = 1.0$, sondern lediglich soweit, dass keine Kosten für den Blindenergiebezug entstehen. Die Verrechnung der Blindenergie durch die Verteilnetzbetreiber ist unterschiedlich. Eine Verrechnung der Blindenergie erfolgt in den meisten Fällen, wenn pro Monat der mittlere $\cos \varphi$ kleiner als 0.9 bis 0.95 ist.

Wird z.B. ein direkt gespeister Motor auf $\cos \varphi = 0.94$ kompensiert, so entsprechen die Netzverluste der Grundschiwungsblindleistung denjenigen der Oberschwiwungsströme gemäss

Tabelle 1. Wird ein direkt gespeister Motor besser als auf $\cos \varphi = 0.94$ kompensiert, so werden durch den Einsatz eines Frequenzumrichters die Netzverluste auf Grund der Oberschwingungsströme zunehmen.

Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Kompensation des Blindleistungsanteils der direkt ab dem Netz versorgten Motoren, kann somit abgeleitet werden, dass durch den Einsatz von Frequenzumrichter für Motoren die Netzverluste nicht erhöht werden.

5 POTENZIALABSCHÄTZUNG FÜR DIE SCHWEIZ

5.1 Energiebezug der Frequenzumrichter im Motorenbereich

Zur Berechnung der Netzverluste, die von Frequenzumrichtern verursacht werden, muss der Energiebezug der in der Schweiz installierten Frequenzumrichter ermittelt werden. Ausgehend vom Elektrizitätsverbrauch, dem Anteil davon, der für Motoren eingesetzt wird und dem noch zu erhebenden Anteil von Motoren mit Frequenzumrichtern kann die Grössenordnung des jährlichen Energiebezugs durch die Motoren mit Frequenzumrichter abgeschätzt werden.

Gemäss der Schweizerischen Gesamtenergiestatistik 2010 [3] betrug der Elektrizitätsverbrauch durch die Endverbraucher der Schweiz im Jahre 2010 60 TWh. Davon werden gemäss der Schweizerischen Elektrizitätsstatistik 2010 [4] (Fig.2) 33.9 % oder 20.3 TWh für die Kategorien Industrie, verarbeitendes Gewerbe, Landwirtschaft und Gartenbau verwendet. In diesen Kategorien werden ungefähr 85 % oder 17.3 TWh der elektrischen Energie für Motoren eingesetzt. Auch in der Kategorie Haushalt wird ein nicht zu vernachlässigender Anteil der elektrischen Energie für Motoren eingesetzt. Dieser Anteil wird auf ca. 15 % oder 2.7 TWh geschätzt, so dass insgesamt ohne die Kategorie Verkehr ca. 20 TWh für Motoren eingesetzt werden. Die Motoren der Kategorie Verkehr sind in dieser Energiemenge nicht berücksichtigt.

Der Anteil der Motoren mit Frequenzumrichter an der gesamten in der Schweiz für Motoren verwendeten elektrischen Energie ist hingegen nicht als gefestigte Kennzahl bekannt und muss aus unterschiedlichen Quellen ermittelt werden. Die für die Ermittlung der Kennzahl „Verbrauch der Motoren mit Frequenzumrichter im Verhältnis zum Verbrauch aller Motoren“ wird basierend auf den im Folgenden aufgeführten Grundlagen abgeschätzt.

In einer an der EEMODS'11 präsentierten Studie bezüglich des weltweiten Markts von Motoren und Antrieben [5] wird aufgezeigt, dass im Jahre 2010 mehr als 34.7 Mio. Einheiten Niederspannungswechselstrommotoren geliefert wurden. Für den gleichen Zeitraum werden 16.4 Mio. Lieferungen von Niederspannungs AC und DC Motor Drives geschätzt. Dies ergibt rein rechnerisch einen Anteil von 47 % für die Motor Drives. Dabei muss wohl davon ausgegangen werden, dass ein Teil der Motor Drives für Nachrüstungen verwendet werden. Da sich die Werte lediglich auf die Stückzahl beziehen, kann über den weltweiten Anteil der Leistung der Drives an der gesamten Motorenleistung keine verlässliche Aussage gemacht werden.

In einer im Auftrag des BFE erstellten Marktanalyse der Industrie aus dem Jahre 2006 [6] werden der Motorenbestand in der Schweizer Industrie und der Anteil der drehzahlregulierten Motoren in Abhängigkeit der Leistungsklassen aufgeführt. Daraus wird entsprechend der

Tabelle 3 der Leistungsanteil der Motoren mit Frequenzumrichter berechnet. In der Marktanalyse wird allerdings darauf hingewiesen, dass es sich bei den aufgeführten Werten jeweils um grobe Schätzungen handelt. Somit ist auch der in Tabelle 3 berechnete Anteil der drehzahlregulierten Motoren als Schätzung zu betrachten.

Leistungskategorie	Anzahl Motoren (in Tausend)	Ø Leistung (kW)	Installierte Leistung (MW)	Verbrauch (GWh)	Drehzahlregulierte Motoren		
					Anteil	Installierte Leistung (MW)	Verbrauch (GWh)
0.75 bis 7.5 kW	1'800	3	5'400	2'160	24%	1'296	518
7.5 bis 37.5 kW	250	15	3'750	1'875	40%	1'500	750
37.5 bis 75 kW	75	55	4'125	2'475	53%	2'186	1'312
75 bis 375 kW	35	120	4'200	3'570	42%	1'764	1'499
>375 kW	4	550	2'200	2'200	17%	374	374
Total	2'164		19'675	12'280		7'120	4'454
Anteile der drehzahlregulierten Motoren						36.2%	36.3%

Tabelle 3: Berechnung des Leistungsanteils der Motoren mit Frequenzumrichter im Jahre 2006 basierend auf den Erfassungen in [6]

Aus der Marktanalyse gemäss [6] geht somit hervor, dass 36 % der Motoren über Frequenzumrichtern angetrieben werden.

Die Erhebung des Anteils der Motoren mit Frequenzumrichter bei der Lonza AG und bei der ARA Radet im Rahmen der Diplomarbeit [2] ergab tiefere Werte, nämlich 10.6 % bei der Lonza AG und 26.6 % bei der ARA Radet.

Für die Berechnung der Netzverluste wird basierend auf der Analyse der oben erwähnten Dokumente und den daraus hervorgehenden sehr unterschiedlichen Werte ein Anteil von 30 % für Motoren mit Frequenzumrichter abgeleitet. Daraus ergibt sich eine elektrische Energie von 6 TWh, die durch Motoren mit Frequenzumrichtern verbraucht wird.

5.2 Berechnung der durch Oberschwingungsströme verursachten Netzverluste

Die Netzverluste $E_{VO\ tot}$, die durch die Oberschwingungsströme der Frequenzumrichter im Verteilnetz der Schweiz verursacht werden, berechnen sich somit gemäss Kap. 4 und Kap. 5.1 wie folgt:

$$E_{VO\ tot} = E_{FU} * (v * THDi^2) = 6TWh * 0.63\% = 37.8GWh \quad \text{Formel 4}$$

Die mit der Formel 4 berechneten durch die Oberschwingungen von Frequenzumrichter verursachten Netzverluste der Schweiz von 37.8 GWh basieren auf folgenden Daten:

- 20 TWh elektrischer Energieverbrauch für Motoren in den Kategorien Industrie, Landwirtschaft und Haushalt gemäss der Herleitung in Kap. 5.1.
- 6 TWh elektrischer Energieverbrauch für Motoren mit Frequenzumrichter in der Schweiz basierend auf einem Anteil der Motoren mit Frequenzumrichtern von 30 % (Kap. 5.1)
- 5 % Netzverluste für die Mittelspannungs-, Transformations- und Niederspannungsebene, wobei die Hälfte davon auf der Niederspannungsebene anfällt (Kap. 4)
- THDi von 40 % verursacht durch die Frequenzumrichter auf der Niederspannungsebene basierend auf Auswertungen und Schätzungen aus [1] (Kap. 4)

- Reduktion des THDi durch die Transformation zwischen Nieder- und Mittelspannung um den Faktor 0.76 (Kap. 4)

In Abbildung 13 werden die berechneten Netzverluste einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Dabei werden Änderungen des Anteils der Motoren mit Frequenzumrichter und des von den Frequenzumrichtern verursachten THDi auf der Niederspannungsseite berücksichtigt.

Der Anteil der Motoren mit Frequenzumrichter von 30 % basiert auf Schätzwerten und wird daher zwischen 10 % und 40 % variiert. Dadurch liegt der für die Sensitivitätsanalyse betrachtete Bereich des elektrischen Energieverbrauchs für Motoren mit Frequenzumrichtern zwischen 2 TWh und 8 TWh.

Der THDi von 40 % basiert auf Messungen und Schätzungen. Werte zwischen 30 % und 50 % sind somit auch möglich. Um den Einfluss von zusätzlichen Filtern zu berücksichtigen wird für die Sensitivitätsanalyse der THDi zwischen 10 % und 50 % variiert.

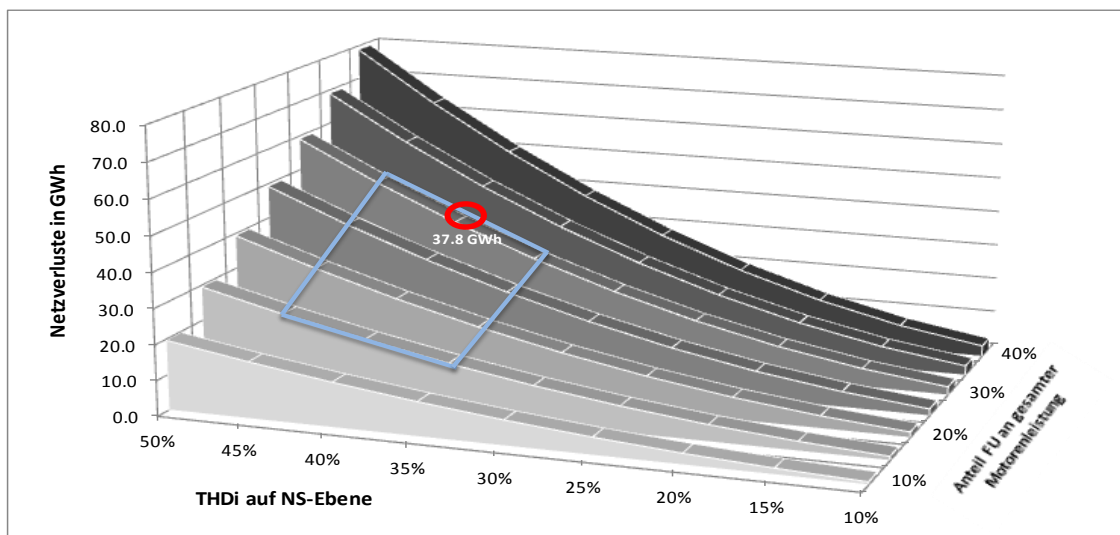


Abbildung 13: Sensitivitätsanalyse der Netzverluste, die durch die Oberschwingungen von Frequenzumrichtern verursacht werden.

Entsprechend der Berechnung der Netzverluste, die durch Oberschwingungen von Frequenzumrichtern verursacht werden (Formel 4), sind die Netzverluste linear vom Anteil der Energiemenge, die von den Motoren mit Frequenzumrichtern verbraucht wird, abhängig. Die Grösse der einzelnen Oberschwingungsströme, die sich im THDi widerspiegelt, wirkt jedoch quadratisch auf die Netzverluste. Erhöht sich der THDi z.B. von 40 % auf 50%, so nehmen die Netzverluste um 56 % zu. Kann jedoch mittels geeigneten Massnahmen, wie z.B. Filter, der gesamte THDi von 40 % auf 30 % reduziert werden, so reduzieren sich die Netzverluste um 44 %.

5.3 Beurteilung und Vorschlag von Massnahmen

Die berechneten Netzverluste, die durch Oberschwingungen von Frequenzumrichter verursacht werden, betragen 37.8 GWh. Dieser berechnete Wert basiert auf mehreren Abschätzungen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass zum aktuellen Zeitpunkt entsprechend dem in Abbildung 13 blau umrahmten Bereich der Anteil der Motoren mit Frequenzumrichtern zwischen 15 % und 30 % aller Elektromotoren beträgt und dass der THDi der Frequenzumrichter aktuell im Mittel zwischen 35 % und 45 % liegt. Daraus resultieren Netz-

verluste, die zwischen 15 GWh und 48 GWh liegen. Dies entspricht gemäss der Schweizerischen Elektrizitätsstatistik 2010 [4] 0.25 % bis 0.8 % des Elektrizitätsverbrauchs der Endverbraucher oder einem Anteil an den Übertragungs- und Verteilverluste von 3.3 % bis 10.6 % der Schweiz.

Massnahmen zur Reduktion der Netzverluste, die durch Oberschwingungsströme von Frequenzumrichtern verursacht werden, sind somit nicht dringend notwendig. Trotzdem kann für den Einsatz von Frequenzumrichtern empfohlen werden, dass nur Typen mit Zwischenkreisdrosseln eingesetzt werden und auch netzseitige Filter zur Reduktion der Oberschwingungsströme der 5. und 7. Ordnung eingesetzt werden sollen. Damit kann der THDi massiv reduziert werden, was eine sehr grosse Reduktion der durch die Oberschwingungsströme verursachten Netzverluste bewirkt.

Die Substitution der Grundschiebungsblindleistung von Motoren durch die Oberschiebungsblindleistung beim Einsatz eines Frequenzumrichters hat zur Folge, dass die entsprechenden Netzverluste auf einen Drittel reduziert werden können. Da jedoch die Grundschiebungsblindleistung von Motoren vielfach zu einem grossen Teil kompensiert wird, bleiben die Netzverluste, die durch die Grundschiebungsblindleistung oder durch die Oberschiebungsblindleistung verursacht werden, in etwa gleich gross, d.h. die Frequenzumrichter verursachen keine zusätzlichen Netzverluste.

Die Reduktion der Oberschwingungsströme von Frequenzumrichtern ist nicht nur im Hinblick auf eine Reduktion der Netzverluste anzustreben, sondern liegt auch im eigenen Interesse des Endverbrauchers. Durch die Reduktion der Oberschwingungsströme vermeidet der Endverbraucher eine selbst verursachte Verschlechterung der Spannungsqualität seines Netzan schlusses und vermeidet dadurch auch Störungen bei anderen von ihm genutzten Geräten.

6 REFERENZEN

- [1] David Gasser; HES-SO Wallis, Studiengang Systemtechnik, Vertiefungsrichtung Power & Control: **Verluste von Frequenzumformer im Motorenbereich**; Diplom 2010
- [2] Matthias Bregy; HES-SO Wallis, Studiengang Systemtechnik, Vertiefungsrichtung Power & Control: **Übertragungsverluste durch Oberschwingungen von Frequenzumformern**; Diplom 2011
- [3] Bundesamt für Energie BFE: **Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2010**; 805.006.10 d/f / 08.2011 / 2800
- [4] Bundesamt für Energie BFE: **Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2010**; 805.005.10 d/f / 06.2011 / 2000
- [5] Alex Chausovsky: **Integral HP Industrial Motors & Drives: A Global Market Update**; EEMODS'11, Electric Motors Group – IMS Research
- [6] Bundesamt für Energie, Basics AG: **Massnahmen zum Stromsparen bei elektrischen Antrieben – Marktanalyse in der Industrie**; Schlussbericht, 11. November 2006