

Diss. Nr. 4945

**Einfluss der Glättungs- und Kommutierungsreaktanzen
auf das Netzverhalten von mehrfach-folgegesteuerten
Stromrichtern in einphasiger
halbsteuerbarer Schaltung**

ABHANDLUNG

zur Erlangung
des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
PETER WINTER
dipl. El.-Ing. ETH
geboren am 7. Dezember 1943
von Dörflingen (Kt. Schaffhausen)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. R. Zwicky, Referent
Prof. A. Dutoit, Korreferent

Juris Druck + Verlag Zürich
1973

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Hinblick auf die Reduktion der Störwirkung phasenanschnittgesteuerter Triebfahrzeuge befasst sich diese Arbeit mit dem Netzverhalten von mehrfach folgegesteuerten Stromrichter-Brückenschaltungen. Sie berücksichtigt speziell 4- und 8-stufige Sparschaltungen, die sich mit reduzierter Ventilzahl relativ einfach ausführen lassen. Bei diesen Stromrichtern kann die Phasenanschnitt-Stromwendung durch eine spezielle Zusatz-Kommutierungs-drossel verlangsamt werden, die bei Vollaussteuerung keine zusätzlichen Spannungsabfälle und Verluste verursacht. Den gleichen Effekt erzeugt in beschränktem Masse ein zweckmässig aufgebauter Stromrichter-Transformator. Die umfangreichen theoretischen und experimentellen Untersuchungen zeigen klar den Einfluss dieser steuerungs- und schaltungstechnischen Massnahmen auf das Stromrichter-Netzverhalten bei verschiedenen Reaktanzen im Gleich- und Netzstromkreis. Sie umfassen alle für die gesamthafte Beurteilung der Rückwirkungen auf Energieversorgungs-, Sicherungs- und Fernmeldeanlagen erforderlichen Kenndaten und eignen sich somit gut als Grundlage zur optimalen Auslegung derartiger Triebfahrzeug-Stromrichter.

Der erste Teil der Untersuchung (Kapitel 3) beruht auf der vereinfachenden Voraussetzung von idealer Gleichstromglättung. Es wird mit relativ einfachen Näherungsformeln gezeigt, dass für den Verlauf der höherfrequenten Oberschwingungen ($n > 11$) in erster Linie die Kommutierungsvorgänge massgebend sind. Weil die Stromwendung bei Vollaussteuerung relativ langsam (bei kleiner Netzspannung) erfolgt, erzeugt der Stromrichter in diesem Betriebspunkt relativ kleine höherfrequente Oberschwingungen. Zudem nehmen hier die Leistungs- und Verschiebungsfaktoren die Höchstwerte an. Das gesamthafte Netzverhalten ist bei Ueberlappungswinkeln von 25° bis 35° am günstigsten. Während bei kleinerer Ueberlappung (d. h. bei kleinerer Netzinduktivität) die höherfrequenten Oberschwingungen stark ansteigen, fallen bei grösseren Ueberlappungswinkeln die Leistungs- und Verschiebungsfaktoren erheblich ab. Bei Teilaussteuerung ist das Netzverhalten der elementaren Brückenschaltung in jeder Beziehung bedeutend schlechter. Das Unterteilen des Stromrichters in 4 oder 8 Stufen bewirkt eine weitgehende Annäherung an das relativ günstige Verhalten nichtsteuerbarer Gleichrichter. Ein wirksamer Abbau der höherfrequenten Oberschwingungen kommt dabei jedoch nur zustande, falls die Stromwendung im Phasenanschnitt verlangsamt wird. Es lässt sich mit Zusatz-Kommutierungs-drosseln erreichen, dass bereits die 4-stufige Schaltung im ganzen

Aussteuerbereich nicht wesentlich grössere höherfrequente Oberschwingungen erzeugt als bei Vollaussteuerung. Dieser Abbau wird vor allem durch die psophometrische Bewertung für $16 \frac{2}{3}$ Hz -Grundfrequenz erfasst. Im 50 Hz -Betrieb ist die Auswirkung auf den Störstrom weniger ausgeprägt.

Der zweite Teil der theoretischen Untersuchungen (Kapitel 4) zeigt anhand einer grossen Zahl von maschinellen Berechnungen, wie sich das Verkleinern der Glättungsinduktivität im Gleichstromkreis auf den Verlauf von Gleich- und Netzstrom auswirkt. Die zunehmende Gleichstromwelligkeit führt generell zu etwas kleineren Netzstrom-Harmonischen niedrigster Ordnung sowie zu einer fühlbaren Verschlechterung der Leistungs- und Verschiebungsfaktoren. Die höherfrequenten Netzstrom-Harmonischen des vollausgesteuerten Stromrichters werden praktisch nicht beeinflusst. Bei der elementaren Brückenschaltung verkleinert sich im Steuerwinkelbereich $\alpha \approx 50^\circ \dots 100^\circ$ die Netzstrom-Stufenhöhe im Phasenanschnitt. Dies äussert sich in einem Abbau der höherfrequenten Oberschwingungen sowie der Störströme. Die Gleichstromwelligkeit nimmt in diesem Aussteuerbereich erheblich höhere Werte an als bei Vollaussteuerung. Im Netzstrom von mehrfach unterteilten Stromrichtern wird die Phasenanschnitt-Stufenhöhe durch die zunehmende Gleichstromwelligkeit nicht wesentlich reduziert. Hier hängen deshalb die maximalen, beim Durchsteuern der höchsten Spannungsstufe auftretenden höherfrequenten Netzstrom-Oberschwingungen und Störströme in viel geringerem Mass von der Glättungsreaktanz ab als von den Kommutierungsreaktanzen und der Stromrichter-stufung. Bei Teilaussteuerung verkleinert sich die Gleichstromwelligkeit mit zunehmender Stufenzahl.

Die Ergebnisse der Messungen an der BLS Thyristorlokomotive Re 4/4 Nr. 161 stimmen gut mit diesen Berechnungen überein. Sie bestätigen insbesondere, dass sich der Störstrom durch eine relativ kleine und leichte Zusatz-Kommutierungsdrossel wesentlich reduzieren lässt. Mit dieser Massnahme verhält sich die Thyristorlokomotive bereits in der 4-stufigen Schaltung nicht wesentlich ungünstiger als die Diodenlokomotiven vom Typ Re 4/4 der gleichen Bahnverwaltung. Die 8-stufig geschaltete Thyristorlokomotive ergibt sogar praktisch im ganzen Aussteuerbereich günstigere Leistungsfaktorwerte.

SUMMARY

With a view to reducing the disturbance caused by rectifier-fed traction vehicles employing the principle of varying the firing angle, this paper deals with the repercussions on the network of multiple rectifier bridge connections with phase-angle control. In particular it takes into consideration four and eight-stage circuits which can be obtained relatively simply with a reduced number of valves. With such converters the reversal of the current by varying the firing angle can be retarded by using an additional, special comreactor which does not give rise to any additional voltage drops or losses at full output. The same effect is achieved, but to a restricted extent, by using an expediently designed converter transformer. The exhaustive theoretical and experimental investigations carried out clearly show the influence of these measures taken in the control and circuitry on the relationships between converter and network with different reactances in the d. c. and a. c. circuits. They include all characteristic data needed for an overall assessment of the repercussions on the power supply, signalling and telecommunication systems and are thus an excellent basis for the optimum design of such converters for traction vehicles.

The first part of the investigation (dealt with in chapter 3) is based on the assumption that the direct current is ideally smoothed. With relatively simple approximation formulae it is demonstrated that commutation phenomena are mainly responsible for the shape of the harmonics of higher order ($n < 11$). Since current reversal takes place relatively slowly at full output (at low mains voltage), the converter produces quite a small proportion of higher-order harmonics at this point. In addition to this, the power factor and displacement factor reach their maxima here. The overall effect on the network is least at overlap angles between 25° and 35° . Whereas at small overlap (i. e. with a low mains inductance) the higher-order harmonics increase considerably, the power factor and displacement factor drop severely at larger angles of overlap. When operating below full output the repercussions on the network of the elementary bridge connection are in every respect worse. Breaking the converter down into 4 or 8 stages results in a marked approximation to the relatively favourable behaviour of the uncontrolled rectifier. An effective reduction of the higher-order harmonics, however, is only achieved if the current reversal is retarded at the firing point. With additional comreactors it is possible to ensure that the proportion of higher-order harmonics produced by a four-stage connection is no greater over the entire range than at full output.

This reduction is primarily determined by the psophometric weighting of the basic frequency of $16 \frac{2}{3}$ Hz. When operating at 50 Hz the effect on the disturbance current is less pronounced.

The second part of the theoretical investigation (chapter 4) refers to a large amount of computed data to illustrate the effect of reducing the smoothing inductance in the d. c. circuit on the shape of the d. c. and a. c. currents. The increasing ripple in the d. c. generally results in somewhat less mains harmonics of low order, as well as a marked deterioration of the power factor and displacement factor. The higher-order mains harmonics of the converter at full output are hardly affected at all. With the elementary bridge connection, at firing angles between about 50 and 100° , the height of the mains current step diminishes at the firing point. This is reflected in a reduction in the higher-order harmonics and in the disturbing currents. In this range the ripple in the direct current increases much more than at full output. In the mains current of converters divided into four or eight stages the height of the current step at the firing point is not notably reduced. Therefore the maximum higher-order mains harmonics when passing through the uppermost voltage stage, as well as the disturbance current, are far less dependent on the smoothing reactance than on the commutating reactance and the graduation of the converter. At lower outputs the d. c. ripple diminishes with increasing number of stages.

The results of measurements on the BLS thyristor locomotive class Re 4/4 (No. 161) agree quite well with these calculations. They confirm, in particular, that the disturbing current can be reduced quite appreciably by using an additional comreactor which is relatively small and light. By this means the thyristor locomotive with a four-stage connection is already not noticeably worse than the Re 4/4 locomotive of the same railway company, that is equipped with diodes. The eight-stage thyristor locomotive yields even better power factors throughout almost the entire range of outputs.