

Versetzte Taktung von zwei Wechselrichtern zur Speisung einer Induktionsmaschine mit offener Wicklung

Doctoral Thesis

Author(s):

Guggenbach, Peter

Publication date:

1997

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001784408>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH ex. B

Diss. ETH Nr. 12104

**VERSETZTE TAKTUNG VON ZWEI WECHSELRICHTERN
ZUR SPEISUNG EINER
INDUKTIONSMASCHINE MIT OFFENER WICKLUNG**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH**

vorgelegt von

Peter Guggenbach

Dipl. El.-Ing. ETH/HTL
geboren am 12. Oktober 1962
von Zürich



Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. H. Stemmler, Referent
Prof. Dr. A. Steimel, Korreferent

1997

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der versetzten Taktung von zwei spannungseinprägenden Wechselrichtern zur drehzahlvariablen Speisung einer Hochleistungs-Drehfeldmaschine mit offener Wicklung.

Ein einführender Vergleich der verschiedenen, stromrichter-gespeisten Antriebe gibt einen Überblick über die bestehenden Antriebskonzepte. Daraus folgt, dass sich der 2-Punkt-Hochleistungs-Wechselrichter mit Spannungseinprägung sehr vielseitig einsetzen lässt, aber wegen der hohen Schaltverluste der Leistungshalbleiter und speziell wegen der frequenzproportionalen Beschaltungsverluste die Schaltfrequenz begrenzt ist. Das bedeutet grosse Strom- und Drehmoment-Oberschwingungen und damit einen schlechten Wirkungsgrad, zudem ist die maximale Drehzahl limitiert. Hier zeigt das Antriebskonzept mit offener Wicklung besonders günstige Voraussetzungen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und zur Erhöhung des Drehzahlbereichs: Mit zwei bestehenden Wechselrichtern sind neben der Verdoppelung der Antriebsleistung ausserordentlich hohe Drehzahlen mit konstantem Feld, bei kleinen Stromoverschwingungen trotz tiefer Schaltfrequenzen möglich. Dabei spielt das Prinzip zur Ansteuerung der Wechselrichter, die versetzte Taktung, eine zentrale Rolle. Mögliche Anwendungen sind Antriebe für Turbo-Kompressoren mit Drehzahlen bis $20'000 \text{ U/min}$, oder auch Pumpen, Lüfter, Gebläse und Kompressoren, bei denen neben der hohen Drehzahl auch speziell die Erhöhung der Antriebsleistung interessant ist.

Die Grundlage der Arbeit bildet die Darlegung der Funktion der Wechselrichter in verschiedenen Antriebskonfigurationen. Zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens des allgemein bekannten 3-Punkt-Gleichspannungs-Wechselrichters wird ein Quellen-Ersatzschaltbild hergeleitet. Durch eine einfache Quellenverschiebung folgt die Erklärung, wie aus dem Ersatzschaltbild eines Wechselrichters mit einer Last in Sternschaltung das Ersatzschaltbild von zwei Wechselrichtern an einer Last mit offener Wicklung entsteht. Dabei lassen sich die Ausgangsspannungen der Wechselrichter als Überlagerung einzelner Quellen-Spannungen (Teil-Spannungen) interpretieren, die mit versetzter Taktung angesteuert werden.

Die Betrachtungen zum Verhalten der Induktionsmaschine am Wechselrichter lieferten die formalen Beziehungen zur Berechnung und Beurteilung des Oberschwingungsverhaltens. Damit wurde es möglich, Steuerverfahren zu erarbeiten, die für zwei 2-Punkt oder 3-Punkt-Wechselrichter an einer Induktionsmaschine mit offener Wicklung ausgezeichnete Leistungswerte ergeben.

Für den unteren Drehzahlbereich wird ein modifiziertes Unterschwingungsverfahren mit versetzten, sägezahnförmigen Trägersignalen verwendet. Im oberen Drehzahlbereich kommt versetzte Grundfrequenztaktung oder Mehr-

fachtaktung zum Einsatz. Die Ausgangsspannungen der Wechselrichter, welche als zusammengesetzte Teil-Spannungen interpretiert werden, sind durch gegeneinander versetzte Steuersignale bestimmt. In zahlreichen formalen Betrachtungen und mathematischen Gleichungen wird gezeigt, wie die Steuersignale zur optimalen Ansteuerung zu erzeugen sind.

Spezielle Aufmerksamkeit gilt der Aufteilung der Wirkleistung auf die beiden Wechselrichter. Anhand der Grundschwingung der Steuersignale lässt sich anschaulich nachvollziehen, dass bei Grundfrequenztaktung wie auch bei Mehrfachtaktung eine gleichmässige Leistungsaufteilung mit den vorgeschlagenen Modulationsverfahren über einen weiten Drehzahlbereich vorerst nicht möglich ist. Das Problem lässt sich durch wechselnde Zuteilung der Pulsmuster lösen, es wird der Begriff Pulsmusterzuteilungswechsel eingeführt. Die Zuteilung der Pulsmuster erfolgt durch eine Zuteilungsfunktion, die zur gleichmässigen Aufteilung der Leistung die Pulsmuster den beiden Wechselrichtern entsprechend zuordnet. Das Prinzip der Pulsmusterzuteilungswechsel ist eine zuverlässige, einfach anzuwendende Methode, welche ausführlich dargelegt und durch einen mathematischen Beweis untermauert wird.

Im Unterschwingungsverfahren mit sägezahnförmigen Trägersignalen wird ein Prinzip zur Pulsunterdrückung entwickelt, welches entweder bei gleichbleibenden Strom-Oberschwingungen die Reduktion der Schaltfrequenz um 33.3% ermöglicht oder bei gleichbleibender Schaltfrequenz zirka $1/3$ kleinere Strom-Oberschwingungen ergibt. Die Korrekturen des Unterschwingungsverfahrens erfolgen durch eine Unterdrückungsfunktion, welche sich nach einfachen Kriterien berechnen lässt und die in einem digitalen Rechner auch einfach zu implementieren ist.

Die Herleitungen aller wichtigen System-Komponenten haben es ermöglicht, eine vergleichende Bewertung der mit optimalen Modulationsverfahren betriebenen Hochleistungs-Antriebe im Bereich "Normal-Speed Drive" (bis $3'600 \text{ U/min}$), "High-Speed Drive" (bis $7'800 \text{ U/min}$) und "Very High-Speed Drive" (bis $18'000 \text{ U/min}$) durchzuführen. Als Mass zur Bewertung der Steuerungsverfahren wurden die Schaltfrequenz und der Gehalt der Strom-Oberschwingungen benutzt. Zahlreiche Gegenüberstellungen dokumentieren die Leistungswerte der verschiedenen Antriebs-Konfigurationen, illustriert durch Zeitverläufe der Spannungen und Ströme sowie zusätzlich belegt durch Messungen am Laboraufbau.

Die 400 kVA Laboranlage wurde vollständig an der Professur für Leistungselektronik und Messtechnik entwickelt und aufgebaut. Auf einer sehr leistungsfähigen, digitalen Steuereinheit erfolgte einerseits die Implementation verschiedener Regelungen, andererseits konnten mit einem universellen Modulator eine Vielzahl verschiedener Modulationsverfahren ausgetestet werden.

Summary

The objective of this thesis is the staggered switching of two 3-level voltage source inverters to feed a variable speed induction machine with open winding.

An introductory comparison of different converter supplied drives gives an overview of the existing high-power drive concepts. Based on this representation, the 2-level voltage source inverter has a wide field of applications, but due to high switching losses of the power semiconductors and especially due to the high frequency-related losses of the snubber circuits, the switching frequency is limited. This implies high current and torque pulsations and therefore a poor efficiency. Moreover, the maximum speed is limited. The drive concept with open winding shows good presuppositions to extend the power range and the maximum speed. Two conventional voltage source inverters allow doubling of the rated power and very high speed under constant field, despite low current harmonics and low switching frequency. To obtain this, the principle of staggered switching in driving the voltage source inverters plays an important role. Possible applications are drives for turbo-compressors with speeds of up to 20'000 *rpm* or also pumps, fans, blowers and compressors, where beside the high speed, the increase in the rated power is also interesting.

In the first part of the work the functions of the voltage source inverters in different drive configurations are explained. Based on the function of the commonly used 3-level voltage source inverter, an equivalent circuit with voltage sources is derived. A simple displacement of these voltage sources delivers the explanation of how an equivalent circuit on star-connection load is transformed to the equivalent circuit with two inverters supplying a load with open winding. The output voltages of these voltage source inverters can be regarded as the superposition of single source voltages (part-voltages), which are driven by staggered switching.

Consideration of the behaviour of the induction machine fed by a switched voltage source inverter provides the equations to calculate and assess the behaviour of the harmonics. Based on this, driving strategies could be developed to reach a very good performance with two 2-level or two 3-level voltage source inverters supplying an induction machine with open winding.

For the lower speed range, a modified subharmonic oscillation with staggered, saw tooth shaped carrier is used. In the upper speed range stag-

gered fundamental switching or multiple switching is used. The output-voltages, which are interpreted as composed part-voltages, are driven by staggered control signals. Numerous formal investigations and mathematical equations show how optimal control signals can be devised.

Special attention has been paid to the distribution of the active power to both voltage source inverters. By using the fundamental of the control signals it can be shown, that equal distribution of the active power is at first not possible with staggered fundamental switching or multiple switching. The problem can be solved by frequently exchanging the allocation of the pulse patterns; the concept of pulse pattern allocation change has been investigated. The allocation of the pulses is controlled by an allocation control signal, which helps to control the pulse patterns for equal distribution of the power. The principle of pulse pattern allocation change is a reliable and easily usable method, which is explained in detail and proven mathematically.

The principle of pulse suppression has been developed for subharmonic oscillation with a saw tooth shaped carrier. Using this method, the switching frequency can be reduced by 33.3% with unchanged current harmonics, alternatively the current-harmonics can be reduced by approximately 1/3 for the same switching frequency. The corrections of the subharmonic oscillation are made by a suppression control signal, which is easy to calculate and also simple to implement in a digital signal processor.

The derivation of all the important components of a drive system gave the opportunity to compare and assess the different high-power drives in the applications "Normal-Speed Drive" (up to 3'600 rpm), "High-Speed Drive" (up to 7'800 rpm) and "Very High-Speed Drive" (up to 18'000 rpm). To compare the performances of the respective modulation strategies, the switching frequency and the total harmonic distortion of the current harmonics have been considered. Numerous graphical comparisons show the performance of the different drive configurations, illustrated by calculated and measured voltages and currents.

The 400kVA laboratory setup has been fully developed and implemented at the Chair of Power Electronics and Electrometrology. By using very powerful digital control equipment, several different control algorithms have been implemented on a universal modulator and numerous different modulation strategies have been verified.