

Lärmerzeugung in wechselrichter- gespeisten Asynchronmaschinen und Lärmbeeinflussung durch optimierte Pulsmuster

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

vorgelegt von
THOMAS EILINGER
Dipl. El. Ing. ETH
geboren am 19. Dezember 1966
von Waldkirch SG

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. H. Stemmler, Referent
Prof. Dr. J. Holtz, Korreferent

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Lärmerzeugung in wechselrichtergespeisten Asynchronmaschinen und der Lärmbeeinflussung durch optimierte Pulsmuster. Wechselrichter (WR) als geschaltete Systeme erzeugen neben der dreiphasigen Grundschwingung zahlreiche Oberschwingungen, welche in der Maschine zusätzliche Geräusche elektromagnetischen Ursprungs verursachen. Verantwortlich für diesen Lärm sind radiale magnetische Kräfte im Luftspalt der Maschine, welche an der Innenseite des Stators angreifen und diesen in Vibration versetzen. Da die heutigen Wechselrichter für Antriebe im mittleren Leistungsniveau mit Schaltfrequenzen im Bereich der grössten Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs betrieben werden, wird der magnetische Lärm oft als sehr störend empfunden.

Um den Einfluss der Modulation zur Steuerung des Wechselrichters auf den magnetischen Lärm beschreiben zu können, stellt der erste Teil der Arbeit die Lärmentstehung in wechselrichtergespeisten Asynchronmaschinen vor. Dazu werden mit Hilfe des elektromagnetischen Maschinenmodells die allgemeinen Zusammenhänge zwischen den WR-Ausgangsspannungen und der lärmverursachenden magnetischen Druckverteilung im Luftspalt der Maschine hergeleitet. Die eingehenden Diskussionen der magnetischen Druckverteilung zeigen, dass jede einzelne Oberschwingungskomponente der WR-Ausgangsspannungen zwei dominante Druckverteilungen mit einer pulsierenden, kreisförmigen und einer rotierenden, sternförmigen Wellenform entlang dem Luftspaltumfang erzeugt, welche jeweils eine unterschiedliche Wirkung auf den magnetischen Lärm ausüben.

Zur quantitativen Beschreibung des Lärms stellt sich die Frage nach der Wahl der geeigneten akustischen Messgrösse. Antriebssysteme werden in Räumen aufgestellt, welche die verschiedenartigsten akustischen Eigenschaften haben können und oft noch weitere Lärmquellen enthalten. Es ist deshalb sinnvoll, als Messgrösse die mit dem Intensitätsverfahren ermittelte, A-bewertete Schalleistung zu wählen, da diese praktisch unabhängig von den räumlichen Gegebenheiten reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Die zahlreichen formalen Betrachtungen zwischen der magnetischen Druckverteilung und dem Vibrationsverhalten der Maschine bis hin zur spektralen Schalleistung zeigen, wie anhand von Linearitätsüberlegungen ein direkter Zusammenhang zwischen der magnetischen Druckverteilung und der spektralen Schalleistung hergeleitet werden kann. Diese direkte Beziehung wird durch zahlreiche Experimente verifiziert. Eine einfache Messmethode stellt die Bestimmung der Übertragungscharakteristik vor,

welche sowohl die mechanischen als auch die akustischen Eigenschaften der Maschinenbaureihe berücksichtigt.

Mit den erarbeiteten Kenntnissen wird es möglich, ausgehend von den WR-Ausgangsspannungen über die analytisch berechenbare magnetische Druckverteilung mit Hilfe der einmalig messtechnisch bestimmten Übertragungscharakteristik, die spektrale und totale Schalleistung für verschiedene Modulationsarten unabhängig vom Betriebszustand der Maschine auf dem Rechner zu bestimmen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird gezeigt, wie der magnetische Lärm durch die Modulationsart stark beeinflusst werden kann. So erzeugt das konventionelle Unterschwingungsverfahren mit konstanter Schaltfrequenz infolge der einzelnen, dominanten Schaltharmonischen unangenehme Pfeiftöne. Das Ziel der Taktfrequenzmodulation besteht in der gleichmässigen Verteilung der Lärmkomponenten über den Frequenzbereich, um ein dem Rauschen ähnliches und angenehmeres Geräusch zu erzeugen. Hierbei hat die sinusförmige Variation der Schaltfrequenz den Vorteil, dass die Spektren der WR-Ausgangsspannungen und der magnetischen Druckverteilung analytisch berechenbar sind. Dazu wird eine Berechnungsmethode vorgestellt, die sich auch auf andere periodische Modulationsfunktionen (z.B. dreieck-, rechteck-, trapezförmige Variation der Taktfrequenz) erweitern lässt. Die erarbeiteten Resultate erlauben zusammen mit der einmalig bestimmten Übertragungscharakteristik die Berechnung der spektralen und totalen Schalleistung in Abhängigkeit der Modulationsparameter.

Eingehend untersucht wird der Einfluss der Modulationsparameter auf die gewünschte Auffächerung des Lärmspektrums und die daraus resultierende spektrale und totale Schalleistung. Es werden mehrere Methoden zur Einstellung der Modulationsparameter vorgeschlagen, welche zum Ziel haben, die Lärmfrequenzen äquidistant zu verteilen, um ein dem Rauschen ähnliches Geräusch zu erzeugen.

Zudem wird gezeigt, wie –unabhängig vom Betriebszustand der Maschine– die Anregung einer akustischen Resonanzstelle bei gleichzeitiger Erfüllung der äquidistanten Frequenzverteilung vermieden werden kann.

Schliesslich wird auch der Einfluss der sinusförmigen Variation der Taktfrequenz auf die Stromverzerrungen (Total Harmonic Distortion und peak to peak Wert) untersucht und mit dem Unterschwingungsverfahren mit konstanter Schaltfrequenz verglichen.

Antriebssysteme werden praktisch ausschliesslich drehzahl geregelt ausgeführt. Aus diesem Grund wird dem Zusammenspiel der lärmoptimierten Modulation mit der Regelung der Asynchronmaschine besondere Beachtung geschenkt.

Summary

The object of this thesis is an analysis of the noise generation in inverter fed induction machines and the effect of optimized PWM patterns on the resulting sound. Due to the fact that inverters are switched systems, they produce beside the necessary fundamental voltage component a lot of harmonic components. These harmonics lead to additional audible noise of electromechanical origin due to radial magnetic forces in the air gap of the machine causing vibrations on its outer surface. Nowadays, speed variable drive systems with medium power levels are operated with switching frequencies just in the range where the human ear has its highest sensitivity. For this reason, the magnetic noise in inverter fed induction machines is often felt as very annoying.

In order to describe the influence of the modulation method on the magnetic noise, the first part of this work presents the noise generation of inverter fed induction machines. Based on the electromagnetic machine model, the general relations between the inverter output voltages and the radial magnetic force density, causing the noise, are derived. The detailed discussions of the magnetic force density show, that each harmonic component of the inverter output voltages generates two dominant force densities with a pulsating circular and a rotating star-shaped waveform along the circumference of the air gap, having different effects on the magnetic noise.

Concerning the quantitative representation of the magnetic noise, the important question arises for the appropriate acoustic measured variable. Drive systems are built up in rooms with different kinds of acoustical characteristics and often in presence of additional sources of noise. Therefore it is useful to select the A-weighted sound power determined by sound intensity, which yields reproducible results nearly independent of the spatial circumstances.

The numerous formal investigations between the magnetic force density and the vibration behaviour of the machine up to the spectral and total sound power show, how a direct relation between the magnetic force density and the spectral sound power can be derived using linear approaches. This direct relationship is verified by several experiments. A simple measuring method is presented for the determination of a unique transfer function, which includes the mechanical as well as the acoustical characteristics of a given family of machines.

Applying the acquired knowledge, it is possible to calculate, based upon the inverter output voltages, the magnetic force density and to determine the spectral and total sound power using the afore mentioned measured transfer

characteristic. This can be realized for different kinds of modulation methods and all operating points of the machine.

In the second part of the work it is shown, how the magnetic noise can be influenced by the modulation method. The conventional sinusoidal Pulse Width Modulation (PWM) generates harmonics with dominant amplitudes at a few single frequencies, producing an especially unpleasant sound. The aim of the switching frequency modulation is to spread the noise components more evenly over the whole frequency range, thus generating a broad band (“white”) noise that sounds more agreeable. The sinusoidal modulation of the switching frequency has furthermore the remarkable advantage that the spectrum of the inverter output voltages and therefore the resulting spectrum of the magnetic force density are exactly calculable. For that purpose, a calculation method is presented, that can also be used for other periodical modulation functions (e.g. triangular, rectangular or trapezoidal switching frequency modulation). The acquired results allow, together with the mentioned measured transfer characteristic, the determination of the spectral and total sound power in dependence on the modulation parameters. The detailed investigations show the influence of the modulation parameters on the desired spreading of the noise spectrum and the resulting spectral and total sound power. Several methods for the settings of the modulation parameters are proposed for an equidistant distribution of the noise frequencies, thus generating a sound that is similar to a broad band noise and therefore more agreeable.

In addition it is shown, that –independently of the operating point of the machine– the excitation of an acoustical resonance can be avoided though the frequency spectrum remains equidistantly distributed.

Finally, the influence of the sinusoidal modulation on the switching frequency to the stator current distortion (total harmonic distortion and peak-to-peak) is investigated and compared to the sinusoidal pulse width modulation with constant switching frequency.

Drive systems are normally operated with torque and speed control. For this reason, a special attention is paid to the interaction between the noise optimized modulation method and the control of the induction machine.