

Diss. ETH Nr. 9219

Analyse einer sechssträngigen, stromrichtergespeisten Synchronmaschine

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels
Doktor der Technischen Wissenschaften
der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

HERMANN BISSIG

Dipl. El.-Ing. ETH
geboren am 12. Dezember 1960
von Altdorf, Uri

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. K. Reichert, Referent
Prof. Dr. H. Glavitsch, Korreferent



Zürich 1990

20.11.90

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer I-Umrichter gespeisten, drehzahlvariabel betriebenen, sechssträngigen Synchronmaschine mit Masivläufer und vollständiger Dämpferwicklung. Zuerst werden die Systemgleichungen der sechssträngigen Synchronmaschine hergeleitet. In einem nächsten Schritt wird die Simulationstechnik zur numerischen Lösung der Systemgleichungen erarbeitet. Danach liefern Stillstandsfrequenzgangmessungen oder die charakteristischen Maschinengrößen (die Zeitkonstanten und charakteristischen Induktivitäten) die Parameter der Systemgleichungen, damit zum Schluss die berechneten Strom- und Spannungsverläufe mit den an einer 3,85MVA-Maschine gemessenen Verläufen verglichen werden können.

Das Modell der Maschine wird ins sogenannte „Statormodell“ und „Rotormodell“ unterteilt. Das Statormodell betrachtet die Maschine als achtpuliges Gebilde. Sechs Spulen bilden die Statorwicklungen, die restlichen zwei den Rotor. Speziell betrachtet wird die induktive Streukopplung der sechs Statorstränge. Sie kommt beispielsweise dadurch zustande, dass in einer Nut zwei Stäbe liegen, die zu unterschiedlichen Strängen gehören. Die zugehörigen Nutstrekoppelinduktivitäten werden für Zweischichtganz- und Zweischichtbruchlochwicklungen aus den Geometriedaten berechnet. Die sechs Statorwicklungsgrößen werden auf ein rotierendes Koordinatensystem transformiert (dq0-Transformation). Dabei zeigt sich, dass es sinnvoller ist, nicht von der sechssträngigen, sondern von der 2×3 -strängigen Synchronmaschine zu sprechen, weil es sich um zwei um $30^{\circ}_{el.}$ versetzte dreisträngige Statorwicklungssysteme handelt. Die Statorwicklungsgrößen werden dann getrennt für jedes System einer dreidimensionalen Transformation unterzogen. Die zwei Rotorwicklungen des Statormodells sind ideale, zueinander orthogonal stehende Wicklungen. Das Rotormodell beschreibt dann die Netzwerke, mit denen diese zwei Wicklungen beschaltet werden müssen, um das Verhalten des Originalrotors, bestehend aus Dämpferwicklung, Erregerwicklung und Rotoreisen, wiederzugeben. Neue Strukturen für die Ersatzschaltungen kommen zur Anwendung.

Das gesamte System wird mit dem „Differenzenleitwertverfahren“, einer Kombination aus Trapezintegration und Knotenadmittanzverfahren, simuliert. Die in dq0-Koordinaten modellierte Maschine wird über die dq0-Transformation mit den in RST-Koordinaten (statorfesten Koordinaten) modellierten Stromrichtern gekoppelt. Dieses Vorgehen erlaubt es, eine einzige, allerdings rotordrehwinkelabhängige, Knotenadmittanzmatrix für das Gesamtsystem aufzustellen. Das Erfassen der Schaltvorgänge in den Thyristoren zwischen zwei Zeitpunkten erfolgt durch iteratives Annähern an den Schaltzeitpunkt mit verkleinerten Zeitschrittweiten. Zur Berechnung der nicht stetigen Systemgrößen unmittelbar nach dem Schalten wird ein neues Verfahren vorgestellt: Eine iterative Korrektur der Ersatzstromquellen liefert via Knotenadmittanzmatrix die unmittelbar nach dem Schalten gültige Potential- und Stromverteilung im System.

Alle Parameter des Stator- und Rotormodells werden aus Stillstandsfrequenzgangmessungen im Bereich von 0,01Hz ... 1kHz bestimmt. Zur möglichst genauen Identifikation des Rotormodells wurden Messwicklungen auf dem Rotor der Prüfmaschine aufgebracht. Zudem müssen neben den üblichen Übertragungsfunktionen neue Größen, die sogenannten „Koppellinduktivitäten der zwei Statorsysteme“, eingeführt werden, um einen ausreichenden Satz an Übertragungsfunktionen zu erhalten.

Im letzten Kapitel werden die gemessenen Strom- und Spannungsverläufe der umrichter gespeisten Versuchsmaschine mit den simulierten verglichen. Es ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Verlustberechnungen zeigen, dass die durch den Stromrichterbetrieb verursachten Rotorzusatzverluste – das sind vorwiegend die Verluste in den Dämpferstäben und im Rotoreisen – wesentlich kleiner als die Erreger- oder Statorkupferverluste sind. Für die Simulation des Klemmenverhaltens der Maschine im stationären Betrieb spielt die Rotormodellierung jedoch eine untergeordnete Rolle. Die Frequenzgangmessungen zeigen bereits, dass bei einem Vielfachen der Statorgrundfrequenz die Rotorimpedanzen gegenüber den durch die Statorstreuinduktivitäten gebildeten Reaktanzen praktisch vernachlässigbar sind. Das Modell muss lediglich für das Grund- und Hochfrequenzverhalten ausgelegt sein. Vergleichende Simulationen mit einfachen Rotorersatzschaltungen bestätigen diese Aussage.

Abstract

The presented work analyses a current source converter fed six phase synchronous machine with solid iron rotor and complete damper winding for variable speed drives. First the system equations for the six phase machine are derived. Next the technique for the numerical solution of the system equations is worked out. In the following chapter standstill frequency response tests yield to the parameters of the machine model, in order to compare the simulated results with the measured currents and voltages of the 3,85MVA test machine.

The system equations are divided into the so called "stator model" and "rotor model". The stator model is a machine of eight coils: Six coils represent the stator windings, two the rotor. The armature leakage inductances are considered in detail because e.g. slot leakage cause an additional coupling between the armature windings. These mutual leakage inductances caused by the slot leakage fields are calculated for double layer windings with a whole and a broken number of slots per pole and phase. The six armature winding quantities are transformed into a coordinate system, related to the rotor (dq0-transformation). Now it is useful to consider the six phase machine as 2×3 -phase machine, because it consists of two symmetrical three phase armature systems, electrically displaced by 30° . The stator coil quantities of each system are transformed separately by a three dimensional matrix. The two rotor coils of the stator model are ideal, electrically displaced by 90° . The rotor model then describes the equivalent circuits, which have to be connected with the two ideal rotor coils, in order to achieve the same rotor behaviour as the original rotor, consisting of damper bars, field winding and rotor iron. New structures for the equivalent circuits are presented.

The whole system is simulated with the "Differenzenleitwertverfahren", a combination of trapezoidal integration and nodal admittance matrix method. With so called "dq0-transformers" the machine, modelled in dq0-coordinates, is coupled with the converters. In this way we get exactly one nodal admittance matrix, yet with elements, depending on the rotor

position angle. In order to find the exact switching point of the thyristors, the time step is reduced iteratively in the switching interval. There is also presented a new method for calculating the non continuous quantities in the system just after a discontinuity: In an iterative process the current sources of the subsystems are corrected until the unknown node voltages, calculated by the nodal admittance matrix, are found.

All parameters of the stator and rotor model are determined by standstill frequency response tests in the range of 0,01Hz ... 1kHz. To identify the rotor model as exactly as possible, two measuring coils have been installed on the rotor surface of the test machine. Beside of the usual transfer functions new quantities, the so called "coupling inductances of the two armature systems" must be introduced to get a complete set of transfer functions.

The last chapter compares the measured voltages and currents of the test machine with the calculated curves. They correspond very well. The calculation of the losses in the machine shows, that the damper winding and rotor iron losses, caused by the converter feeding, are much smaller than the losses in the armature windings or the field winding. But for the simulation of the terminal behaviour of the machine at steady state operation, rotor modeling is not very important, because at a multiple of the stator frequency the rotor impedances are much smaller than the armature leakage reactances. It is sufficient, when the model represents the machine correctly for the fundamental frequency and for very high frequencies. Simulations using equivalent rotor circuits with only one damper branch in each axis confirm this.