

Ein Beitrag zur Berechnung der Kräfte im Wickelkopfbereich grosser Synchronmaschinen

Doctoral Thesis

Author(s):

Frei-Spreiter, Barbara

Publication date:

1998

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001948382>

Rights / license:

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

**Ein Beitrag zur Berechnung
der Kräfte im Wickelkopfbereich
grosser Synchronmaschinen**

ABHANDLUNG

Zur Erlangung des Titels

DOKTORIN DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

BARBARA FREI-SPREITER

dipl. Masch.-Ing. ETH

geboren am 18. April 1970

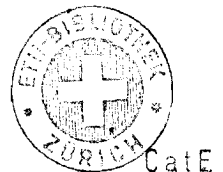
von Sevelen (SG) und Luthern (LU)

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. Ing. habil. K. Reichert, Referent

Prof. Dr. Ing. J. Hugel, Korreferent

1998



Zusammenfassung

Bei der Entwicklung der mechanischen Konstruktion im Wickelkopfbereich grosser Synchronmaschinen müssen für eine eingehende Spannungsanalyse die an den Statorwicklungen angreifenden Stromkräfte bekannt sein. Dabei spielen die im Nennbetrieb auftretenden Kräfte für die Ermüdungsbetrachtungen eine Rolle, wogegen die in transienten Vorgängen (Stosskurzschluss, Fehlsynchronisation) auftretenden Spitzenkräfte für die maximal zulässigen Beanspruchungen wichtig sind. Dazu benötigt man den Verlauf des Stirnraumfeldes in den Statorspulen. Diese Berechnung ist nicht ganz einfach, da der Endbereich des Turbogenerators sowohl geometrisch wie auch elektromagnetisch kompliziert aufgebaut ist. Grundsätzlich existieren zwei verschiedene Methoden zur Bestimmung des Stirnraumfeldes: die *Quasi-3D-Methode* und die *Integralmethode*.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Berechnung von Stromkräften nach der Integralmethode. Dabei wird der endliche Querschnitt der Statorstäbe und die Magnetisierung der Läuferwelle in die Modellierung des Endbereichs miteinbezogen. Es gelten dabei die folgenden Einschränkungen:

- Die Ströme sind bekannt
- Die Wirbelströme werden vernachlässigt
- Keine Dämpferströme im transienten Betriebsfall

Die Arbeit ist in 3 Teile gegliedert:

Der erste Teil beschreibt die Methoden zur Berechnung der Stromkräfte. Um auch den Einfluss der ferromagnetischen Materialien in der Feldrechnung berücksichtigen zu können, wird die magnetische Feldstärke in einen von den stromführenden Leitern verursachten Vektor \mathbf{H}_C und in einen von den magnetischen Materialien induzierten Vektor \mathbf{H}_M aufgeteilt. Während \mathbf{H}_C relativ einfach aus dem Biot-Savart Integral bestimmt werden kann, bedarf es bei \mathbf{H}_M der Verwendung einer sogenannten Summationsmethode, welche auf der Integralgleichung der Magnetisierung basiert und die Diskretisierung

des Materialgebietes verlangt. Sie führt auf ein grosses Gleichungssystem, das sowohl von \mathbf{H}_C wie auch von der magnetischen Suszeptibilität der Materialien abhängt. Es muss bei einer nichtlinearen $B(H)$ -Kurve iterativ gelöst werden.

Mit dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen verteilen sich die Kräfte, ermittelt aus dem Kreuzprodukt der Stromdichte und der magnetischen Induktion, in die Knotenpunkte des Wickelkopfmodelles. Alle Integrationen werden mit der Gauss-Legendre-Quadratur numerisch gelöst.

Im zweiten Teil wird das elektromagnetische Modell des Endbereichs aufgebaut. Die Spulen der Statorwicklungen werden mit Hexaedern modelliert, was eine günstige Anbindung an das mechanische Finite Element Modell erlaubt. Die magnetische Läuferwelle wird in sektorförmige Elemente diskretisiert mit der Annahme, dass die Magnetisierung innerhalb eines solchen Elementes konstant sei. Als Randbedingung werden die stromführenden Leiter an der Endplatte, welche den Endbereich gegenüber dem Statorblechpaket abgrenzt, gespiegelt. Das Modell berücksichtigt die räumlichen Oberwellen des Statorfeldes sowohl im transienten wie im stationären Betriebsfall, während für das Läuferfeld im letzten Fall nur die Grundwelle miteinbezogen wird.

Modellanordnungen, die mit einer elektromagnetischen 2D-FEM-Applikation nachgerechnet wurden, verifizierten die Genauigkeit der vorgeschlagenen Methode zur Bestimmung des Stirnraumfeldes. Des weiteren wurde festgestellt, dass der feldverstärkende Einfluss der Läuferwelle weniger von der Permeabilität als von den geometrischen Abmessungen der Welle abhängt.

Das Modell und die Methode wurden in einer Computer-Applikation implementiert. Eingesetzt als praktisches Werkzeug in der Entwicklung erlaubt sie die schnelle und effiziente Simulation der Kräfte in allen Knotenpunkten der Ständerwicklung für beliebige Betriebspunkte.

Mit der neuen Methode wurden die Wickelkopfbeanspruchungen eines luftgekühlten Turbogenerators berechnet. Die Kräfteverteilung wurde für den stationären und den transienten (3-phasiger Stosskurzschluss) Zustand ermittelt. Im dritten Teil werden diese Resultate dargestellt und diskutiert. Die Untersuchungen zeigten, dass die magnetische Läuferwelle die Kräfte um 20 – 25% vergrössert. Die Torsionsbeanspruchung der einzelnen Stäbe und des gesamten Wickelkopfes sind im transienten Fall zu beachten.

Abstract

At the development of the mechanical construction in the stator end-winding region of large synchronous machines, the forces acting at the stator windings have to be taken into consideration for a detailed stress analysis. In this respect, the forces occurring in steady-state operations are important for fatigue considerations, while the maximum forces occurring in transient processes (sudden short-circuit, fault synchronization) are essential for the maximum stresses allowed. Therefore, it is important to determine the course of the magnetic field in the stator coils. This calculation is not very easy to do as the end-winding region of the turbogenerator is geometrically and electro-magnetically complex. In principle, there are two different methods for solving the magnetic field: the *quasi-3D method* and the *integral method*.

The following thesis deals with the calculation of forces using the integral method. At the modeling of the end-winding section, the finite cross-section of the stator coils and the magnetization of the rotor shaft are included. The following restrictions are valid:

- The currents are known
- The eddy currents are neglected
- No damper currents in the case of transient operation

The thesis is subdivided into 3 parts:

The first part is a description of the methods used to calculate the forces. In order to take the impact of the magnetizable materials into account in the field calculation, the strength of the magnetic field is split up into a vector \mathbf{H}_c , created by the current-carrying conductors, and a vector \mathbf{H}_m , induced by the magnetic materials. While \mathbf{H}_c is relatively simple to solve using Ampère's law, for \mathbf{H}_m the so-called method of Summation has to be used, which is based on the integral equation of magnetization and requires the

discretization of the material area. It leads to a large system of equations that depends on \mathbf{H}_c as well as on the magnetic susceptibility of the materials. With a non-linear $B(H)$ -curve, it has to be solved iteratively. The formulation of Finite Element Characteristics given, the forces, calculated using the vector cross-product of the current density and the magnetic induction, spread to the nodes of the stator end winding model. All integrations are solved numerically using the Gauss-Legendre-Quadratur.

In the second part, the electro-magnetic model of the end-winding region is constructed. The stator coils of the stator windings are modeled using hexahedrons, which allows a favorable correlation with the mechanical Finite Element Model. The magnetic rotor shaft is discretized into sector elements, assuming that the magnetization within such an element is constant. As a boundary condition, the current-carrying conductors are reflected at the clamping plate, that distinguishes between the end-winding region and the active part. The model considers the spatial harmonics of the stator field in the transient as well as in the steady-state calculation, while in the case of the rotor field in the latter case only the fundamental is taking into account. Model arrangements that have been checked using an electro-magnetic 2D-FEM application verified the accuracy of the suggested method for the solution of the magnetic field. Furthermore, it was observed that the increasing impact of the rotor shaft depends to a lesser extent on the permeability than on the geometrical dimension of the shaft. The model and the method were implemented in a computer application. Used as a practical tool in development, it allows the fast and efficient simulation of the forces in all nodes of the stator winding for any operation point.

The application was applied using an air-cooled turbogenerator. The force distribution was calculated under steady-state and transient (3-phase sudden short-circuit) conditions. In the third part, the results are presented and discussed. Tests have shown that the magnetic rotor shaft changes the forces by 20 – 25%. In the transient case, the torsional stress of the different stator coils and of the entire stator end winding have to be taken into consideration.