



Doctoral Thesis

Zusatzverluste in Statorwicklungen grosser Synchronmaschinen unter Berücksichtigung der Verdrillung und der Stirnraumfelder

Author(s):

Iseli, Markus Albrecht

Publication Date:

1991

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000626270> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 9546

**Zusatzverluste in
Statorwicklungen grosser
Synchronmaschinen unter
Berücksichtigung der
Verdrillung und der
Stirnraumfelder**

ABHANDLUNG
Zur Erlangung des Titels

Doktor der technischen Wissenschaft
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
MARKUS ALBRECHT ISELI
dipl. Ing. ETH
geboren am 11. März 1954
von Täuffelen BE

Angenommen auf Antrag von:
Prof. Dr. Ing. habil. K. Reichert, Referent
Prof. Dr. ès sciences G. Neidhöfer, Korreferent

1991

Zusammenfassung

Zusatzverluste in Statorwicklungen grosser Synchronmaschinen unter Berücksichtigung der Verdrillung und der Stirnraumfelder

Die Entstehung von Zusatzverlusten in Statorwicklungen elektrischer Maschinen durch Wirbelströme¹ (skin effect) ist etwa seit der Jahrhundertwende bekannt. Im Roebelstab (benannt nach seinem Erfinder Ludwig Roebel) konnten durch Unterteilung des Stabes und Verdrillung der Teileiter die verlustverursachenden Magnetfelder im Eisenteil der Maschinen kompensiert werden. Später sind weitere Massnahmen vorgeschlagen worden, welche auch die Felder im Stirnraum ganz oder teilweise kompensierten.

Im Hinblick auf die *Optimierung* von elektrischen Maschinen wird es immer wichtiger, detaillierte Modelle zu kennen, um genauere Voraussagen machen zu können über die zu erwartenden Verluste. Die vorliegende Arbeit beschreibt ein neues Modell, welches die Stirnraumfelder der Maschine berücksichtigt sowie den Grad der Verdrillung der Statorstäbe. Damit können die zu erwartenden Schlingströme² und die dadurch auftretenden Zusatzverluste vorausberechnet werden.

¹Wirbelströme sind Stromdichtewirbel, die sich innerhalb eines massiven Leiters schliessen und zum totalen Stromfluss nichts beitragen. Sie fliessen, je nach verursachender Induktion, in beliebiger Richtung

²Schlingströme fliessen durch parallel geschaltete Teileiter in geschlossenen Kreisen und geben keinen Beitrag zum Gesamtstrom des Stabes. Sie fliessen nur in Längsrichtung der Teileiter.

Der in Teilleiter unterteilte Stab wird in diesem Modell als Kettenleiter behandelt. Diese Darstellung erlaubt, auf sehr einfache Weise beliebige Verdrillungswinkel zu berücksichtigen. Auf gleiche Weise werden die Spannungen behandelt, welche im Stirnraum vom Feld in den Teilleitern induziert werden. Die Stromverteilung erhält man dann aus der Lösung des dadurch bestimmten linearen Gleichungssystems.

Die Stirnraumfelder werden bestimmt durch eine 3-dimensionale integrale Methode, wobei als Randbedingung die Endplatte durch gespiegelte Leiter berücksichtigt wird. Die evolventenförmigen Stirnbügel werden mit ihrer genauen Geometrie berücksichtigt, somit auch die räumlichen Oberwellen des Statorfeldes. Die Zeitharmonischen hingegen werden nicht berücksichtigt.

Das Modell ist als interaktives Programm implementiert worden. Anhand einer konkreten Maschine ist der Einfluss folgender Parameter auf die Schlingstromverluste untersucht worden:

- Verdrillungswinkel im Eisen
- Verdrillungswinkel im Stirnraum
- Betriebspunkt

Zusammenfassend wird festgestellt, dass ein höherer Verdrillungsaufwand im allgemeinen eine Verlustreduktion bewirkt, dass aber eine genauere Untersuchung zwecks Aufwandoptimierung durchaus sinnvoll ist, insbesondere bei Sonderverdrillungen, wo eine optimale Kombination von Nut- und Stirnraumverdrillung sehr effektiv sein kann. Dem Einfluss des Betriebspunktes ist ebenfalls Beachtung zu schenken.

Abstract

Stray Losses in Stator Windings of Large Synchronous Machines under Consideration of Transposition and End Region Field

Eddy currents¹ in stator windings of electrical machines and the resulting stray losses are known since the beginning of this century. In the Roebelbar (named according to its inventor Ludwig Roebel), the loss causing magnetic fields in the iron part of the machine could be compensated by dividing the bar into strands and transposing them within the bar. Further solutions have been proposed later on in order to partially or totally compensate the end region field.

In regard to optimization of electrical machine devices the development of accurate models becomes more and more important, in order to predict more precisely the losses to be expected. The present work describes a new model which takes into account the end region field as well as the transposition angle of the stator bars. The circulating currents² can then be calculated as well as the resulting stray losses.

The bar — subdivided into strands — is represented as a series connection of m -ports. This approach allows to consider any arbitrary transposition angle in a very simple way. The same method is applied

¹Eddy currents are curl of current density which flow in a closed loop within a solid conductor and which do not affect the resulting current of the conductor. The direction is arbitrary and depending on the induction.

²Circulating currents flow in parallel strands within closed loops and do not affect the resulting current of the bar. They flow in length direction of the strands.

to treat the voltages induced in the strands by the end region field. The current distribution is finally obtained by the solution of the linear equation system.

The end region field is determined by a 3-dimensional integral method. The boundary condition of the end plate is considered by image conductors. The spatial harmonics of the stator field are considered by using the real geometry of the involute shape of the end windings. The time harmonics are neglected.

The model has been implemented as an interactive computer program. An investigation on a existing sample machine is made upon the influence of the following parameters to the circulating current stray losses:

- transposition angle within the iron part
- transposition angle within the end region
- operating point

In conclusion it is stated, that the manufacturing effort for transpositions is never worthless, but a detailed investigation for optimizing purposes is worthwhile, especially for special transpositions, since an optimal combination of transpositions in the iron part and in the end region can be very effective. The influence of the operating point as well is to be considered.