



Anwendung der Finite Elemente Methode bei Elektrischen Maschinen

Erich Schmidt

Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen Technische Universität Wien Wien, Österreich

Inhalt

- Einleitung
- Analyse einer Transversalflussmaschine
 - Modellierung von Stator-Rotor-Positionen
 - Optimierung des Reluktanzmoments
- Analyse von Wasserkraft-Generatoren
 - Wicklungsausführung und Reaktanzen
 - Wirbelströme in den Stator-Pressteilen
- Zusammenfassung





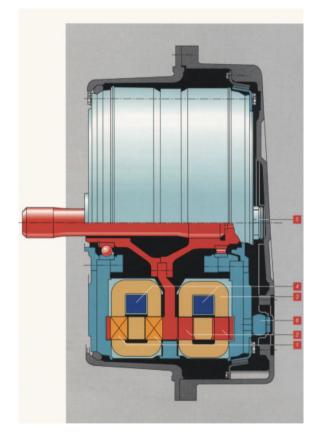
Einleitung

- Im Bereich der elektrischen Maschinen sind Finite Elemente Analysen im normalen Entwurfsverfahren und insbesonders für Design-Review und Design-Optimierung immer mehr etabliert.
- Im Hinblick auf Modellerstellung und Reduzierung des Rechenaufwandes sind dabei spezielle Methoden zur Modellierung der verschiedenen Stator-Rotor-Positionen unverzichtbar.
- Damit werden einfach und rasch Design-Varianten bezüglich Geometrie und Materialeinsatz ermöglicht, sodass bestehende Betriebsmittel optimiert werden und zukünftig öfter auf Prototypen verzichtet werden kann.
- Gemäß diesen Gesichtspunkten werden Anwendungen aus den Bereichen Antriebstechnik und Energieerzeugung vorgestellt.





Analyse einer Transversalflussmaschine



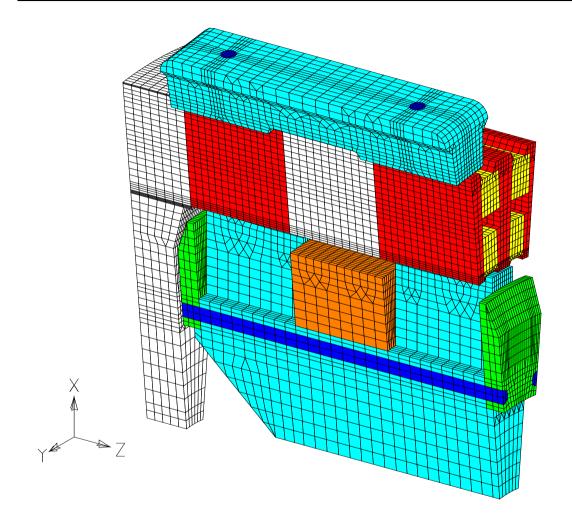
HAUPTDATEN DER
TRANSVERSALFLUSSMASCHINE (VOITH)

| Nennleistung | 150 | kW |
|-------------------------|------|-------|
| Nenndrehmoment | 1800 | Nm |
| Nenndrehzahl | 800 | 1/min |
| Maximaldrehzahl | 2400 | 1/min |
| Anzahl der Pole | 56 | |
| Rotordurchmesser aussen | 380 | mm |
| Rotordurchmesser innen | 290 | mm |
| Rotorpaketlänge | 315 | mm |

Zweisträngige Transversalflussmaschine in vereinfachter Darstellung (VOITH)







Finite Elemente Modell von zwei Polteilungen eines Stranges der zweisträngigen Transversalflussmaschine

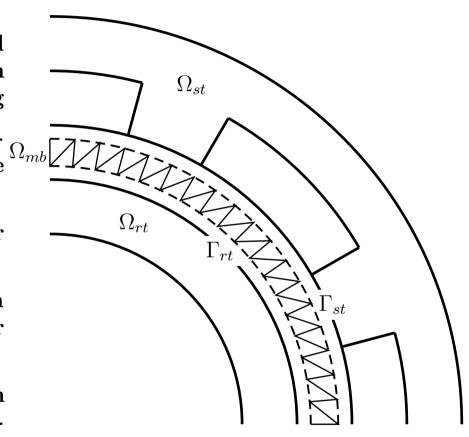
- Rotor-Permanentmagnete
- Rotor-Blechpakete
- Stator-Pulvermagnetjoche
- Stator-Ringwicklung
- Statorpressteile
- Rotorträgerteile





Moving Band Modellierung

- Getrennte Modelle für Stator und Rotor mit einer meist äquidistanten Diskretisierung in Umfangsrichtung
- Kopplung der Stator- und Rotor-Teilmodelle über eine Elementlage im Luftspalt
- Simultane Anwendung periodischer Randbedingungen schwierig
- Neuvernetzung der Elementlage im Luftspalt in Abhängigkeit von der aktuellen Rotorposition
- Ungleiche Qualität der numerischen Ergebnisse für verschiedene Rotorpositionen



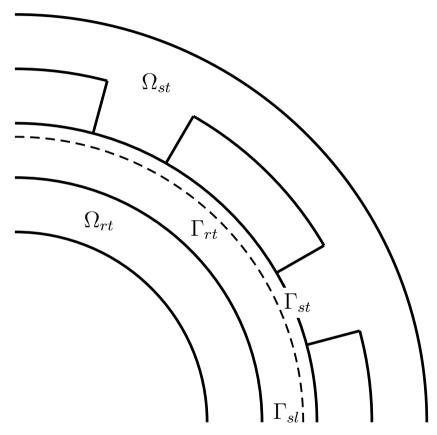
Bereiche bei der Moving Band Modellierung





Sliding Surface Modellierung

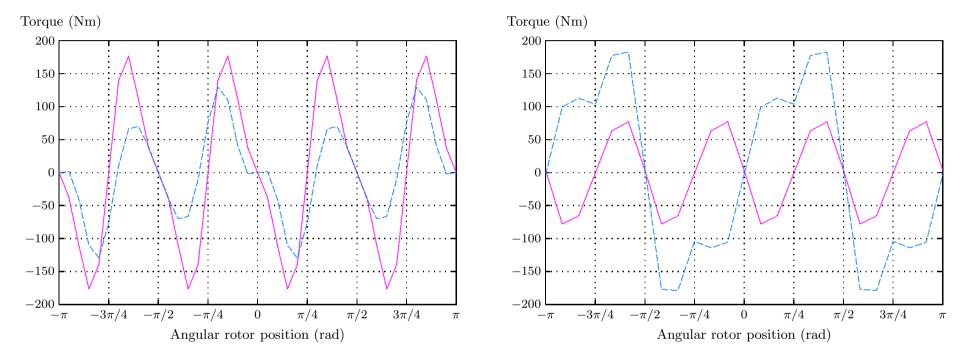
- Getrennte Modelle für Stator und Rotor mit einer meist äquidistanten Diskretisierung in Umfangsrichtung
- Kopplung der Stator- und Rotor-Teilmodelle über Randbedingungen in Abhängigkeit der Rotorposition
- Simultane Anwendung periodischer Randbedingungen möglich
- Invariante Diskretisierung der Teilmodelle ohne einer Neuvernetzung für verschiedene Rotorpositionen
- Identische Qualität der numerischen Ergebnisse für verschiedene Rotorpositionen



Bereiche bei der Sliding Surface Modellierung



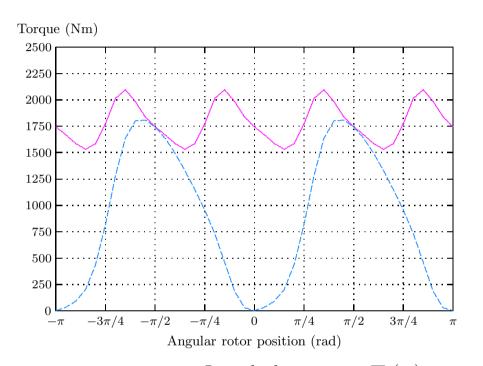


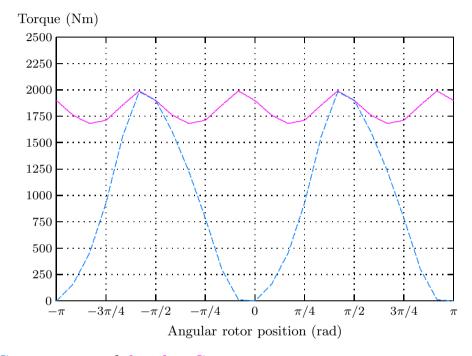


Reluktanzmoment $T_z(\varphi)$ eines Stranges und beider Stränge, symmetrische Rotornuten und geblechte Joche (links), asymmetrische Rotornuten und Pulvermagnetjoche (rechts)







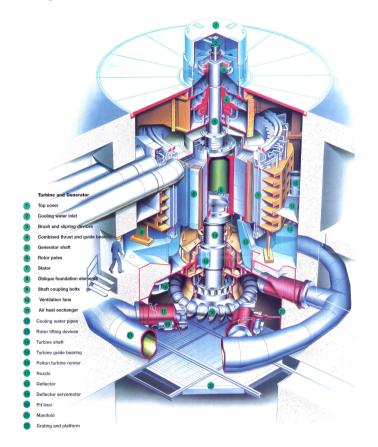


Lastdrehmoment $T_z(\varphi)$ eines Stranges und beider Stränge, Erregung mit $\hat{\Theta}_C = 7.2 \text{ kA}$, $\gamma_i = -\pi/2$, symmetrische Rotornuten und geblechte Joche (links), asymmetrische Rotornuten und Pulvermagnetjoche (rechts)





Analyse von Wasserkraft-Generatoren



Gesamt-Anordnung des Wasserkraft-Generators samt Turbine (ALSTOM)

HAUPTDATEN DES WASSERKRAFT-GENERATORS (ALSTOM)

| Nennscheinleistung | 500 | MVA |
|----------------------------|-------|-------|
| Nennspannung | 21000 | V |
| Nennstrom | 13745 | A |
| Leistungsfaktor | 0.9 | |
| Nennfrequenz | 50 | Hz |
| Nenndrehzahl | 428 | 1/min |
| Maximaldrehzahl | 800 | 1/min |
| Anzahl der Pole | 14 | |
| Anzahl der Statornuten | 138 | |
| Stator-Bohrungsdurchmesser | 5350 | mm |
| Stator-Paketlänge | 2900 | mm |



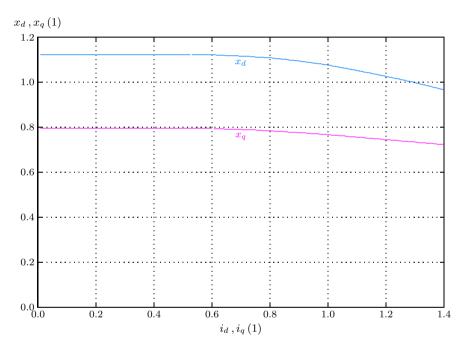


OBERWELLEN IN DER VERTEILUNG DER RADIALKOMPONENTE DER MAGNETISCHEN FLUSSDICHTE MIT VERSCHIEDENEN WICKLUNGSSCHRITTEN DER BRUCHLOCHWICKLUNG IM STATOR, ERREGUNG MIT STATORNENNSTROM

| Erregung | Ordnungszahl | Amplitude | $\frac{W}{\tau_p} = \frac{56}{69}$ | $\frac{W}{\tau_p} = \frac{63}{69}$ | $\frac{W}{\tau_p} = \frac{70}{69}$ |
|----------|--------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | 21/7 | B_{21}/B_7 | 9.83% | 8.92% | 9.45% |
| d-Achse | 35/7 | B_{35}/B_7 | 2.91% | $\boldsymbol{4.69\%}$ | 5.48% |
| | 49/7 | B_{49}/B_7 | 1.75% | 0.37% | 0.91% |
| q-Achse | 21/7 | B_{21}/B_7 | 30.30% | $\boldsymbol{32.17\%}$ | 31.50% |
| | 35/7 | B_{35}/B_7 | 8.57% | $\boldsymbol{4.88\%}$ | 6.10% |
| | 49/7 | B_{49}/B_7 | 5.28% | $\boldsymbol{2.86\%}$ | 3.99% |







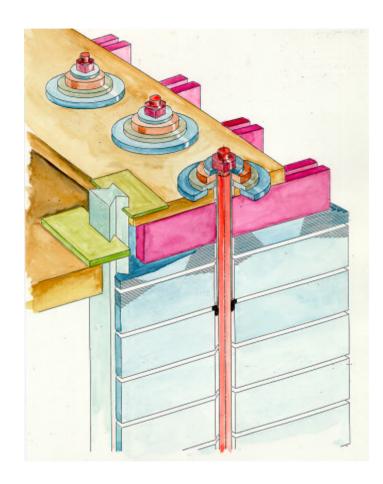
Stationäre Reaktanzen $x_d(i_d), x_q(i_q)$ in Abhängigkeit des Statorstroms i_S

Stationäre Reaktanzen – Vergleich zwischen Rechnung und Messung

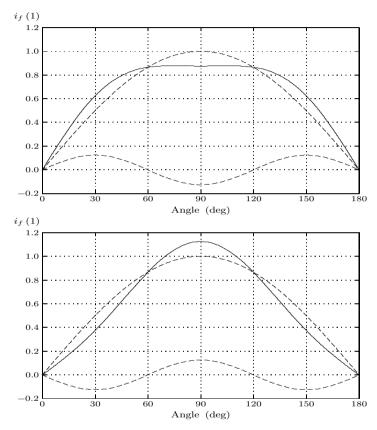
| Reaktanz | | Rechenwert | Messwert |
|----------------------|--------------|------------|----------|
| Streureaktanz | x_{σ} | 0.104 | 0.105 |
| d-Achse, ungesättigt | x_{du} | 1.122 | 1.120 |
| d-Achse, gesättigt | x_{ds} | 1.076 | 1.070 |
| q-Achse, ungesättigt | x_{qu} | 0.795 | 0.800 |
| q-Achse, gesättigt | x_{qs} | 0.767 | 0.780 |







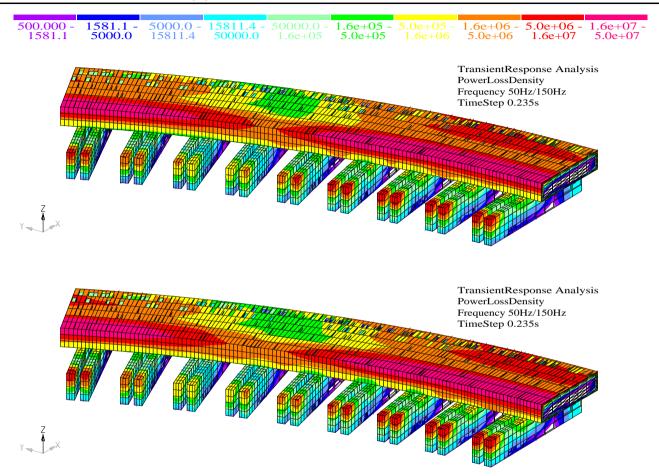
Statorblechpaket und Presskonstruktion mit durchgehenden Spannbolzen (ALSTOM)



Grundwelle und dritte Oberwelle des Stirnraumfeldes entlang einer Polteilung zufolge einer magnetischen Achsigkeit (oben) und einer hohen Sättigung im Stator (unten)







Verlustleistungsdichte im Statorpresssystem bei Leerlauf, Zeitpunkt $t=0.235\,\mathrm{s}$, nichtlinear transiente Analyse, Erregung mit Grundwelle und dritter Oberwelle zufolge magnetischer Achsigkeit (oben) und hoher Stator-Sättigung (unten)





Wirbelstromverluste [W] je Polpaar im Statorpresssystem bei Leerlauf

| | Nichtlinear transiente Analyse | | | | Linear zeit-harmonische Analyse | | | |
|---|--------------------------------|---------|-------------|---------|---------------------------------|---------|-------------|---------|
| | Pressfinger | | Pressplatte | | Pressfinger | | Pressplatte | |
| | minimal | maximal | minimal | maximal | minimal | maximal | minimal | maximal |
| Grundwelle ohne dritter Oberwelle | 813 | 814 | 5534 | 5536 | 821 | 821 | 5337 | 5337 |
| Grundwelle und dritte Oberwelle zufolge einer magnetischen Achsigkeit | 848 | 850 | 5848 | 5854 | 848 | 850 | 6801 | 6809 |
| Grundwelle und dritte Oberwelle zufolge einer hohen Stator-Sättigung | 846 | 847 | 5795 | 5800 | 848 | 850 | 6801 | 6809 |





Zusammenfassung

- Für den routinemäßigen Einsatz der Finite Elemente Methode bei Entwurf und Optimierung von elektrischen Maschinen sind effiziente Methoden für Modellierung und Analyse notwendig.
- In diesem Zusammenhang sind die wichtigsten Methoden einer effizienten Modellierung von Stator-Rotor-Positionen samt den Vor- und Nachteilen vorgestellt worden.
- Die ausgewählten Beispiele zeigen exemplarisch den Einsatz von Finite Elemente Analysen sowohl für Entwurf und Optimierung als auch für die Weiterentwicklung elektrischer Maschinen.
- Die präsentierten Anwendungen dokumentieren auch die erfolgreiche Zusammenarbeit mit bedeutenden Industriepartnern im Hinblick auf den Themenkreis Innovative Energietechnik.



