

**H. O. Seinsch**  
**Ausgleichsvorgänge bei**  
**elektrischen Antrieben**

# **Ausgleichsvorgänge bei elektrischen Antrieben**

**Grundlagen zur analytischen  
und numerischen Berechnung**

Von Prof. Dr.-Ing. Hans-Otto Seinsch  
Universität Hannover

Mit 61 Bildern



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Deutsche Bibliothek — CIP-Einheitsaufnahme

**Seinsch, Hans Otto:**

Ausgleichsvorgänge bei elektrischen Antrieben : Grundlagen  
zur analytischen und numerischen Berechnung / von Hans-Otto

Seinsch. — Stuttgart : Teubner, 1991

ISBN 978-3-519-06136-6 ISBN 978-3-663-01398-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-01398-3

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1991

Ursprünglich erschienen bei B. G. Teubner Stuttgart 1991

## **Vorwort**

Das vorliegende Buch ist aus einer Vorlesung entstanden, die ich seit einigen Jahren an der Universität Hannover für Studenten der elektrotechnischen Studienrichtungen Allgemeine Elektrotechnik und Energietechnik im 6. Semester abhalte. Zum Verständnis sind elementare Kenntnisse in Mathematik sowie über den Aufbau und das Grundwellenbetriebsverhalten der gebräuchlichen Arten von elektrischen Maschinen erforderlich.

In der Vergangenheit haben die Ausgleichsvorgänge bei Antrieben in Lehrbüchern ein Schattendasein geführt. Nur der Stoßkurzschluß der Synchronmaschine bei konstanter Drehzahl wurde in allen Einzelheiten behandelt, das übrige transiente Verhalten der Drehfeldmaschinen hingegen durchweg nur qualitativ gewürdigt. Hierfür gibt es zwei Gründe:

- Die Schaltvorgänge beschreibenden Differentialgleichungen sind in der Regel geschlossen nur unter der Annahme konstanter Drehzahl und weiterer roher Näherungen, z.B. Vernachlässigung der Stromverdrängung in Käfigwicklungen, lösbar. Fast alle in der Praxis wichtigen Ausgleichsvorgänge erfordern numerische Lösungen, für die erst seit wenigen Jahren einfach programmier- und bedienbare, leistungsfähige Rechner überall verfügbar sind.
- Das Anwachsen der Netzkurzschlußleistungen und die stark gestiegenen Anforderungen an die Verfügbarkeit von Antrieben haben Schaltvorgänge in den Blickpunkt gerückt (Beispiel Langzeit-Netzumschaltungen), die früher gar nicht vorkamen und bei denen mechanische Bauteile wie z.B. Kupplungen oder Getriebe so stark belastet werden, daß mitunter Ausführbarkeitsgrenzen überschritten werden.

In dieser Monografie wird der Versuch unternommen, den in vielen Einzeldarstellungen veröffentlichten Stand der Kenntnisse systematisch gliedert und konzentriert zusammenzufassen. Die technischen Einzelheiten werden in allen Abschnitten einerseits so weit in den Rechnungsgang eingebunden, wie dies zum Erzielen von quantitativ für die Ingenieurpraxis ausreichend genauen Ergebnissen erforderlich ist, andererseits wird auf das Abbrennen jedweden theoretischen Feuerwerks als Selbstzweck verzichtet. Die Darstellung enthält bewußt keine rechentechnischen Details und verfolgt im Kern das Ziel, dem Leser den Blick für das physikalische Problem offenzuhalten und ihn in die Lage zu versetzen, Plausibilitäts- und Grenzwertkontrollen auch bei solchen

Ergebnissen durchzuführen, die rein numerisch gewonnen wurden.

Die magnetischen Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Strängen von Ständer und Läufer einer Drehfeldmaschine sind komplex. Zur Erhöhung der Transparenz der Rechnungsgänge bedient man sich einer mathematischen Transformation, bei der man für Induktions- bzw. Synchronmaschinen mit nur zwei Spannungsgleichungen wie im stationären Betrieb auskommt. Von den bekannten Transformationsvorschriften habe ich im Sinne der genannten Zielsetzung die Symmetrischen Komponenten (SK) ausgewählt. Für sie ist der Zusammenhang zwischen den fiktiven transformierten Größen und den originalen Zeitverläufen besonders einfach. Die anderen Verfahren (Zweiachsentheorie und Raumzeigerkalkül) werden aber auch vorgestellt mit der beruhigenden Gewißheit, daß alle diese Methoden auf den gleichen Randbedingungen aufbauen und folglich auch zu identischen Ergebnissen führen.

Die Zweiachsentheorie wurde von R.H. Park schon 1929 veröffentlicht. Aber auch die geschlossene Beschreibung des Gesamtfeldes einer elektrischen Maschine mit verallgemeinerten Symmetrischen Komponenten hat V. Klima bereits in den dreißiger Jahren entwickelt. W.V. Lyon hat sie nach dem 2. Weltkrieg speziell auf Ausgleichsvorgänge zugeschnitten. Der später von K.P. Kovacs vorgestellte Raumzeigerkalkül unterscheidet sich im formalen Aufbau der Gleichungen von den SK nur um den Faktor 2.

Ich danke meinen Sekretärinnen, Frau Waltraut Haake und Frau Dorothea Hanquist, für das Schreiben des Manuskriptes. Dank schulde ich auch meinen wissenschaftlichen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Bernd Ponick und Dipl.-Ing. Stephan Rust für ihre wertvollen Hinweise und die Mühsal des Korrekturlesens. Nicht zuletzt danke ich Herrn cand.ing. Markus Riedel für den Fleiß und die Sorgfalt bei der Gestaltung des Textes und der Bilder.

Hannover, im Sommer 1991      Hans Otto Seinsch

## Inhaltsverzeichnis

1.	Laplace-Transformation zur Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen . . . . .	9
2.	Schaltvorgänge bei ruhenden Anordnungen . . . . .	15
2.1	Zu- und Abschalten eines "Ausnahme-Netzwerkes" . . . . .	15
2.2	Zu- und Abschalten einer Wicklung mit Dämpferwicklung am Gleichspannungsnetz . . . . .	18
2.3	Einschalten eines Wechselstromtransformators im Leerlauf . . . . .	26
2.4	Kurzschluß eines Wechselstrom-Transformators . . . . .	29
3.	Schaltvorgänge bei Gleichstrommaschinen . . . . .	34
3.1	Rotationsreaktanz, Längs- und Querinduktivität . . . . .	34
3.2	Kurzschluß eines Nebenschlußgenerators . . . . .	37
3.3	Leerlauf-Kurzschluß-Leerlauf-Diagramm eines fremderregten Generators mit Gegen-Reihenschluß-Wicklung . . . . .	40
3.3.1	Schaltvorgang Leerlauf $\rightarrow$ Kurzschluß . . . . .	42
3.3.2	Schaltvorgang Kurzschluß $\rightarrow$ Leerlauf . . . . .	44
3.4	Schwungmassenanlauf eines fremderregten Motors . . . . .	46
4.	Behandlung von Ausgleichsvorgängen bei Drehfeldmaschinen mit Hilfe der Symmetrischen Komponenten . . . . .	51
4.1.	Allgemeines zum Verfahren . . . . .	51
4.2	Flußverkettungen einer Drehstromwicklung . . . . .	53
4.3	Flußverkettungen zwischen den Wicklungen von Ständer und Läufer . . . . .	55
4.4	Luftspalt-Drehmoment . . . . .	57
5.	Schaltvorgänge bei Induktionsmaschinen . . . . .	59
5.1	Spannungsgleichungen einer symmetrischen Drehstrominduktionsmaschine . . . . .	59
5.2	Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer . . . . .	63

<b>5.3</b>	<b>Bestimmung des Stoßkurzschlußstromes . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Kurzschluß der synchron laufenden Maschine . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Zuschalten des stehenden Motors . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>5.4</b>	<b>Strom und Drehmoment bei festgebremstem Läufer . . . . .</b>	<b>70</b>
<b>5.5</b>	<b>Anlauf von drehstarr und drehelastisch gekoppelten Induktionsmotoren</b>	<b>77</b>
<b>5.6</b>	<b>Klemmenkurzschlüsse . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>5.7</b>	<b>Ströme und Drehmomente bei Netzumschaltungen . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>5.8</b>	<b>Aufschalten von mechanischen Laststößen und periodischen Lastmo- menten . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>5.9</b>	<b>Ausgleichsvorgänge bei Umrichterspeisung . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>6.</b>	<b>Schaltvorgänge bei Synchronmaschinen . . . . .</b>	<b>113</b>
<b>6.1</b>	<b>Vollpolmaschine . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Flußverkettungen der Ständerstränge mit der Induktorwicklung . . .</b>	<b>114</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Spannungsgleichungen und Luftspalt-Drehmoment . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Stoßkurzschluß . . . . .</b>	<b>116</b>
<b>6.2</b>	<b>Schenkelpolmaschine . . . . .</b>	<b>121</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Flußverkettungen einer Drehstromwicklung mit einem Reluktanzläufer</b>	<b>121</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Spannungsgleichungen und Luftspalt-Drehmoment, ausgedrückt durch Symmetrische Komponenten . . . . .</b>	<b>127</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Berechnung des Stoßkurzschlußstromes aus dem Schaltgesetz . . .</b>	<b>131</b>
<b>6.2.4</b>	<b>Park'sche Gleichungen der Zweiachsentheorie (d/q-Komponenten) .</b>	<b>133</b>
<b>6.2.5</b>	<b>Reaktanzen und Zeitkonstanten . . . . .</b>	<b>135</b>
<b>6.3</b>	<b>Beispiele für Ausgleichsvorgänge . . . . .</b>	<b>137</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Anlauf und Synchronisation eines Turboverdichter-Antriebes . . . .</b>	<b>138</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Fehlsynchronisation eines Generators mit dem Netz . . . . .</b>	<b>144</b>