

TRANSIENTE VORGÄNGE BEIM SCHWERANLAUF EINES ASYNCHRONANTRIEBES

H. Mosebach

1 EINLEITUNG

Asynchronantriebe stellen in der industriellen Antriebspraxis eine weit verbreitete Lösung dar. Neben ihrer Robustheit und ihres vergleichsweise einfachen und preiswerten Aufbaus wird die Möglichkeit geschätzt, die Maschinen - sofern eine weitgehend konstante Drehzahl verlangt wird - ohne Stromrichter direkt am Netz zu betreiben. Besondere Anforderungen stellt der Schweranlauf gegen das Massenträgheitsmoment und ein gegebenenfalls vorhandenes Gegenmoment einer großen Arbeitsmaschine dar. Neben der thermischen Rotorbelastung treten nach dem Einschalten hohe elektrische und mechanische Beanspruchungen durch transiente Vorgänge auf, die beim Anlagenentwurf und der Betriebsweise zu beachten sind.

Die typischen Vorgänge sollen hier am Beispiel eines Leeranlaufs gegen ein großes Trägheitsmoment nach **Bild 1** untersucht werden. Dabei wird angenommen, dass das eigentliche Arbeitsmoment erst nach dem Hochlauf wirksam wird (Antriebsbeispiel: Schere).

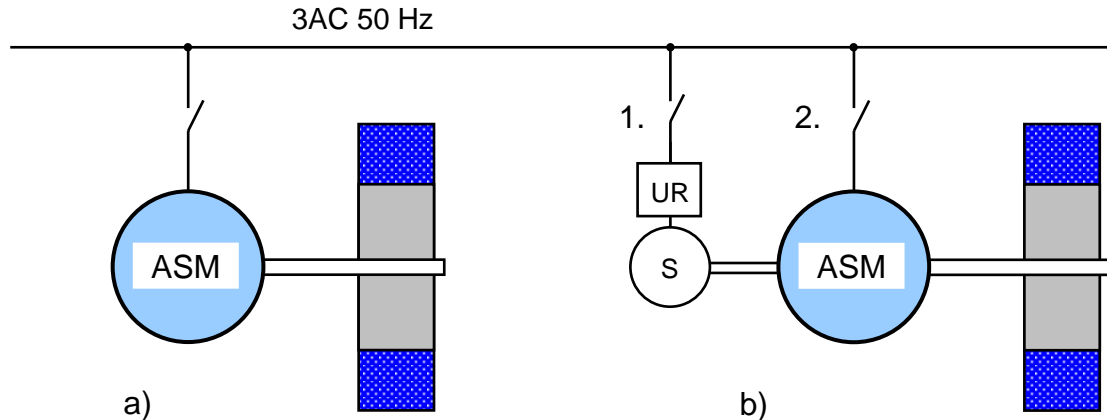


Bild 1: Leeranlauf eines Asynchronantriebes gegen Schwungmasse am Netz

- a) Direktes Aufschalten aus dem Stillstand
- b) Gestaffeltes Aufschalten aus variabler Drehzahl

Das direkte Aufschalten eines großen Antriebes nach **Bild 1a** hat bekanntlich sehr hohe Anlaufströme zur Folge, die bereits quasistationär ein Mehrfaches des Nennstromes betragen. Darüber hinaus treten kräftige transiente Pendelmomente auf, die zu einem Ansprechen von Sicherheitseinrichtungen führen können. In einzelnen Fällen kann es sinnvoll sein, eine Schaltung nach **Bild 1b** zu realisieren, bei der eine zweckmäßige Einschaltdrehzahl (z. B. die Synchrondrehzahl?) über einen UR-gespeisten Servoantrieb langsam aufgebaut wird.

2 RECHENMODELL FÜR TRANSIENTE VORGÄNGE

Die Behandlung transienter Vorgänge bei Drehstrommaschinen kann allgemein durch eine Reihe von Verfahren mit spezifischen Stärken und Schwächen erfolgen [1,2]. Bei Problemen mit Drehzahländerungen stellt die Methode der numerischen Integration mit einem Verfahren aus der Runge-Kutta-Familie das leistungsfähigste Vorgehen dar.

Für die praktische Anwendung ist es hier vorteilhaft, auf den bekannten komplexen Grundgleichungen der Asynchronmaschine [3] aufzubauen und sie auf transiente Vorgänge zu erweitern. Hilfreich für die Datengewinnung ist in diesem Zusammenhang das einsträngige Ersatzschaltbild nach **Bild 2**. Seine Größen sind relativ einfach messtechnisch zu erfassen oder zumindest herstellerseits weitgehend bekannt und damit kommunizierbar.

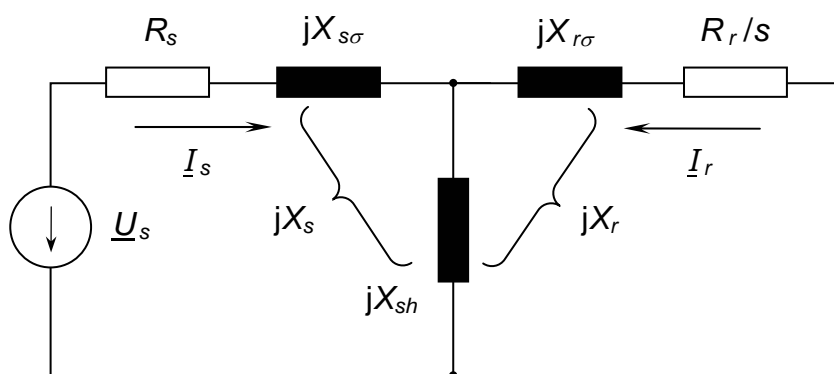


Bild 2: Einsträngiges Ersatzschaltbild der symmetrischen Asynchronmaschine

2.1 Koordinatensystem

Bei der Behandlung transienter Vorgänge in Drehfeldmaschinen ist die Wahl eines geeigneten Koordinatensystems sehr wichtig. Da es sich bei der hier gestellten Aufgabe um den Betrieb an einem Netz mit konstanter Frequenz und Spannung handelt, ist ein mit dem Netzspannungszeiger mitrotierendes Koordinatensystem besonders zweckmäßig. Ein solches System stellt das a,b -System [1] dar. Bei ihm ist die Netzspannung nach der b -Achse orientiert. Größen in der a -Achse beschreiben somit Blindkomponenten. Nach dem Abklingen des Ausgleichsvorgangs erscheinen die Stromkomponenten als Gleichgrößen.

2.2 Gleichungen

Die Gleichungen der Asynchronmaschine für transiente Vorgänge umfassen 4 Spannungsgleichungen und eine Bewegungsgleichung. Die Zahl der Spannungsgleichungen entspricht dem bekannten 4-Wicklungsmodell. Zu den gewünschten Gleichungen für die Maschine gelangt man, wenn man nach [4] das Raumzeigertheorem zu Hilfe nimmt, die Spannungsgleichungen sowohl für den Stator als auch den Rotor in seinem eigenen Koordinatensystem aufstellt und eine Transformation mit dem Drehwinkel des Läufers durchführt. Die verschiedenen Zwischenschritte sollen hier nicht wiederholt werden.

In der komplexen Schreibweise mit 2 Gleichungen

$$\begin{bmatrix} R_s + jX_s + L_s \frac{d}{dt} & jX_{sh} + L_{sh} \frac{d}{dt} \\ jsX_{sh} + L_{sh} \frac{d}{dt} & R_r + jsX_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_s \\ \underline{I}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

erkennt man die 2-Maschenstruktur des Ersatzschaltbildes **Bild 2** unmittelbar wieder. Nach dem Abklingen der transienten Vorgänge ($d/dt \equiv 0$) vereinfacht sich (1) zu den stationären Spannungsumläufen. Die Bewegungsgleichung lautet

$$\Theta \frac{d\Omega}{dt} = M_{el} - M_w \quad \text{bzw.} \quad \Theta \frac{ds}{dt} = \frac{p}{\omega} (M_w - M_{el}) \quad , \quad (2)$$

wenn statt der mech. Winkelgeschwindigkeit Ω der Schlupf s als Variable eingeführt wird. Durch die Aufteilung der komplexen Stromzeiger auf Real- und Imaginärteil,

$$\underline{I}_s = I_{sr} + jI_{si} \quad , \quad \underline{I}_r = I_{rr} + jI_{ri} \quad , \quad (3)$$

erkennt man, dass insgesamt 5 reelle, gekoppelte und nichtlineare Differentialgleichungen integriert werden müssen. Das Drehmoment ergibt sich aus den Stromkomponenten zu

$$M_{el} = m_s p \cdot L_{sh} \cdot \text{Im} \{ \underline{I}_s \cdot \underline{I}_r^* \} = m_s p \cdot L_{sh} \cdot (I_{si} I_{rr} - I_{sr} I_{ri}) \quad . \quad (4)$$

Eine möglichst allgemeine Darstellung gelingt, wenn Ströme und Drehmoment auf geeignete Bezugswerte normiert werden. Für den Statorstrom bietet sich der ideelle Stator-kurzschlussstrom ($s \rightarrow \infty$) unter der Voraussetzung $R_s = 0$ an,

$$I_{s\infty} = \frac{U_s}{X_{s\sigma} + \frac{X_{sh} X_{r\sigma}}{X_r}} \quad . \quad (5)$$

Das Drehmoment wird zweckmäßig auf das Kippmoment bezogen (ebenfalls für $R_s = 0$):

$$M_k = \frac{m_s p}{2\omega} \cdot \frac{U_s^2}{X_s} \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma} \quad (6)$$

Dabei ist die Streuung

$$\sigma = 1 - \frac{X_{sh}^2}{X_s X_r} \quad . \quad (7)$$

Schließlich ist es zweckmäßig, aus Trägheitsmoment, Kippmoment und Leerlaufdrehzahl eine fiktive Anlaufzeit

$$T_{mk} = \frac{\Theta \Omega_0}{M_k} \quad (8)$$

zu berechnen.

2.3 Möglichkeiten und Grenzen

Das beschriebene Verfahren eignet sich nicht nur zur Untersuchung des Hochlaufs, sondern ist - bei bekannten Anfangsbedingungen - auch für etliche weitere Fragestellungen geeignet. Hierzu gehören z. B.: Periodische Anregungen, Motor- und Generatorbetrieb, Laststöße inkl. Lastabwurf, plötzlicher Klemmenkurzschluss, Wiedereinschalten der Netzspannung mit

Restfeld etc. . Darüber hinaus ist es recht einfach, auch angeschlossene umfangreiche mechanische Systeme mit drehelastischen Eigenschaften (Wellenstränge) einzubauen [5].

Die Grenzen sind durch die Schwierigkeiten der Kontrolle eines rein numerisch vorhandenen Ergebnisses und die begrenzte Gültigkeit des einsträngigen Ersatzschaltbildes gegeben. Hier sind vor allem die Stromverdrängungseffekte bei Hochstab- und Doppelstabläufem zu nennen. Es kann dann jedoch zumindest versucht werden, durch angepasste bzw. nachgeführte Parameter eine Eingrenzung der Effekte zu erreichen. Speziell entwickelte Methoden [6,7] können hier überlegen sein. Bei ihnen ist die Datengewinnung allerdings komplizierter.

3 BERECHNUNGSBEISPIEL

Als Berechnungsbeispiel wird eine "größere" Asynchronmaschine mit den Daten nach **Tabelle 3.1** und stationären Kennlinien nach **Bild 3** herangezogen.

Tabelle 3.1: Daten einer beispielhaften Asynchronmaschine

Größe	Zahlenwert
Ständerwiderstand r_s	0,01
Ständerstreureaktanz $x_{s\sigma}$	0,06
Rotorwiderstand r_r	0,03
Rotorstreureaktanz $x_{r\sigma}$	0,06
Trägheitsmoment $\hat{=}$ Anlaufzeit T_{mk}	400 ms

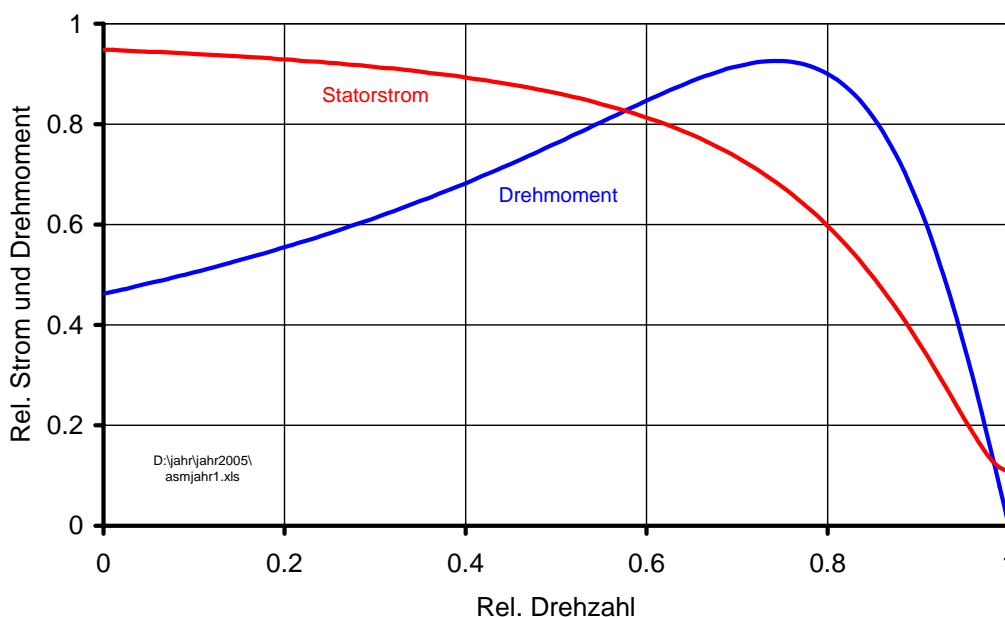


Bild 3: Stationäre Drehmoment- und Statorstromkennlinie

In **Tabelle 3.1** sind Widerstände und Reaktanzen auf die Hauptreaktanz bezogen:

$$r_s = \frac{R_s}{X_{sh}}, \quad r_r = \frac{R_r}{X_{sh}}, \quad x_{s\sigma} = \frac{X_{s\sigma}}{X_{sh}}, \quad x_{r\sigma} = \frac{X_{r\sigma}}{X_{sh}} \quad (9)$$

Bei dem direkten Aufschalten der Asynchronmaschine aus dem Stillstand nach **Bild 1a** erhält man die in **Bild 4** gezeigten Verhältnisse mit dem erwarteten heftigen transienten Geschehen.

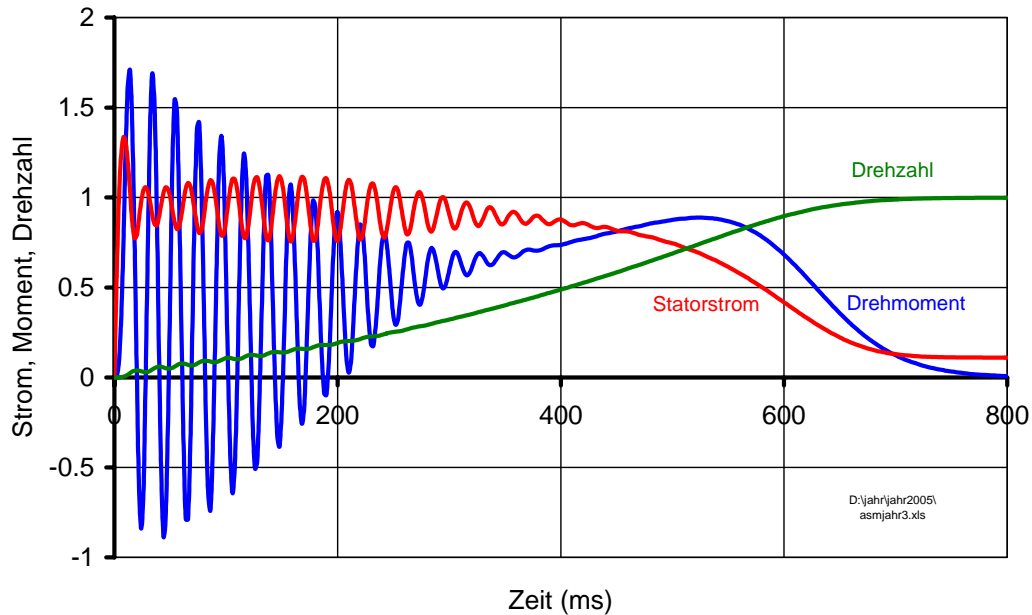


Bild 4: Anlaufvorgang bei Aufschalten der Asynchronmaschine im Stillstand (nach **Bild 1a**)

Aufgrund der stationären Kennlinien (**Bild 3**) könnte man bei der Netzaufschaltung nach **Bild 1b** und Synchronismus im Schaltaugenblick einen besonders weichen Übergang erwarten. Dies ist tatsächlich jedoch nicht der Fall, **Bild 5**.

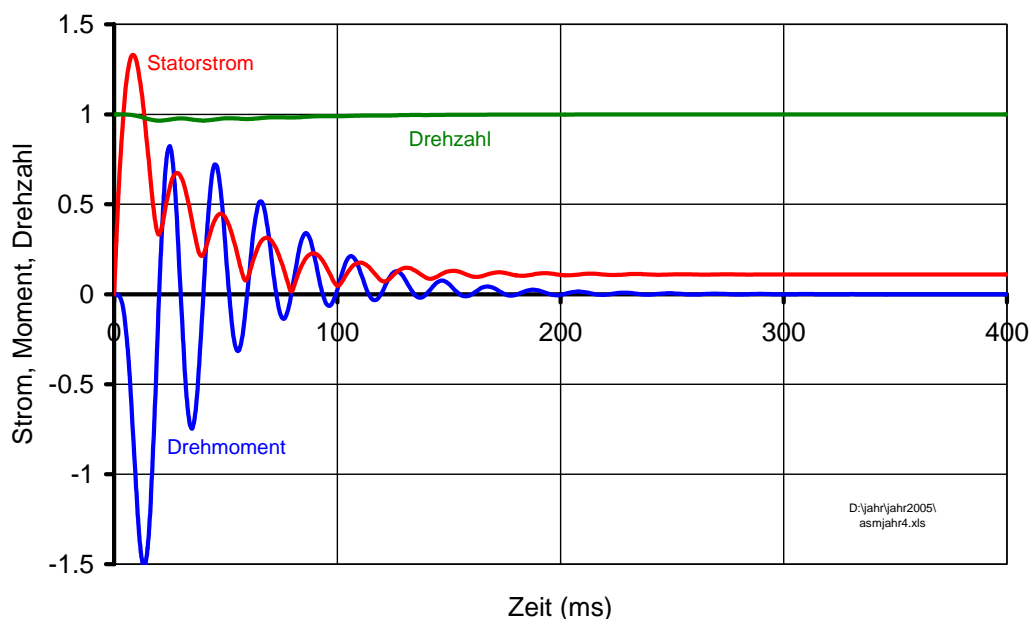


Bild 5: Vorgang bei Aufschalten der Asynchronmaschine aus $n = n_0$ (nach **Bild 1b**)

Der Höchstwert des Statorstromes ist in beiden Fällen praktisch gleich groß, die Drehmomentdifferenz $M_{max}-M_{min}$ nur ca. 10 % kleiner als beim direkten Aufschalten. Bezüglich der Momentendifferenz wird ein **Optimum** erreicht, wenn bei der halben Leerlaufdrehzahl zugeschaltet wird (**Bild 6**). Der Höchstwert des Stromes ist dann allerdings geringfügig größer geworden.

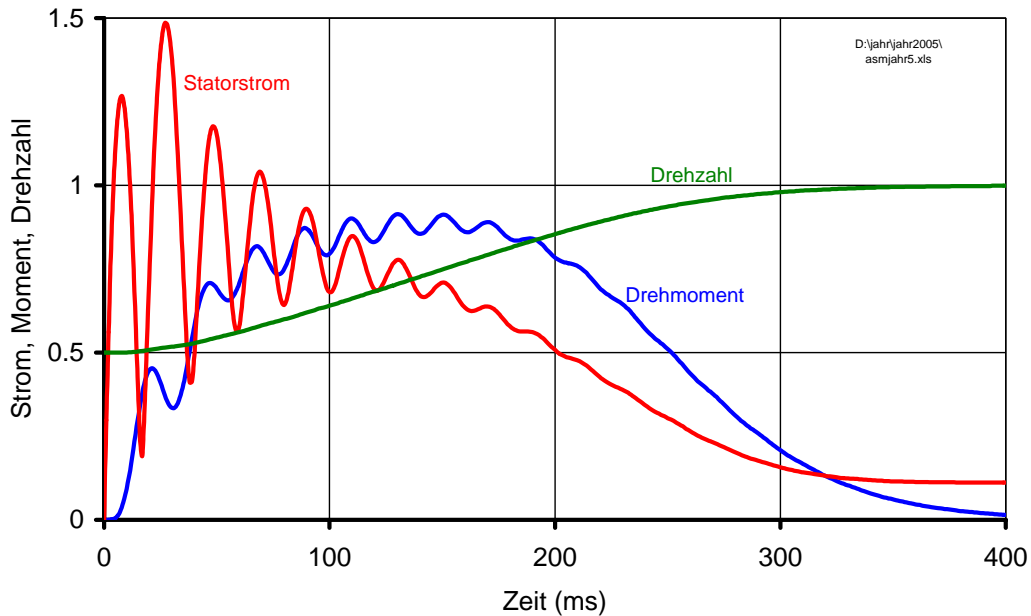


Bild 6: Vorgang bei Aufschalten der Asynchronmaschine aus $n = n_0/2$ (nach **Bild 1b**)

Betrachtet man außer den bisher ausgewählten Aufschaltdrehzahlen die ganze Bandbreite, kann die Frage nach den Maximalwerten des Stromes und der Drehmomentamplituden beantwortet werden (**Bild 7**). Dabei wurde abweichend von **Tabelle 3.1** für **Bild 7** ein "sehr großes" Trägheitsmoment entsprechend einer Anlaufzeit von $T_{mk} = \text{ca. } 30 \text{ s}$ angenommen.

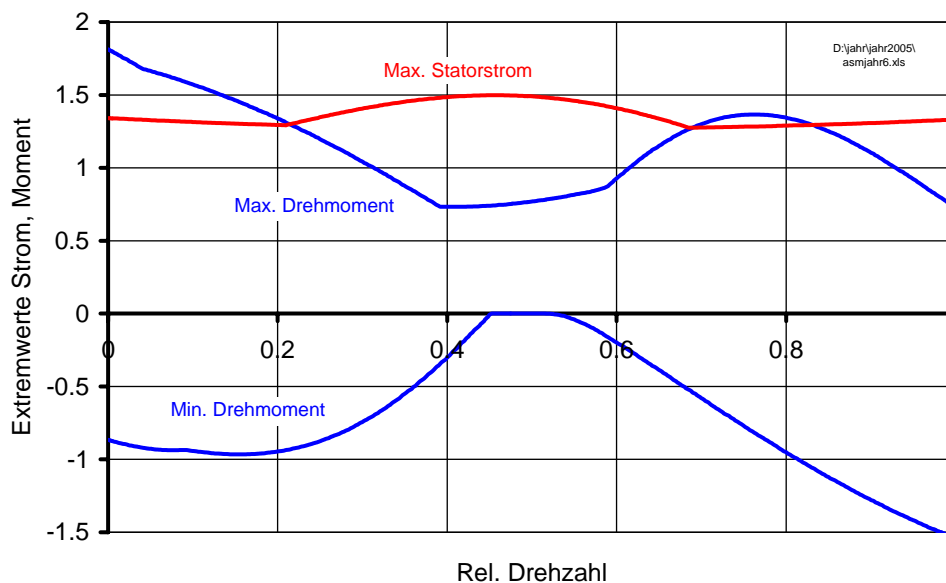


Bild 7: Extremwerte von Strom und Drehmoment bei Aufschalten bei variabler Drehzahl

Wie bereits in Kap. 2.3 beschrieben, ist die physikalische Interpretation der Kurven aufgrund des numerischen Integrationsverfahrens schwierig. Es liegen z. B. keinerlei Eigenwerte vor.

Das Aufschalten im Bereich etwa der halben Synchrondrehzahl hat offenbar den Vorteil, dass negative Drehmomentpulse vollständig vermieden werden und die positiven Momentspitzen kleiner als das Kippmoment bleiben. Der Höchstwert des Statorstromes ist jedoch etwas größer als bei dem bezüglich Drehmoment härtesten Aufschalten aus dem Stillstand.

Die beschriebenen Eigenschaften wurden im Zusammenhang mit konkreten Störfällen bei einem großen industriellen Antrieb erarbeitet und praktisch verifiziert.

Da die Transienten mit zunehmender Anlagengröße wegen der verhältnismäßig kleineren Widerstände langsamer abklingen und höhere Amplituden erreichen, ist im Einzelfall zu prüfen, welche Einschaltprozedur angewendet werden sollte.

LITERATUR

- [1] H. Weh: *Elektrische Netzwerke und Maschinen in Matrizendarstellung*, Bibliographisches Institut Mannheim, 1968
- [2] H. O. Seinsch: *Ausgleichsvorgänge bei elektrischen Antrieben*, B. G. Teubner, Stuttgart, 1991
- [3] J. Štěpina: *Komplexe Grundgleichungen der Asynchronmaschine*, AfE 73 (1990), S. 45-49
- [4] H. Eckhardt: *Grundzüge der elektrischen Maschinen*, B. G. Teubner, Stuttgart, 1982
- [5] E. Pittius, St. Rust, H. O. Seinsch: *Über die dynamischen Beanspruchungen in den Wellensträngen großer Gebläseantriebe bei der Netzs Umschaltung von Asynchronmaschinen-Gruppen*, AfE 71 (1988), S. 399-411
- [6] U. Beckert, W. Neuber: *Digitale Simulation von Asynchronmotoren mit Hochstabläufer im dynamischen Betrieb*, Elektrie 42 (1988), S. 187-189
- [7] U. Beckert: *Einfluss der transienten Stromverdrängung im Läufer auf das dynamische Verhalten der Asynchronmaschine*, Tagungsband der VDE/VDI-Tagung "Elektrisch-mechanische Antriebssysteme, Innovationen – Trends – Mechatronik", 6./7.10. 2004, Fulda, S. 889-903