



Optimaler Motorschutz mit **SIPROTEC**-Schutzgeräten

Power Transmission and Distribution

SIEMENS

SIEMENS
siemens-russia.com

Optimaler Motorschutz mit SIPROTEC-Schutzgeräten

Inhalt

	Seite
<i>Einführung in die Grundlagen von Asynchron- und Synchronmotoren</i>	3
<i>Schutzfunktionen und Schutz- geräte für Motoren im Überblick</i>	11
<i>Thermische Beanspruchung von Motoren und erforderliche Schutzfunktionen</i>	17
<i>Stromwandleranforderungen beim Motorschutz</i>	25
<i>Schutz von Motoren kleiner Leistung</i>	31
<i>Schutz von Motoren mittlerer Leistung</i>	43
<i>Schutz von Asynchronmotoren großer Leistung</i>	51
<i>Schutz von Synchronmotoren</i>	63
<i>Synchronisation und Schutz von Synchronmotoren mit dem 7UM62</i>	69
<i>Anhang</i>	73

Einführung in die Grundlagen von Asynchron- und Synchronmotoren

In diesem Kapitel wird eine Einführung in die Grundlagen von Drehstrommotoren gegeben. Ausgehend von grundlegenden physikalischen Zusammenhängen und dem Aufbau wird insbesondere auf charakteristische Betriebsweisen der Motoren eingegangen. Ferner werden wesentliche mathematische Zusammenhänge dargestellt, die man bei der Ableitung von Motorkenngrößen bzw. für Schutzstellwerte benötigt.

■ 1. Grundprinzip der Drehfeldmaschine

Elektrische Maschinen wandeln elektrische Energie in mechanische Energie um. Der Energieumwandlungsprozess beruht auf der Wechselwirkung zwischen magnetischen Feldern und Wicklungen. Eine rotierende elektrische Maschine besteht in ihrem wirksamen elektrischen Teil aus dem Ständer mit einer Drehfeldwicklung und dem Läufer. Der Läufer ist mit der Welle verbunden, über den beim Motor mechanische Energie abfließt. Grundlegende Voraussetzung für die Funktionsweise von Drehfeldmaschinen ist das umlaufende Magnetfeld (Drehfeld). Dies wird durch Anschluss einer dreiphasigen Wicklung an ein symmetrisches Drehstromsystem erzeugt. Für einen sinusförmigen Verlauf des Drehfeldes müssen die drei Stränge um 120° versetzt angeordnet sein und eine Phasenverschiebung von 120° zwischen den einzelnen Strangströmen bestehen. Die Umlaufgeschwindigkeit des Drehfeldes wird als Synchrondrehzahl n_{syn} bezeichnet und wird durch die Polzahl der Maschine und die Frequenz des speisenden Netzes bestimmt. Es gilt:

$$n_{\text{syn}} = f \cdot 60/p \quad [1/\text{min}]$$

mit: p = Polpaarzahl

Wirkungsweise der Asynchronmaschine

Besteht eine Differenz zwischen der Umfangsgeschwindigkeit des Drehfeldes und des Läufers, wird in den Leitern des Läufers eine Spannung induziert (Induktionsgesetz). Sind die Leiter Bestandteil einer geschlossenen Wicklung, bewirkt die induzierte Spannung einen Stromfluss. Dies führt gemäß der Kraftwirkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld zu Tangentialkräften.

Die Summe aller Tangentialkräfte erzeugt über dem Läuferadius als Hebelarm ein resultierendes Drehmoment.

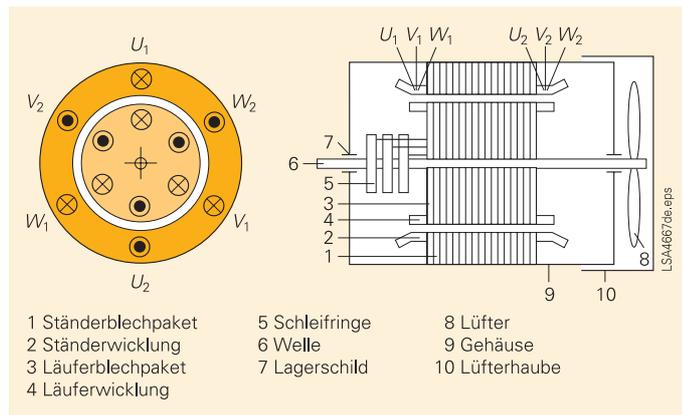


Bild 1 Hauptbestandteile der dreiphasigen Asynchronmaschine (U, V, W: Leiteranschluss U_{L1} , U_{L2} , U_{L3})

Die Kraftwirkung zwischen Strömen und Drehfeld ist gemäß der Lenzschen Regel so gerichtet, dass sie der Ursache der Induktion entgegenwirkt. Läuft das Drehfeld bei der noch stillstehenden Maschine über den Läufer hinweg, beginnt dieser sich in Richtung des Drehfeldes zu drehen, um die Relativgeschwindigkeit zwischen Drehfeld und Läufer zu verringern. Die Frequenz des Läufers (Drehzahl) kann nie die Drehfeldfrequenz des Ständers erreichen, weil dann im Läufer keine Spannung mehr induziert wird und damit die Kraftwirkung Null wird. Die Abweichung zwischen Drehfeld- und Läuferfrequenz wird als Schlupf s bezeichnet. Der Schlupf stellt sich so ein, dass gerade ein für die Motorbelastung hinreichender Läuferstrom entsteht.

$$s = \frac{\omega_D - \omega_L}{\omega_D} = \frac{f_D - f_L}{f_D} = \frac{n_{\text{syn}} - n_L}{n_{\text{syn}}} \quad (1)$$

ω_D Kreisfrequenz des Ständerdrehfeldes ($\omega_D = \omega_s$)

ω_L Kreisfrequenz des Läufers

f Frequenz

n Drehzahl

Die resultierende Drehzahl des Motors (Läufer) ergibt sich über die Anzahl der Polpaare p ($p = 1$ bedeutet 2 Pole gemäß Bild 1) und den Schlupf.

$$n_L = n_{\text{syn}} (1 - s) \quad (2)$$

Die Ungleichheit zwischen Drehfeld- und Läuferfrequenz führte zur Namensgebung *Asynchronmaschine*. Aufgrund der Spannungsinduktion wird auch häufig die Bezeichnung Induktionsmaschine benutzt.

Aufbau einer Asynchronmaschine

Bild 1 zeigt in einem Quer- und Längsschnitt die Hauptbestandteile einer dreiphasigen Asynchronmaschine mit Schleifringläufer. Die Polpaarzahl beträgt $p = 1$.

Ständer

Das am Gehäuse befestigte Ständerblechpaket nimmt in meist halbgeschlossenen Nuten die isolierte dreiphasige Ständerwicklung auf. Das Ständerblechpaket besteht aus gegeneinander isolierten Dynamoblechen. Die Blechung des Ständers und des Läufers ist erforderlich, um die infolge der magnetischen Wechselfelder entstehenden Wirbelstromverluste klein zu halten.

Die drei Stränge der Ständerwicklung werden entweder im Stern oder im Dreieck geschaltet. Werden die Anfänge und Enden der Stränge aus der Wicklung herausgeführt, besteht die Möglichkeit, die Maschinen mit unterschiedlicher Nennspannung zu betreiben. So können Maschinen in Sternschaltung bei 400 V durch Umschalten auf Dreieckschaltung auch bei 230 V mit unveränderter Leistung betrieben werden. Werden Maschinen bei Nennspannung in Dreieckschaltung betrieben, besteht zusätzlich die Möglichkeit des Stern-Dreieck-Anlaufes.

Läufer

Die ebenfalls isolierte dreiphasige Läuferwicklung liegt in halb oder ganz geschlossenen Nuten des Läuferblechpaketes. Die Enden der Läuferwicklungsstränge sind zu einem Sternpunkt verbunden. Die Anfänge der Wicklung werden auf Schleifringe geführt, so dass die Wicklung direkt oder mit Hilfe von Widerständen kurzgeschlossen werden kann.

Im Gegensatz zum Schleifringläufer besteht beim Kurzschlussläufer die Wicklung aus einfachen Leiterstäben ohne zusätzliche Isolation. Diese Leiterstäbe werden konzentrisch um die Welle am Läuferumfang verteilt angeordnet und an den Stirnseiten des Läuferblechpaketes durch Ringe kurzgeschlossen. Der dabei entstehende Wicklungskäfig führt zur Bezeichnung Käfigläufer. Durch spezielle Querschnittsformen der Läuferstäbe (siehe Bild 2) oder durch Verwendung zweier Käfige (Doppelkäfigläufer) kann das Anlaufverhalten (siehe auch Punkt 3) des Motors beeinflusst werden.

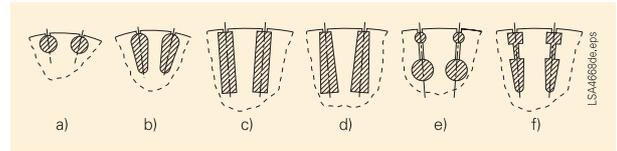


Bild 2 Stabformen eines Kurzschlussläufers

- Rundstabläufer,
- Kurzschlussläufer mit parallelfankigen Zähnen für gegossene Käfige,
- Hochstabläufer mit Rechteckstäben,
- Hochstabläufer mit Keilstäben,
- Doppelkäfigläufer mit Rundstäben,
- Doppelkäfigläufer mit parallelfankigen Zähnen

Der zwischen Ständer- und Läuferblechpaket vorhandene Luftspalt muss im Hinblick auf einen möglichst geringen Magnetisierungsstrom sehr klein gehalten werden. Da alle Nutöffnungen längs des Läufers- bzw. Ständerumfangs wie eine Vergrößerung des Luftspaltes wirken und zu Verzerrungen des Luftspaltfeldes (Spannungsverzerrungen, Zusatzverluste) führen, werden die Nuten im allgemeinen halb geschlossen, teilweise ganz geschlossen und nur bei Hochspannungsmaschinen offen ausgeführt.

Wirkungsweise der Synchronmaschine

Bei der *Synchronmaschine* ist die Drehfeld- und Läuferfrequenz gleich und somit der Schlupf gleich Null. Beide Drehfelder laufen synchron. Wie oben bereits erläutert, versagt damit das Prinzip der Induktionsmaschine. Das für den Energieumsatz notwendige magnetische Feld wird mit Hilfe einer Erregerwicklung erzeugt. Für die Erregerwicklung wird bei elektrisch erregten Synchronmaschinen ein einstellbarer Gleichstrom benötigt. Dieser wird mit Hilfe eines Erregersystems geliefert. Bei einer bürstenlosen Erregung, wie sie vor allem bei großen Synchronmotoren eingesetzt wird, erfolgt die Zuführung der Erregerleistung mittels einer auf der Motorwelle sitzenden Erregermaschine und einer mitrotierenden Drehstrombrückenschaltung. Diese erzeugt unmittelbar die Erregerspannung. Alternativ kann die Erregerleistung auch über Schleifringe zugeführt werden. Eine positive Eigenschaft der Synchronmaschine ist der mögliche Phasenschieberbetrieb. Es kann eine Blindleistung in gewünschter Form erzeugt und damit der Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) eines Netzes verbessert werden.

■ 2. Ersatzschaltung der Asynchronmaschine und mathematische Beziehungen

Am Beispiel der Ersatzschaltung sollen wesentliche charakteristische Größen abgeleitet werden. Es lassen sich Analogien zum Transformator finden, so dass die Ersatzschaltung des Asynchronmotors (siehe Bild 3) aus dem Ersatzschaltbild des Transformators entwickelt werden kann. Die Läufergrößen sind über die magnetische Kopplung auf die Ständergrößen umgerechnet. Ähnlich wie beim Transformator erfolgt das mit dem Quadrat der Windungszahlen der Läufer- und Ständerwicklung (siehe Gleichung (3)). Zur Vereinfachung werden die Eisenverluste vernachlässigt.

$$R'_L = \left(\frac{W_S}{W_L} \right)^2 R_L \quad (3)$$

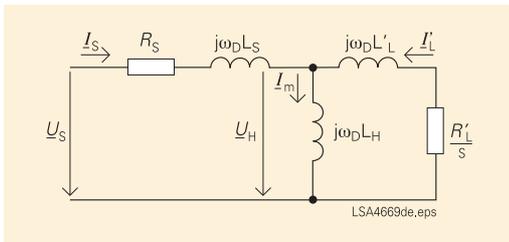


Bild 3 Ersatzschaltung des Asynchronmotors

Es wird deutlich, dass im Anlauf ($s = 1$) der wirksame Läuferwiderstand klein ist. Daraus resultiert der große Anlaufstrom mit einem kleinen $\cos \varphi$. Im Normalbetrieb wird mit $s \rightarrow 0$ der wirksame Widerstand groß und der $\cos \varphi$ nähert sich dem Wert 1.

Die notwendigen mathematischen Beziehungen sind nachfolgend dargestellt. Gleichung (4) zeigt den Ständerstrom als Summe des Läufer- und Leerlaufstroms (I_m). Bei Vernachlässigung des Leerlaufstromes ist der Ständerstrom in etwa gleich dem transformierten Läuferstrom.

$$\underline{I}_S = \underline{I}_m - \underline{I}'_L = \frac{\underline{U}_H}{j\omega_D L_H} - \frac{\underline{U}_H}{\frac{R'_L}{s} + j\omega_D L'_L} \approx \frac{\underline{U}_S}{R_S + \frac{R'_L}{s} + j(X_S + X'_L)} \quad (4)$$

Der Leistungsfaktor ergibt sich aus dem Realteil des Läuferstromes von Gleichung (4) und führt zur Beziehung nach Gleichung (5).

$$\cos \varphi_L = \frac{\frac{R'_L}{s}}{\left(\frac{R'_L}{s} \right)^2 + (X'_L)^2} \quad (5)$$

Eine weitere charakteristische Kenngröße ist das Drehmoment der Maschine, welches aus der Leistungsbilanz abgeleitet werden kann. Die abgegebene mechanische Leistung P_{mech} ergibt sich aus der Differenz von zugeführter elektrischer Wirkleistung P_S minus der Verluste im Ständer P_{VS} und im Läufer P_{VL} der Maschine.

$$P_{\text{mech}} = P_S - P_{VS} - P_{VL} \quad (6)$$

Bei Vernachlässigung der Ständerverluste und der Einführung der Luftspaltleistung P_σ gilt:

$$P_{\text{mech}} = P_\sigma - P_{VL} \quad (7)$$

Die mechanische Leistung lässt sich mit Hilfe des Drehmomentes M und der mechanischen Winkelgeschwindigkeit ω_{mech} des Läufers ausdrücken.

$$P_{\text{mech}} = M \omega_{\text{mech}} = M \frac{\omega_D}{p} (1 - s) \quad (8)$$

Analog dazu kann das Drehmoment sowohl aus der Luftspaltleistung als auch der Läuferverlustleistung unter Zuhilfenahme nachfolgender Gleichung berechnet werden.

$$M = \frac{P_\sigma}{\omega_D} p \quad \text{bzw.} \quad M = \frac{P_{VL}}{\omega_D} \frac{p}{s} \quad (9)$$

Gemäß der Vernachlässigung der Ständerverluste kann die Drehfeldleistung aus der Ständerspannung (Strangspannung) und dem Realteil des Ständerstromes berechnet werden und ergibt sich für eine dreiphasige Maschine zu:

$$P_\sigma = 3 \cdot U_S \text{Re}(\underline{I}_S)$$

mit

$$\text{Re}(\underline{I}_S) = \frac{U_S \cdot \frac{R'_L}{s}}{\left(R_S + \frac{R'_L}{s} \right)^2 + (X_S + X'_L)^2} \quad (10)$$

Gleichung (10) in Gleichung (9) eingesetzt führt zur endgültigen Beziehung für das Drehmoment der Maschine.

$$M = \frac{3p U_S^2}{\omega_D} \frac{\frac{R'_L}{s}}{\left(R_S + \frac{R'_L}{s} \right)^2 + (X_S + X'_L)^2} = \frac{3p U_S^2}{\omega_D} \frac{1}{\frac{R_S^2 + (X_S + X'_L)^2}{R'_L} s + \frac{R'_L}{s} + 2 R_S} \quad (11)$$

Über die Ableitung des Nenners von Gleichung (11), der zu Null gesetzt wird, lässt sich der Schlupf berechnen, bei dem das Drehmoment den Extremwert erreicht. Dieser Schlupf wird als Kippschlupf s_{kipp} bezeichnet. Das sich bei diesem Schlupf entwickelnde Moment ist folglich das Kippmoment.

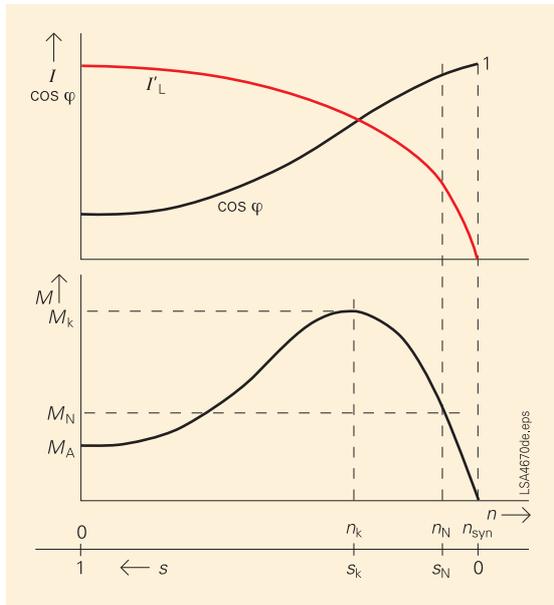


Bild 4 Betriebsgrößen des Asynchronmotors als Funktion der Läuferdrehzahl bzw. des Schlupfes (M_A Anlaufmoment, M_k Kippmoment; M_N Nennmoment, n_k Kippdrehzahl, $n_{syn} = n_D$ Drehzahl des Ständerdrehfeldes, s_k Kippenschlupf, s_N Nennschlupf)

$$s_{\text{kipp}} = \frac{R'_L}{\sqrt{R_S^2 + (X_S + X'_L)^2}} \quad (12)$$

$$M_{\text{kipp}} = \frac{3pU_S^2}{2\omega_D} \frac{1}{\sqrt{R_S^2 + (X_S + X'_L)^2} + R_S} \quad (13)$$

Setzt man nun Gleichung (11) und (13) ins Verhältnis und vernachlässigt den ohmschen Ständerwiderstand, dann erhält man die so genannte „Kloss'sche Beziehung“. Mit dieser Formel (Gleichung (14)) wird die Drehmoment-Schlupf-Kennlinie für den gesamten Schlupfbereich ($-\infty < s < +\infty$) beschrieben. Es vereinfacht sich auch die Beziehung für den Kippenschlupf.

$$\frac{M}{M_{\text{kipp}}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{kipp}}} + \frac{s_{\text{kipp}}}{s}} \quad \text{mit } s_{\text{kipp}} = \frac{R'_L}{X_S + X'_L} \quad (14)$$

Damit sind wesentliche mathematische Beziehungen für die Betriebsgrößen des Asynchronmotors abgeleitet. Diese helfen bei der Interpretation der vom Motorhersteller gelieferten Kurven und Daten. Bild 4 zeigt qualitativ den Verlauf der charakteristischen Größen. Es sind gleichzeitig die typischen Kenngrößen eingetragen.

Aus Gleichung (4) resultiert, dass der Anlaufstrom unter anderem von der angelegten Spannung und insbesondere vom Läuferwiderstand abhängt. Um die Verluste im Läufer gering zu halten, wird der Läuferwiderstand klein ausgelegt. Das führt zu den relativ großen Anlaufströmen, die durchaus das Fünf- bis Achtfache des Nennstromes erreichen können. Ferner limitiert der geringe Läuferwiderstand gemäß Gleichung (11) das Anlaufmoment.

Einer Verringerung des Anlaufstromes durch Absenken der Ständerspannung sind Grenzen gesetzt. In Gleichung (11) wird die quadratische Abhängigkeit des Drehmomentes von der angelegten Ständerspannung ($M \sim U^2$) deutlich und führt zu einer drastischen Verringerung des Anlaufmomentes (halbe Klemmenspannung führt zu einem Viertel des ursprünglichen Momentes). Die Erhöhung des Läuferwiderstandes durch Anlasswiderstände (Schleifringläufermotor nach Bild 1) führt zur Reduktion des Anlaufstromes. Dadurch erhöht sich der $\cos \varphi$ und damit das Anlaufmoment. Im Normalbetrieb sind die Widerstände kurzgeschlossen. Nachteil der Lösung ist der höhere Aufwand.

Aus der quadratischen Spannungsabhängigkeit des Momentes lässt sich ferner ableiten, dass sich gemäß Gleichung (13) auch das Kippmoment deutlich verringert. Damit läuft man Gefahr, dass bei Betrieb eines Motors mit abgesenkter Spannung das erforderliche mechanische Moment das Kippmoment überschreitet und der Motor dann förmlich stehen bleiben kann.

3. Hochlaufvorgänge von Asynchronmotoren

Für den sicheren Anlauf (Hochlauf aus dem Stillstand) und den Wiederhochlauf von einer bestimmten Drehzahl auf Nenn Drehzahl bei eventuell vorhandenem Restmagnetismus des magnetischen Feldes ist aus Netzsicht der entsprechende Nachweis zu erbringen. Werden die Hochlaufbedingungen nicht erfüllt, sind folgende Auswirkungen möglich:

- starke Verzögerung des Hochlaufvorganges und damit verbundene hohe thermische Beanspruchung der Motoren und der vorgeordneten Netzelemente
- Stillstand des Antriebes
- Ansprechen des Motorschutzes und ggf. Ansprechen des vorgeordneten Schutzes
- thermische Beanspruchung aller Elemente der entsprechenden Strombahn
- Abkippen in Betrieb befindlicher Motoren bis zum Stillstand

In Erweiterung zu Bild 4 zeigt Bild 5 die Hüllkurve des Anlaufstromes. Beim Einschalten des Motors mit dem Schlupf $s = 1$ tritt ähnlich wie beim Einschalten einer Induktivität ein transienter Einschaltstrom auf, der dann in den quasistationären Anlaufstrom übergeht. Dieser Strom klingt zunächst sehr langsam ab und sinkt erst in Nähe des Nennschlupfes schnell auf den normalen Betriebsstrom.

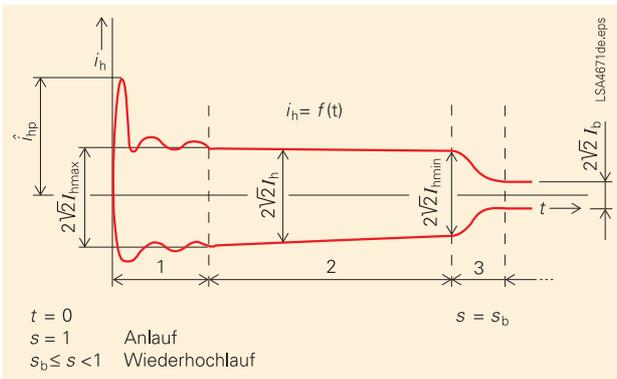


Bild 5 Hüllkurve des Anlaufstromes

Zur Charakterisierung des Anlaufs von Maschinen wird häufig der Anlauffaktor ($k_a = 3 \dots 6 \dots 10$) angegeben. Er ist im Wesentlichen konstruktionsabhängig (siehe Punkt 2 sowie Bild 2). Der Wiederhochlauffaktor ($k_w = 1 \dots 3 \dots 10$) ist neben der Konstruktion stark von der Drehzahl und von dem noch vorhandenen Magnetfeld zum Zeitpunkt der Wiedereinschaltung abhängig.

$$k_a = \frac{I_A}{I_N} \quad \text{bzw.} \quad k_w = \frac{I_W}{I_N} \quad (15)$$

Bild 6 zeigt beispielhaft für Asynchronmotoren mit unterschiedlichen Anlauffaktoren die Abhängigkeit des Wiederhochlauffaktors vom Schlupf.

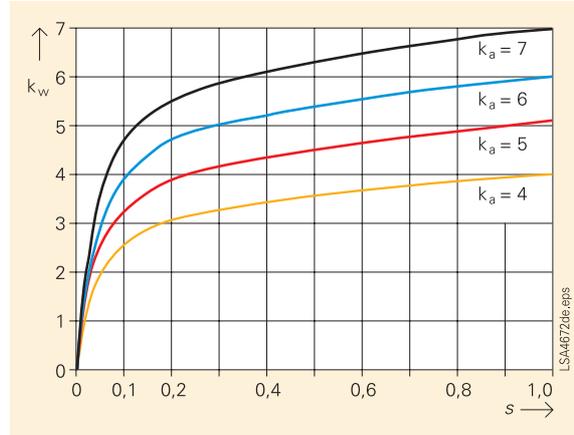


Bild 6 Wiederhochlauffaktor k_w als Funktion des Schlupfes und für unterschiedliche Anlauffaktoren k_a

Die Anlauf- bzw. Wiederhochlaufbedingung ist für jeden Antrieb erfüllt, wenn zu jedem Zeitpunkt das Motordrehmoment M größer als das Widerstandsmoment M_W (Gegenmoment der Arbeitsmaschine, Summe der Reibungsmomente, sonstige Verluste) ist. Man rechnet mit einer Sicherheit von 10 %. Unter Anwendung von Gleichung (16) lässt sich die erforderliche Mindestspannung bestimmen. Diese liegt in der Größenordnung von $U_{\min} = (0,55 \dots 0,7) U_{N,M}$.

$$U_{\min} = U_{N,M} \frac{n_K}{n_N} \sqrt{\frac{1,1 M_N}{M_K}} \quad (16)$$

mit:

- $U_{N,M}$ Motornennspannung
- M_N Nennwiderstandsmoment
- M_K Kippmoment
- n_K Kippdrehzahl
- n_N Nenn Drehzahl

Zur Berechnung der Klemmenspannungen beim Anlauf ist eine Netzersatzschaltung erforderlich, die Bild 7 beispielhaft zeigt.

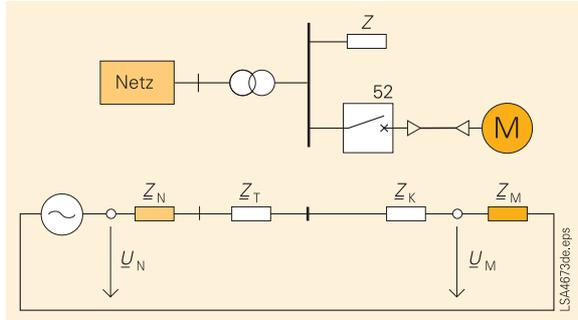


Bild 7 Netzersatzschaltung beim Einschalten eines Motors

Die Netzersatzimpedanz Z_N wird aus der Kurzschlussleistung, die Transformatorimpedanz Z_T aus den Nenndaten des Transformators, die Kabelimpedanz Z_K aus den spezifischen Kabelparametern und die Motorimpedanz Z_M aus dem Anlaufaktor k_a berechnet werden (siehe Gleichung 17).

$$\underline{Z}_M = Z_M (\cos \varphi_A + j \sin \varphi_A) \quad (17)$$

$$\text{mit } Z_M = \frac{U_{N,M}^2}{k_a S_{N,M}}$$

mit:

$U_{N,M}$ Motornennspannung
 $S_{N,M}$ Motornennscheinleistung

Für Hochspannungsmotoren kann man vereinfacht mit einem Phasenwinkel von 90° rechnen, so dass $\underline{Z}_M \approx j X_M$ gesetzt wird.

4. Betriebsweisen von Asynchronmotoren

Die mechanische und thermische Beanspruchung hängt vom Belastungszustand der Motoren ab. Beim *Dauerbetrieb* darf die Endüber Temperatur die für das verwendete Isoliersystem zulässige Grenzüber Temperatur nicht überschreiten. Es ist jedoch offensichtlich, dass ein Motor während einer gewissen Zeitdauer höher belastet werden darf, ohne dass die Wicklungsüber Temperatur ihren zulässigen Wert überschreitet. Danach muss unbedingt eine Pause zur Abkühlung eingelegt werden, ehe es zu einer erneuten Belastung kommt. In der IEC 60034 sind derartige Betriebsfälle in idealisierter Form als so genannte *Betriebsarten* S1 bis S10 genormt worden.

- S1 Dauerbetrieb
- S2 Kurzzeitbetrieb (z. B. S2 60 min)
- S3 Periodischer Aussetzbetrieb (Betrieb mit gleichartigen Belastungsspielen)
- S4 Periodischer Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufvorgangs
- S5 Periodischer Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung
- S6 Ununterbrochener periodischer Betrieb

- S7 Unterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung
- S8 Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Last-/Drehzahländerungen
- S9 Betrieb mit nichtperiodischen Last- und Drehzahländerungen
- S10 Betrieb mit einzelnen konstanten Belastungen und Drehzahlen

Dabei ist die überwiegende Betriebsart von Motoren der Dauerbetrieb (ca. 90 % der Anwendungen).

Bild 8 zeigt ausgewählte Betriebsarten. Es sind außer den Verläufen der Über Temperatur auch die Verläufe der Verluste und der Drehzahl angegeben, so dass sich aus den Darstellungen allein die Kennzeichen der einzelnen Betriebsarten ablesen lassen.

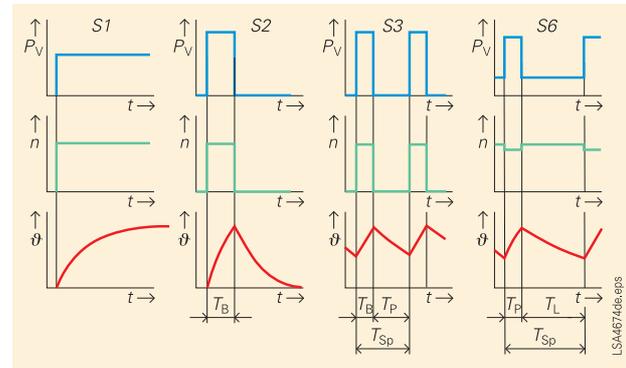


Bild 8 Verlauf der Verluste P_v , der Drehzahl n und der Über Temperatur für die Betriebsarten S1, S2, S3, S6 (T_B Belastungsdauer, T_P Pausendauer, T_{Sp} Spieldauer, T_L Leerlaufdauer)

5. Außertrittsfällen von Synchronmotoren

Die Leistungsgleichung für den stabilen Betrieb eines Synchrondrehstrommotors beschreibt Gleichung (18).

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{syn}} = 3 \frac{EU}{X_d} \sin \delta + \frac{3}{2} U^2 \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2 \delta$$

mit:

P_{mech} mechanisch abgegebene Leistung
 P_{syn} elektrisch aufgenommene Wirkleistung
 E Polradspannung
 U Klemmenspannung (Strangspannung)
 X_d synchrone Längsreaktanz
 X_q synchrone Querreaktanz
 δ Polradwinkel

Wird nach Gleichung (18) bei vorgegebener konstanter mechanischer Leistung die Klemmenspannung oder die Erregerspannung verkleinert, so steigt der Polradwinkel δ , bis bei Überschreitung des Grenzwinkels ($\delta > 90^\circ$ bei $X_d = X_q$) der Motor außer Tritt fällt. Der Motor läuft nicht mehr mit synchroner Drehzahl.

Bei ungestörtem Netz tritt dieser Fall auf, wenn für die abverlangte mechanische Leistung die Erregung zu gering ist oder ganz ausfällt. Man spricht hierbei von „Außertrittfall infolge Untererregung“. Ein Außertrittfall kann aber auch als Folge einer Netzstörung auftreten, bei der die Klemmenspannung während einer kurzen Zeit stark abfällt bzw. ganz verschwindet und anschließend wiederkehrt. Bei Wiederkehr der Spannung trotz voller Erregung kann das synchronisierende Moment nicht ausreichen, um den Motor in den Synchronismus zu ziehen. Man spricht hier von „Außertrittfall infolge Netzstörung“.

Bei nicht-synchronem Lauf des Motors sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden:

1. Der Motor arbeitet stabil

- bei geschlossenem Erregerstromkreis wie ein Asynchronmotor mit zwei Läuferwicklungen (Erreger- und Dämpferkreis) in der Längsachse (Doppelkäfigcharakteristik), aber nur einer Läuferwicklung (Dämpferstromkreis) in der Querachse (Einfachkäfigcharakteristik)
- bei offenem Erregerstromkreis wie ein Asynchronmotor mit einer Läuferwicklung (Dämpferstromkreis) mit Einfachkäfigcharakteristik

2. Der Kippunkt für den stabilen Asynchronlauf wird überschritten und der Motor wird abhängig von der Drehmomentcharakteristik der Belastungsmaschine abgebremst. Er schlüpft und kommt in der Regel bis zum Stillstand.

Für die mathematische Behandlung des nicht-synchronen Betriebes gilt nicht mehr Gleichung (18), sondern für eine schwingende Maschine muss stattdessen die vollständige Bewegungsgleichung angesetzt werden.

In den nachfolgenden Ausführungen wird an Hand von Berechnungen mit einem dynamischen Netzberechnungsprogramm das Verhalten der Motoren für die zwei Ausfallmechanismen diskutiert:

a) Außertrittfall durch Untererregung

Wird bei einem vollbelasteten Synchronmotor die Erregerspannung abgeschaltet, so ist ein synchroner Lauf nicht mehr gewährleistet, der Motor fällt außer Tritt.

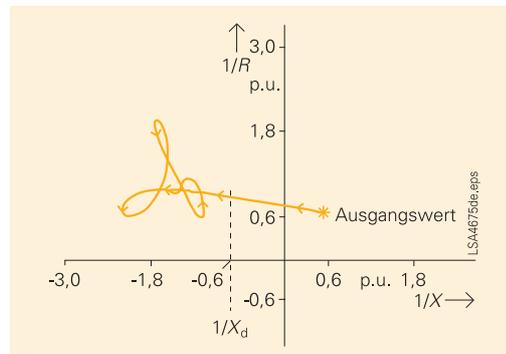


Bild 9 Admittanzverlauf bei Erregerausfall (Motor von 2,22 MVA)

Bild 9 zeigt den Messgrößenverlauf im Admittanzdiagramm. Wegen des ausreichend hohen asynchronen Kippmomentes ist der Motor in der Lage, bei kleinem Schlupf die verlangte mechanische Leistung weitgehend stabil als asynchrone Leistung abzugeben. Andererseits ergeben sich wegen der unterschiedlichen Reaktanzen in der Längs- und Querachse beachtliche Schwingungen bei der Konduktanz und Suszeptanz bzw. der Wirk- und Blindleistung. Im konkreten Fall pendelt der Motor in der Drehzahl um einen Mittelwert von $0,99 n_{\text{syn}}$ mit einer Amplitude von $0,02 n_{\text{syn}}$.

Der Pendelvorgang wiederholt sich zyklisch und die Kippgrenze des „Asynchronmotors“ wird nicht überschritten. In allen Fällen bleibt die Suszeptanz größer als $1/X_d$. An einem zweiten Motor mit anderen Daten wurde ebenfalls ein Erregerausfall (kurzgeschlossener Erregerkreis) simuliert (siehe Bild 10).

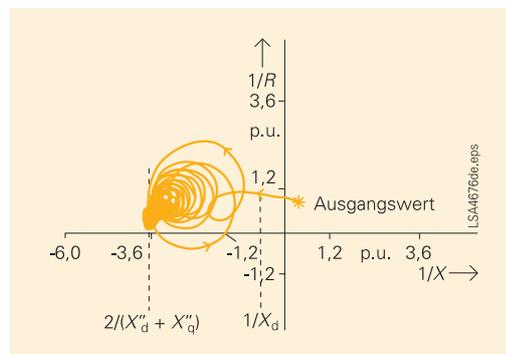


Bild 10 Admittanzverlauf bei Erregerausfall (Motor von 9,88 MVA)

In diesem Fall wird das asynchrone Kippmoment überschritten und der Motor kommt bei rasch zunehmendem Schlupf mit einer Geschwindigkeit von ca. $dn/dt = 7 \text{ %/s}$ zum Stillstand. Die Polradwinkeländerung steigt von $600^\circ/\text{s}$ auf immer größere Werte. Aufgrund unterschiedlicher Eingangsgleichungen in Längs- und Querachse bewegt sich die Admittanz nahezu in Kreisen. Da sich mit zunehmendem Schlupf diese Reaktanzen von ihren Synchronwerten bis hin zu ihren Subtransient-Werten verkleinern, werden auch die Kreisdurchmesser immer kleiner. Der Endpunkt des Vorgangs wird bei einer Konduktanz von nahezu Null und einer Suszeptanz von ungefähr $2/(X_d'' + X_q'')$ erreicht.

b) Außertrittfall durch kurzzeitigen Netzspannungsausfall

Bei einem dreipoligen Netzkurzschluss und damit verbundenem Zusammenbruch der Netzspannung kann ein Synchronmotor nicht mehr die von der Last geforderte mechanische Leistung als elektrische Leistung vom Netz beziehen. Die fehlende Leistung wird durch die (negative) Beschleunigungsleistung gedeckt. Da diese proportional zur Änderung der Anstiegsgeschwindigkeit des Polradwinkels ($d^2\delta/dt^2$) ist, wird eine rasche Polradwinkeländerung erzwungen. Als Polradwinkel ist hierbei der Winkel zwischen Polradspannung und frequenzstarrer Netzspannung zu verstehen. Nach Kurzschlussabschaltung und damit verbundener Spannungswiederkehr kann es abhängig von den Motorkonstanten, der mechanischen Last und der Kurzschlussdauer entweder zu einem Wiedersynchronisieren oder zu einem Außertrittfall kommen.

Bild 11 zeigt einen Ortskurvenverlauf, bei dem der Motor gerade noch nicht außer Tritt gefallen ist. In der spannungslosen Zeit fällt die Drehzahl zwar bis zu 5 % ab und der Polradwinkel hat schon fast 180° erreicht, aber das synchronisierende Moment nach Spannungswiederkehr ist so groß, dass der Motor wieder in den Synchronismus gezogen wird.

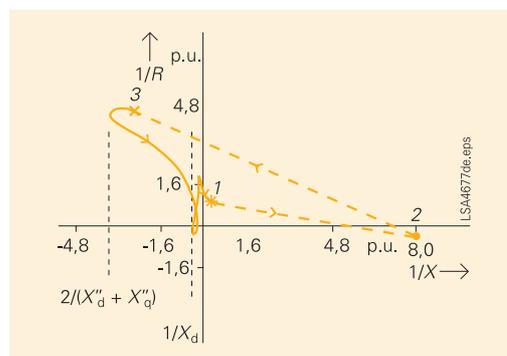


Bild 11 Ortskurvenverlauf der Admittanz infolge eines dreipoligen Kurzschlusses von 0,15 s Dauer (Motor 2,22 MVA)
1 – Ausgangswert,
2 – Wert während des Kurzschlusses,
3 – Wert nach Kurzschlussabschaltung

Eine Verlängerung der Kurzschlussdauer um 50 ms führt zu einem größeren Drehzahlabfall (8 %) und der Motor fällt außer Tritt (siehe Bild 12). Ähnlich dem Untererregungsvorgang nach Bild 10 zeigt der Ortskurvenverlauf Kreisbewegungen um den Punkt $1/X_d''$. Da die volle Erregung wirksam ist, sind die Kreisdurchmesser bedeutend größer. Auch hier bleibt die Suszeptanz auch immer größer als $1/X_d''$.

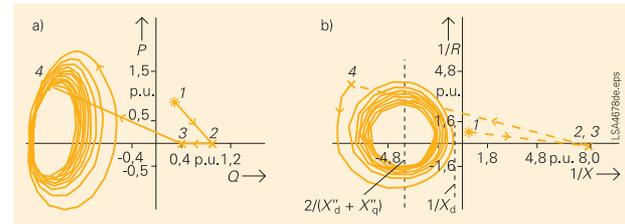


Bild 12 Ortskurvenverlauf der Admittanz infolge eines dreipoligen Kurzschlusses von 0,2 s Dauer (Motor 9,88 MVA)
a) Leistungs Ortskurven,
b) Admittanz Ortskurven
1 – Ausgangswert,
2 – Wert bei Kurzschlussbeginn,
3 – Wert bei Kurzschlussabschaltung,
4 – Wert nach Kurzschlussabschaltung

c) Schlussfolgerung

Die Beispiele zeigen deutlich, dass man den Außertrittfall von Synchronmotoren sehr gut durch einen Untererregungsschutz mit Admittanzcharakteristik (siehe Handbuch 7UM61 bzw. 7UM62) beherrscht. Man braucht nur eine Schutzkennlinie, die auf $1/X_d''$ einzustellen ist. Um den Motoren die Chance einer Resynchronisation zu ermöglichen, sollte eine ausreichende Verzögerung eingestellt werden. Bei den Simulationen erfolgte für den ungünstigen Fall der Motorbelastung mit Nennlast diese Resynchronisation in höchstens 0,5 s. Es wird damit für den Außertrittfallschutz eine Auslöseverzögerung von 1 s empfohlen. Da wegen der meist geringen Vorreaktanz die Motorklemmenspannung sich nur wenig ändert, kann alternativ auch eine Blindleistungsüberwachung eingesetzt werden.

Literatur:

- [1] Weißnigk, K.-D.: Kraftwerkselektrotechnik. VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 1993
- [2] Brendler, W.; Roseburg, D.: Elektrische Maschinen. 4. Lehrbrief fürs Hochschulfernstudium in der ehemaligen DDR, 1988
- [3] Müller, G.: Grundlagen elektrischer Maschinen. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1994
- [4] Clemens, H.; Rothe, K.: Schutztechnik in Elektroenergiesystemen. Verlag Technik GmbH, Berlin, 1991
- [5] IEC 60034-1 - Rotating electrical machines. Part1: Rating and performance, Release 2004
- [6] Fischer, A.: Außertrittfall und Außertrittfallschutz von Synchronmotoren. Etz Bd. 111 (1990) H. 6, S. 306 – 309

Schutzfunktionen und Schutzgeräte für Motoren im Überblick

In dem Kapitel werden ausgehend von möglichen Fehlern in Asynchron- und Synchronmotoren die tauglichen Schutzfunktionen vorgestellt. Weiter folgt eine Übersicht zur Aufteilung von Schutzfunktionen auf einzelne Schutzgeräte. Abschließend wird die prinzipielle Anwendung der Schutzeinrichtungen für die unterschiedlichen Motortypen und Leistungsklassen diskutiert.

■ 1. Fehler und Schutzfunktionen

Bei Motoren sind unterschiedliche Fehlerursachen möglich. Tabelle 1 zeigt in Übersichtsform wesentliche Fehlerursachen und deren Auswirkungen. Eine zentrale Rolle spielt dabei die thermische Überlastung sowohl für den Ständer als auch für den Läufer. Diese unzulässige Beanspruchung hat generellen Einfluss auf die Lebensdauer des Motors und führt zur vorzeitigen Alterung. Das wiederum beeinträchtigt das Isolationsvermögen und erhöht gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit von Folgefehlern, welche in der Regel Erdschlüsse und Kurzschlüsse sein können.

Fehlerursache	Fehlerart				
	Thermische Überlastung	Wicklungsschluss (2polig, 3polig)	Erdschluss	Windungsschluss	Mechanische Zerstörung
Isolationsalterung		•	•	•	
Stationäre und transiente Überspannungen		•	•	•	
Unterspannung	•				
Unsymmetrische Spannung	•				
Leiterunterbrechung, Phasenausfall	•				
Asynchrones Umschalten	•				•
Lagerschaden	•				•
Mechanische Überlast im Dauerbetrieb	•				
Unzulässig große Anlaufzeit	•				
Blockierung des Läufers beim Anlauf	•				
Unzulässig kleine Pausenzeiten, zu häufige Wiedereinschaltung	•				
Verschmutzung	•				
Unzulässig hohe Umgebungstemperatur	•				
Ausfall der Kühlung	•				

Tabelle 1 Übersicht über Fehlerursachen und Fehlerarten bei Asynchronmotoren

Fehler	Schutzfunktionen	ANSI
Thermische Überlastung des Ständers durch Überstrom, Kühlungsprobleme, Verschmutzung usw.	– Thermischer Überlastschutz mit vollständigem Gedächtnis – Messung der Ständertemperatur über Temperaturfühler (z. B. PT100)	49
Thermische Überlastung des Läufers beim Anlauf – zu lang, Läufer blockiert – zu häufig	Überlastschutz durch 2 Prinzipien – Anlaufzeitüberwachung – Wiedereinschaltsperr	48 66, 49R
Spannungsunsymmetrie, Phasenausfall	Schieflastschutz (unabhängige, thermische Stufe)	46
Überlastung und damit Übertemperatur der Lager	Messung der Lagertemperatur über Temperaturfühler (z. B. PT100)	38
Überbeanspruchung leer laufender Antriebe (Pumpen, Kompressoren)	Minimaler Leistungsbezug – Unterstrom $I <$ – Wirkleistung $P <$	37 32U
Erdschluss	– Erdschlussmeldung über Verlagerungsspannung – Erdstrommessung (Motoranschluss über kurze Kabel) – Erdschlussrichtung	59N
		51Ns
		67Ns
Kurzschlüsse	– Überstromzeitschutz – Differentialschutz	50, 51
		87M
Unterspannung	Unterspannungsschutz (unabhängig, abhängig)	27
Erregungsausfall bei Synchronmotoren	Untererregungsschutz	40
Asynchronlauf von Synchronmotoren (Außertrittfall)	Untererregungsschutz	40

Tabelle 2 Zuordnung der Schutzfunktionen zu den Fehlerarten

Nicht aufgeführt sind Fehlerursachen, wie zum Beispiel verdeckte Herstellungsfehler und Montagefehler (z.B. Verspannen des Motors, einseitiger Lagerdruck beim Anschluss der Arbeitsmaschine) sowie eine unzulängliche Wartung.

Die Aufgabe des Schutzes besteht darin,

- den Motor im Falle einer thermischen Überlastung vor einer Zerstörung und damit einer Verringerung der Lebensdauer zu bewahren.
- bei auftretendem Kurz-, Erd- und Windungsschluss durch hinreichend schnelle Abschaltung sowohl einer Ausweitung des Schadens am Motor (Zerstörung des Eisenpakets, Motorbrand) entgegenzuwirken als auch die Auswirkungen auf andere angeschlossene Verbraucher (Spannungssymmetrie, Spannungseinsenkung, Stromüberlastung) zu begrenzen.

Die obenstehende Tabelle 2 zeigt die Beziehung zwischen möglichen Fehlern und Schutzfunktionen, die diese Fehler erfassen.

Nicht aufgeführt ist ein Überstromschutz, der mechanische Fehler unter anderem in der Antriebsmaschine erfasst. Hier ist zum Beispiel denkbar, dass sich Stückgut bei Kohlemühlen verklemmt, Saugzugkanäle verstopfen oder mechanische Schäden auftreten. Der daraus resultierende Überstrom führt zwangsläufig zur Überlastung des Motors und erfordert die Auslösung durch den Überlastschutz. Bei langen Erwärmungszeitkonstanten ist die Auslösung entsprechend verzögert.

Um den Motor zusätzlich „zu schonen“, wird bei Strömen deutlich über dem Nennstrom (z. B. $2 I_{N,M}$) ein Überstromschutz mit einem Zeitglied (Verzögerung ca. 1 s) eingesetzt. Diese Schutzfunktion ist während des Anlaufs inaktiv. Treten während des Normalbetriebes Kurzschlüsse auf, wirkt diese Funktion auch als Kurzschlusschutz in deutlich kürzerer Zeit.

Auf eine detaillierte Diskussion zu den einzelnen Schutzfunktionen soll verzichtet werden, da diese in anderen Kapiteln erfolgt.

■ 2. Aufteilung der Schutzfunktionen auf die Schutzgeräte

Schutzfunktion	ANSI	7SJ602	7SJ61	7SJ62	7SJ63/64	7UM61	7UM62
Analogeingänge		3I, I _{ee}	3I, I _{ee}	3I, I _{ee} 3U	3I, I _{ee} 3U/4U 2MU/-	3I, I _{ee} 4U	6I, 2I _{ee} 4U 3MU
Ständerüberlastschutz	49	●	●	●	●	●	●
Anlaufzeitüberwachung, Festbremschutz	48	●	●	●	●	●	●
Wiedereinschaltsperr	66, 49R	●	●	●	●	●	●
Schiefelastschutz I ₂ >	46	●	●	●	●	●	●
Thermischer Schiefelastschutz (I ₂ ² t)	46					●	●
Temperaturerfassung (über Thermobox)	38	● ¹⁾	●	●	●	●	●
Unterstromschutz	37	●	●	●	●	●	●
Wirkleistungsschutz (P <)	32U					●	●
Erdschlussschutz ungerichtet	59N, 51Ns	●		●	●	●	●
gerichtet	67Ns	● ²⁾	●	●	●	●	●
Überstromschutz	50, 51	●	●	●	●	●	●
Stromdifferentialschutz	87M						●
Unterspannungsschutz	27			●	●	●	●
Überspannungsschutz	59			●	●	●	●
Untererregungsschutz	40					●	●
Läufererdschlussschutz	64R					●	●
Frequenzschutz	81		●	●	●	●	●
Schalerversagerschutz	50BF	●	●	●	●	●	●
Freiprogrammierbare Logik (CFC)			●	●	●	●	●
Steuerfunktionen			●	●	●	●	●
Grafikdisplay					●		●
Flexible Schnittstellen		1	2	2	2/3	2	3
Frequenzarbeitsbereich (11 Hz – 69 Hz)						●	●
Betriebsmesswerte		●	●	●	●	●	●
Betriebs- und Störfallmeldungen		●	●	●	●	●	●
Störschreibung		●	●	●	●	●	●
Protokolle		MODBUS PROFIBUS-DP IEC 60870-5-103	MODBUS PROFIBUS-DP DNP 3.0 IEC 60870-5-103 IEC 61850	MODBUS PROFIBUS-DP DNP 3.0 IEC 60870-5-103 IEC 61850	MODBUS PROFIBUS-DP DNP 3.0 IEC 60870-5-103 IEC 61850	MODBUS PROFIBUS-DP DNP 3.0 IEC 60870-5-103	MODBUS PROFIBUS-DP DNP 3.0 IEC 60870-5-103 IEC 61850

Tabelle 3 Motorschutzfunktionen in den SIPROTEC-Schutzgeräten (I_{ee} – empfindlicher Stromeingang, MU – Messumformer);
Hinweis zu 7SJ602:

- 1) bestellabhängig – nicht verfügbar, wenn Kommunikationsprotokoll benötigt wird
- 2) optionale Bestellung auch mit U_e möglich

Aufteilung der Schutzfunktionen auf die Schutzgeräte

Der digitale Schutz zeichnet sich insbesondere durch Multifunktionalität aus. Auf einer Standardhardware können anwendungsabhängig unterschiedliche Schutzfunktionen ablaufen. Gleichgültig, ob man nun ein Kabel, eine Freileitung, einen Generator oder einen Motor schützt, hat man es immer mit den gleichen Gerätetypen zu tun. Das vereinfacht das Engineering durch ein identisches Hardwaremengengerüst. Man kann Anwendungen standardisieren und auch den Ersatzteilaufwand reduzieren. Neben der Geräteauswahl muss der Anwender die entsprechende Schutzfunktionskombination bestellen.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die in den Schutzgeräten enthaltenen Funktionen für die Motorschutzapplikationen und es werden ausgewählte Zusatzfunktionen aufgelistet.

■ 3. Anwendung der Schutzgeräte

Der zu benutzende Schutzzumfang richtet sich im Wesentlichen nach der Nennleistung des Motors, seiner Betriebsart sowie seiner Rolle und Bedeutung aus Sicht des mit ihm verbundenen technologischen Prozesses. Natürlich sind die Kosten nicht zu vernachlässigen. Man sollte eine Gesamtkostenbetrachtung anstellen, da teilweise die Kosten für die Reparatur eines Motors im Vergleich zu den Reparaturkosten anderer elektrischer Betriebsmittel verhältnismäßig gering sind. Dagegen können die Folgekosten bei einem Ausfall für das Produktionssystem ein Vielfaches der Reparaturkosten betragen.

Die Übersicht in Bild 1 zeigt eine Aufteilung der Schutzgeräte nach Leistungsklassen der Motoren und gilt für Asynchronmotoren. In der linken Spalte sind die Vorzugstypen der Schutzgeräte dargestellt.

Werden zusätzliche Funktionen, wie z. B. frei-programmierbare Logik, mehr Möglichkeiten der seriellen Kommunikation, ein weiter Frequenzarbeitsbereich und andere mehr gefordert, so kann man auf die Geräte der rechten Spalte ausweichen. Da die Mehrzahl der Schutzgeräte direkt in der Mittelspannungszelle eingebaut ist, erfolgt verstärkt die Nutzung der Steuerfunktionalität. Hier bieten die Geräte mit Grafikdisplay durch die Darstellung eines Abganges mit den Schaltgeräten Vorteile. Man kann auf das konventionelle Blindschaltbild verzichten.

Tabelle 4 beschreibt die Vorzüge der optionalen Geräte aus Bild 1.

Klassifizierung	Optionen
Klein (100 – 500 kW)	7SJ61: höhere Funktionalität (z. B. CFC), mehr Kommunikationsmöglichkeiten, mehr binäre I/O's
Mittel (500 kW – 2 MW)	7SJ63/64: Grafikdisplay und damit bessere Vorort-Steuerung, skalierbares binäres I/O-Mengengerüst, 7SJ64 hat eine höhere CFC-Leistungsfähigkeit und eine Schnittstelle mehr. 7UM61: größeres binäres I/O-Mengengerüst, weiter Frequenzarbeitsbereich (sichere Schutzfunktionalität auch beim Motorauslauf)

Tabelle 4 Erläuterung zu den Optionen

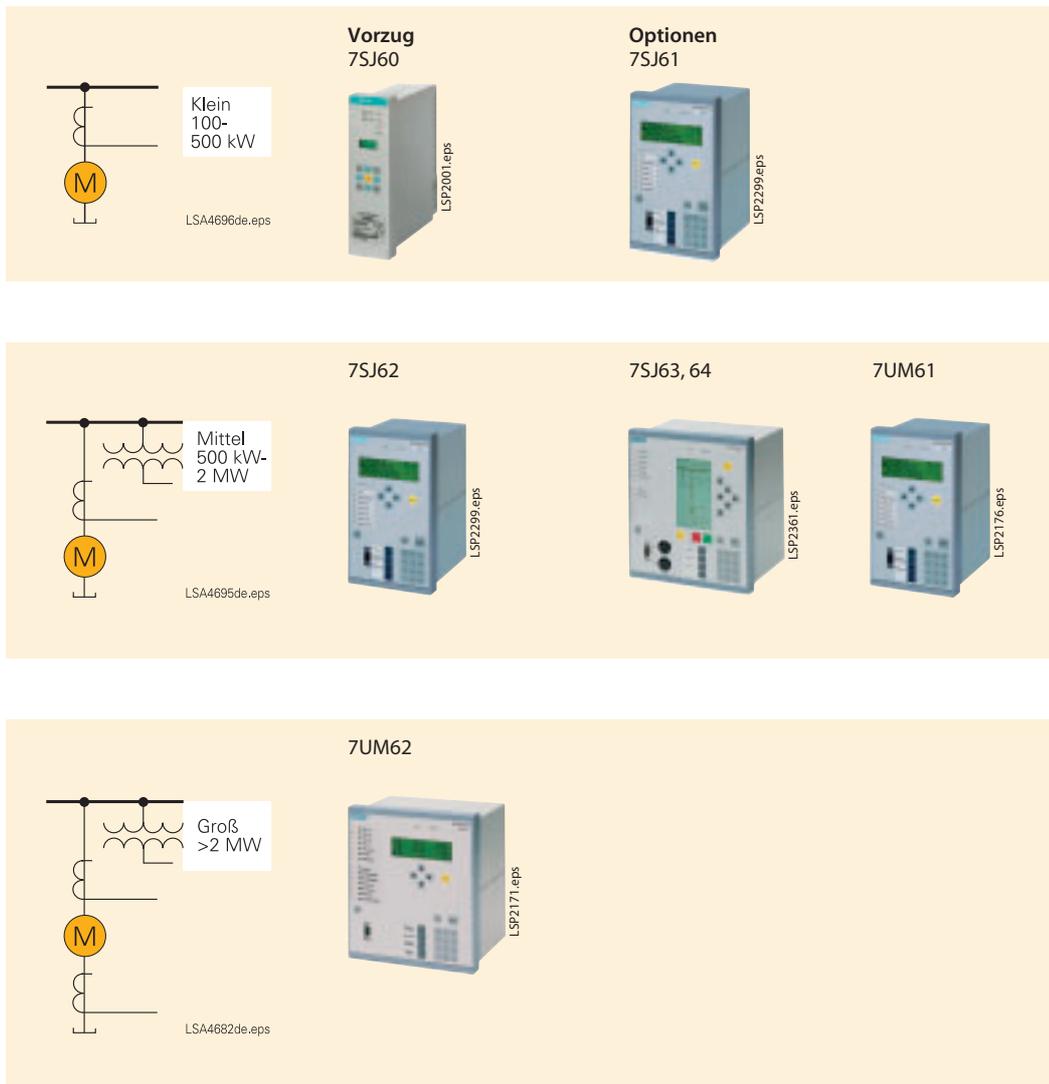


Bild 1 Zuordnung der Schutzgeräte zu Motorleistungsklassen

Die Leistung von Synchronmotoren ist in der Regel deutlich größer als 2 MW. Aus diesem Grunde ist unbedingt ein Differentialschutz vorzusehen. Als Schutzgerät wird ein SIPROTEC 7UM62 mit der Bestelloption „Generator Basis“ empfohlen. Diese Option enthält den Untererregungsschutz, um Erregungsprobleme (Ausfall bzw. Regelungsprobleme) und einen Außertrittfall zu erfassen.

Weitere Hinweise zum Einsatz, zur Anschaltung und zur Einstellung der Schutzgeräte werden in den nachfolgenden Kapiteln gegeben.

Thermische Beanspruchung von Motoren und erforderliche Schutzfunktionen

In dem Kapitel wird die thermische Beanspruchung von Motoren behandelt. Es werden die unterschiedlichen Betriebszustände betrachtet und daraus die thermische Beeinflussung abgeleitet. Im zweiten Teil erfolgen Diskussionen zu tauglichen Schutzprinzipien und die prinzipielle Erläuterung der Umsetzung in digitalen Schutzgeräten. Es werden, entnommen aus Motordatenblättern, Hinweise zur Einstellung der Schutzfunktionen gegeben.

■ 1. Erwärmungsvorgänge

Beim Energieumwandlungsprozess von elektrischer in mechanische Energie treten Verluste auf, die zu einer Erwärmung des Betriebsmittels Motor führen. Die konstruktive Ausführung erlaubt bestimmte thermische Belastungen.

Beim Wirksamwerden der Wärmequellen setzt ein Erwärmungsvorgang ein. Die zugeführte Energie wird zunächst in jedem Volumenelement als Wärme gespeichert. Der Anfangsverlauf der Temperaturerhöhung $\vartheta = f(t)$ ist unabhängig von den Wärmewiderständen, über die später die Wärme abgeführt wird. Er ist außerdem keineswegs überall gleich, da in den verschiedenen Wicklungen wie ebenso in den einzelnen Abschnitten des magnetischen Kreises unterschiedliche Verlustdichten herrschen. Der Motor kann deshalb im Allgemeinen nicht als Einkörpersystem aufgefasst werden.

Es bilden sich zwischen den Teilen des Motors und zum umgebenden Kühlmittel Temperaturunterschiede aus, wobei Wärmeströme in Richtung Kühlmittel zu fließen beginnen. Der Temperaturunterschied zwischen Kühlmittel (das auch Luft sein kann) und Maschinenteil wird als *Übertemperatur* bezeichnet. Nach hinreichend langer Zeit stellt sich ein Gleichgewichtszustand der Wärmeströme ein. Es findet dann keine weitere Speicherung von Wärme mehr statt. Die Temperatur hat ihre *Endübertemperatur* erreicht. Den Verlauf der Übertemperatur für charakteristische Stellen innerhalb des Ständers eines Motors zeigt Bild 1.

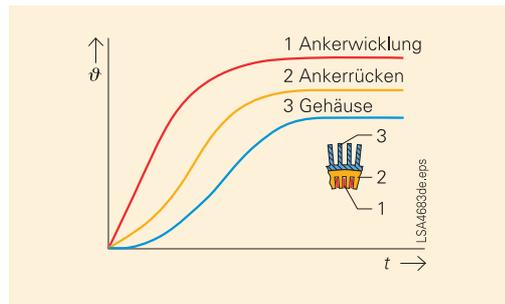


Bild 1 Verlauf der Übertemperatur an drei charakteristischen Stellen des Ständers.

Die *zulässige Übertemperatur* einer elektrischen Maschine ist in erster Linie durch die relativ geringe Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe begrenzt, die zur Isolierung der Wicklungen dienen. Die Isoliersysteme werden hinsichtlich ihrer Wärmebeständigkeit in *Wärmeklassen A bis H* eingeteilt. Die zulässige Übertemperatur einer Wicklung an ihrer heißesten Stelle unterscheidet sich von der zulässigen Temperatur des verwendeten Isoliersystems um die vereinbarte Höchsttemperatur des Kühlmittels (Umgebungstemperatur), die mit 40 °C festgelegt ist. In der Regel wird noch eine Sicherheit von 5 bis 15 K zuge schlagen.

Bei der thermischen Betrachtung eines Motors müssen zwei Betriebsweisen unterschieden werden:

a) Normalbetrieb unter Last

Abhängig vom aufzubringenden Moment wird vom Netz der entsprechende Strom aufgenommen, der konstruktionsabhängig zu der oben beschriebenen Erwärmung führt. Hierbei kann man sich vorrangig auf den Ständer beziehen. Der Motorhersteller legt die Maschine thermisch für eine zulässige Wärmeklasse aus. Der Betrieb unter Bemessungsbedingungen führt zu einer Übertemperatur, die im Allgemeinen einer geringeren Wärmeklasse zugeordnet werden kann. Findet man z. B. die Angabe F/B (ausgelegt/betrieben) in den Motordaten, ist der Motor für die Wärmeklasse F ausgelegt, wird aber nach Wärmeklasse B ausgenutzt. Aus diesen thermischen Reserven ergibt sich eine dauernde Überlastbarkeit von etwa 10 %. Kurzzeitig ist eine höhere Überlastung möglich, jedoch gibt der Hersteller aufgrund der vielfältigen Einflussparameter keine Daten an. Man muss sich an der „thermal-withstand-curve“ orientieren (siehe Bild 2).

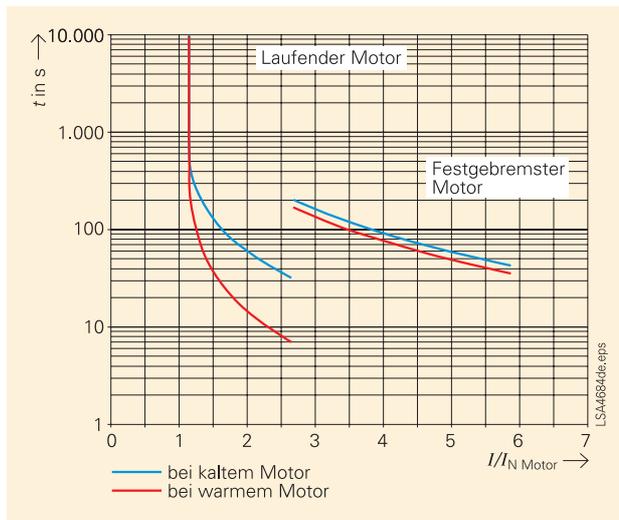


Bild 2 Maximal zulässige thermische Überlastung eines Motors

(Thermische Kupferzeitkonstante (Kurzzeitbetrieb)):	2,7 min
Thermische Zeitkonstante (Dauerbetrieb (S1)):	15 min
Abkühlungszeitkonstante bei Stillstand:	105 min
Wärmeklasse (ausgelegt/betrieben):	F/B

Die Kurven werden sowohl für den kalten als auch warmen Motor angegeben. Warm bedeutet, dass der Motor mit Nenngrößen betrieben wurde und es dann zur Überlastung kam. In der obigen Grafik ist der ungünstigste Fall, der Verlauf der Kupferzeitkonstanten für den Kurzzeitbetrieb, dargestellt. Bei der Schutzeinstellung ist die Zeitkonstante für den Dauerbetrieb heranzuziehen. Der dauernd zulässige Strom kann ebenfalls aus der Kennlinie abgelesen werden und ist nach Bild 2 etwa $1,15 I_{N\text{Motor}}$.

Im amerikanischen Raum (NEMA) wird die Überlastung durch den Servicefactor (SF) beschrieben. Er gibt die zulässige Überlast zur Bemessungsleistung im S1-Betrieb an. Diese Überlastung bezieht sich auf das Gesamtsystem (elektrischer und mechanischer Teil). Nach der NEMA MG1 dürfen dabei die zulässigen Grenzübertemperaturen der entsprechenden Wärmeklasse 10 K höher sein. Die Werte für den Servicefaktor liegen z. B. bei 1,1; 1,15 usw. Wird aber zum Beispiel SF = 1 angegeben, heißt das, dass der Motor nur mit der Bemessungsleistung betrieben werden darf. Der thermische Überlastschutz bezieht sich ausschließlich auf die Motorwicklung. Bei der Angabe von SF = 1 kann man einen dauernd zulässigen Wicklungsüberstrom von 10 % annehmen, da die Auslegung der Isolation in der Regel nach Wärmeklasse F vorgenommen und überwiegend der Motor nach Wärmeklasse B betrieben wird. Bei einem SF = 1,1 können das über 10 % (z. B. durchaus 15 %) sein. Der exakte Wert für den dauernd zulässigen Überlaststrom ist aus der thermischen Kennlinie zu entnehmen (siehe Bild 2).

Zur Erfassung von Übertemperaturen sind ferner pro Phase überwiegend 2 Temperaturfühler (bevorzugt PT100) in der Ständerwicklung eingebaut. Die Motorhersteller haben sie dabei an den thermisch kritischen Punkten platziert. Die Auslösetemperatur lässt sich aus der Wärmeklasse ableiten. F bedeutet eine maximal zulässige Temperatur von 155 °C und für B liegt der Wert bei 130 °C. Letztere Temperatur müsste sich in etwa bei Belastung mit Bemessungsgrößen einstellen. Der Auslösewert ergibt sich abzüglich eines Sicherheitsfaktor von 10 K zu etwa (155 °C – 10 K = 145 °C).

Zu einer zusätzlichen Erwärmung des Läufers kommt es, wenn der Motor an einer *unsymmetrischen Spannung* betrieben wird. Der kritischste Fall ist die Unterbrechung in einem Leiter. Spannungsunsymmetrie bedeutet, dass ein Spannungsgegensystem vorhanden ist, welches einen Gegenstrom antreibt. Dieses Gegendrehfeld führt zu einem Wechselstrom im Läufer (100 Hz Relativgeschwindigkeit) in umgekehrter Drehrichtung. Infolge des Skin效ektes wirkt ein größerer Läuferwiderstand, welcher wiederum zu einer höheren Erwärmung führt. Es kann davon ausgegangen werden, dass 1 % Gegenstromspannung zu etwa 5 % bis 6 % Gegenstrom führt.

Den Ständerstrom kann man über die Ersatzschaltung abschätzen. Dabei ist sie in das Mit- und Gegensystem aufzuteilen. Weil das Gegensystemdrehfeld in negativer Richtung mit der Synchrongeschwindigkeit umläuft, beträgt der Schlupf für das Gegensystem 2-s. In Bild 3 erkennt man sehr gut den Einfluss der unterschiedlichen Läuferwiderstände.

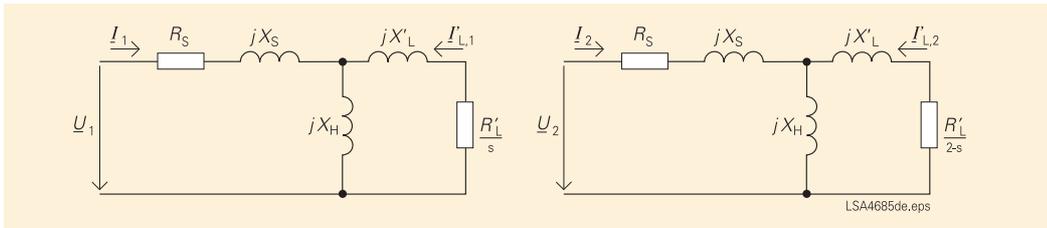


Bild 3 Motorersatzschaltung als Mit- und Gegensystem (links: Mitsystem; rechts: Gegensystem)

Wenn nichts anderes angegeben ist, kann man davon ausgehen, dass etwa 2 % Gegensystemspannung zu keiner zusätzlichen Erwärmung der Motoren führen. Das entspricht einem dauernd zulässigen Gegensystemstrom von etwa 10 %. Steigt der Strom über diesen Wert, ist nach definierten Zeiten auszulösen. Hier werden leider selten Angaben seitens der Motorhersteller gemacht.

b) Anlauf

Beim Anlauf kommt es infolge der Anlaufströme zu einer thermischen Beanspruchung im Läufer. Die typischen Anlaufvorgänge werden im Kapitel „Einführung in die Grundlagen von Asynchron- und Synchronmotoren“ behandelt.

Grundsätzlich sind die Fälle „festgebremster Läufer“ und „sich beschleunigender Läufer“ zu betrachten. Bei läuferkritischen Motoren (überwiegende Anzahl) ist der Festbremsfall aus thermischer Sicht die größere Belastung. Aus diesem Grund gibt der Motorhersteller häufig in der „thermal limit curve“ die thermischen Grenzen des festgebremsten Motors (locked rotor) an. Diese Kurven sind rechts im Bild 2 dargestellt. Beschleunigt der Motor, liegen in der Regel die thermischen Grenzen darüber.

Ferner findet man in den technischen Daten die Anlaufzeiten des Motors sowohl für die Nennspannung als auch für den 80%-Fall. Diese Zeiten gelten bei Anschluss der Arbeitsmaschine.

Zum Beispiel beträgt die Anlaufzeit des Motors 24,0 s bei einem Anlaufstrom von 5,6 I_{N} unter Nennspannungsbedingungen (U_N) sowie 52 s bei 4,17 I_{N} und 0,8 U_N . Aus Bild 2 liest man bei 5,6 I_{N} eine Zeit von etwa 40 s für die Bedingung warm ab, so dass man problemlos die Kennlinie einer Anlaufzeitüberwachung unterhalb der Festbremskennlinie legen kann. Eine Drehzahlkontrolle ist hier nicht zwingend erforderlich.

Eine weitere thermische Beanspruchung ergibt sich aus der Häufigkeit aufeinander folgender **Wiedereinschaltungen** des Motors. Hier unterscheidet der Hersteller zwischen warm und kalt. Häufig findet man die typische Angabe: 3 Einschaltungen aus dem Kalten und 2 Einschaltungen aus dem Warmen. Diese Aussage gilt auch für den Anlauf mit verminderter Spannung (80 %).

Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Anzahl der zulässigen Einschaltungen pro Jahr. Diese liegt zum Beispiel bei 1000 und darf nicht überschritten werden.

■ 2. Schutztechnische Realisierungen

2.1 Thermischer Überlastschutz für den Ständer (Normalbetrieb)

In Punkt 1 wurde herausgearbeitet, dass das Temperaturverhalten komplexer Natur ist und eigentlich durch ein Wärmenetzwerk beschrieben werden müsste. Diese Beschreibung führt zu Differentialgleichungen höherer Ordnung, für die aber die Eingangsparameter fehlen. Aufgrund der begrenzt verfügbaren Daten seitens der Motorhersteller hat sich die vereinfachte Beschreibung durch ein Einkörpermodell durchgesetzt. Bild 4 zeigt das Modell mit der Wärmequelle, ausgeführt als Stromquelle I^2 , der Wärmespeicherung in der Kapazität C_{th} , der Wärmeabgabe über den Widerstand R_{th} und der Umgebungstemperatur ϑ_U . Das Modell basiert auf einer Bezugstemperatur ϑ_0 von 40 °C. Die Temperatur ϑ beschreibt die Übertemperatur des Motors.

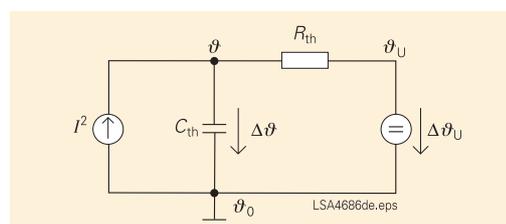


Bild 4 Ersatzschaltung des thermischen Modells

Aus dem Ersatzschaltbild lässt sich nachfolgende Differentialgleichung (Gleichung (1)) ableiten, die sich bei Annahme einer konstanten Bezugstemperatur ϑ_0 weiter vereinfacht.

$$I^2 = C_{th} \frac{d(\vartheta - \vartheta_0)}{dt} + \frac{\vartheta - (\vartheta_U - \vartheta_0)}{R_{th}} \rightarrow$$

$$I^2 R_{th} = R_{th} C_{th} \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta - (\vartheta_U - \vartheta_0) \quad (1)$$

Der maximal zulässige Strom wird bei Annahme einer konstanten Umgebungstemperatur zur maximal zulässigen Temperatur führen ($I_{max}^2 \cdot R_{th} \triangleq \vartheta_{max}$). Normiert man Gleichung (1) mit den maximal zulässigen Größen, so erhält man die programmtechnisch umzusetzende Differentialgleichung. Die Differentialgleichung ist für jeden Leiterstrom separat zu berechnen. Zur Auslösung kommt es, wenn in mindestens einem Leiter der Wert 1 (Grund: es wird mit normierten Größen gerechnet) erreicht wird.

$$I_{p.u.}^2 = \tau_{th} \frac{d\Theta}{dt} + \Theta - \Theta_U \quad (2)$$

mit folgender Normierung

$$I_{p.u.} = \frac{I}{I_{max}} = \frac{I}{k I_N} \quad \Theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_{max}} = \frac{\vartheta}{k^2 \vartheta_N}$$

$$\tau_{th} = R_{th} C_{th} \quad \Theta_U = \frac{\vartheta_U - \vartheta_0}{\vartheta_{max}} = \frac{\vartheta_U - \vartheta_0}{k^2 \vartheta_N}$$

Die Lösung der Differentialgleichung führt zum bekannten Exponentialausdruck. Bei einer sprunghaften Stromerhöhung nähert sich die Temperatur exponentiell an den stationären Wert an.

$$\Theta(t) = (I_{p.u.}^2 + \Theta_U - \Theta_{t=0}) (1 - e^{-t/\tau_{th}}) + \Theta_{t=0} \quad (3)$$

Da alle Werte normierte Werte sind, kann man aus Gleichung (3) die Auslösezeit berechnen, wenn $\Theta(t) = 1$ gesetzt wird. Benutzt man ferner die Normierungsgrößen von Gleichung (2) und geht von einer gemessenen Umgebungstemperatur aus, so lässt sich mit nachfolgender Gleichung die Auslösezeit berechnen. Wird keine Umgebungstemperatur gemessen, so ist für $\vartheta_{U, gemessen} = 40 \text{ °C}$ einzusetzen und das führt zu einer weiteren Vereinfachung von Gleichung (4).

$$t = \tau_{th} \cdot \ln \left(\frac{\frac{1}{k^2} \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 - \frac{1}{k^2} \left(\frac{I_{Vorlast}}{I_N} \right)^2}{\frac{1}{k^2} \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 + \frac{1}{k^2} \left(\frac{\vartheta_{U, gemessen} - \vartheta_0}{\vartheta_N} \right) - 1} \right)$$

Bei der Vorlast sowie der gemessenen Umgebungstemperatur wird ein quasistationärer Zustand (konstant über $5 \tau_{th}$) vorausgesetzt.

Für den Überlastschutz braucht man somit 2 charakteristische Parameter vom Motor, den Faktor k , der den dauernd maximal zulässigen Strom, bezogen auf den Nennstrom, beschreibt und die thermische Zeitkonstante τ_{th} . Bei Messung der Umgebungs-/Kühlmitteltemperatur ist als Normierungsgröße noch die Temperatur erforderlich, die sich bei Nennbedingungen einstellt. Bei fehlender Angabe kann diese über die Temperaturfühler gemessen werden. Bei Betrieb mit unterschiedlicher Last ist die Erwärmungsgleich der Abkühlzeitkonstanten. Wird der Motor jedoch still gesetzt, muss von einer längeren Abkühlung (keine Zwangskühlung durch den Lüfter) ausgegangen werden. Unterschreitet dabei der Strom einen minimalen Wert, kann ein Stillstand angenommen und auf die längere Abkühlzeitkonstante (im Beispiel nach Bild 2 sind das 105 min) umgeschaltet werden.

Es ist nun noch das Verhalten des thermischen Modells beim Einschalten des Motors zu betrachten. Hier wirkt jedoch die thermische Beanspruchung auf den Läufer. Das bedeutet eine eingeschränkte Gültigkeit des Ständermodells bzw. der Einstellwerte. Derzeit werden 2 Strategien verfolgt:

– *Einfrieren des thermischen Speichers bei Anlaufvorgängen*

Damit soll eine Überfunktion des Überlastschutzes bei Anlaufvorgängen vermieden werden.

– *Interne Begrenzung des Anlaufstromes*

Im Falle des Anlaufvorganges wird der dem thermischen Modell zugeführte Strom begrenzt. Damit erfolgt ein „Abbremsen“ der Erwärmung. Die Strombegrenzung sollte bei etwa $2,5 I/I_{N,M}$ liegen (siehe auch Bild 2). Bei langen Anlaufzeiten und möglichen aufeinander folgenden Warmanläufen wird eine weitere Reduzierung der Begrenzung empfohlen. Im Beispiel ist bei einer Anlaufzeit von 52 s (bei $0,8 U_N$) ein Wert von $2 I/I_{N,M}$ sinnvoll.

Um einen Einblick in das Wärmeverhalten des thermischen Modells zu geben, wurden unterschiedliche Betriebszustände angenommen. Bild 5 umfasst dabei folgende Sequenz: Anlauf mit Nennspannung (Anlaufzeit = 24 s), Dauerbetrieb unter Nennbedingungen, Ausschalten und unmittelbares Wiedereinschalten bei abgesenkter Spannung (Anlaufzeit = 52 s), kurzzeitiger Betrieb mit reduzierter Last ($0,9 I/I_{N,M}$) und danach Stillsetzen des Motors. Nach dem Stillsetzen erkennt man sehr gut die Wirkung der längeren Abkühlzeitkonstanten. Im Anlauf wurde der Anlaufstrom für das thermische Modell auf $2 I/I_{N,M}$ begrenzt.

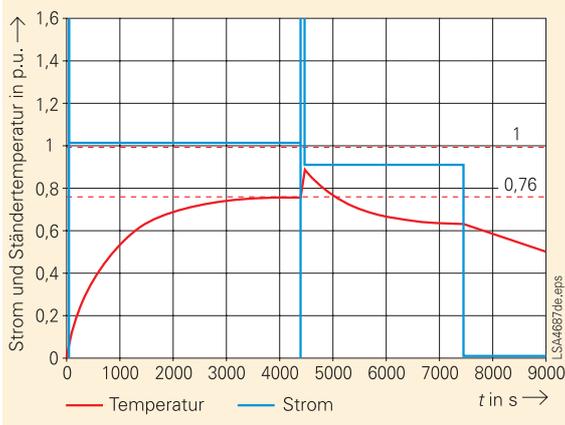


Bild 5 Verhalten des thermischen Modells bei unterschiedlichen Belastungsfällen (Daten: $k = 1,15$; $\tau_{\text{Erwärmung}} = 15 \text{ min}$; $\tau_{\text{Abkühlung}} = 105 \text{ min}$)

Die Auslöseschwelle für das thermische Modell ist 1 (entspricht 100 %). Der größere, aber bereits reduzierte Strom führt während des Anlaufs zu einer sichtbaren Temperaturerhöhung. Die Auslöseschwelle wird jedoch trotz des langen Anlaufs nicht erreicht. Bei Betrieb unter Nennbedingungen ($I = I_{N,M} = 1$) hat der thermische Speicher einen „Füllstand“ von etwa 76 % (Dreisatz: $1,15^2 / 100 \%$ wie $1^2 / x \%$).

2.2 Thermischer Schutz bei unsymmetrischer Spannung (Schieflastschutz)

Spannungsunsymmetrie führt zu einer Stromunsymmetrie, die durch den Gegensystemstrom beschrieben werden kann. Aus den Leiterströmen berechnet der Schutzalgorithmus entsprechend der Definitionsgleichung der symmetrischen Komponenten den Gegensystemstrom, der schutztechnisch zu bewerten ist. Im einfachsten Fall werden Schwellen abgefragt und nach einer eingestellten Verzögerung die Auslösung eingeleitet.

Um den Erwärmungsprozess zu berücksichtigen, ist eine I^2t -Charakteristik nachzubilden, die eine bekannte Charakteristik (z.B. $I^2t = 10 \text{ s}$) bei Synchronmaschinen ist. Die Freigabe der Kennlinie erfolgt, wenn die zulässige Schieflastschwelle (z.B. 10 %) überschritten wird. Bei Unterschreiten ist die Abkühlung vorzunehmen. Als Auslösekennlinie ergibt sich eine inverse Kurve (siehe auch Bild 9).

2.3 Anlaufzeitüberwachung

Ist der Anlaufvorgang zu lang, wird der Läufer thermisch überlastet. Die thermische Grenze (siehe Bild 2) wird durch eine I^2t -Kennlinie beschrieben. Diese Kennlinie muss nachgebildet werden. Man kann folgende Gleichgewichtsbedingung (siehe Gleichung (5)) aufstellen und daraus die zulässige Anlauf- bzw. Festbremszeit ermitteln.

$$I^2 t = I_A^2 t_A \rightarrow t = \left(\frac{I_A}{I} \right)^2 t_A \quad (5)$$

mit:

- I_A maximal zulässiger Anlaufstrom
- t_A maximal zulässige Anlaufzeit
- I gemessener Anlaufstrom

Ist die tatsächliche Zeit länger, so kommt es zu einer Auslösung. Die Auslösekennlinie hat inversen Charakter und passt sich sehr gut an die Anlaufbedingungen (mit Nennspannung sowie verminderte Spannung) an.

Die Berechnung nach Gleichung (5) wird erst freigegeben, wenn auf Anlaufvorgang erkannt wird. Die erforderliche Stromschwelle beträgt für typische Motoren etwa $2,5 I_{N,M}$. Bei Motoren mit reduzierten Anlaufströmen ist die Schwelle entsprechend abzusenken.

Bild 6 zeigt beispielhaft für einen Motor gemessene Anlaufströme/-zeiten. Es ist die sehr gute Anpassung der Schutzcharakteristik an die Anlaufbedingungen zu erkennen.

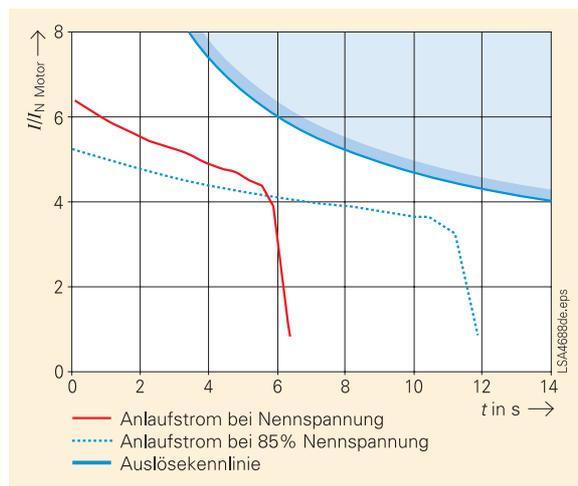


Bild 6 Gemessene Anlaufströme und Auslösecharakteristik

2.4 Wiedereinschaltsperr

Eine unzulässige Erwärmung des Läufers tritt ein, wenn der Motor zu häufig hintereinander eingeschaltet wird. Im einfachsten Fall kann man die zulässigen Grenzwerte durch Zähler überwachen und dann die vorgegebenen Pausenzeiten einhalten. Eine andere Herangehensweise ist die Modellierung der Erwärmung des Läufers, um die thermische Grenze für die zulässigen Wiedereinschaltungen zu ermitteln. Damit kommt man den physikalischen Bedingungen näher und kann den Motor im Allgemeinen besser auslasten.

Zweckmäßig für die Modellierung ist ebenfalls ein Einkörpermodell. Es sind die beiden erforderlichen Parameter k-Faktor für den Läufer (k_L) und die Läuferzeitkonstante τ_L zu finden. Beide Werte sind in der Regel nicht gegeben. Sie können jedoch aus den Herstellerangaben wie Anzahl der Kaltanläufe (n_K) und Warmanläufe (n_W), der Anlaufzeit und dem dazugehörigen Anlaufstrom

abgeleitet werden. Man schafft sich ein Gleichungssystem, welches den kalten und den warmen Zustand mit den bekannten Größen beschreibt und ermittelt daraus die beiden Unbekannten (k_L und τ_L). Die genäherte Lösung zeigt Gleichung (6).

$$k_L \approx \sqrt{\frac{n_K}{n_K - n_W}} \quad \tau_L \approx (n_K - n_W) I_A^2 t_A \quad (6)$$

Diese funktionsintern berechneten Parameter fließen in das thermische Modell (analog zu Gleichung (2)) ein. Hat der thermische Speicher einen entsprechenden Füllstand erreicht, wird die Wiedereinschaltsperrung aktiv. Diese Schwelle liegt bei $(n_K - 1)/n_K$.

Bei Stillstand erfolgt durch Verlängerung der Zeitkonstanten die Berücksichtigung der langsameren Abkühlung. Zuvor wird für eine einstellbare Zeit das thermische Abbild eingefroren, um interne Ausgleichsvorgänge zu berücksichtigen. Erst danach kommt es zur exponentiell abklingenden Abkühlung. Für diese Zeit wird auch eine erneute Zuschaltung verhindert, um den Motor auslaufen zu lassen.

Um Forderungen nach einer Mindeststillstandszeit zu erfüllen, wird nach Blockierung durch die thermische Wiedereinschaltsperrung eine zusätzliche Verzögerungszeit gestartet. Diese Zeit wirkt nur, wenn das thermische Modell früher eine Freigabe erteilt.

Bild 7 zeigt das thermische Verhalten für einen möglichen Betriebsfall. Der Motor wird aus dem Kalten eingeschaltet, läuft für eine bestimmte Zeit mit Nennbedingungen. Danach folgen eine zweimalige Wiedereinschaltung aus dem Warmen und der Betrieb mit 90 % des Nennstromes. Die Zahl 1 beschreibt die thermische Grenze für den Läufer

und 0,67 die Schwelle für die Wiedereinschaltsperrung.

Die 1. Einschaltung aus dem Kalten führt zur Läufererwärmung, die sich auch bei Nennbetrieb einstellen wird. Aus diesem warmen Zustand sind 2 Einschaltungen erlaubt. Man erkennt nach der 2. Einschaltung aus dem Warmen das Überschreiten der Wiedereinschaltsperrung und gleichzeitig strebt die Temperatur zum Grenzwert 1 zu, der der maximal zulässigen Läufertemperatur entspricht. Der anschließende Weiterbetrieb unter Lastbedingungen führt zur entsprechenden Abkühlung des Motors. Würde der Motor jetzt abgeschaltet, könnte er sofort erneut wieder eingeschaltet werden, da genügend thermische Reserve vorhanden ist.

Erfolgt eine Abschaltung dagegen unmittelbar nach dem 2. Anlauf aus dem Warmen, würde die Wiedereinschaltsperrung sofort aktiv werden und eine erneute Zuschaltung verhindern. Dies ist aus thermischer Sicht erst wieder möglich, wenn die 67%-Schwelle unterschritten wird.

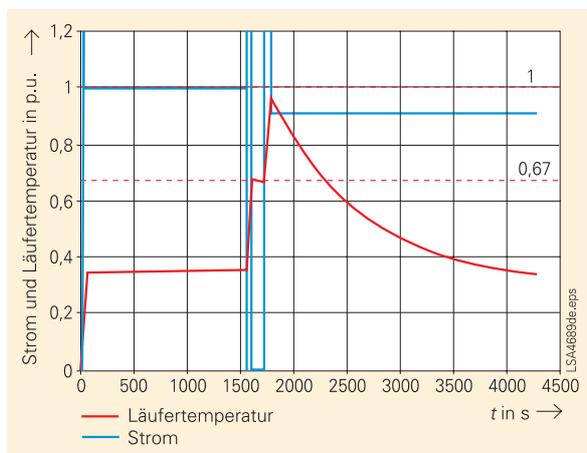


Bild 7 Verhalten des thermischen Läufermodells bei unterschiedlichen Belastungen ($t_A = 52$ s; $I_A = 4.17$ I_{N,M}; $n_K = 3$ und $n_W = 2$)

■ 3. Schutzeinstellung

Im Sinne einer Zusammenfassung werden für die thermischen Schutzfunktionen die Einstellparameter tabellarisch zusammengefasst und kurz kommentiert.

a) Ständerüberlastschutz

Einstellparameter	Wert	Kommentar
Erwärmungszeitkonstante	15 min	Aus dem Motordatenblatt (siehe Bild 2) entnehmen bzw. aus einer angegebenen Kennlinie ausrechnen (es kann Gleichung (4)) dazu benutzt werden).
Abkühlungszeitkonstante	105 min	Aus dem Motordatenblatt (siehe Bild 2) entnehmen bzw. Erfahrungswert, z.B. 7-fache Erwärmungszeitkonstante, einstellen
k-Faktor	1.15	Aus der thermischen Kennlinie entnehmen; fehlt diese, kann ein k-Faktor von 1,1 benutzt werden (siehe Pkt. 1 – Wärmeklasse F/B)
Thermische Warnstufe	90 %	Bei Betrieb mit Nennbedingungen ist der thermische Speicher immer unterhalb von 90 %. Bei der Standardeinstellung von 1,1 sind das 83 % und bei k = 1,15 nur 76 %.
Strombegrenzung	$2 I_{N,M}$	Durch die langen Anlaufzeiten, insbesondere bei abgesenkter Spannung, wurde der Wert etwas geringer gewählt. Bei kurzer Anlaufzeit kann der Wert von $2,5 I_{N,M}$ benutzt werden.
Stromwarnstufe	$1.15 I_{N,M}$	Sie sollte gleich wie der k-Faktor eingestellt werden.

b) Schiefelastschutz

Einstellparameter	Wert	Kommentar
Dauernd zulässige Schiefelast bzw. Warnstufe	$0.1 I_2/I_{N,M}$	Wenn nichts anderes angegeben ist, sollte dieser Wert eingestellt werden. Soll diese Stufe auch auslösen, so ist sie entsprechend zu verzögern (etwa 15 – 30 s); Vorschlag: 20 s.
Auslösestufe	$0.4 I_2/I_{N,M}$	Zweiphasiger Betrieb unter Nennbedingungen führt zu einem Gegensystemstrom von etwa 66 %. Infolge der aufzubringenden Leistung wird er ansteigen und durchaus Werte von 100 % erreichen. Eine Auslöseverzögerung von etwa 3 s wird empfohlen, um Ausgleichsvorgänge abzuwarten.
Thermische Schiefelastzeit ($I_2/I_{N,M})^2 t = K$ (interne Bezeichnung: FAKTOR K)	2 s	Wenn keine Vorgaben vom Motorhersteller gemacht werden, wird die konservative Einstellung von 2 s gewählt. Eigentlich müsste die Zeit größer sein, wenn man eine vergleichbare Wirkung wie bei Synchronmaschinen voraussetzt.
Abkühlzeit des thermischen Modells	200 s	Es ist nachfolgende Beziehung zu nutzen: $t_{\text{Abkühl}} = \frac{K}{\left(\frac{I_{2,\text{zul}}}{I_{N,M}}\right)^2} = \frac{2 \text{ s}}{0,1^2} = 200 \text{ s}$

c) Anlaufzeitüberwachung

Einstellparameter	Wert	Kommentar
Anlaufstrom	$5.6 I_{N,M}$	Aus dem Motordatenblatt (Anlaufkurven) entnehmen.
Maximal zulässige Anlaufzeit	35 s	Hierzu sind die angegeben Anlaufzeiten mit den Kennlinienzeiten zu vergleichen. Ist ein ausreichender Sicherheitsabstand vorhanden, legt man sich unter die thermische Kennlinie. Nach Bild 2 sind bei $5,6 I_{N,M}$ im warmen Zustand 40 s zulässig. Die Anlaufzeit des Motors war bei diesem Strom mit 24 s angegeben. Gewählte zulässige Anlaufzeit: 35 s
Anlaufkennung	$2 I_{N,M}$	Bei abgesenkter Spannung beträgt der Anlaufstrom $4,17 I_{N,M}$ und ferner wurde die Strombegrenzung beim Überlastschutz auf $2 I_{N,M}$ festgelegt. Bei Standardmotoren kann der typische Wert von $2,5 I_{N,M}$ benutzt werden.

d) Wiedereinschaltsperr

Einstellparameter	Wert	Kommentar
Anlaufstrom	4.17 I _{NM}	Aus dem Motordatenblatt wird der Strom bei der längsten Anlaufzeit genommen. Das ist der Wert bei abgesenkter Spannung.
Anlaufzeit	52 s	Zum Strom zugehörige Zeit wählen; läuft ein Motor deutlich schneller an, z.B. in 2,6 s, kann man etwas großzügiger mit der Einstellung sein. Hier wählt man den untersten Einstellwert von 3 s.
Kaltanläufe	3	Aus den Motordaten entnehmen; fehlen Vorgaben, ist der Wert 3 anzunehmen.
Warmanläufe	2	Aus den Motordaten entnehmen; fehlen Vorgaben, kann man den Wert 2 annehmen.
Läufertemperatenausgleichszeit	1 min	Diese Zeit wird als praktikabel angesehen und berücksichtigt auch das Auslaufen bis zum Stillstand. Hinweis: Während dieser Zeit ist eine erneute Zuschaltung des Motors nicht möglich. Soll nur eine Blockierung bei Erreichen der thermischen Grenze erfolgen, so ist die Zeit auf Null zu stellen.
Verlängerung der Zeitkonstante bei Stillstand	5	Bei langen Anlaufzeiten wird dieser Wert empfohlen. Er führt zu einer Freigabe der Wiedereinschaltsperr nach etwa 30 min. Sind die Anlaufzeiten deutlich kürzer, ist mindestens der Wert 10 zu wählen.
Mindestsperrzeit der Wiedereinschaltsperr	30 min	Gibt es keine Angaben, wird eine Zeit zwischen 15 min und 30 min empfohlen. Die längere Zeit ist bei längeren Anläufen zu wählen.

e) Resultierende Kennlinien aus den Schutzzeinstellwerten

In Analogie zu Bild 2 zeigt Bild 8 die Auslösezeiten der eingestellten thermischen Kennlinien. Links im Bild ist die thermische Überlastschutzkennlinie und rechts die Charakteristik der Anlaufzeitüberwachung zu sehen. Es wurde zusätzlich die „festgebremste Läufer“ Kennlinie des Herstellers (Kurve kurz darüber) dargestellt.

Bild 9 zeigt das Auslöseverhalten bei Schiefblast. Neben der thermischen Kennlinie wurden auch die 2 unabhängigen Zeit-Kennlinien eingetragen.

Das Verhalten der Wiedereinschaltsperr für die gewählten Einstellparameter mit Bild 7 hinreichend erläutert worden.

Literatur:

- [1] IEC60034-1 – Rotating electrical machines. Part1: Rating and performance, Release 2004
- [2] IEC62114 – Electrical insulation systems (ISM). Thermal classification, Release 2001

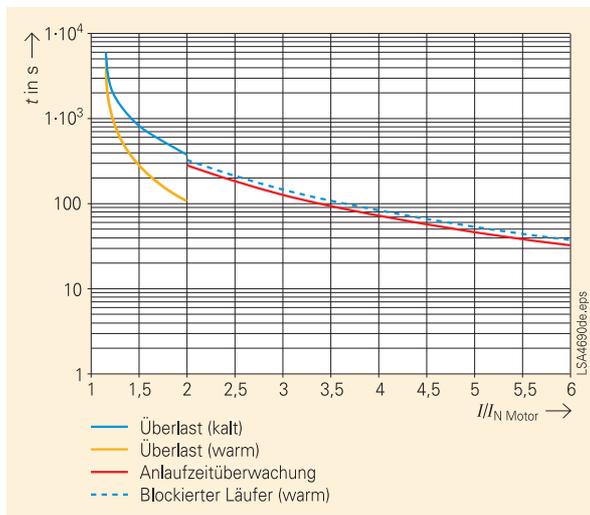


Bild 8 Thermische Kennlinien gemäß Einstellung

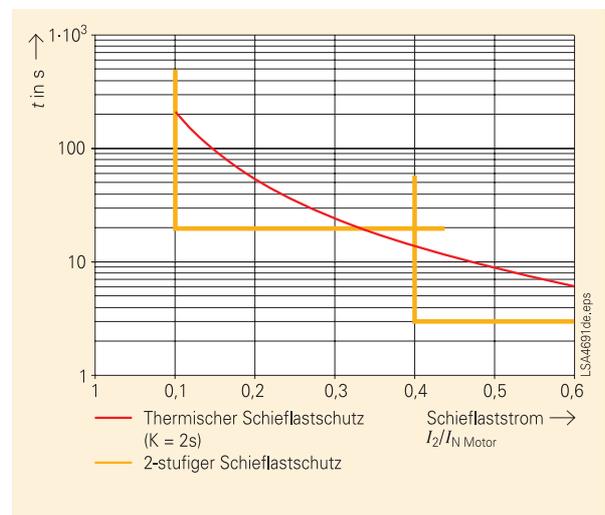


Bild 9 Schieflastschutzkennlinien

Stromwandler- anforderungen beim Motorschutz

Der Beitrag befasst sich mit der Auslegung von Stromwandlern für Motorschutzanwendungen. Es werden dabei die unterschiedlichen Betriebsfälle und typische Schutzprinzipien betrachtet. Die Auslegung wird an Beispielen erläutert, wobei zwei Vorgehensweisen gewählt wurden, die Überprüfung vorhandener Stromwandler und die Neuauslegung. Grundlage für die Betrachtungen bilden unter anderem die einschlägigen IEC-Normen (IEC 60044-1, IEC 60044-6).

■ Verwendete Formelzeichen/Begriffe

K_{ssc} =	Faktor des symmetrischen Bemessungs-Kurzschlussstromes (Beispiel: Wandler Kl. 5P20 → $K_{ssc} = 20$)
K'_{ssc} =	effektiver Faktor des symmetrischen Kurzschlussstromes
K_{td} =	transienter Bemessungs-Dimensionierungsfaktor
I_{pn} =	primärer Wandlernennstrom
I_{sn} =	sekundärer Wandlernennstrom
R_{ct} =	Sekundärwicklungswiderstand in Ω bei 75 °C (oder andere spezifizierte Temperatur)
R_b =	ohmsche Bemessungsbürde in Ω
R'_b =	$R_L + R_{Relais}$ = angeschlossene Bürde in Ω
R_{Relais} =	Relaisbürde in Ω
$R_L = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A}$	
mit:	
l =	einfache Leiterlänge zwischen Stromwandler und Gerät in m
ρ =	spezifischer Widerstand = 0,0175 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ (Kupfer) bei 20 °C (oder anderer spezifizierter Temperatur)
A =	Leiter-Querschnitt in mm^2
I_A =	Anlaufstrom des Motors
$I_{A \text{ trans}}$ =	transienter Anlaufstrom
k_{trans}	Faktor für den transienten Anlaufstrom

Für Stromwandler, die über den Faktor des symmetrischen Bemessungs-Kurzschlussstromes K_{ssc} und die ohmsche Bemessungsbürde R_b definiert sind (z.B. 5P, 10P), kann der effektive Faktor des symmetrischen Kurzschlussstromes K'_{ssc} nach folgender Formel berechnet werden:

$$K'_{ssc} = K_{ssc} \cdot \frac{R_{ct} + R_b}{R_{ct} + R'_b}$$

Für die Stabilität bei durchfließendem Strom und die Auslegung der Wandler ist der Anlaufvorgang maßgebend.

Anforderung aus dem Motoranlauf

Der Anlaufstrom I_A liegt im Bereich 4 bis 7 mal I_N bei einer Gleichstromzeitkonstanten T_A von etwa 40 ms (< 1 MW) bis 70 ms (> 1 MW). Überlagert ist ein Rush-Strom der gleichen Größenordnung, der jedoch in zwei bis drei Perioden abklingt, entsprechend einer Zeitkonstanten T_{rush} von etwa 20 ms.

Der gesamte Einschaltstrom ist deshalb:

$$I_{A \text{ trans}} = k_{trans} \cdot I_A, \text{ mit } k_{trans} = 2 - 2,5$$

Der mindestens geforderte Faktor des symmetrischen Kurzschlussstromes K'_{ssc} lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$K'_{ssc} \geq K_{td} \cdot \frac{I_{A \text{ trans}}}{I_{pn}}$$

Es ist folgende Bedingung einzuhalten:

$$K'_{ssc} (\text{gefordert}) \leq K'_{ssc} (\text{effektiv})$$

Beispiel 1 UMZ, Überprüfung des vorhandenen Stromwandlers

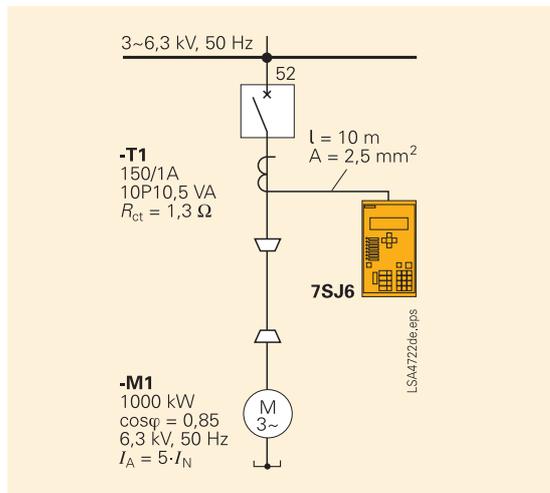


Bild 1

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi} = \frac{1000 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \text{ kV} \cdot 0,85} = 107,8 \text{ A}$$

$$I_A = 5 \cdot I_N = 5 \cdot 107,8 \text{ A} = 537,5 \text{ A}$$

$$I_{A \text{ trans}} = 2 \cdot I_A = 2 \cdot 537,5 \text{ A} = 1075 \text{ A}$$

$$\text{Einstellwert } I \gg: 1,3 \cdot I_{A \text{ trans}} = 1,3 \cdot 1075 \text{ A} = 1397 \text{ A}$$

Hinweis:

Gilt bei $t \gg = 0 \text{ ms}$

Wird z.B. eine Zeit $t \gg = 50 \text{ ms}$ eingestellt,

kann der Einstellwert reduziert werden.

(siehe Kapitel „Schutz von Motoren mittlerer Leistung“)

$$\text{Forderung: } K'_{\text{ssc}} \geq \frac{I \gg}{I_{\text{pn}}} = \frac{1397 \text{ A}}{150 \text{ A}} = 9,3 \text{ mindestens jedoch } 20$$

Die Nennbürde des Wandlers in Ω beträgt:

$$R_b = \frac{S_n}{I_{\text{sn}}^2} = \frac{5 \text{ VA}}{1 \text{ A}^2} = 5 \Omega$$

Die tatsächlich angeschlossene Bürde (Leitung + Gerät) beträgt:

$$R'_b = R_L + R_{\text{Relais}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A} + 0,1 \Omega = \frac{2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot 10 \text{ m}}{2,5 \text{ mm}^2} + 0,1 \Omega = 0,24 \Omega$$

Damit ergibt sich der effektive Faktor:

$$K'_{\text{ssc}} = K_{\text{ssc}} \cdot \frac{R_{\text{ct}} + R_b}{R_{\text{ct}} + R'_b} = 10 \cdot \frac{1,3 \Omega + 5 \Omega}{1,3 \Omega + 0,24 \Omega} = 40,9$$

K'_{ssc} gefordert = 20, K'_{ssc} effektiv = 40,9 \rightarrow Die Wandlerdimensionierung ist korrekt.

Beispiel 2 Differentialschutz, Auslegung und Überprüfung eines Stromwandlers

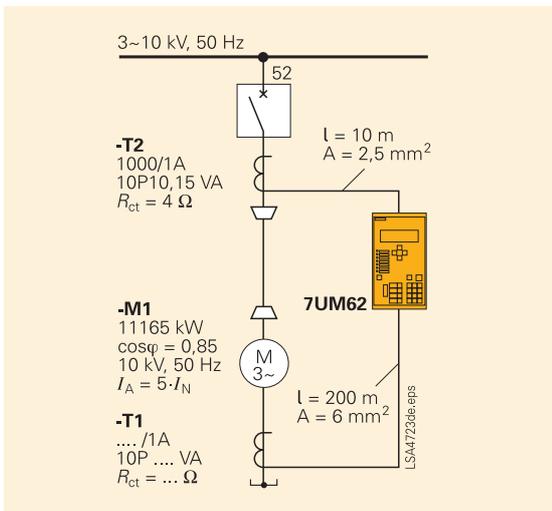


Bild 2

2.1 Auslegung des Stromwandlers – T1

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi} = \frac{11165 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV} \cdot 0,85} = 758 \text{ A}$$

Es wird ein Wandler mit $I_{pn}=1000 \text{ A}$ gewählt.

$$I_A = 5 \cdot I_N = 5 \cdot 758 \text{ A} = 3790 \text{ A}$$

$$I_{A \text{ trans}} = 2 \cdot I_A = 2 \cdot 3790 \text{ A} = 7580 \text{ A}$$

$$\text{Forderung: } K'_{\text{ssc}} \geq K_{\text{td}} \cdot \frac{I_{A \text{ trans}}}{I_{pn}} = 5 \cdot \frac{7580 \text{ A}}{1000 \text{ A}} = 37,9$$

mit $K_{\text{td}} = 5$ für Generator-/Motordifferentialschutz (Katalog SIP 2006)

Wandlerklasse soll 10P sein mit 20 VA Nennbürde und Innenwiderstand $R_{ct} \leq 4 \Omega$

Die Nennbürde des Wandlers in Ω beträgt:

$$R_b = \frac{S_n}{I_{sn}^2} = \frac{20 \text{ VA}}{1 \text{ A}^2} = 20 \Omega$$

Die tatsächlich angeschlossene Bürde (Leitung + Gerät) beträgt:

$$R'_b = R_L + R_{\text{Relais}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A} + 0,1 \Omega = \frac{2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot 200 \text{ m}}{6 \text{ mm}^2} + 0,1 \Omega = 1,266 \Omega$$

Damit ergibt sich der Bemessungsfaktor:

$$K_{\text{ssc}} \geq \frac{R_{ct} + R'_b}{R_{ct} + R_b} \cdot K'_{\text{ssc}} = \frac{4 \Omega + 1,266 \Omega}{4 \Omega + 20 \Omega} \cdot 37,9 = 8,3$$

Es wird $K_{\text{ssc}} = 10$ gewählt

Damit sind alle erforderlichen Wandlerdaten vorhanden:

$$1000 \text{ A/1A}, 10\text{P}10, 20 \text{ VA}, R_{ct} \leq 4 \Omega$$

2.2 Überprüfung des vorhandenen Wandlers – T2

$K'_{ssc} = 37,9$ (aus Wandlerauslegung – T1)

Die Nennbürde des Wandlers in Ω beträgt:

$$R_b = \frac{S_n}{I_{sn}^2} = \frac{15 \text{ VA}}{1 \text{ A}^2} = 15 \Omega$$

Die tatsächlich angeschlossene Bürde (Leitung + Gerät) beträgt:

$$R'_b = R_L + R_{\text{Relais}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A} + 0,1 \Omega = \frac{2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot 10 \text{ m}}{2,5 \text{ mm}^2} + 0,1 \Omega = 0,24 \Omega$$

Damit ergibt sich der effektive Faktor:

$$K'_{ssc} = K_{ssc} \cdot \frac{R_{ct} + R_b}{R_{ct} + R'_b} = 10 \cdot \frac{4 \Omega + 15 \Omega}{4 \Omega + 0,24 \Omega} = 44,8$$

K'_{ssc} gefordert = 37,9, K'_{ssc} effektiv = 44,8 → Die Wandlerdimensionierung ist korrekt.

Hinweis: Im Gegensatz zum Sternpunktwandler (-T1) kann die erforderliche Scheinleistung etwas geringer sein, da die Entfernung zum Schutz deutlich kürzer ist. Ist die endgültige Entfernung nicht klar, ist der ungünstigste Fall zu rechnen und es sind identische Stromwandler vorzusehen.

Beispiel 3 Differentialschutz mit Durchführungswandlern

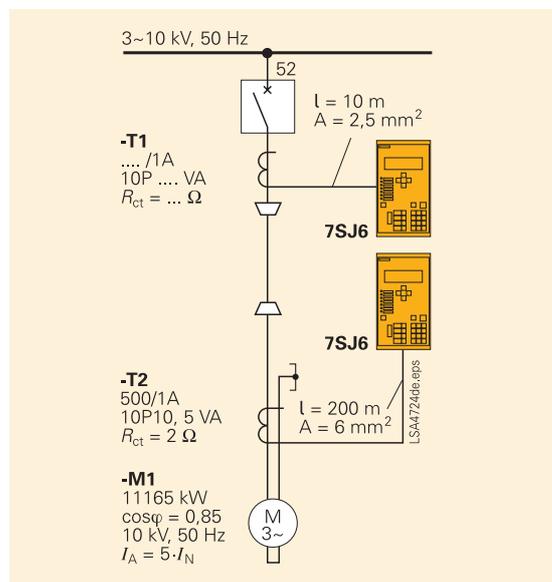


Bild 3

3.1 Stromwandler – T1

Mit diesem Stromwandler arbeiten die klassischen Motorschutzfunktionen (Überlast, Anlaufüberwachung, Schiefast ...)

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi} = \frac{11165 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV} \cdot 0,85} = 758 \text{ A}$$

Es wird ein Wandler mit $I_{pn} = 1000 \text{ A}$ gewählt.

$$I_A = 5 \cdot I_N = 5 \cdot 758 \text{ A} = 3790 \text{ A}$$

$$I_{A \text{ trans}} = 2 \cdot I_A = 2 \cdot 3790 \text{ A} = 7580 \text{ A}$$

$$\text{Einstellwert } I \gg : 1,3 \cdot I_{A \text{ trans}} = 1,3 \cdot 7580 \text{ A} = 9854 \text{ A}$$

Hinweis:

Gilt bei $t \gg = 0 \text{ ms}$

Wird z. B. eine Zeit $t \gg = 50 \text{ ms}$ eingestellt,

kann der Einstellwert reduziert werden.

(siehe Kapitel „Schutz von Motoren mittlerer Leistung“)

$$\text{Forderung: } K'_{\text{ssc}} \geq \frac{I \gg}{I_{pn}} = \frac{9854 \text{ A}}{1000 \text{ A}} = 9,85 \quad \text{mindestens jedoch } 20$$

Die Wandlerklasse soll 10P sein, mit 5 VA Nennbürde und einem Innenwiderstand $R_{ct} \leq 4 \Omega$.

Die Nennbürde des Wandlers in Ω beträgt:

$$R_b = \frac{S_n}{I_{sn}^2} = \frac{5 \text{ VA}}{1 \text{ A}^2} = 5 \Omega$$

Die tatsächlich angeschlossene Bürde

(Leitung + Gerät) beträgt:

$$R'_b = R_L + R_{\text{Relais}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A} + 0,1 \Omega = \frac{2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot 10 \text{ m}}{2,5 \text{ mm}^2} + 0,1 \Omega = 0,24 \Omega$$

Damit ergibt sich der Bemessungsfaktor:

$$K_{\text{ssc}} \geq \frac{R_{ct} + R'_b}{R_{ct} + R_b} \cdot K'_{\text{ssc}} = \frac{4 \Omega + 0,24 \Omega}{4 \Omega + 5 \Omega} \cdot 20 = 9,42$$

Es wird $K_{\text{ssc}} = 10$ gewählt

Damit sind alle erforderlichen Wandlerdaten vorhanden:

$$1000 \text{ A/1 A}, 10\text{P}10, 20 \text{ VA}, R_{ct} \leq 4 \Omega$$

3.2 Durchführungswandler – T2

Bei Maschinen, die über Kabel angeschlossen werden, lässt sich mit dieser Methode ein sicherer Differentialschutz mit hoher Ansprechempfindlichkeit realisieren. Voraussetzung ist, dass die drei Phasen von der Sternpunktseite getrennt zurückgeführt und in Gegenrichtung durch die Durchführungswandler geführt werden.

Bei fehlerfreier Maschinenwicklung heben sich die Ströme im Wandler auf und es fließt kein Strom in das (Differential-) Stromrelais. Der Stromvergleich erfolgt hochgenau ohne Sättigungsprobleme als magnetischer Selbstabgleich (self-balancing). Es ist keine Stabilisierung erforderlich, das heißt, es können einfache Stromrelais eingesetzt werden. Der Ansprechwert kann auf 2 bis 5 % Maschinennennstrom eingestellt werden. Anstelle von zwei 7SJ6 kann auch ein 7UM62 eingesetzt werden, wobei dem Durchführungswandler die Überstromschutzfunktion zuzuordnen ist.

Wandleranforderung für -T2

Das (Differential-) Stromrelais muss bei stromstarken inneren Fehlern ansprechen.

Da der Einstellwert sehr gering ist und bei fehlerfreiem Betrieb der Summenstrom null ist, wird ein Wandler mit 500 A/1 A, 10P10, 5 VA,

$R_{ct} = 2 \Omega$ gewählt mit der Forderung:

$K'_{ssc} \geq 20$ (analog zum UMZ-Schutz)

Die Nennbürde des Wandlers in Ω beträgt:

$$R_b = \frac{S_n}{I_{sn}^2} = \frac{5 \text{ VA}}{1 \text{ A}^2} = 5 \Omega$$

Die tatsächlich angeschlossene Bürde (Leitung + Gerät) beträgt:

$$R'_b = R_L + R_{\text{Relais}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A} + 0,1 \Omega = \frac{2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot 200 \text{ m}}{6 \text{ mm}^2} + 0,1 \Omega = 1,266 \Omega$$

Damit ergibt sich der effektive Faktor:

$$K'_{ssc} = K_{ssc} \cdot \frac{R_{ct} + R_b}{R_{ct} + R'_b} = 10 \cdot \frac{2 \Omega + 5 \Omega}{2 \Omega + 1,266 \Omega} = 21,4$$

K'_{ssc} gefordert = 20, K'_{ssc} effektiv = 21,4 → Die Wandlerdimensionierung ist korrekt

■ Zusammenfassung

Die Anforderung an die Stromwandler wird neben dem Anlaufvorgang auch durch die Forderungen des Schutzprinzips bestimmt. Weitere wichtige Größen sind die Bürde durch die Zuleitung und auch die Innenbürde des Stromwandlers. Die in den Beispielen gewählten Stromwandlertypen können durchaus zur Orientierung genutzt werden. Es wird aber dennoch generell eine kurze Überprüfung empfohlen.

Schutz von Motoren kleiner Leistung

Im Folgenden werden Schutzprinzipien sowie Einstellungen für den Schutz eines kleinen (Asynchron-) Motors diskutiert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Auslegung des Erdfehlerschutzes für geerdete, isolierte und

gelöschte Netze stellvertretend für alle Arten und Größen von Motoren. Als bevorzugte Schutzgeräte für kleine Motoren gelten der 7SJ600 bzw. der 7SJ602.

■ 1. Verwendete Schutzfunktionen

Schutzfunktion bzw. Messverfahren	Abkürzung	ANSI
Überstromzeitschutz Phase	$I >>, I >, I_p$	50, 51
Erdschluss ungerichtet/ gerichtet *, **	$I_{EE\ ger. >>}, I_{EE\ ger. >}, U_E >$	51N, 51Ns, 67Ns, 59N
Verlagerungsspannungsschutz	$U_E >$	59N
Überlastschutz	$I^2 t >$	49
Anlaufzeitüberwachung	$I_A^2 t$	48
Wiedereinschaltsperr	$I^2 t$	66, 49R
Schieflastschutz	$I_2 >, t = f(I_2)$	46
Temperaturüberwachung **	⌘ (Theribox)	38

* je nach Sternpunktbehandlung
und Netztopologie notwendig

** nur mit 7SJ602

Folgende Schutzfunktionen sind verfügbar:

7SJ600:

Überstromzeitschutz Phase/Erde, Überlastschutz, Anlaufzeitüberwachung, Wiedereinschaltsperr, Schieflastschutz.

7SJ602 (ab V3.5) zusätzlich:

Empfindlicher Erdfehlerschutz
Gerichteter Erdschlussschutz für isolierte und
kompensierte Netze
Unterstromzeitschutz
Temperaturüberwachung mittels Theribox

Neben den hier vorgestellten SIPROTEC-Geräten 7SJ600 und 7SJ602 eignen sich natürlich auch die 7SJ61,62,63,64 der Reihe SIPROTEC 4 mit größerem Funktionsumfang, siehe hierzu Kapitel zum Schutz von Motoren mit mittlerer und hoher Leistung.

Mögliche Anschaltung des 7SJ602 für isoliertes oder gelöstes Netz mit Erdschlussrichtungsbestimmung. Weitere Beispiele, siehe Handbuch.

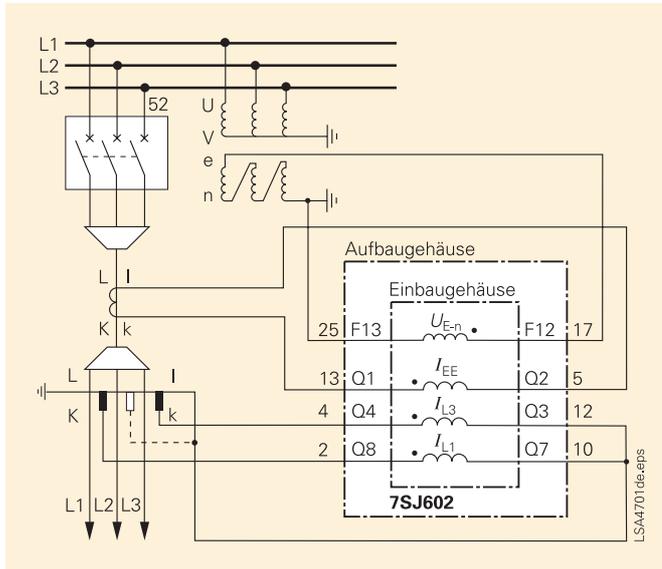


Bild 1 Anschaltung mit 3 Stromeingängen I_{L1} - I_{L3} - I_{EE} für empfindlichen Erdschleifenschutz und Verlagerungsspannungseingang U_{E-n}

2. Vorhandene Motordaten

Größe	Wert
Leistung	460 kW
Nennspannung	6 kV
Motornennstrom	48 A
Max. Anlaufstrom (bei 100 % U_N)	$312 \text{ A} = 6,5 \cdot I_{N, M}$
Anlaufzeit (bei 100 % U_N)	2,1 s
Erwärmungszeitkonstante	40 min
Abkühlzeitkonstante im Stillstand	240 min
Max. thermischer Dauerstrom	$58 \text{ A} = 1,2 \cdot I_{N, M}$
Max. Festbremszeit	18 s bei $6,5 \cdot I_{N, M}$

Es werden ein Stromwandler 75 A/1 A für die Phasen und ein Kabelumbauwandler 60 A/1 A sowie Spannungswandler 6 kV/100 V gewählt.

3. Allgemeine Netzdaten

Die Strom- und Spannungswandlerdaten und die Art des Anschlusses werden im Gerät unter „1100 Anlagendaten/Leistungsdaten“ eingegeben

Hier die Parameter eines 7SJ602 aus DIGSI:

Nr.	Parameter	Wert
1100	Anlagen-/Leistungsdaten	
1101	Nennfrequenz	fN 50 Hz
1105	Wandler-Nennstrom, primär	75 A
1106	Wandler-Nennstrom, sekundär	1 A
1111	Anpassungsfaktor für Erdstrom (lee/lph)	0.800
1112	Wandler Nennstrom empf. Erde sekundär	1 A
1113	Wandler-Nennspannung primär	6.00 kV
1114	Wandler-Nennspannung sekundär	100 V
1115	Leistungs-/Energierichtung invertieren	aus
1116	Stromschwelle Leistungsschalter geschl.	0.10 I/In
1118	Motornennstrom bez. auf Wandlernennstrom	0.64
1119	Anlaufstrom bez. auf Motornennstrom	6.5
1120	Maximale zulässige Anlaufzeit	8.0 s
1121	Thermische Abbilder bei Anlauf löschen	ja
1134	Mindestdauer des Auskommandos	0.15 s
1135	Maximale Dauer des Einkommandos	1.00 s

1118: Für die Motorschutzfunktionen „Anlaufzeitüberwachung“ und „Wiedereinschaltsperr“ werden die Angaben auf Motornennstrom über diesen Einstellwert bezogen. 1119: Motoranlauf oder -festbremsstrom. 1120: Die Läuferblockierzeit beträgt für $6,5 I_{N, M}$ 18 s, die Hochlaufzeit für die im Beispiel verwendete Pumpe von 422 kW beträgt 2,1 s. Als Zwischenwert wurde 8 s gewählt (siehe auch Kommentare bei Anlaufzeitüberwachung).

■ 4. Schutzfunktionen

4.1 Überstromzeitschutz Phase

Nr.	Parameter	Wert
1300	Bedienblock: Phasenstromzeitschutz	
1301	Überstromzeitschutz Phasen ein/aus	ein
1302	Dauer der Anregeschwellenumschaltung	10.00 s
1303	Anregestrom Schnellauslösestufe	1.2 I _N
1304	Anregestrom Schnellauslösestufe (dyn.)	6.3 I _N
1305	Phasenanstrom Hochstromstufe UMZ	1.2 I _N
1306	Phasenanstrom Hochstromstufe UMZ (dyn.)	6.3 I _N
1307	Verzögerungszeit Hochstromstufe UMZ PH	0.05 s
1308	Phasenanstrom Überstromstufe UMZ	1.2 I _N
1309	Phasenanstrom Überstromstufe UMZ (dyn.)	1.2 I _N
1310	Verzögerungszeit Überstrom UMZ PH	10.00 s
1311	Messwiederholung für Phasenanstrom	nein
1319	Hand-Ein-Behandlung	I>> unverzögert

Es wird mit dynamischen Schwellen gearbeitet, d.h., während des erhöhten Stromes bei Motoranlauf werden die Überstromstufen $I_{>>>}$ (1303) und $I_{>>}$ (1305) entsprechend angehoben (1304: $I_{>>> \text{dyn}}$, 1306: $I_{>> \text{dyn}}$) und nach dem Anlauf wieder abgesenkt (Haltezeit 1302: 10 s). Vorteil: Während des normalen Betriebes ist eine empfindliche Einstellung mit kurzer Auslösezeit möglich. Zusätzlich wird als Reservestufe die $I_{>}$ mit einer Auslösezeit (1310) länger als die Anlaufzeit betrieben. Alle Stufen sind auf den 1,5-fachen maximalen Betriebsstromwert eingestellt, z. B. $I_{>>> \text{dyn}} = 1,5 \cdot 6,5 \cdot 0,64 = 6,24$
6,5: max. Anlaufstrom,
0,64: Umrechnung Motor-Wandlernennstrom.
 $I_{>>} = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 0,64 = 1,15$
1,2: max. therm. Dauerstrom,
0,64: Umrechnung Motor-Wandlernennstrom.

4.2 Schieflastschutz

Es existieren keine Angaben des Motorherstellers, so dass folgende Einstellungen als Richtwert gelten können

Nr.	Parameter	Wert
1500	Schieflastschutz	
1501	Status des Schieflastschutzes	ein
1502	Ansprechwert der Auslösestufe I gegen >	8 %
1503	Auslöseverzögerung der Stufe I gegen >	20.00 s
1504	Ansprechwert der Auslösestufe I gegen >>	26 %
1505	Auslöseverzögerung der Stufe I gegen >>	3.00 s

Die Werte beziehen sich auf den Wandlernennstrom, 1502 und 1504 sind auf etwa 10 % bzw. 40 % des Motornennstromes eingestellt. Weitere Information siehe im Kapitel „Thermische Beanspruchung von Motoren und erforderliche Schutzfunktionen.“

4.3 Überlastschutz

Der Überlastschutz dient zum Schutz des Ständers vor unzulässiger Erwärmung.

Nr.	Parameter	Wert
2700	Überlastschutz	
2701	Überlastschutz	ein
2702	K-Faktor	0.77
2703	Zeitkonstante	60.0 min
2704	Zeitfaktor bei Stillstand	4.00
2705	Thermische Warnstufe	90 %

Alle Werte beziehen sich auf Wandlernennstrom. 2702: der Wert kann aus der „thermal withstand curve“, der thermischen Belastbarkeitskennlinie des Motors abgelesen werden und ist der asymptotische Wert der Kennlinie unten. Im Beispiel ist

$$k = 1,2 \cdot \frac{I}{I_{N, M}}$$

Auf Wandlernennstrom bezogen:

$$k = 1,2 \cdot \frac{I_{N, M}}{I_{N, Wdl}} = 1,2 \cdot 0,64 = 0,77$$

2703 und 2704 stammen aus dem Datenblatt; Achtung: für 2703 muss die thermische Zeitkonstante im Dauerbetrieb und nicht die Kupferzeitkonstante für Kurzzeitbetrieb verwendet werden.

2705: Die Warnstufe spricht an, sobald die berechnete Temperatur 90 % der maximal zulässigen Temperatur erreicht.

4.4 Anlaufzeitüberwachung

Sie dient dem Schutz des Läufers während des Motoranlaufes. Empfohlen wird, eine maximale Anlaufzeit zuzulassen, welche zwischen der realen Anlaufzeit (2,1 s) und der max. Festbremszeit (18 s) liegt, um einerseits nicht zu empfindlich bei längeren Anlaufzeiten zu reagieren und den Motor unnötig abzuschalten und andererseits aber auch nicht an das absolute thermische Limit der Läuferisolierung zu gehen. Beim 7SJ602 sind beide Werte im Parameterblock der Anlagendaten untergebracht und werden dort beschrieben.

Nr.	Parameter	Wert
2800	Anlaufzeitüberwachung	
2801	Anlaufzeitüberwachung	ein
2803	Basiswert I_A für Anlaufzeitüberwachung	1.6 I/In
2804	Blockierung der $I > I_p$ Stufen bei Anlauf	nein

2803: Steigt der gemessene Phasenstrom über diesen Wert, so wird auf Motoranlauf erkannt und die Funktion aktiv geschaltet. Ein guter Wert für die Anlaufenerkennung ist der 2,5-fache Motor-nennstrom $I_A = 2,5 \cdot 0,64 = 1,6$. 2804 bietet die Möglichkeit, die Überstromstufen zu blockieren, um eine Überstromauslösung bei Motoranlauf zu vermeiden. Unser Beispiel verwendet jedoch die dynamische Schwellenanhebung während des Anlaufs sowie eine Reservestufe $I >$ mit einer Auslösezeit länger als der Motoranlauf, sodass diese nicht blockiert werden darf.

4.5 Wiedereinschaltsperr

Diese Funktion verhindert ein zu häufiges Einschalten des Motors hintereinander. Da die Anlaufzeitüberwachung kein thermisches Gedächtnis besitzt, würde sie beliebig viele Anläufe direkt hintereinander zulassen, solange nur die max. Hochlaufzeit nicht überschritten würde. Der Motorhersteller lässt jedoch i.d.R. nur 3 Anläufe aus dem kalten (4503 + 4504) und 2 aus dem warmen Betriebszustand (4503) zu.

Nr.	Parameter	Wert
4500	Wiedereinschaltsperr	
4501	Wiedereinschaltsperr	ein
4502	Läuferfermentperaturausgleichszeit T AUSGL	1.0 min
4503	Max. zulässige Anzahl von Warmanläufen	2
4504	Differenz zwischen Warm- und Kaltanläufen	1
4505	Faktor für Tau bei Motorstillstand	5.0
4506	Faktor für Tau bei Motorbetrieb	2.0
4507	Mindestsperrzeit für Wiedereinschaltung	6.0 min

Basis der Berechnung ist ein thermisches Einkörpermodell ähnlich dem Standardüberlastschutz, der für die Ständerwicklung arbeitet. Die Zeitkonstante während des Betriebes ist gleich dem unter 2703 eingestellten Wert, für die Verlängerung bei Motorstillstand ist ein zusätzlicher Wert 4505 einstellbar. 4502 ist ein Erfahrungswert und kann i.d.R. so eingestellt bleiben. Gibt der Hersteller eine Mindestsperrzeit zwischen 2 Anläufen an, so kann diese unter 4507 eingestellt werden. Diese wirkt zusätzlich zur Blockierung, welche dynamisch aus dem thermischen Abbild abgeleitet wird. Der k-Faktor, der beim Überlastschutz ermittelt werden muss, wird hier aus der Anzahl der Hochläufe für kalt und warm automatisch ermittelt und ist normalerweise für den Läufer deutlich kleiner als für den Ständer.

4.6 Unterstromüberwachung

Die Unterstromüberwachung dient dem Schutz der angetriebenen Last und erkennt einen Lastverlust, welcher evtl. Schäden hervorruft, z. B. leerlaufende Pumpen. Die Einstellwerte richten sich nach der Art und Größe der angetriebenen Last.

Nr.	Parameter	Wert
4600	Unterstromüberwachung	
4601	Grenzwert für Unterstromüberwachung	0.20 I/In
4602	Verzögerungszeit für Unterstromüberwachung	10.0 s
4603	Unterstromüberwachung	ein

4.7 Schalterversagerschutz

Er dient dazu, ein AUS-Kommando, das nicht zum Öffnen des Leistungsschalters führt, auf einem anderen Kommando-relais zu wiederholen, um evtl. eine zweite Auslösespule des Leistungsschalters oder einen übergeordneten Leistungsschalter anzustoßen.

Nr.	Parameter	Wert
3600	Schalterversagerschutz	
3601	Schalterversagerschutz ein-/ausschalten	ein
3602	Auslösezeit für SVS	0.3 s
3603	Auswertung Hilfskontakte für SVS SVS-HK	aus

Die Verzögerungszeit muss hierbei größer als die Laufzeit des Leistungsschalters und die Rückfallzeit des Schalterversagerschutzes einschließlich Sicherheitsreserve sein.

4.8 Verlagerungsspannungsschutz $U_{E>}$

Nr.	Parameter	Wert
3300	Verlagerungsspannungsschutz $U_{E>}$	
3309	Verlagerungsspannung	0.10 U/Un
3311	Verzögerungszeit für Anregemeldung $U_{E>}$	1.00 s

Er dient der Erkennung eines Erdfehlers in isolierten und kompensierten Netzen und wird ergänzend zum empfindlichen Erdfehlerschutz auf Überstrombasis verwendet. Speziell an der Einspeisung einer Sammelschiene können einpolige Fehler nicht aufgrund des Nullstromes erkannt werden und werden vom $U_{E>}$ -Schutz gemeldet. Durch Schalthandlungen kann der Fehlerort dann bestimmt und der Fehler beseitigt werden.

Im Folgenden wird der Erdfehlerschutz stellvertretend für alle Motorarten und -größen ausführlich beschrieben.

4.9 Erdfehlerschutz

Der Erdfehlerschutz hängt hauptsächlich von der Netzsternpunktterdung ab. Bei isolierten und kompensierten Netzen (Petersenspule im Netzsternpunkt) kommt es zu einem Erdschluss, d.h. die dabei auftretenden Fehlerströme sind relativ klein und müssen daher nicht in kürzester Zeit abgeschaltet werden. Der Netzbetreiber hat die Möglichkeit, sein Netz für eine begrenzte Zeit weiter zu betreiben und durch Schalthandlungen den Fehler zu eliminieren. Bei niederohmig oder starr geerdeten Netzen hingegen ist der Fehlerstrom so groß, dass er unverzüglich abgeschaltet werden muss.

a) Starr oder niederohmig geerdeter Sternpunkt

Die Fehlerströme sind Kurzschlussströme und müssen in Schnellzeit abgeschaltet werden. Ein evtl. im Sternpunkt angebrachter Widerstand dient dazu, die Erdkurzschlussströme bei Erdfehlern (ph-e, ph-ph-e) auf einen bestimmten Höchstwert zu begrenzen.

• Selektivitätskriterien

Die Kurzschlussströme treten nur im fehlerbehafteten Abzweig auf. Es können Kurzschlussströme erkannt werden, die kleiner als der Motornennstrom sind, da dieser im normalen

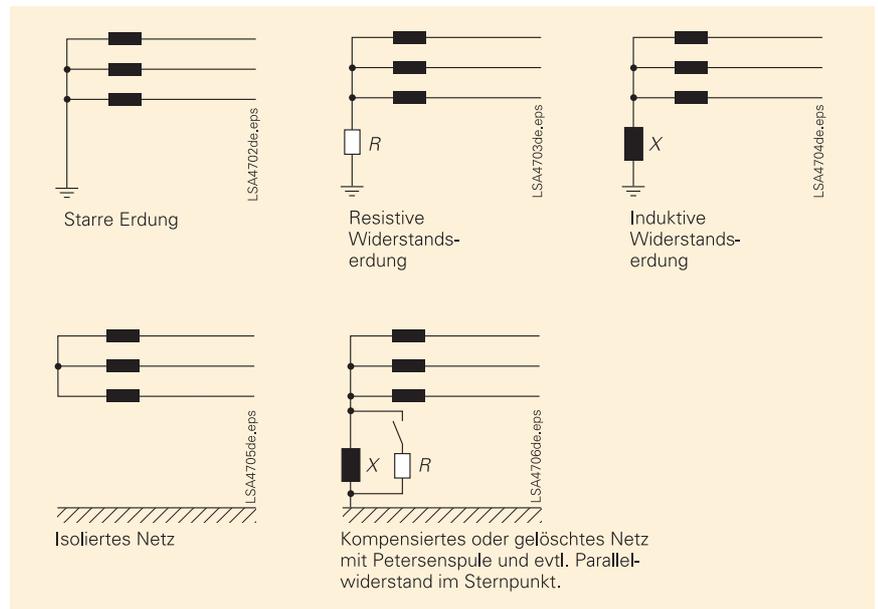


Bild 2 Übersicht über die möglichen Sternpunktterdungen (starre und induktive Erdung sind jedoch für Motorschutzanwendungen eher unüblich)

Betrieb annähernd symmetrisch ist, d.h. keine Gegen- und Nullsystemkomponente enthält. Die Grenze der Einstellempfindlichkeit wird durch Unsymmetrien und Messfehler der Stromwandler – besonders in Holmgreen-schaltung – sowie Unsymmetrien des Betriebes definiert. Es wird daher empfohlen, nicht empfindlicher als $0,1-0,2 I_{N, wdl}$ einzustellen.

Nr.	Parameter	Wert
1400	Bedienblock: Erdstromzeitschutz	
1401	Überstromzeitschutz Erde ein/aus	ein
1402	Erdanregestrom Hochstromstufe UMZ	0.20 I/In
1403	Erdanregestrom Hochstromstufe UMZ (dyn.)	1.00 I/In
1404	Verzögerungszeit Hochstromstufe UMZ E	0.05 s
1405	Erdanregestrom Überstromstufe UMZ	+ * I/In
1406	Erdanregestrom Überstromstufe UMZ (dyn.)	+ * I/In
1407	Verzögerungszeit Überstrom UMZ E	60.00 s
1408	Messwiederholung für Erdanregung	nein
1416	Hand-Ein-Behandlung	IE>> unverzögert

1402: Ansprechwert des Erdfehlerschutzes.
 1403: Aufgrund der höheren Betriebsströme während des Anlaufes wird wegen der Messfehler auch die Anregeschwelle proportional nach oben gezogen. 1404: Da keinerlei Staffelzeiten zu berücksichtigen sind, kann in Schnellzeit ausgelöst werden.

b) Isolierte Netze

Einpolige Fehler sind Erdschlüsse. Der Fehlerstrom wird durch Kapazitäten der Leiter gegen Erde erzeugt (Bild 3).

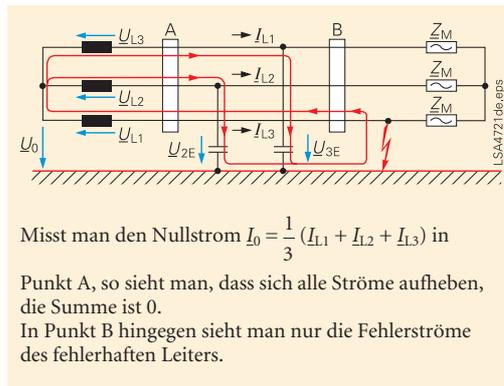


Bild 3 Erdfehler im isolierten Netz, Fehlerströme

Ströme, die von Leitungskapazitäten erzeugt werden, die in Fehlerrichtung vorwärts liegen, heben sich mit dem auf dem fehlerhaften Leiter zurückfließenden Strom auf (Messpunkt A). Kapazitive Ströme hinter der Messstelle hingegen werden von dieser über den fehlerhaften Leiter erkannt (Messstelle B). Übertragen auf mehrere Abzweige in einem isolierten Netz bedeutet dies, dass die kapazitiven Ströme der gesunden Leiter inkl. Einspeisung auf dem fehlerbehafteten Leiter gemessen werden. Die Größe des Fehlerstromes, der am fehlerhaften Abzweig gemessen wird, ist also gleich der Summe der kapazitiven Ströme des restlichen, zusammenhängenden gesunden Netzes. Jeder gesunde Abzweig trägt dabei einen Teil des Fehlerstromes, welcher von den jeweils dort installierten Schutzgeräten auch gemessen wird (Bild 4).

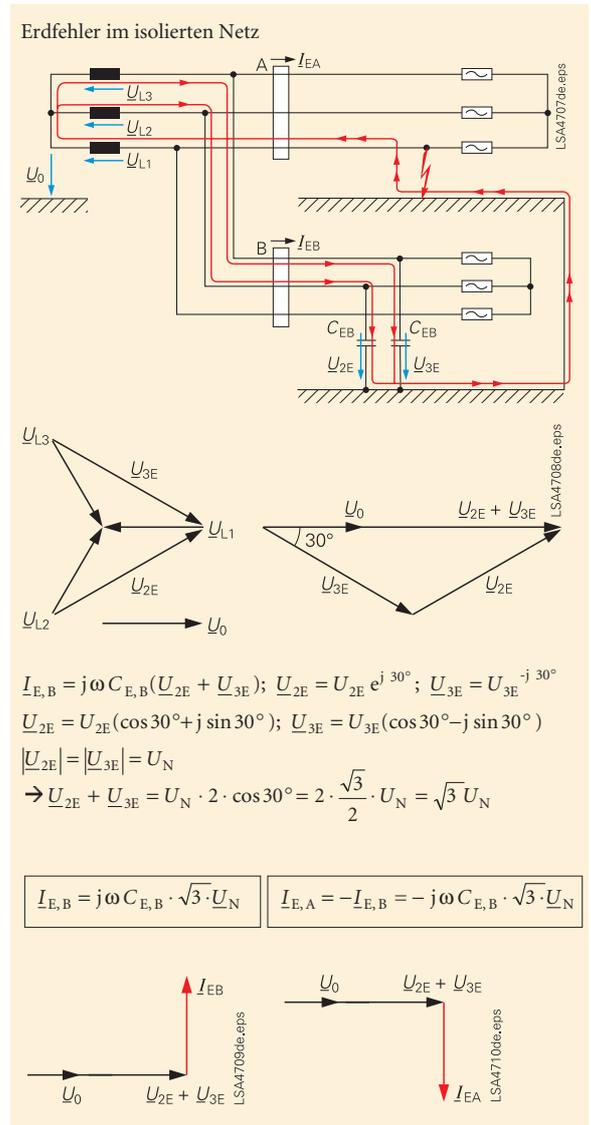


Bild 4 Erdfehler im isolierten Netz, Größe und Phasenlage von I_{EA} , I_{EB} und U_0

Für einen Fehler auf Abzweig A läuft der Nullstrom $\left(\frac{1}{3} I_{EA}\right)$, gemessen im Punkt A, der Nullspannung um 90° hinterher.
 Der Strom I_{EB} , gemessen im Punkt B, läuft der Nullspannung um 90° voraus.
 Die Größe des Nullstromes wird durch die Gesamtkapazität (nicht zeichnerisch dargestellt) der Leitung B und evtl. weiterer Leitungen bestimmt.
 Anmerkung: Die Pfeilung der Erdstrom I_E ist bei den SIPROTEC-Geräten dem Nullstrom entgegengesetzt, sodass auch die Richtungen der Kennlinien im Handbuch der obigen Darstellung entgegengesetzt sind.

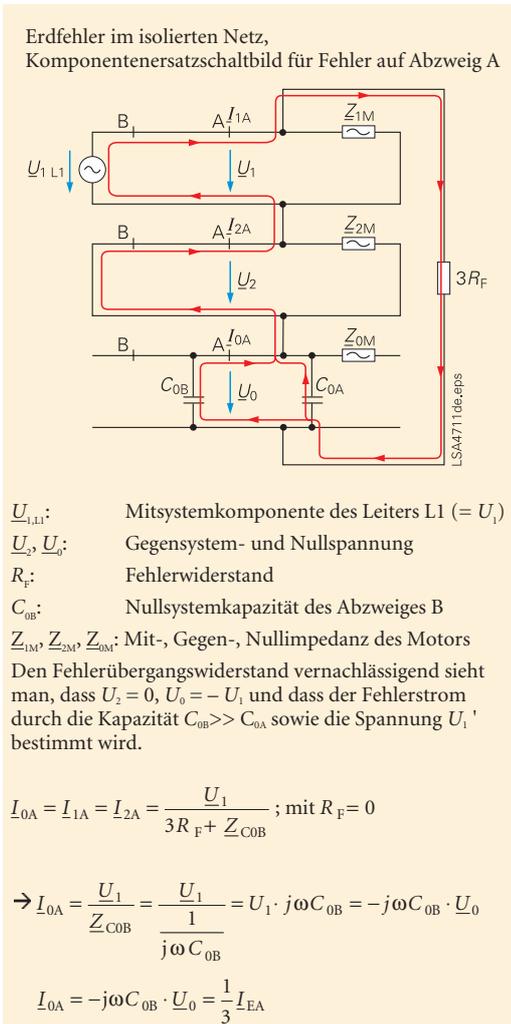


Bild 5 Komponentenersatzschaltbild beim einpoligen Fehler. Es ist deutlich zu sehen, dass der Fehlerstrom hauptsächlich durch die Leiter-Erde-Kapazität des Restnetzes C_{0B} begrenzt wird. Ein Vergleich mit Bild 3 zeigt, dass sowohl Richtung als auch Betrag des Fehlerstromes mit der Darstellung mit natürlichen Größen übereinstimmen.

Selektivitätskriterien

Da im Gegensatz zum geerdeten Netz in jedem fehlerfreien Abzweig ein Strom gemessen wird, dessen Größe proportional zur Leiter-Erde-Kapazität in Vorwärtsrichtung ist, hängt es von der Verteilung der Kapazitäten ab, ob ein Überstromkriterium allein für eine abzweigbezogene Selektivität ausreicht. Gilt für jeden Abzweig des zusammenhängenden Netzes, dass die Kapazität des Restnetzes deutlich größer ist als die Kapazität der eigenen Leitung, so wird auch ein Fehler in Vorwärtsrichtung (gespeist durch die rückwärtigen Kapazitäten) immer einen deutlich größeren Erdfehlerstrom am Einbauort des Stromwandlers ergeben als ein Fehler in Rückwärtsrichtung, bei dem der lokale Abzweigschutz den kapazitiven Strom der eigenen Leitung misst.

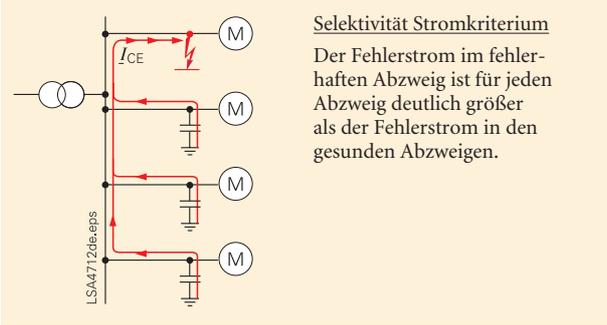


Bild 6 Selektivität durch Stromkriterium, Prinzip

Da der Erdfehlerschutz auch Erdschlüsse innerhalb des Motors finden soll – meistens fordert man eine Abdeckung von 80 – 90 % der Statorwicklung – muss dieser Fall noch betrachtet werden.

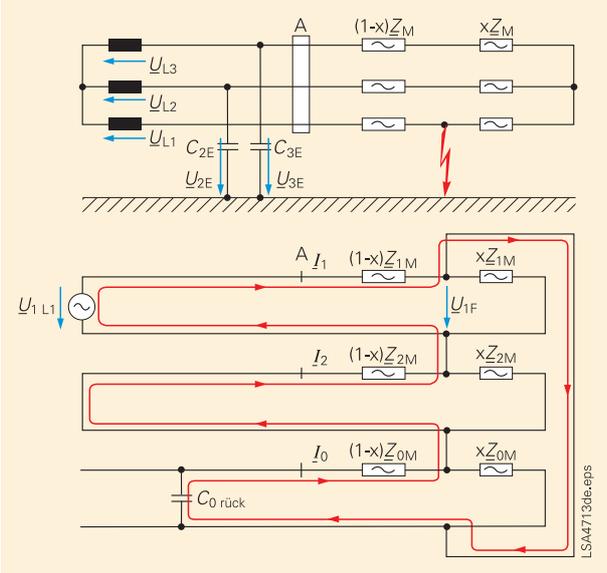


Bild 7 Isoliertes Netz, Erdschluss im Stator des Motors

Die den Nullstrom I_0 treibende Spannung ist die Spannung am Fehlerort $\underline{U}_{1,F}$. Sie entsteht durch einen Spannungsteiler

$$\frac{xZ_{1M}}{Z_{1M}} \text{ d.h. } \underline{U}_{1F} = -\underline{U}_0 = x \cdot \underline{U}_1$$

Vernachlässigt man die Widerstände entlang der Strombahn von I_0 ($(1-x)Z_{0M}, (1-x)Z_{2M}$) sowie die Reaktanzen des zuleitenden Kabels, was angesichts des relativ hohen Widerstandes der Nullkapazität im Vergleich zu diesen eine sehr gute Näherung ergibt, so ist $I_0(x)$ proportional zu x .

$$\underline{I}_0(x) = x \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot C_{0 \text{ rück}}$$

Bei einer Fehlerabdeckung von 90 % der Ständerwicklung ist der resultierende Nullstrom also nur 10 % des Nullstromes, welcher bei einem Fehler auf der Zuleitung, außerhalb des Ständers also, entsteht.

1. Beispiel Selektivität durch Überstrom

Gegeben sei ein Netz mit 10 Motoren, alle jeweils über ein Kabel von 200 m Länge mit einer Sammelschiene verbunden, welche durch einen Trafo gespeist wird:

$$\text{Trafo: } U_N = \frac{20 \text{ kV}}{6 \text{ kV}}; S_N = 6 \text{ MVA}, u_k = 0,08$$

Die Kabel haben eine längenbezogene Kapazität gegen Erde von $C_E = 0,257 \mu\text{F} / \text{km}$.

Die Motoren haben eine Ständer-Erde-Kapazität von $0,12 \mu\text{F}$.

Da unsere Motoren einen Nennstrom von 48 A haben, werden die nächstgrößeren Phasenstromwandler des bevorzugten Typs mit 75 A/1A gewählt.

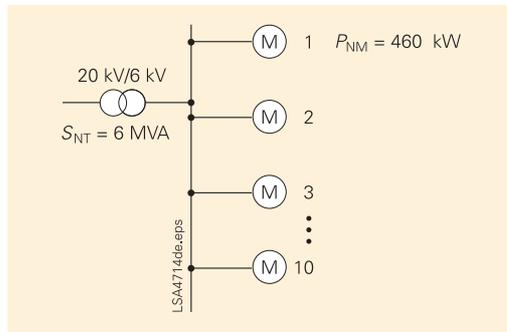


Bild 8 Beispielnetz mit 10 gleichen Motoren

Der Erdfehlerschutz jedes Abzweiges soll nicht nur sicher Fehler auf dem zuleitenden Kabel, sondern auch Fehler im Motor bis zu einer Reichweite von mind. 80 % der Ständerwicklung (von außen gerechnet) sicher finden.

1. Berechnung der Gesamtkapazität eines Abzweiges:

$$C_{0\text{ges}} = 0,2 \text{ km} \cdot 0,257 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} + 0,12 \mu\text{F} = 0,1714 \mu\text{F}$$

2. Nullstrom eines Abzweiges bei einem Fehler rückwärts außerhalb des Motors:

$$I_{0, \text{rück}} = \omega \cdot C_{0, \text{ges}} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 100 \frac{\pi}{\text{s}} \cdot 0,1714 \cdot \frac{10^{-6} \text{ s}}{\Omega} \cdot \frac{6 \text{ kV}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{0, \text{rück}} = 0,187 \text{ A (primär)}$$

$$I_{E, \text{rück}} = 3 \cdot I_{0, \text{rück}} = 0,561 \text{ A (primär)}$$

Diesen Fehlerstrom sieht jeder Abzweigschutz bei einem Fehler in Rückwärtsrichtung. Er darf auf keinen Fall anregen, d.h. die Stromschwelle sollte auch wegen der Einschwingvorgänge bei Erdschlusseintritt etwa 50 % über diesem Wert liegen.

$$I_{EE} >= 3 \cdot 1,5 \cdot I_{0, \text{rück}} = 0,84 \text{ A (primär)}$$

Bei diesen sehr kleinen Primärströmen ist hier ein Kabelumbauwandler einer Holmgreenschaltung vorzuziehen. Um einen ausreichend großen Strom sekundärseitig zu messen, wird ein Wandlerverhältnis von 60 A/1 A einem höheren Verhältnis, z.B. 100 A/1 A vorgezogen.

Mit einem Wandlerverhältnis von 60/1 erhält man somit einen Einstellwert von $I_{EE} >= 14 \text{ mA}$.

Bei einem Fehler in Vorwärtsrichtung (Faktor x der Ständerwicklung) wird folgender Strom gemessen:

$I_{0, \text{vor}} = 9 \cdot I_{0, \text{rück}} \cdot x$, da die neun gesunden Abzweige nun den Fehlerstrom liefern.

$$I_{0, \text{vor}} = 9 \cdot 0,187 \text{ A} \cdot 0,2 = 0,337 \text{ A}$$

$$I_{E, \text{vor}} = 3 \cdot I_{0, \text{vor}} = 1 \text{ A}$$

Dieser Wert liegt etwa 20 % über dem Einstellwert $I_{EE} >$ primär von 0,84 A. Somit ist eine Reichweite von mindestens 80 % in den Motor hinein gewährleistet.

Nr.	Parameter	Wert
7800	Geräteumfang	
7801	UMZ/AMZ Charakteristiken	UMZ
7802	Dyn. Umschaltung d. Anregeschwellen	vorhanden
7803	SLS Schiefastschutz projektieren	vorhanden
7804	Überlastschutz	mit Gedächtnis
7805	Anlaufzeitüberwachung	vorhanden
7806	Richtungszusatz empfindlich Erde	nicht vorhanden
7807	UMZ/AMZ Charakteristiken Erde	UMZ
7835	Schalerversagerschutz	vorhanden
7839	Auslösekreisüberwachung	mit 1 BE
7840	Unterstromüberwachung	vorhanden
7841	Wiedereinschaltsperr	vorhanden

7806: Die Richtungsbestimmung kann in diesem Beispiel ausgeschaltet werden.

Nr.	Parameter	Wert
3000	Erdschlusserfassung im isol./gelöschten Netz	
3001	Erdfehlererfassung ein/aus	ein
3013	Erdanregestrom Hochstromstufe EEE	0.014 I/In
3014	Verzögerungszeit Hochstromstufe EEE	0.5 s
3015	Erdanregestrom Überstromstufe EEE (UMZ)	+ * I/In
3016	Anregung empf. Erde Hochstromstufe UMZ (dyn.)	+ * I/In
3017	Anregung empf. Erde Hochstromstufe UMZ (dyn.)	+ * I/In
3018	Verzögerungszeit der Überstromstufe EEE (UMZ)	00 s
3019	Messwiederholung für Erdanregung	nein
3028	Hand-Ein-Behandlung	IE >> unverzögert

3001: Der empfindliche Erdfehlerschutz ist eingeschaltet. 3013: Mit 14 mA ist gewährleistet, dass bei Rückwärtsfehlern die ungerichtete Stufe $I_{EE} >$ nicht anspricht. 3014: Um ein Ansprechen oder Auslösen durch transiente Vorgänge, z.B. beim Einschalten des Motors, zu verhindern, wird die Verzögerungszeit auf mind. 0,5 s erhöht. Insbesondere ist eine lange Verzögerungszeit bei Holmgreenschaltung zu empfehlen, da hier Wandlerunsymmetrien einen Nullstrom sekundärseitig vortauschen, der primärseitig nicht existiert.

Andere ähnliche Netzkonfigurationen, bei denen der Erdstrom als Selektivitätskriterium genügt, können sein:

- Motoren und mehrere Transformatoren zur Niederspannung im gleichen Netz mit ungefähr gleicher Zuleitungslänge.
- Einspeisung ohne Trafo an der Übergabestelle, sodass die gesamte Kapazität des vorgelagerten Netzes auf Fehler in den Motorabzweigen einspeist. Je nach Größe des vorgelagerten Netzes können hier deutlich größere Fehlerströme entstehen, welche auch mit Holmgreenschaltung beherrscht werden. Die sekundären Einstellwerte sollten dabei nicht unter etwa $0,3\text{-}0,5 I I_N$ liegen.

Fehler auf der Sammelschiene hingegen werden nicht vom Schutz an der Einspeisung erkannt, sie müssen mit Hilfe eines Spannungsrelais – oder der U_0 -Schutzfunktion des 7SJ602 gemeldet werden.

2. Beispiel Selektivität durch gerichteten Erdfehlerschutz

Das obige Netz besteht nur aus 2 Motoren, da inzwischen die anderen Motoren nicht mehr am Netz sind. In diesem Fall ist der Strom in jedem Abzweig für interne und externe Fehler gleich groß. Der Strom als alleiniges Kriterium reicht daher nicht für eine selektive Auslösung aus. Zusätzlich zum Nullstrom muss mittels der Nullspannung die Fehlerrichtung festgestellt werden.

In Bild 4 sieht man, dass die Lage von Nullstrom und -spannung um 180° zwischen Vorwärts- und Rückwärtsrichtung abweicht. Dies ist ein sicheres und relativ robustes Richtungskriterium. Es werden daher auch beim isolierten Netz keine besonderen Genauigkeitsanforderungen an die Wandler gestellt. Für die Messung des Erdstromes reicht häufig eine Holmgreenschaltung der Stromwandler. Es gilt das oben Gesagte bezüglich der Messgenauigkeit. Da jetzt die Fehlerströme sehr klein sind ($I_{0,\min} = 0,187 \cdot 0,2 \text{ A} = 0,0374 \text{ A}$ primär), können sie nicht mehr mit den üblicherweise eingesetzten Wandlern gemessen werden (z.B. Kabelumbauwandler 60 A/1 A, oder Phasenstromwandler 75 A/1 A). Zur Lösung dieses Problems wird häufig ein an der Sammelschiene befindlicher Erdungstransformator verwendet, welcher den Nullstrom im isolierten Netz erhöht.

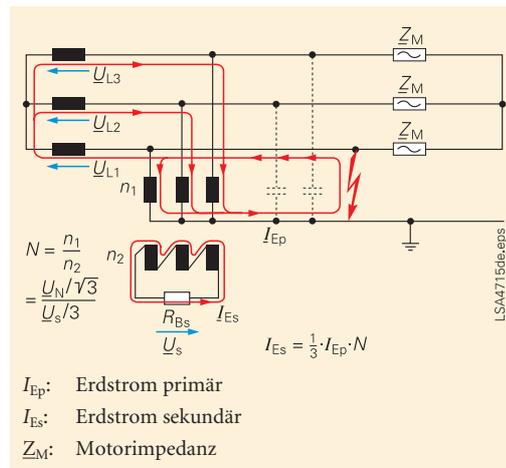


Bild 9 Erhöhung des Erdstromes durch einen Erdungstransformator

Bild 9 zeigt die Anschaltung eines Erdungstransformators in Yd-Schaltung. An die offene Dreieckswicklung wird ein Belastungswiderstand geschaltet, welcher einen Strom durch alle sekundären Wicklungen fließen lässt. Primärseitig entsteht ein Nullstrom in jedem Leiter – also auch im fehlerbehafteten Leiter, obwohl hier primärseitig keine treibende Spannung vorhanden ist – der über den Sternpunkt des Erdungstrafos in die Fehlerstelle abfließt und sich über den Sternpunkt des einspeisenden Transformators über die jeweiligen Leitungen schließt. Der Belastungswiderstand muss nun so bemessen sein, dass der kleinste zu messende Nullstrom, also bei einem Fehler im Motor z.B. bei 20 % der Ständerwicklung, mit dem zugehörigen Abzweigschutz noch messbar ist. Generell gilt dabei, dass man sekundäre Einstellwerte unter 10 mA vermeiden sollte (Mess-toleranzen der Kabelumbauwandler sowie digitale Messwertauflösung des Schutzes).

3. Beispiel Erhöhung des Erdstromes mittels Erdungstransformator

Der Nullstrom des 2. Beispiels soll so erhöht werden, dass bei einem Fehler bei 90 % der Ständerwicklung ein Erdstrom von mindestens 10 mA sekundär gemessen werden kann. Es wird ein Erdungstrafo mit 500 V sekundär eingesetzt sowie ein Kabelumbauwandler 60 A/1 A.
Berechnung des Belastungswiderstandes:
 Der entsprechende minimale primäre Nullstrom berechnet sich aus den eben genannten Daten wie folgt:

$$I_{0\min} = \frac{1}{3} \cdot 60 \cdot 10 \text{ mA} = 200 \text{ mA}$$

$$I_{E\min} = 3 \cdot I_{0\min} = 600 \text{ mA}$$

Bei einem Fehler außerhalb des Ständers ist der

$$\text{Fehlerstrom } I_{Ep} = \frac{1}{x} \cdot I_{E\min} = 6 \text{ A}$$

$$I_{Es} = \frac{1}{3} \cdot \dot{u}_{ETr} \cdot I_{Ep} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{6 \text{ kV} / \sqrt{3}}{500 \text{ V} / 3} \right) \cdot 6 \text{ A} = 41,57 \text{ A}$$

$$R_{Bs} = \frac{U_s}{I_{Es}} = \frac{500 \text{ V}}{41,57 \text{ A}} = 12 \Omega$$

Leistungsbemessung:

R_{Bs} verbraucht bei voller Verlagerungsspannung eine Leistung von

$$P = \frac{U_s^2}{R_{Bs}} = 0,25 \cdot \frac{10^6 \text{ V}^2 \text{ A}}{12 \text{ V}} = 20,8 \text{ kW}$$

Belastungswiderstand und Erdungstrafo sind auf diese Leistung auszulegen.

Da Erdungstrafo samt Belastungswiderstand nur während eines Fehlers belastet werden, werden sie häufig nur auf eine Betriebsdauer von 20 s ausgelegt, innerhalb der der Fehler abgeschaltet werden muss. Wird dieser Zeitwert überschritten, sorgt ein Relais vor dem Belastungswiderstand für dessen Abschaltung.

Mit nun ausreichendem Erdstrom können die notwendigen Einstellungen für einen gerichteten Erdfehlerschutz vorgenommen werden:

Nr.	Parameter	Wert
3300	Verlagerungsspannungsschutz UE>	
3309	Verlagerungsspannung Ue>	0.10 U/Un
3311	Verzögerungszeit für Anregemeldung UE>	1.00 s
3312	Verzögerungszeit Ue-Auslösestufe	1.00 s

Die Verlagerungsspannung U_E ist auf $0,1 U_N$ eingestellt. Damit wird sichergestellt, dass U_E auch bei kleinstmöglichem Fehlerstrom und Nullspannung die Richtungserkennung freigibt. 3312: Verlagerungsspannung ist als zusätzliche Meldung vorgesehen.

Nr.	Parameter	Wert
3100	Richtungsparameter empf. Erdfehlerschutz	
3102	Kabelumbauwandler Sekundärstrom I1	0.010 I/In
3103	Kabelumbauwandler Fehlerwinkel bei I1	0.3 Grad
3104	Kabelumbauwandler Sekundärstrom I2	0.100 I/In
3105	Kabelumbauwandler Fehlerwinkel bei I2	0.3 Grad
3115	Richtungssinn für AUS Hochstromstufe EEE	vorwärts
3122	Richtungssinn für AUS Überstromstufe EEE	vorwärts
3123	Min. Wirk-/Blindstrom f. Freigabe Richtungsent.	0.010 I/In
3124	Korrekturwinkel (additiv zu DA 3025)	5.0 Grad
3125	Messart (Netzsternpunktunabhängig)	Cos phi
3126	Rückfallverz. zur Richtungsstabilis.	1 s

Bei den Adressen 3102 bis 3105 werden Stromwandlerwinkelfehler eingetragen. Dies ist besonders wichtig bei kompensierten Netzen. Bei isolierten Netzen wie in diesem Beispiel kann auf extrem genau messende Stromwandler verzichtet werden. 3115 und 3122 geben die Auslöserichtung an. Mit 3125 wird die Art der Richtungsbestimmung angegeben. Generell gilt: „sin φ “ für isolierte Netze, „cos φ “ für kompensierte Netze. Hier wurde „cos φ “ eingestellt, da der resistive Anteil im Fehlerstrom durch den Erdungstrafo etwa 10 Mal so groß ist wie der kapazitive Teil. Damit bekommt der Fehlerstrom einen ohmsch-kapazitiven Charakter. 3124 ist ein Parameter, um die Richtungskennlinie ausgehend von Par 3125 um einen bestimmten Winkelbetrag zu drehen. Mit einem resistiven Strom von $I_{Ep} = 0,6 \text{ A}$ und einem kapazitiven Strom von $I_{EC} = 0,0561 \text{ A}$ ergibt sich ein Winkel von 5° ($\arctan 0,0561/0,6$). 3124 wird also auf $+ 5^\circ$ – das ist die kapazitive Richtung – eingestellt. Dieser Winkel ist in sehr guter Näherung konstant und nicht abhängig davon, ob sich der Fehler außerhalb oder innerhalb der Ständerwicklung befindet.

Nr.	Parameter	Wert
3000	Erdschlusserfassung im isol./gelöschten Netz	
3001	Erdfehlererfassung ein/aus	ein
3013	Erdanregestrom Hochstromstufe EEE	0.010 I/In
3014	Verzögerungszeit Hochstromstufe EEE	0.5 s
3015	Erdanregestrom Überstromstufe EEE (UMZ)	+ * I/In
3016	Anregung empf. Erde Hochstromstufe UMZ (dyn.)	+ * I/In
3017	Anregung empf. Erde Überstromstufe UMZ (dyn.)	+ * I/In
3018	Verzögerungszeit der Überstromstufe EEE (UMZ)	5.00 s
3019	Messwiederholung für Erdanregung	nein
3028	Hand-Ein-Behandlung	IE>> unverzögert

Für die Stromschwelle wird die $I_E \gg$ -Stufe verwendet (Par 3013). Um Ungenauigkeiten durch transiente Vorgänge zu reduzieren (Anfahrstrom des Motors, Einschwingvorgänge bei Erdschlusseintritt) wird eine nicht zu kurze Auslösezeit empfohlen. Hier: 0,5 s (Par 3014).

Die resultierende Richtungskennlinie mit Zeigern für Nullstrom und -spannung sind in Bild 10 dargestellt.

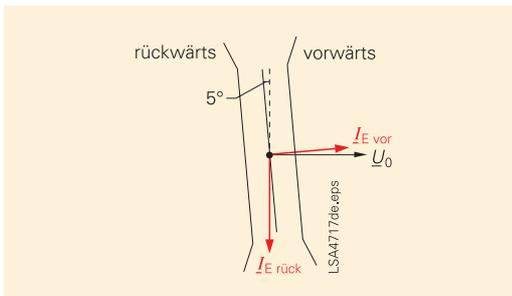


Bild 10 Anpassung der Richtungskennlinie an den ohmsch-kapazitiven Fehlerstrom. Sie sollte so eingestellt werden, dass der Erdstrom in Vorwärtsrichtung senkrecht zur Richtungskennlinie

c) Kompensiertes Netz

Im kompensierten oder gelöschten Netz wird mit Hilfe einer auf die Leiter-Erde-Kapazitäten des Netzes abgestimmten Spule, der sog. Petersen-Spule, der Fehlerstrom am Fehlerort soweit reduziert, dass ein selbstständiges Löschen des Lichtbogens möglich ist.

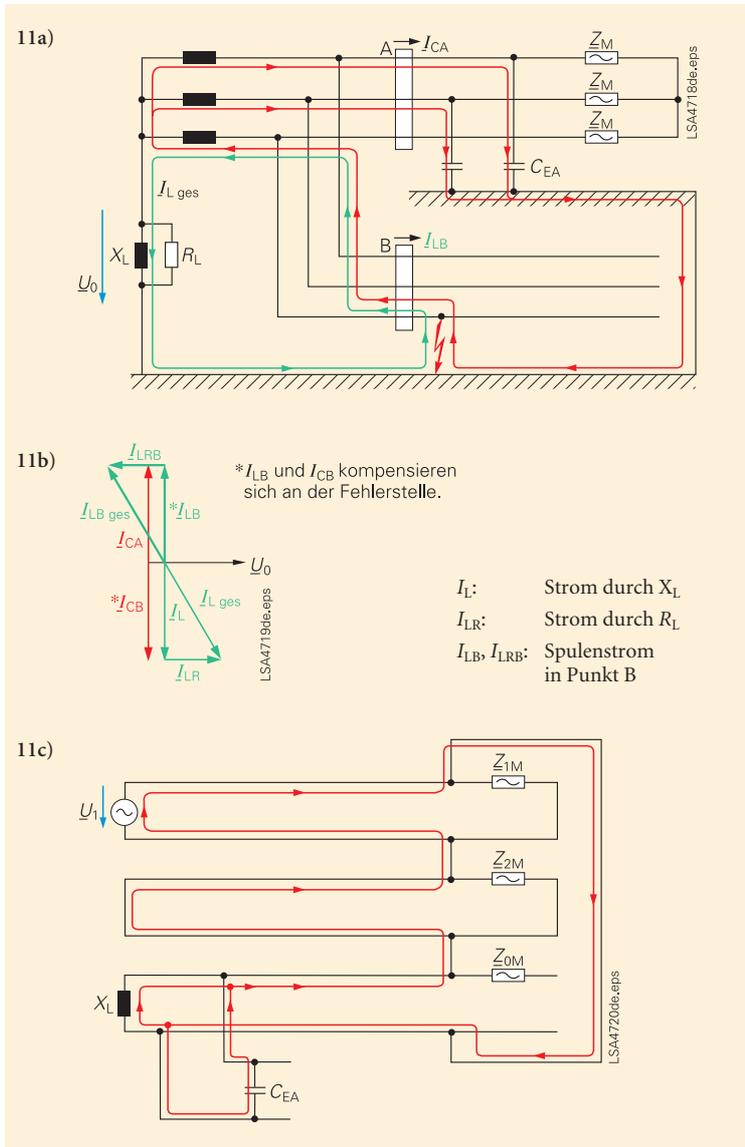


Bild 11 Schematische Darstellung von kompensiertem oder gelöschtem Netz

Da beim kompensierten Netz zum einen auf dem fehlerbehafteten Abzweig der ohnehin schon kleine kapazitive Strom noch durch die parallel geschaltete Nullreaktanz der Petersen-Spule weiter verringert wird („kompensiert“), kann nur mit Hilfe eines Stromkriteriums kein (selektiver) Schutz erfolgen. Es wird stattdessen das so genannte „wattmetrische Reststromverfahren“ oder cos φ -Verfahren angewendet.

Da abhängig von der Kompensation der Gesamt-nullstrom in B (Bild 11) entweder voreilend oder nacheilend ist und dies sich auch während des Betriebs durch Abschalten von Netzteilen ändern kann, ist die Phasenlage des kapazitiv/induktiven Nullstromes gegenüber der Nullspannung kein verlässliches Kriterium. Es wird vielmehr der so genannte Wattreststrom bewertet. Dies ist der Anteil am Fehlerstrom, der durch den ohmschen Anteil der Reaktanz der Petersen-Spule hervorgerufen wird. Da dieser Strom sehr klein gegenüber dem induktiven Spulenstrom ist (Größenordnung einige Prozent), wird manchmal ein ohmscher Widerstand der Spule parallelgeschaltet, damit bei einem Erdschluss von 80 % der Ständerwicklung noch ausreichend Wirkstrom fließt.

Da die Wirkströme sehr klein sind, ist es unerlässlich, einen Kabelumbauwandler zu verwenden. Eine Holmgreenschaltung würde das Messergebnis in unzulässiger Weise verfälschen. Um die Winkelfehler des Kabelumbauwandlers zu korrigieren, gibt es die Möglichkeit, einige Fehlerstrompaare desselben im 7SJ602 einzugeben.

Nr.	Parameter	Wert
3000	Erdschlusserfassung im isol./gelöschten Netz	
3001	Erdfehlererfassung ein/aus	ein
3013	Erdanregestrom Hochstromstufe EEE	0.010 I/n
3014	Verzögerungszeit Hochstromstufe EEE	0.5 s
3015	Erdanregestrom Überstromstufe EEE (UMZ)	+ * I/n
3016	Anregung empf. Erde Hochstromstufe UMZ (dyn.)	+ * I/n
3017	Anregung empf. Erde Überstromstufe UMZ (dyn.)	+ * I/n
3018	Verzögerungszeit der Überstromstufe EEE (UMZ)	5.00 s
3019	Messwiederholung für Erdanregung	nein
3028	Hand-Ein-Behandlung	IE>> unverzögert

3013: Es wird angenommen, dass der Wattreststrom mindestens 10 mA beträgt. Gegebenenfalls muss der Petersen-Spule ein ohmscher Widerstand parallel geschaltet werden, um diesen Wert zu erreichen.

Nr.	Parameter	Wert
3100	Richtungsparameter empf. Erdfehlerschutz	
3102	Kabelumbauwandler Sekundärstrom	I1 0.010 I/n
3103	Kabelumbauwandler Fehlerwinkel bei	I1 0.3 Grad
3104	Kabelumbauwandler Sekundärstrom	I2 0.100 I/n
3105	Kabelumbauwandler Fehlerwinkel bei	I2 0.1 Grad
3115	Richtungssinn für AUS Hochstromstufe EEE	vorwärts
3122	Richtungssinn für AUS Überstromstufe EEE	vorwärts
3123	Min. Wirk-/Blindstrom f. Freigabe Richtungsent.	0.010 I/n
3124	Korrekturwinkel (additiv zu DA 3025)	0.0 Grad
3125	Messart (Netzsternpunktabhängig)	Cos phi
3126	Rückfallverz. zur Richtungsstabilis.	1 s

3102 bis 3105 dienen der Korrektur der o.g. Stromwandlerfehler. 3123 ist die Mindeststromschwelle, ab der eine Richtungsbestimmung durchgeführt wird. 3125 definiert die $\cos\phi$ -Messung, d.h. es wird der Wattreststrom im Fehlerstrom bewertet. 3124 bleibt in diesem Fall auf 0° eingestellt, da nur der resistive Anteil des Fehlerstromes bewertet wird.

■ Zusammenfassung

Der Erdfehlerschutz des Motors ist entsprechend der Erdung des Netzsternpunktes mit dem passenden SIPROTEC 7SJ602 auszulegen.

Mit dem Einsatz von Erdungstransformator bzw. Kabelumbauwandler reicht die Empfindlichkeit des 7SJ602 für eine sichere und selektive Erkennung eines Fehlers aus, auch wenn die Fehlerströme sehr klein werden.

Schutz von Motoren mittlerer Leistung

Im Folgenden wird eine Motoreinstellung anhand des SIPROTEC Schutzgerätes 7SJ62 erläutert. Es werden Hinweise gegeben, wie die vorhandenen technischen Daten des Motors verwendet werden, um sinnvolle Einstellwerte abzuleiten. Dabei wird u.a. die dynamische Parameterumschaltung zur Absenkung der Überstromeinstellwerte im Normalbetrieb erklärt. Ferner wird die Option der Einkopplung einer externen Thermobox benutzt, um über Thermofühler direkt die Ständer-temperatur und Lagertemperatur zu überwachen.

■ 1. SIPROTEC 7SJ62

Zum Schutz von Motoren mittlerer Leistung eignet sich das SIPROTEC Überstromzeitschutzgerät 7SJ62, das als eine der möglichen Bestellvarianten eine Motorschutzfunktion mit folgendem Umfang anbietet:



Bild 1 SIPROTEC-Geräte 7SJ62 und 7SJ63/7SJ64

Schutzfunktion bzw. Messverfahren	Abkürzung	ANSI
Überstromschutz Phase/Erde	$I >>, I >, I_p, I_E >>, I_E >, I_{Ep}$	50, 51, 50N, 51N
Erdschluss gerichtet	$I_{EE\ ger.} >>, I_{EE\ ger.} >, U_E/U_o >$	67N, 51Ns, 59N
Überlastschutz	$I^2 t >$	49
Anlaufzeitüberwachung	$I_A^2 t$	48
Wiedereinschaltsperr	$I^2 t$	66, 49R
Schiefelastschutz	$I_2 >$	46
Unterspannung	$U <$	27
Temperaturüberwachung	† (Thermobox)	38

Neben 7SJ62 eignen sich auch 7SJ63 oder 7SJ64. Die Unterschiede dieser Geräte verglichen mit 7SJ62 sind:

7SJ63:

Gleiche Funktionen wie 7SJ62 und zusätzlich

- Großes graphisches Abzweigsteuerbild
- Komfortable Geräte-Vorortbedienung zur Steuerung
- Schlüsselschalter
- Größeres Mengengerüst der Binäreingaben und -ausgaben

7SJ64:

Wie 7SJ63 und zusätzlich

- Größere CFC-Logikprogramm-Leistungsfähigkeit
- Flexible Schutzfunktionen
- Weitere hintere Schnittstelle (Anschluss der Thermobox und hinterer DIGSI Schnittstelle getrennt möglich)
- Ein vierter Spannungseingang zur Messung der Verlagerungsspannung oder für Synchrocheckfunktion

■ 2. Vorhandene Motordaten

In unserem Beispiel sind nicht alle Daten vorhanden. Dies entspricht leider allzu häufig der Praxis, wenn der Motor beispielsweise schon sehr lange in Betrieb ist und komplette Unterlagen nicht mehr vorliegen oder es nur noch die Angaben auf dem Motortypenschild gibt.

Gegeben:
Verdichtermotor für Pressluft in einem Industriebetrieb:

Größe	Wert
Leistung	780 kW
Nennspannung	10 kV
Motornennstrom	54 A
Max. Anlaufstrom (bei 100 % U_N)	250 A
Anlaufzeit (bei 100 % U_N)	5 s
Erwärmungszeitkonstante	40 min
Abkühlzeitkonstante im Stillstand	140 min
Max. thermischer Dauerstrom	60 A
Max. Festbremszeit	10 s

■ 3. Allgemeine Netzdaten

Die Strom- und Spannungswandlerdaten und die Art des Anschlusses werden im Gerät unter „Anlagedaten 1“ eingegeben

Stromwandler 75 A/1 A

Kabelumbauwandler 60 A/1 A

Spannungswandler 10 kV/100 V

Isoliertes Netz

Nr.	Parameter	Wert
0213	Spannungswandleranschluss	U12, U23, UE
0204	Wandlernennstrom Phase prim.	75 A
0205	Wandlernennstrom Phase sek.	1 A
0217	Wandlernennstrom Erde prim.	60 A
0218	Wandlernennstrom Erde sek.	1 A
0202	Wandlernennspannung prim.	10 kV
0203	Wandlernennspannung sek.	100 V

■ 4. Anlaufzeitüberwachung

Die Einstellparameter der Anlaufzeitüberwachung benötigen den Anlaufstrom und die Anlaufzeit. Die Festbremszeit ist in unserem Fall unkritisch, da diese Zeit höher ist als die Anlaufzeit (10 s zu 5 s). Der zugehörige Einstellparameter für die Festbremszeit wird deaktiviert (zweimal Buchstaben kleines „o“ eintippen für unendlich). Die Anlaufzeitüberwachung kann rechtzeitig bei einem blockierten Läufer reagieren, eine externe Verdrahtung mit einem Drehzahlwächter entfällt. Da in den technischen Daten die garantierte Anlaufzeit (5 s) angegeben wurde, muss der Schutzeinstellwert darüber liegen. Im konkreten Fall wurde der Wert 7 s gewählt. Der maximale Anlaufstrom errechnet sich bei Berücksichtigung des Stromwandlerverhältnisses zu $I_A = 250 \text{ A} / 75 \text{ A} = 3,33$.

Nr.	Parameter	Wert
4102	Maximaler Anlaufstrom	3.33
4103	Maximale Anlaufzeit	7 s
4104	Festbremszeit	oo

■ 5. Überlastschutz

Die Überlastfunktion charakterisieren folgende typische Kenngrößen: Maximal dauernd zulässiger Betriebsstrom, Erwärmungszeitkonstante und Abkühlzeitkonstante im Stillstand. Die Angabe des Maximalstromes fehlt oft in den technischen Daten. Als Erfahrungswert kann eine Einstellung 10 % über $I_{N, M}$ verwendet werden, in unserem Fall ist bereits $I_{M, max} = 60 \text{ A}$ vorgegeben. Eingestellt wird unter Parameter 4202 k-Faktor = $I_{M, max} / I_{Wdl, prim} = 60 \text{ A} / 75 \text{ A} = 0,8$.

Die Erwärmungszeitkonstante 40 min kann direkt als Einstellung übernommen werden. Die Überlastschutzfunktion berücksichtigt auch das Abkühlverhalten, da unterschiedliche Voraussetzungen für den Motor (mit oder ohne Lüfter) unterschiedliches Abkühlverhalten bewirkt. Die Einstellung geschieht unter Parameter 4207A als Faktor von Erwärmung zu Abkühlung, $140 \text{ min} / 40 \text{ min} = 3,5$.

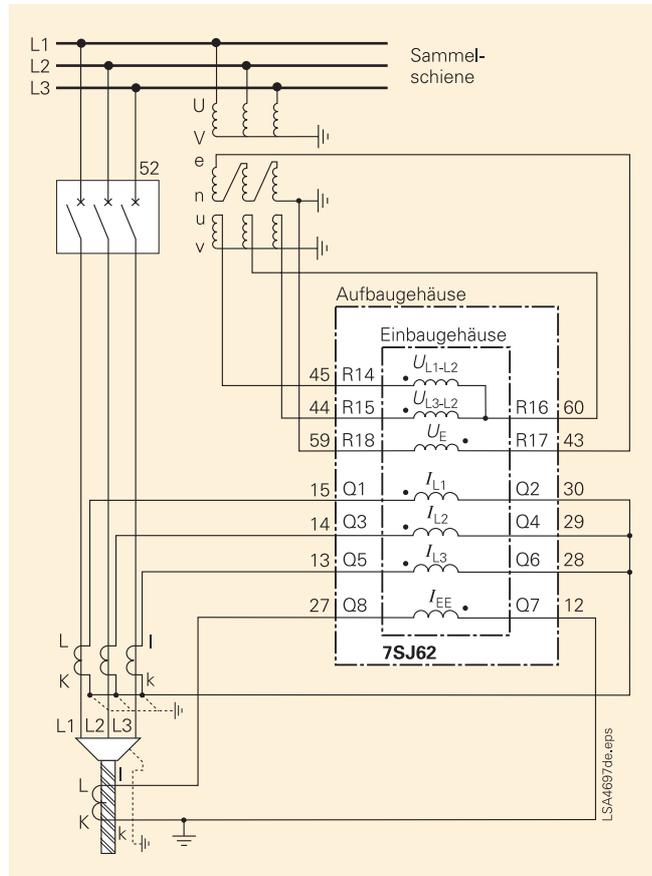


Bild 2 Anschlussplan 7SJ62

Die thermische Warnstufe Parameter 4204 bietet eine zusätzliche Warnmeldung vor der Auslösung an. Deshalb sollte sie unterhalb der Auslöseschwelle 100 % bei Maximalstrom eingestellt sein, beispielsweise 90 %. Wenn Sie wissen wollen, wie hoch der thermische Wert bereits bei Nennstrom liegt, rechnet man $1/k^2 = 1/(1,1 \cdot 1,1) = \frac{1}{1,2}$

etwa 0,83, also etwa 83 % bei $I_N = (54 \text{ A} / 75 \text{ A}) 1 \text{ A} = 0,72 \text{ A sek}$.

Die Stromwarnstufe kann gleich dem Maximalstrom gewählt werden.

Parameter 4208 A „Rückfallzeit nach Notanlauf“ ist nur aktiv, wenn auch eine Einkopplung über Binäreingang vorgenommen wird, die der Überlastschutzfunktion trotz anstehendem AUS-Signal einen Notanlauf erlauben soll.

Nr.	Parameter	Wert
4202	k-Faktor	0.8
4203	Zeitkonstante	40 min
4204	Thermische Warnstufe	90 %
4205	Stromwarnstufe	0.8
4207 A	Kt-Zeitfaktor bei Motorstillstand	3.5
4208 A	Rückfallzeit nach Notanlauf	100 s

Unter Anlagedaten 2 befindet sich ein wichtiger Parameter, der das Zusammenwirken von Überlastschutz und Anlaufzeitüberwachung regelt (Parameter 1107). Bis zu diesem Einstellwert ist die Überlastschutzfunktion aktiv, größere Stromwerte werden vom Gerät als Anlauf erkannt, die Anlaufzeitüberwachungsfunktion startet und das thermische Modell der Überlast erhöht sich nicht weiter. Es empfiehlt sich, den Wert auf etwa 50 % des Anlaufstromes einzustellen (in unserem Fall $250 \text{ A}/2 = 125 \text{ A}$, als Sekundärwert mit Stromwandlerverhältnis 75 A/1 A berücksichtigt = 1,66 A). Somit können sowohl Anläufe bei geringerer Nennspannung erkannt werden als auch genügend hohe Überlasten oberhalb des Maximalstromes (110 % von I_N) geschützt werden.

Nr.	Parameter	Wert
1107	Motoranlaufstrom (blk. Überlast)	1.66 A

Direkte Messung der Temperaturen

Zur Temperaturerfassung können bis zu 2 Thermoboxen mit insgesamt 12 Messstellen eingesetzt und vom Schutzgerät erfasst werden. Insbesondere an Motoren, Generatoren und Transformatoren lässt sich so der thermische Zustand überwachen. Bei rotierenden Maschinen werden zusätzlich die Lagertemperaturen auf Grenzwertverletzung kontrolliert. Die Temperaturen werden an verschiedenen Stellen des Schutzobjektes durch Temperatursensoren gemessen und dem Gerät über eine oder zwei Thermoboxen 7XV566 zugeführt.

Alternativ kann über die Thermobox die Umgebungs- bzw. Kühlmitteltemperatur der Überlastschutzfunktion zugeführt werden. Der notwendige Temperatur-Sensor muss dazu an den Sensoreingang 1 der 1. Thermobox angeschlossen werden.

Da sämtliche Berechnungen mit normierten Größen durchgeführt werden, ist die Umgebungstemperatur ebenfalls zu normieren. Als Normungsgröße wird die Temperatur bei Nennstrom herangezogen. Weicht der Nennstrom vom Wandlernennstrom ab, so muss die Temperatur mit nachfolgender Formel unter Parameter 4209 „Temperatur bei Nennstrom“ angepasst werden.

$$\vartheta_{N_{\text{sek}}} = \vartheta_{N, M} \cdot \left(\frac{I_{N_{\text{prim}}}}{I_{N, M}} \right)^2$$

Ist beispielsweise $\vartheta_{N, M} = 80 \text{ °C}$
(durch Messung erhalten),
so wird $\vartheta_{N_{\text{sek}}} = 80 \text{ °C} \cdot (75/54)^2 = 153 \text{ °C}$



Bild 3 Thermobox 7XV5662-xAD10

Nr.	Parameter	Wert
4209	Temperatur bei Nennstrom	153 °C

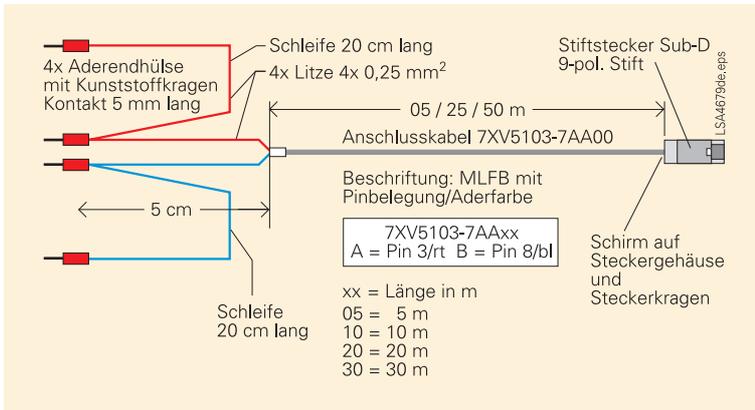


Bild 4 Anschlusskabel 7XV5103-7AAxx zwischen SIPROTEC und Thermobox

6. Wiedereinschaltsperr

Das zweite thermische Modell für den Motorschutz ist in der Wiedereinschaltsperr zum Schutz des Rotors realisiert. Das Hauptaugenmerk gilt der Anzahl der Anläufe aus dem kalten und warmen Zustand. Diese Daten fehlen in unserem Fall, so dass 3 Kaltanläufe (n_k) und 2 Warmanläufe (n_w) angenommen werden.

Die Läuferfemperaturausgleichszeit (Parameter 4304) wird auf 1 min gesetzt und definiert die Mindestpausenzeit zwischen den einzelnen Anläufen. Parameter 4302 „Anlaufstrom/Motornennstrom“ ergibt $250 \text{ A}/54 \text{ A} = 4,6$. Als Anlaufzeit wählt man den Wert, bei dem der Motor mit Nennarbeitsmoment und Nennspannung anläuft. Häufig kann die Zeit aus mitgelieferten Anlaufkurven entnommen werden. Im konkreten Fall sind das 5 s.

Das Abkühlverhalten für die Wiedereinschaltsperr kann bei fehlenden Daten ähnlich dem Abkühlverhalten des Überlastschutzes angenommen werden. Es war beim Überlastschutz $140 \text{ min}/40 \text{ min} = 3,5$. Dies wird für die Wiedereinschaltsperr unter Parameter 4308 eingegeben.

Parameter 4309 „Verlängerung Zeitkonstante beim Betrieb“ greift ein, wenn der Einschaltvorgang des Motors erfolgreich war und anschließend der Motor im Nennbetrieb weiterläuft. Die Abkühlung hierfür ist deutlich kürzer als unter Parameter 4308, da eine Eigenkühlung durch den Rotorbetrieb besteht, wir wählen deshalb Faktor 2.

Nach 3 Anläufen kurz hintereinander sperrt die Wiedereinschaltsperr und erteilt nach einer errechneten Pausenzeit ein Freigabesignal, um einmalig wieder zuschalten zu dürfen. Die intern errechnete Pausenzeit hängt von der jeweiligen Belastung ab und kann demzufolge unterschiedlich lang sein. Alternativ besteht die Möglichkeit, bewusst eine Mindestsperrzeit vorzugeben (beispielsweise wenn der Kunde auf erhöhten Sicherheiten besteht). Diese wird unter Parameter 4310 eingestellt.

Nr.	Parameter	Wert
4302	Anlaufstrom/Motornennstrom	4.6
4303	Maximal zulässige Anlaufzeit	5 s
4304	Läuferfemperaturausgleichszeit	1.0 min
4305	Motornennstrom	0.72 A
4306	Zul. Anzahl der Warmanläufe	2
4307	Diff. zw. Warm- u. Kaltanläufen	1
4308	Verläng. Zeitkonst. bei Stillstand	3.5
4309	Verläng. Zeitkonst. beim Betrieb	2.0
4310	Mindestsperrzeit	6.0 min

7. Schiefelastschutz

Da keine weiterführenden Informationen vorhanden sind, werden Empfehlungswerte eingesetzt. Bei unabhängiger Auslösecharakteristik sind dies:

$10 \% I^2/I_{N,M}$ für die Warnung bzw. Langzeitauslösung und etwa $40 \% I^2/I_{N,M}$ für eine kürzer verzögerte Auslösung. Die Einstellwerte müssen mit dem Übersetzungsverhältnis des Stromwandlers ($75 \text{ A}/1 \text{ A}$) auf die Sekundärseite umgerechnet werden. Für Parameter 4002 beträgt der Mindesteinstellwert 0,1 A.

Nr.	Parameter	Wert
4002	Anregestrom $I_2 >$	0.1 A
4003	Verzögerungszeit $T I_2 >$	20 s
4004	Anregestrom $I_2 >>$	0.30 A
4005	Verzögerungszeit $T I_2 >>$	3 s

■ 8. Überstromzeitschutz

Es wird nur der Phasenstromzeitschutz betrachtet, die Erdfunktion wird wegen der Erdung „isoliertes Netz“ über die empfindliche Erdfehlerfunktion abgedeckt. Zu beachten ist bei den Einstellwerten des Phasenstromzeitschutzes, dass diese über den Werten des Motoranlaufs liegen müssen. Die $I_{>>}$ -Stufe muss wegen dem kurzzeitig auftretenden Motor-inrush $> 1,5 \cdot$ Anlaufstrom eingestellt sein, wir wählen $1,6 \cdot (250/75) A = 5,33 A$. Die Zeitverzögerung $T_{I_{>>}}$ (Parameter 1802) wird mit 50 ms gewählt. Die Spitze des Anlaufstroms kann am Anfang sogar höher sein. Wenn die Verzögerungszeit $T_{I_{>>}}$ unverzögert auf 0 ms gesetzt wird, sollte deshalb für die $I_{>>}$ -Stufe $2,5 \cdot$ Anlaufstrom eingestellt werden. Für die $I_{>}$ -Stufe wird $1,1 \cdot (250/75) A = 3,6 A$ errechnet.

Tritt ein Kurzschlussstrom auf, der z. B. durch einen Übergangswiderstand bei $2,5 \cdot I_{N,M}$ liegt, so wird der Überstromzeitschutz nicht ansprechen, sondern wie Bild 5 zeigt, die Anlaufzeitüberwachung auslösen. Die Auslösung kommt jedoch erst nach einigen Sekunden (in unserem Beispiel $> 7 s$) und kann zu enormen Schäden führen.

Es besteht nun die Möglichkeit, die UMZ-Einstellwerte während des Motornennbetriebs herabzusetzen, um sensibler auf Stromfehler jeglicher Art reagieren zu können (siehe Bild 6). Dazu wird die Option der „Dynamischen Parameterumschaltung“ verwendet: Während des Normalzustands, also laufender Motor, sind tiefere Einstellwerte gültig, die bei Fehlern ab bereits $1,5 \cdot I_{N,M}$ (abhängig von Überlastbedingungen) in kurzer Verzögerung auslösen können.

Zum Erkennen der ausgeschalteten Anlage und somit Umschalten auf hohe Einstellwerte stehen wahlweise zwei Kriterien zur Verfügung:

- Die Stellung des Leistungsschalters wird dem Gerät über Binäreingaben mitgeteilt (Parameter 1702 dynPAR.START = LS-Position).
- Es wird das Unterschreiten einer einstellbaren Stromschwelle (Parameter 1702 dynPAR.START = Stromkriterium) benutzt.

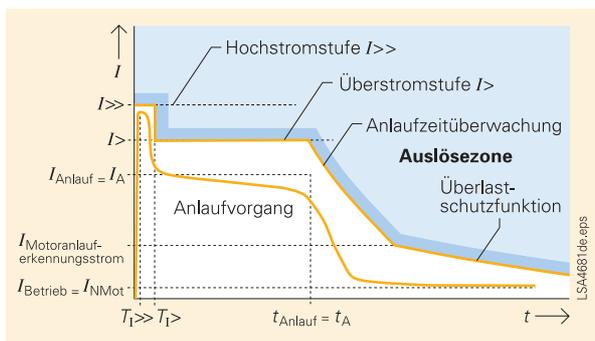


Bild 5 Koordination der Schutzfunktionen (ohne dynamische Parameterumschaltung)

Die Wirkzeit, Parameter 1704, muss höher als die Motoranlaufzeit eingestellt sein. Der herabgesetzte Wert für $I_{>}$, Parameter 1204, ergibt sich aus $1,5 \cdot (54/75) A = 1,1 A$.

Dynamische Parameterumschaltung:

Nr.	Parameter	Wert
1703	Unterbrechungszeit	0 s
1704	Wirkzeit	8 s
1801	Anreghostrom $I_{>>}$	5.33 A
1802	Verzögerungszeit $T_{I_{>>}}$	0.05 s
1803	Anreghostrom $I_{>}$	3.6 A
1804	Verzögerungszeit $T_{I_{>}}$	0.2 s

UMZ-Schutz:

Nr.	Parameter	Wert
1202	Anreghostrom $I_{>>}$	5.33 A
1203	Verzögerungszeit $T_{I_{>>}}$	0.05 s
1204	Anreghostrom $I_{>}$	1.1 A
1205	Verzögerungszeit $T_{I_{>}}$	1 s

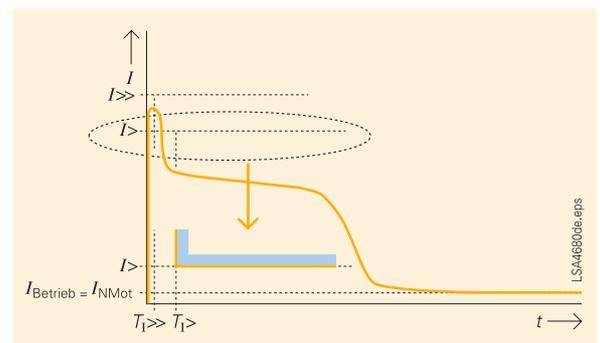


Bild 6 Herabsetzen der Überstromzeitschutz- $I_{>}$ -Stufe während Nennbetrieb

Eine zusätzliche Programmierung mit CFC-Logik ist nicht notwendig. Die Umschaltung geschieht automatisch. Um bei kurzen, großen Überlastungen (Load Jam) nicht frühzeitig mit der $I_{>}$ -Stufe Parameter 1204 auszulösen, erhöht man die Auslösezeit auf 1s.

■ 9. Empfindliche Erdfehlererfassung

Die empfindliche Erdfehlererfassung beinhaltet eine Vielzahl von Einstellungen, um z.B. die Verlagerungsspannung exakt zu bestimmen oder Wandlerfehler zu korrigieren. Wir betrachten nur die wesentlichen Einstellungen, um einen gerichteten Erdfehler zu erkennen. Die weiteren Parameter können auf Standardeinstellung gesetzt bleiben. Die Schwellwerte für den I_{EE} -Strom müssen über die Netzdaten ermittelt werden. Dazu benötigt man die Kabellängen und Kabeltypen, um den kapazitiven Erdstrom I_{CE} zu errechnen. Zum Teil wird auch ein Belastungswiderstand vorgeschaltet, um bei Auftreten einer Verlagerungsspannung einen erhöhten Erdschlussstrom zu erhalten. Angenommen sei ein kapazitiver Erdstrom I_{CE} von 20 A. Für einen Schutzbereich von 90 % soll der Schutz bereits bei 1/10 der vollen Verlagerungsspannung arbeiten (Parameter 3109 mit $0,1 \cdot 100 \text{ V} = 10 \text{ V}$), wo sich auch nur 1/10 des Erdschlussstromes ergibt. Für Parameter 3117 stellt man somit $(20 \text{ A}/(60 \text{ A}/1 \text{ A})) 0,1 \approx 0,035 \text{ A}$ ein.

Für die Richtungsbestimmung ist zu beachten, dass der Erdstrom in Richtung zu schützender Motor fließt, wenn Parameter 3122 „vorwärts“ und Parameter 0201 Stromwandlersternpunkt Richtung „Leitung“ gewählt und der Erdwandler wie in Bild 2 angeschlossen ist.

Nr.	Parameter	Wert
3113	Anregestrom IEE>>	0.5 A
3114	Verzögerungszeit T IEE>>	∞
3117	Anregestrom IEE>	0.035 A
3118	Verzögerungszeit T IEE>	5 s
3109	Uen> gemessen	10 V
3122	Richtung IEE>	Vorwärts
3125	Messart	Sinus Phi

■ 10. Spannungsschutz

Bis ca. 80 % der Nennspannung sind vom Motor noch zu beherrschen, Werte darunter führen zur Instabilität.

Nr.	Parameter	Wert
5103	Anregespannung U<	75 V
5106	Verzögerungszeit T U<	1.5 s
5111	Anregespannung U<<	70 V
5112	Verzögerungszeit T U<<	0.5 s

■ Zusammenfassung

Die Motorschutzfunktionen des 7SJ62, abgeleitet sowohl von den Strom- als auch den Spannungseingängen, ergeben eine Kombination, die dem Anwender einen effektiven und kostengünstigen Rundumschutz anbietet und in der Industrie bei Mittelspannungsmotoren sehr häufig zum Einsatz kommt. Es wurden die Schritte zur Übertragung der Motordaten in 7SJ62 Einstelldaten diskutiert, sowie für fehlende Motorkenngrößen die passenden Ersatzstellwerte vorgeschlagen.

Schutz von Asynchronmotoren großer Leistung

Um Netzurückwirkungen beim Einschalten von Motoren möglichst gering zu halten, werden Hochspannungsmotoren häufig über ein Anlassverfahren zugeschaltet. Dabei haben verschiedene Verfahren einen Einfluss auf die Auslegung des Schutzes. In diesem Kapitel wird die Schutzeinstellung unter Berücksichtigung eines Teilspannungsanlaufs über Anlasstransformator erarbeitet.

■ 1. Geräteauswahl

Für den Schutz eines Motors gegen die verschiedenen Fehlerarten ist ein sinnvoller Funktionsmix erforderlich. Bei der Festlegung sollte neben der Leistungsgröße des Motors die Bedeutung des Antriebes für den technologischen Prozess, die Betriebsbedingungen und die Anforderungen des Motorherstellers zu Grunde gelegt werden. Der Motor aus diesem Beispiel hat eine Nennleistung von 3 MW. Bei Motoren dieser Größe wird empfohlen, einen schnellen Kurzschlusschutz in Form eines Differentialschutzes einzusetzen, der durch einen 7UM62 in der Bestellvariante Asynchronmotor realisiert wird. Weitere Schutzfunktionen, die für einen Motor dieser Leistungsgröße empfohlen werden, sind:

Schutzfunktion	Abkürzung	ANSI
Thermischer Überlastschutz für Ständer	I^2t	49
Wiedereinschaltsperr für Läufer	I^2t	66, 49R
Anlaufzeitüberwachung	I_A^2t	48
Schiefelastschutz	$I_2 >$	46
Erdschlusschutz	$U_0 >$	59N
Differentialschutz	$\Delta I >$	87M

Der Transformatorschutz wird in diesem Kapitel nicht berücksichtigt und muss durch zusätzliche Hardware realisiert werden. Dies kann z. B. durch einen zweiten 7UM62 realisiert werden, der als Transformatorordifferentialschutz eingestellt wird. Durch den Einsatz einer einheitlichen Hardware können Einsparungen in der Ersatzteilkhaltung erreicht werden.

Eine andere Möglichkeit zum Schutz des Transformators ist ein Trafodifferentialschutz 7UT6. Bei einem ausgelagerten Transformator kann der Leitungsdifferentialschutz 7SD610 mit der Zusatzfunktion – Trafo im Schutzbereich – eingesetzt werden.

■ 2. Anschaltung

Der Asynchronmotor ist entsprechend nachfolgendem einpoligem Übersichtsbild (Bild 1) in Blockschaltung an einen Yd5 Transformator geschaltet. Mit Rücksicht auf die Netzverhältnisse soll der Anlaufstrom I_A klein gehalten werden, deshalb erfolgt der Anlauf über einen Teilspannungsanlauf in der sogenannten Dreischaltermethode bzw. auch Korndorferschaltung genannt. Die Maschinenspannung wird während des Anlaufes über einen Anlasstransformator (Spartransformator) herabgesetzt. Sobald der Motor eine bestimmte Drehzahl erreicht hat, wird der Transformator mit Q2 überbrückt und der Motor wird an die volle Netzspannung geschaltet.

Der Anlaufvorgang erfolgt wie nachfolgend beschrieben:

- 1) Q3 geschlossen
- 2) Über Q1 wird der Anlasstransformator ans Netz geschaltet und läuft mit reduzierter Spannung an.

Die Motorspannung wird über eine Mittelanzapfung am Anlasstransformator abgegriffen und ergibt sich zu:

$$U_M = \frac{n_2}{n_1} U_{\text{Netz}} \quad \frac{n_2}{n_1} = \text{Windungsverhältnis des Anlasstransformators}$$

Die Motorspannung kann über den Anlasstransformator so weit herabgesetzt werden, wie es mit Rücksicht auf das Gegenmoment im Anlauf zulässig ist. Im gleichen Verhältnis wie das Anlaufmoment geht auch der netzseitige Anlaufstrom zurück.

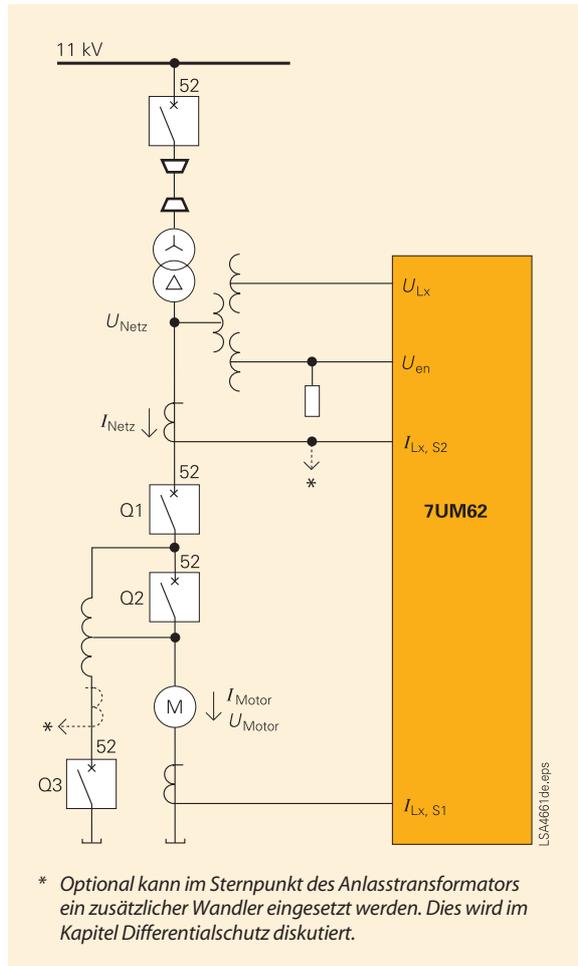


Bild 1 Einpoliges Übersichtsdiagramm

Die Stromaufnahme aus dem Netz während des Anlassvorganges ergibt sich zu:

$$I_{\text{Netz}} = \frac{n_2}{n_1} I_M$$

und wird über das Übersetzungsverhältnis des Anlasstransformators begrenzt.

- 3) In der nächsten Startphase wird Q3 geöffnet und der Motor wird über die Reiheninduktivität des Anlasstransformators aus dem Netz versorgt.
- 4) Nachdem der Motor die vorgeschriebene Drehzahl erreicht hat, wird Q2 geschlossen und der Motor mit voller Netzspannung betrieben.

3. Nenndaten

Wandler

Stromwandler Sternpunktseite	650 A/1 A
Stromwandler Zuleitungsseite	650 A/1 A
Spannungswandler	$\frac{3,3 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \mid \frac{100 \text{ V}}{\sqrt{3}} \mid \frac{100 \text{ V}}{3}$

Motor

Größe	Wert	
Nennleistung	3000 kW	
Nennspannung	3300 V	
Nennstrom	591 A	
Leerlaufstrom	93 A	
Thermisch dauerhaft zulässiger Strom	650 A	
Thermische Ständerzeitkonstante	12 min	
Abkühl-Ständerzeitkonstante	60 min	
Zulässige Anläufe aus dem kalten Zustand	3	
Zulässige Anläufe aus dem warmen Zustand	2	
	100 % U_N	57 % U_N
Anlaufstrom	6,7 I_N	3,7 I_N
Anlaufzeit	5 s	28 s
Festbremszeit des Läufers, kalte Maschine	5 s	29 s
Festbremszeit des Läufers, warme Maschine	4 s	21 s

Anfahrtransformator

Primär-Spannung	3300 V
Sekundär-Spannung	2362 V

■ 4. Angewendete Schutzfunktionen

Nachfolgend werden die verschiedenen Schutzfunktionen diskutiert. Die Einstellungen werden als Sekundärwerte angegeben. Der Schwerpunkt liegt auf den Schutzfunktionen Differentialschutz und Erdschlussschutz. Schutzfunktionen, die den Motor vor einer thermischen Überlastung schützen, sind im Kapitel „Thermische Beanspruchung von Motoren und erforderliche Schutzfunktionen“ detaillierter beschrieben.

4.1 Differentialschutz

Der Differentialschutz bildet einen schnellen Kurzschlusschutz für den Motor. Das Messprinzip beruht auf dem Stromvergleich aller in das Schutzobjekt einfließenden Ströme (Knotenpunktsatz nach Kirchhoff). Die Zählpfeilrichtung ist so festgelegt, dass Ströme in Richtung Schutzobjekt positiv gezählt werden.

Nach Bild 2 ergibt sich für den Differentialstrom:

$$\Delta I = I_{\text{Diff}} = |I_1 + I_2|$$

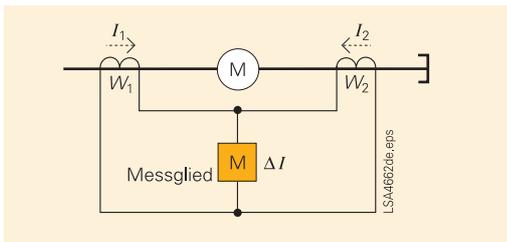


Bild 2 Grundprinzip des Differentialschutzes am Motor (1-phasige Darstellung)

Wenn im Einschaltmoment sehr große Anlaufströme den Schutzbereich durchfließen, tritt bei unterschiedlichem Übertragungsverhalten im Sättigungsbereich der Wandler W1 und W2 im Messglied M ein entsprechender Differenzstrom auf, der eine Auslösung verursachen kann.

Um eine solche Überfunktion des Schutzes zu vermeiden, wird zusätzlich ein stabilisierender Strom I_{Stab} eingeführt.

$$I_{\text{Stab}} = |I_1| + |I_2|$$

Über Differential- und Stabilisierungsstrom ist eine Differentialschutzkennlinie (Bild 3) definiert, die aus vier Kennlinienästen a, b, c und d besteht.

Die Anregung des Differentialschutzes ist zweistufig. Außer der Ansprechschwelle $I_{\text{Diff}} >$ ist noch eine zweite Ansprechschwelle $I_{\text{Diff}} \gg$ eingeführt. Bei Überschreiten von $I_{\text{Diff}} \gg$ wird unabhängig von der Größe des Stabilisierungsstromes auf Auslösung erkannt.

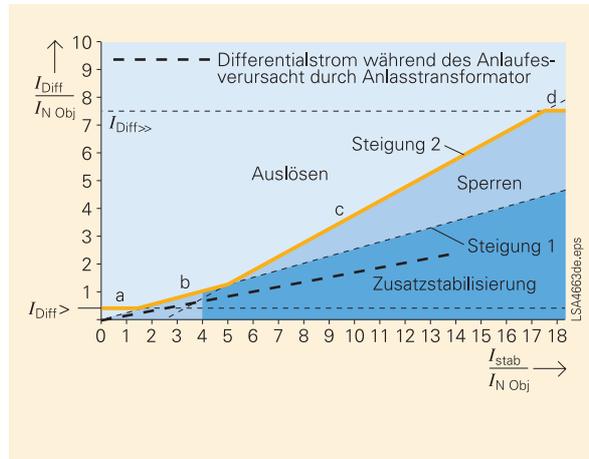
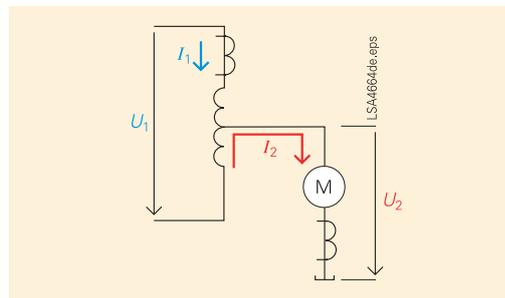


Bild 3 Auslösekennlinie des Differentialschutzes mit Fehlerkennlinie

Bei einem Motor, der über einen Anlasstransformator gestartet wird, muss der Start genauer beleuchtet werden. Bedingt durch das Übersetzungsverhältnis des Anlasstransformators während des Starts gilt hier:

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2$$



$$I_{\text{Diff}} = |I_1 + I_2| = \left| I_2 - \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2 \right| = \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right) \cdot I_2$$

$$I_{\text{Stab}} = |I_1| + |I_2| = \left| -\frac{U_2}{U_1} I_2 \right| + |I_2| = \left(\frac{U_2}{U_1} + 1 \right) \cdot I_2$$

Überprüft werden muss, ob der Differentialstrom, der während des Anlaufs durch den Anlasstransformator hervorgerufen wird, zur Auslösung führt. Der Differentialstromverlauf ergibt sich zu:

$$\frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Stab}}} = \frac{1 - \frac{U_2}{U_1}}{\frac{U_2}{U_1} + 1} = \frac{1 - \frac{2362 \text{ V}}{3300 \text{ V}}}{\frac{2362 \text{ V}}{3300 \text{ V}} + 1} = 0,166$$

und ist als gestrichelte Linie in das Kennlinien-diagramm (Bild 3) eingezeichnet. Aus der Kennlinie ist ersichtlich, dass sich der Differentialstrom immer im Sperrbereich der Kennlinie befindet – der Differentialschutz ist trotz des vorhandenen Differentialstromes während des Anlaufes stabil

und kann deshalb auch während des Startvorganges aktiv geschaltet sein.

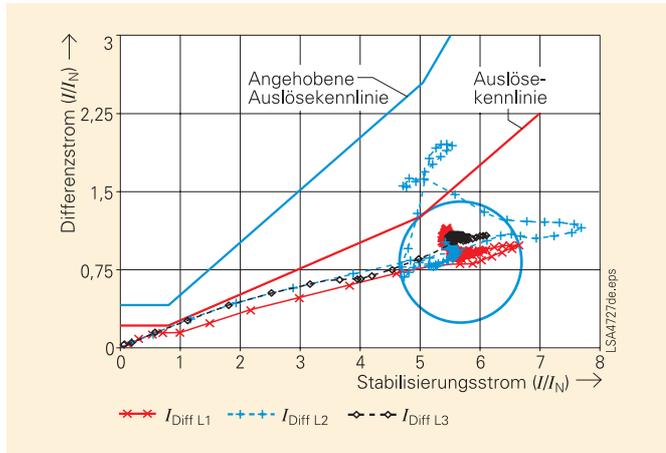


Bild 4 Differentialströme bei Motoranlauf (ca. 5 s) (Auswertung der aufgezichneten Differential- und Stabilisierungsströme mit Mathcad)

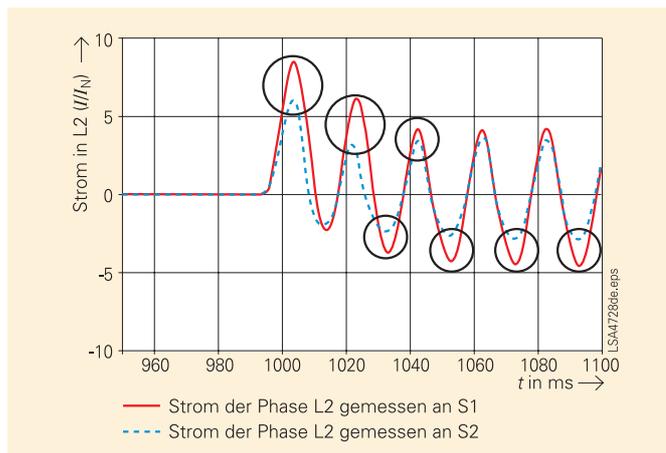


Bild 5 Darstellung der Ursache für den Differentialstrom – Wandler-sättigung in Phase L2 der Seite 2 (Auswertung mit Mathcad)

Bild 4 stellt die Wertepaare aus einem aufgezeichneten Momentanwertschrieb dieses Motors im Auslöseprogramm des Differentialschutzes dar. Der Verlauf spiegelt den berechneten Verlauf des Differentialstromes wieder – der Fehlerstrom wandert auf der „Geraden“ in den quasi stationären Arbeitspunkt (blauer Kreis)

Noch während des Anlaufens kommt es in der Phase L₂ (+++ dargestellte Kennlinie) auf Grund von hohen Anlaufströmen zu Wandlersättigung (siehe Bild 5) mit einem starken Anstieg des Differentialstromes, so dass der Arbeitspunkt in das Auslösegebiet oberhalb der Auslösekennlinie wandert und im ungünstigen Fall eine ungewollte Auslösung des Differentialschutzes nach sich zieht.

Um in dieser Betriebssituation eine Überfunktion zu vermeiden, kann im Anlaufmoment der Ansprechwert des Differentialschutzes erhöht werden. Für den Schutz eines Motors wird empfohlen die Differentialschutzkennlinie während des Anlaufes um den Faktor 2 zu erhöhen. Im Bild 4 ist zu erkennen, dass der Differentialstrom die angehobene Auslösekennlinie nicht überschreitet. Der Differentialschutz bleibt stabil.

Bild 5 zeigt den Momentanwertverlauf der Ströme für den Leiter L₂. Das Sättigungsverhalten ist nach den beiden ersten Sinuskurven deutlich zu erkennen.

Ursache hierfür sind Gleichstromglieder im Anlaufstrom. Obwohl gleiche Wandler eingesetzt sind, führt eine unterschiedliche Wandlerbürde zu einem abweichenden Übertragungsverhalten mit einem Differentialstrom (siehe Bild 4).

Im Bild 6 ist in der obersten Kurve I_1 der Anlaufstrom (Mitsystemstrom) des Motors als Effektivwertschrieb der Seite 2 (Zuleitungsseite des Motors) dargestellt. Der Schrieb wurde während der Inbetriebsetzung des Motors mit dem Schutzrelais 7UM62 aufgezeichnet. Der Anlaufstrom zeigt einen typischen Verlauf. Auffällig ist die Stromspitze bei ca. 21,5 s, welche durch Ausgleichsvorgänge beim Kurzschließen des Anlasstransformators (schließen von Q2) hervorgerufen wurde. Die Anlauferhöhung sollte über diesen Zeitpunkt hinaus aufrechterhalten bleiben.

Durch das Aktivieren der Ansprechwerterhöhung wird im Anlauf die Empfindlichkeit des Differentialschutzes verringert. Soll auf die volle Empfindlichkeit nicht verzichtet werden, wird ein zusätzlicher Wandler im Sternpunkt des Anlasstransformators (siehe Hinweis zu Bild 1) benötigt. Die Wandlersekundärseite wird mit dem Wandler der Seite 2 (Anschlussseite) umgekehrt parallelgeschaltet und dadurch der Strom auf der Anschlussseite korrigiert. Dem Differentialschutz werden dadurch auch im Anlauf die korrekten Messwerte zur Verfügung gestellt und die Anhebung der Ansprechkennlinie kann entfallen – der Differentialschutz arbeitet auch während des Startens mit der normalen Empfindlichkeit.

Im vorliegenden Beispiel war der zusätzliche Wandler im Sternpunkt des Anlasstransformators nicht vorhanden, es wurde die Erhöhung der Ansprechkennlinie gewählt, um die Stabilität des Schutzes zu gewährleisten. Empfehlenswert ist es, während der Inbetriebsetzung die Art der Störwertaufzeichnung auf Effektivwertaufzeichnung zu stellen, auf diese Weise ist es möglich, auch den gesamten Startvorgang (≤ 80 s) aufzuzeichnen.

Die Aufzeichnung eines Schriebs erfolgt durch das 7UM62 automatisch, sobald der Stabilisierungsstrom mehr als 85 % in das Gebiet der Zusatzstabilisierung reicht, so dass mit jedem Start automatisch ein Schrieb angelegt wird und dieser nicht separat angestoßen werden muss.

Zum Abschluss der Inbetriebsetzung sollte die Aufzeichnung auf Momentanwertaufzeichnung umgestellt werden, bei der auch der Differentialstrom und der Stabilisierungsstrom aufgezeichnet werden.

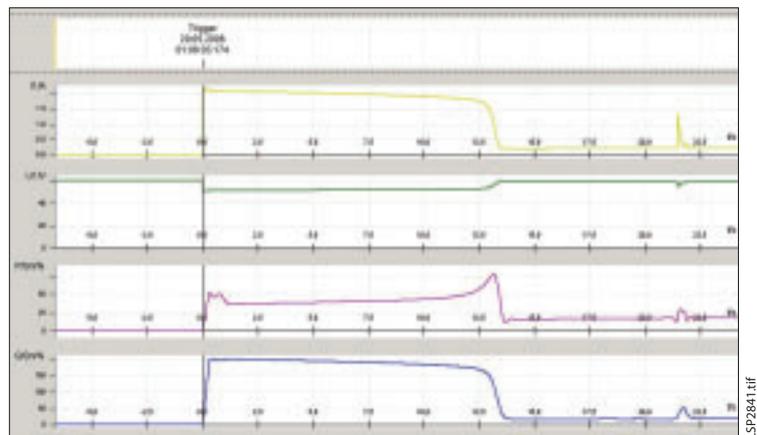


Bild 6 Anlaufstrom des Motors (Effektivwertschrieb aus dem 7UM62)

Nachfolgend sind die Einstellparameter für die Differentialschutzfunktion aufgelistet und kurz kommentiert.

Einstellparameter	Wert	Kommentar
I-DIFF> Ansprechwert der Auslösestufe IDIFF>	0.20 I/InO	Der Einstellwert ist auf den Nennstrom des Schutzobjektes bezogen. Die Voreinstellung von 0,20 I/InO kann beibehalten werden.
T I-DIFF> Zeitverzögerung der Auslösestufe IDIFF>	0.00 s	Die Verzögerungszeit T I-DIFF> wird gestartet, wenn auf einen inneren Fehler im Motor erkannt worden ist. Im Normalfall soll der Differentialschutz unverzüglich auslösen, so dass die Voreinstellung von 0 s beibehalten werden kann.
I-DIFF>> Ansprechwert der Auslösestufe IDIFF>>	7.5 I/InO	Bei der I-DIFF>> Stufe handelt es sich um eine unstabilierte Schnellauslösestufe. Für den Einstellwert muss sichergestellt sein, dass der Wert im Normalbetrieb nicht überschritten wird. Die Einstellung sollte am max. Anlaufstrom (hier 6,7 InO) orientiert werden.
T I-DIFF>> Zeitverzögerung der Auslösestufe IDIFF>>	0.00 s	Die Verzögerungszeit T I-DIFF>> ist eine Zusatzverzögerung und beinhaltet nicht die Eigenzeiten des Relais. Im Normalfall soll der Differentialschutz unverzüglich auslösen, so dass die Voreinstellung von 0 s beibehalten werden kann.
KL-ERHÖH ANLAUF Ansprechwerterhöhung bei Anlauf	Ein	Damit die Kennlinienerhöhung wirksam wird, muss diese mit dem Parameter KL-ERHÖH ANLAUF eingeschaltet werden.
ANLAUF-STAB Ansprechwert ISTAB für Anlauf-erkennung	0.10 I/InO	Der Einstellwert ist auf den Nennstrom des Schutzobjektes bezogen.
ANLAUF-FAKTOR Ansprechwerterhöhung bei Anlauf	2	Mit dem ANLAUF-FAKTOR wird der Erhöhungsfaktor der Ansprechwerte bei Anlauf festgelegt. Ein Faktor von 2 hat sich als praktikabel erwiesen.
Max. ANLAUFZEIT Maximale Anlaufzeit	30.0 s	Die maximale Anlaufzeit ist in den Motordaten mit 28 s angegeben. Die Anlauferhöhung sollte für den gesamten Anlauf wirksam sein, deshalb wird die Einstellung mit 30 s gewählt.

4.2 Erdschlussschutz

Ein Erdschluss wird durch einen Fehler an der Isolierung eines Leiters gegen Erde hervorgerufen.

Der Motor in diesem Beitrag ist in Blockschaltung angeschlossen. Die Auswertung der Verlagerungsspannung hat sich in diesem Fall als ein sicheres Kriterium der Erdschlusserfassung erwiesen. Bei einem Klemmenerdschluss tritt die volle Verlagerungsspannung U_E auf (Bild 7).

Sie verringert sich bei einem Erdschluss an der Wicklung proportional der Wicklungsspannung und wird beim Erdschluss im Maschinensternpunkt Null.

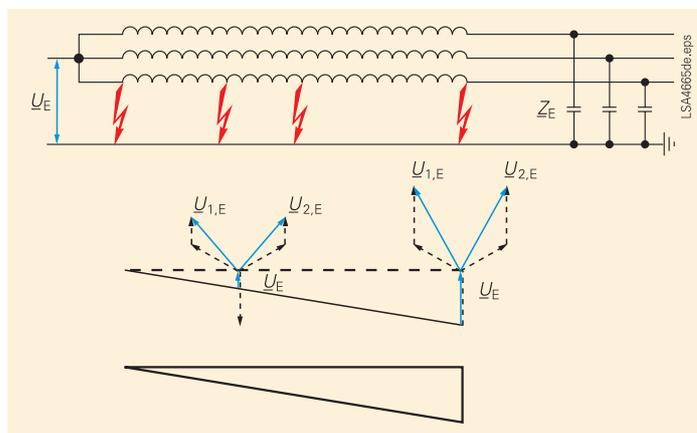


Bild 7 Verlagerungsspannung U_E in Abhängigkeit von der Fehlerstelle bei einem Erdschluss in der Maschinenwicklung

Um einen möglichst großen Schutzbereich an der Maschinenwicklung zu erreichen, sollte der Einstellwert für die Verlagerungsspannung sehr klein gewählt werden. Auf der anderen Seite wird die mögliche Empfindlichkeit des Schutzes durch Störspannungen begrenzt, die bei Erdschlüssen im vorgelagerten Netz über die Koppelkapazität des Blocktransformators auf die Motorspannungsseite übertragen werden.

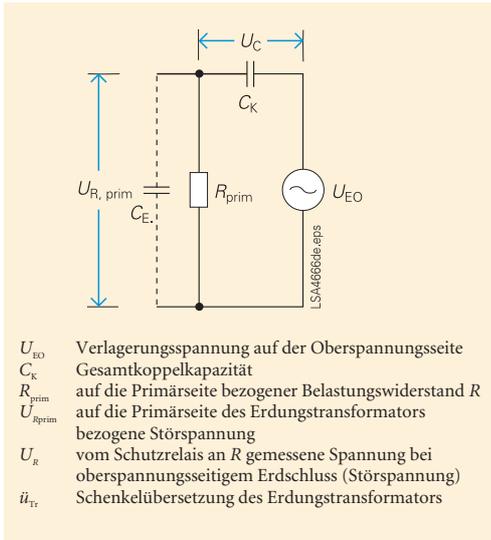


Bild 8 Einphasige Ersatzschaltung ($C_E = C_{Generator} + C_{Leitung} + C_{Transformator}$ vernachlässigt)

Die Ersatzschaltung im Bild 8 zeigt, dass sich U_{EO} auf die Spannungen U_C und $U_{R,prim}$ aufteilt. Über das Übersetzungsverhältnis des Spannungswandlers (Erdungstransformator) wird $U_{R,prim}$ auf die Sekundärseite übersetzt (U_R) und stellt die vom Relais am Belastungswiderstand gemessene Störspannung dar.

Da U_R kleiner als der Ansprechwert des Relais sein muss, ist der Belastungswiderstand R entsprechend niederohmig zu wählen. Man erreicht auf diese Weise einen Schutzbereich von ca. 80 bis 90 % der Motorwicklung. Um z.B. 80 % Schutzbereich zu erreichen, muss das Relais auf 20 % der vollen Verlagerungsspannung U_E eingestellt werden.

Dimensionierung des Erdschlussschutzes mit 80 % Schutzbereich

Der kapazitive Widerstand der Koppelkapazität C_K ist immer sehr viel größer als der ohmsche Widerstand des Belastungswiderstandes R . Der bei einem überspannungsseitigen Erdschluss auf die Unterspannungsseite übertragene Strom hängt daher praktisch nur von der Größe von C_K und von U_{EO} ab.

R wird so ausgelegt, dass U_R etwa die Hälfte des einzustellenden Ansprechwertes der Erdschlussfunktion beträgt. Damit wird doppelte Sicherheit gegen Fehlansprechen erreicht.

$$I_{C_{prim}} = U_{EO} \cdot 2 \pi f \cdot C_K = \frac{11 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot 2 \pi f \cdot 10 \text{ nF} \approx 0,02 \text{ A}$$

- $I_{C_{prim}}$ Störstrom auf der Primärseite des Erdungstransformators (Spannungswandler)
 - U_{EO} Verlagerungsspannung auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators
- $$U_{EO} = \frac{11 \text{ kV}}{\sqrt{3}}$$
- C_K Gesamtkapazität zwischen Ober- und Unterspannungsseite des Blocktransformators (Gesamtkoppelkapazität zwischen OS und US) $C_K = 10 \text{ nF}$ (kein Datenblatt des Transformators vorhanden => Standardwert)

$$I_{C_{sek}} = \frac{1}{3} I_{C_{prim}} \cdot i_{u,TR} = \frac{1}{3} \cdot 0,02 \text{ A} \cdot 57,1 = 0,38 \text{ A}$$

- $i_{u,TR}$ Übersetzungsverhältnis des Erdungstransformators (Spannungswandler)

$$i_{u,TR} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{\frac{100 \text{ V}}{3}} = \frac{\frac{3300 \text{ V}}{\sqrt{3}}}{\frac{100}{3}} = 57,1$$

- $I_{C_{sek}}$ Störstrom auf der Sekundärseite des Erdungstransformators (Spannungswandler)

$$R = SF \cdot K \cdot \frac{100 \text{ V}}{I_{C_{sek}}} = \frac{1}{2} \cdot 0,2 \cdot \frac{100 \text{ V}}{0,38 \text{ A}} = 26,3 \Omega$$

- SF Sicherheitsfaktor $U_R \approx 0,5 \cdot$ Relais-einstellwert
- K Schutzbereich 80 % $\rightarrow K = 0,2$
- R Belastungswiderstand

$$P = \frac{U^2}{R} = 380 \text{ VA}$$

- P erforderliche Leistung des Erdungstransformators bei Belastung mit R

$$I_{R_{max}} = \frac{U}{R} = \frac{100 \text{ V}}{26,3 \Omega} = 3,80 \text{ A} \text{ für } t \leq 20 \text{ s}$$

- $I_{R_{max}}$ Strom durch Belastungswiderstand R bei 100 % U_E

Gewählt wird:

- 1) Belastungswiderstand (mit z.B. 30 Ω) und einem einstellbaren Zwischenabgriff
- 2) Spannungswandler mit 380 VA für 20 s Belastungsdauer

Nachfolgend sind die Einstellparameter für den Erdschlussschutz aufgelistet und kurz kommentiert.

Einstellparameter	Wert	Kommentar
U0 > Anregespannung U0>	20.0 V	Mit dem Einstellwert wird der Schutzbereich für den Erdschlussschutz festgelegt. Ein Schutzbereich von 80 % (20 V) bis 90 % (10 V) der Ständerwicklung ist üblich. Eine Erhöhung der Empfindlichkeit bedeutet auch, dass der Belastungswiderstand kleiner wird und dadurch auch die Leistung des Erdungstransformators größer werden muss.
T SES Verzögerungszeit T SES	0.30 s	Bei der Festlegung der Verzögerungszeit muss die max. Belastungsdauer der Belastungseinrichtung berücksichtigt werden. Eine Verzögerungszeit von 0,3 s – 0,5 s hat sich als praktikabel erwiesen.

4.3 Thermischer Überlastschutz

Der Überlastschutz verhindert eine thermische Überbeanspruchung der Ständerwicklung des Asynchronmotors.

Nachfolgend sind die Einstellparameter für den thermischen Überlastschutz aufgelistet und kurz kommentiert.

Einstellparameter	Wert	Kommentar
K-FAKTOR maximal zulässiger Dauerstrom	1.00	Der thermisch maximal zulässige Dauerstrom I_{\max} wird als Vielfaches des Nennstromes I_N des Schutzobjekts beschrieben: $I_{\max \text{ prim}} = k \cdot I_N$ Aus dem Datenblatt kann der thermisch zul. Dauerstrom mit 650 A abgelesen werden. Bei nachfolgenden Motor- und Wandlerdaten ergibt sich: Nennstrom des Motors $I_N = 591 \text{ A}$ Thermisch zul. Dauerstrom $I_{\max \text{ prim}} = 650 \text{ A}$ Stromwandler 650 A/1 A $K\text{-Faktor}_{\text{Einstell}} = k \cdot \frac{I_{N, M}}{I_{N, Wdl. \text{ prim}}} = 1,1 \cdot \frac{591 \text{ A}}{650 \text{ A}} = 1,0$
τ Erwärmungszeitkonstante	720 s	Aus dem Motordatenblatt entnommen – 12 min
Kτ-FAKTOR Abkühlungszeitkonstante	5.0	Mit dem K τ -Zeitfaktor kann das Abkühlungsverhalten der Maschine bei Stillstand berücksichtigt werden. Aus dem Motordatenblatt entnommen – 60 min. Soll kein unterschiedliches thermisches Verhalten berücksichtigt werden, kann die Voreinstellung von 1 beibehalten werden
Θ WARN Thermische Warnstufe	90 %	Die thermische Warnstufe gibt eine Warnmeldung vor Erreichen der Auslösetemperatur ab. Bei dem in diesem Beispiel vorliegenden Motor mit einem $k = 1,1$ ergibt sich bei angepasstem Maschinen-nennstrom ein Übertemperaturendwert von $\frac{\Theta}{\Theta_{\text{AUS}}} = \frac{1}{k^2} = \frac{1}{1,1^2} = 83 \%$ der Auslösetemperatur. Ein Einstellwert von 90 % liegt damit oberhalb der betrieblich zu erwartenden Übertemperatur von 83 % aber unterhalb der Auslösetemperatur von 100 %.

Einstellparameter	Wert	Kommentar
I WARN Stromwarnstufe	1.00 A	Neben der thermischen Warnstufe ist noch eine Stromwarnstufe realisierbar. Die Stromwarnstufe sollte gleich dem dauerhaft zulässigen sekundären Nennstrom eingestellt werden. $I_{\text{Warn,sek}} = k \cdot \frac{I_{N, M}}{I_{N, Wdl, prim}} \cdot I_{N, Wdl, sek} = 1,1 \cdot \frac{591 \text{ A}}{650 \text{ A}} \cdot 1 \text{ A} = 1,0 \text{ A}$
I GRENZ Grenzstrom des thermischen Modells	2.27 A	Der Grenzwert ist so zu bemessen, dass auch beim größtmöglichen Kurzschlussstrom die Auslösezeiten des Überlastschutzes mit Sicherheit über denen der Kurzschlusschutzfunktionen liegen. Im Regelfall wird eine Begrenzung auf einen Sekundärstrom, der etwa 2,5 – 3 mal Maschinennennstrom entspricht, ausreichend sein.

4.4 Wiedereinschaltsperr

Gerade beim Starten des Motors wird der Läufer thermisch sehr stark belastet. Durch zu häufiges Starten von Motoren kann es zu einer thermischen Überbeanspruchung kommen. Die Wiedereinschaltsperr soll dann ein erneutes Einschalten des Motors unterbinden.

Da der Läuferstrom nicht direkt gemessen werden kann, wird die Läuferferemperatur mittels vorhandener Ständergrößen nachgebildet und beim Überschreiten einer Grenztemperatur eine erneute Wiedereinschaltung unterbunden.

Nachfolgend sind die Einstellparameter für die Wiedereinschaltsperr aufgelistet und kurz kommentiert.

Einstellparameter	Wert	Kommentar
I Anl/IMot.Nenn Anlaufstrom/Motornennstrom	3.7	Der Parameter Anlaufstrom wird als Verhältnis zum Motornennstrom (I Anl/IMot.Nenn) eingegeben. Zur richtigen Interpretation ist es wichtig, dass in den Anlagendaten1 die Scheinleistung SN GEN/MOTOR und die Nennspannung UN GEN/MOTOR des Motors richtig eingestellt ist. Aus dem Motordatenblatt wird der Strom bei der längsten Anlaufzeit genommen. Das ist der Wert bei abgesenkter Spannung. Im Datenblatt sind der Strom und die Anlaufzeit bei einer Spannung von 57 % U_N angegeben.
T ANLAUF MAX Maximal zulässige Anlaufzeit	28 s	Aus dem Motordatenblatt entnommen – die gewählte Zeit muss dem eingegebenen Anlaufstrom entsprechen.
n-WARM Zulässige Anzahl der Warmanläufe	2	Aus dem Motordatenblatt entnommen
n-KALT<->n-WARM Diff. zwischen Warm- und Kaltanläufen	1	Aus dem Motordatenblatt entnommen
T AUSGLEICH Läuferfermentperaturausgleichszeit	1 min	Im Motordatenblatt sind keine Werte angegeben. Hier wird empfohlen, die Voreinstellung zu belassen. Siehe auch das Kapitel „Thermische Beanspruchung von Motoren und erforderliche Schutzfunktionen“
Kτ-BETRIEB Verlängerung der Zeitkonstante τ_L bei Betrieb	2	Während der Motor läuft, wird die Erwärmung des thermischen Läuferabbildes mit der aus den Motorkennwerten berechneten Zeitkonstanten τ_L berechnet. Damit man den Anforderungen nach einer langsameren Abkühlung gerecht wird, wird die Abkühlung während des Betriebes mit der Zeitkonstanten $\tau_L \cdot K\tau\text{-BETRIEB}$ gebildet. Im vorliegenden Motordatenblatt stehen keine Läuferzeitkonstanten zur Verfügung. Es wird dann empfohlen, die Voreinstellung $K\tau = 2$ zu belassen – die Abkühlung dauert doppelt so lange wie die Erwärmung.

Einstellparameter	Wert	Kommentar
IKτ-STILLSTAND Verlängerung der Zeitkonstanten τ_L bei Stillstand	5	Um bei eigenbelüfteten Motoren die geringere Wärmeabgabe bei Motorstillstand richtig zu berücksichtigen, kann die Abkühlzeitkonstante bei Stillstand $\tau_L \cdot K\tau$ - STILLSTAND getrennt eingegeben werden. Im vorliegenden Motordatenblatt stehen keine Läuferzeitkonstanten zur Verfügung. Es wird dann empfohlen, die Voreinstellung $K\tau = 5$ zu belassen – die Abkühlung bei Stillstand dauert 5-fach so lange wie die Erwärmung. Für die ordnungsgemäße Funktion ist wichtig, die Stromschwelle zur Unterscheidung Motorstillstand/Motorlauf LS I> (Empfehlung $0,1 \cdot I_{N,M}$) korrekt einzustellen.
T MIN.SPERRZEIT Mindestsperrzeit der Wiedereinschaltsperr	12.8 min	Unabhängig von thermischen Modellen kann mit der T MIN.SPERRZEIT die Forderung nach einer Mindestsperrzeit nach Überschreiten der zulässigen Anläufe erfüllt werden. Den Einstellparameter entsprechend der Angaben des Motorherstellers einstellen. Bei dem vorliegenden Motor sind diesbezüglich keine Anforderungen gegeben, so dass wir den Einstellwert am thermischen Modell orientieren. $\tau_L \cdot K\tau$ -BETRIEB = $28 \text{ s} \cdot (3-2) \cdot 3,7^2 \cdot 2 = 766 \text{ s}$

■ 4.5 Anlaufzeitüberwachung

Die Anlaufzeitüberwachung ergänzt die Überlastfunktion und die Wiedereinschaltsperr, um eine unzulässige thermische Beanspruchung des Läufers aufgrund von zu langen Anläufen durch z. B. blockierten Läufer zu verhindern.

Nachfolgend sind die Einstellparameter für die Anlaufzeitüberwachung aufgelistet und kurz kommentiert.

Einstellparameter	Wert	Kommentar
ANLAUFSTROM Anlaufstrom des Motors	3.07 A	Anlaufzeitüberwachung arbeitet mit den Messwerten der Seite 2. Der Anlauf erfolgt über einen Anlasstransformator, dies muss bei der Einstellung berücksichtigt werden. $I_{A \text{ reduz}} = \left(\frac{2362 \text{ V}}{3300 \text{ V}} \right)^2 \cdot 6,7 \cdot \frac{591 \text{ A}}{650 \text{ A}} \cdot 1 \text{ A} = 3,07 \text{ A}$
MAX. ANLAUFZEIT Zulässige Anlaufzeit des Motors	18 s	Der Einstellwert zur max. Anlaufzeit wird an der in Bild 6 dargestellten Anlaufkennlinie orientiert. Der Anlauf dauert etwa 14 s. Der Einstellwert wird mit 18 sec etwas größer gewählt.
I ANL. ERKENN Stromschwelle zur Anlaufenerkennung	1.50 A	Die Schwelle muss oberhalb des maximalen Laststromes (Lastspitzen müssen berücksichtigt werden) und unterhalb des minimalen Anlaufstromes liegen. Im vorliegenden Beispiel wird die Anlaufenerkennung oberhalb des dauerhaft zulässigen Stromes und unterhalb des erwarteten Anlaufstromes eingestellt. 1) dauerhaft zulässiger Strom: $I_{\text{thermzul}} = \frac{650 \text{ A}}{650 \text{ A}} I_{N, \text{Wdl.sek}} = 1 \cdot I_{N, \text{Wdl.sek}} = 1 \text{ A}$ 2) Anlaufstrom bei $U_M = 2362 \text{ V}$ Annahme: Anlaufstrom reduziert sich linear $I_{A \text{ reduz}} = \left(\frac{2362 \text{ V}}{3300 \text{ V}} \right)^2 \cdot 6,7 \cdot \frac{591 \text{ A}}{650 \text{ A}} \cdot 1 \text{ A} = 3,07 \text{ A}$ Einstellparameter I ANL. ERKENN wird mit $\leq 0,5 \cdot 3,07 \text{ A} = 1,53 \text{ A} \approx 1,5 \text{ A}$ eingestellt.
FESTBREMSZEIT Festbremszeit des Motors	4 s	Der Einstellwert wurde aus dem Datenblatt des Motors übernommen. Da die maximal zulässige Festbremszeit t_E kürzer ist als die Anlaufzeit des Motors, muss das Festbremsen des Läufers über einen externen Drehzahlwächter erfasst und in das Schutzgerät über einen Binäreingang („>Festbrems“) eingelesen werden.

■ 4.6 Schiefastschutz

Eine Schiefast entsteht durch den Ausfall einer Phase oder durch Unsymmetrie der Netzspannung. Häufig läuft der Motor weiter und nimmt gegenüber dem dreiphasigen Betrieb einen erhöhten Strom auf, der zur Überschreitung der zulässigen Grenztemperatur führen kann.

Der Schiefastschutz des 7UM62 arbeitet mit dem Inversstrom I_2 – wird ein parametrierbarer Schwellwert überschritten, kommt es zum Starten der Auslösezeit, nach deren Ablauf ein Auslösekommando erfolgt.

Nachfolgend sind die Einstellparameter für den Schiefastschutz aufgelistet und kurz kommentiert.

■ Zusammenfassung

Der applikationsorientierte Funktionsmix des SIPROTEC 7UM62 lässt sich in der Bestellvariante „Asynchronmotor“ vorteilhaft für diesen Anwendungsfall einsetzen. Der Asynchronmotor ist mit nur einem Multifunktionsgerät optimal geschützt.

Einstellparameter	Wert	Kommentar
I2 ZUL. Dauernd zulässige Schiefast	9.1 %	<p>Für das thermische Abbild ist der maximal dauernd zulässige Inversstrom $I_{2\max,prim}/I_N$ maßgebend. Dieser beträgt erfahrungsgemäß zwischen 6 % und 12 %.</p> $I_{2\text{zul}} = \frac{I_{2\max,prim}}{I_{N,M}} \cdot \frac{I_{N,M}}{I_{N,Wdl,prim}}$ <p>Vom Maschinenhersteller sind keine Werte für den maximal zulässigen Inversstrom gegeben. Gewählt wird deshalb $I_{2\max,prim}/I_N = 10 \%$.</p> $I_{2\text{zul}} = 10 \% \cdot \frac{591 \text{ A}}{650 \text{ A}} = 9,1 \%$
FAKTOR K Unsymmetriefaktor K	1.65 s	<p>Der Unsymmetriefaktor ist maschinenabhängig und stellt die Zeit in Sekunden dar, die der Motor mit 100 % Schiefast maximal belastet werden darf.</p> <p>Wenn keine Vorgaben vom Motorhersteller gemacht werden, wird die konservative Einstellung von $K_{prim} = 2 \text{ s}$ gewählt.</p> <p>Mit nachfolgender Beziehung ist der Faktor K_{prim} auf die Sekundärseite umrechenbar:</p> $K_{sek} = K_{prim} \cdot \left(\frac{I_{N,M}}{I_{N,Wdl,prim}} \right)^2 = 1,65 \text{ s}$
T ABKÜH Abkühlzeit des thermischen Modells	165 s	<p>Mit dem Parameter T ABKÜHL wird die Zeitdauer festgelegt, die vergeht, bis das Schutzobjekt bei vorausgegangener Belastung mit zulässiger Schiefast I2 ZUL. bis auf den Ausgangswert abkühlt. Werden vom Maschinenhersteller keine Angaben gemacht, lässt sich der Einstellwert finden, indem Abkühlzeit und Erwärmungszeit des zu schützenden Objektes als gleich angenommen werden. Zwischen dem Unsymmetriefaktor K und der Abkühlzeit besteht dann der folgende Zusammenhang:</p> $T_{ABKÜH} = \frac{K}{\left(\frac{I_{2\text{zul}}}{I_N} \right)^2} = \frac{1,65 \text{ s}}{0,1^2} = 165 \text{ s}$
I2>> Anregestrom I2>>	60 %	Zweiphasiger Betrieb unter Nennbedingungen führt zu einem Gegensystemstrom von ca. 66 %. Infolge der aufzubringenden Leistung wird er ansteigen und durchaus Werte von 100 % erreichen.
T I2>> Verzögerungszeit T I2>>	3 s	Eine Auslöseverzögerung von ca. 3 s wird empfohlen, um Ausgleichsvorgänge abzuwarten.

Schutz von Synchronmotoren

Dieses Kapitel behandelt als Schwerpunktthema Schutzsysteme für große Synchronmotoren. Hierbei wird mehrfach auf andere Kapitel in diesem Band verwiesen, in denen einzelne auch für Synchronmotoren verwendete Schutzfunktionen detailliert dargestellt werden. So gesehen ist dieser Applikationsband als Gesamtheit zu behandeln.

■ 1. Umfang eines Schutzsystems für Motoren

Synchronmotoren erfüllen unterschiedliche Aufgaben in Betrieben der Grundstoff- und Verarbeitungsindustrie, in Energieerzeugungsanlagen sowie in Einrichtungen der Infrastruktur. Im Bereich hoher Leistungsanforderungen an den Motorantrieb werden bevorzugt Synchronmotoren eingesetzt mit einer Leistung bis zu 50 MW. Beispiele sind Förderanlagen im Bergbau oder Kühlmittelspeisepumpen in Kraftwerksanlagen.

Für die Grundlagen über Funktionsweise und Einsatz verschiedener Motorarten wird auf das Kapitel „Einführung in die Grundlagen von Synchron- und Asynchronmotoren“ verwiesen. Ausgewählte Schutzfunktionen wie Überlastschutz oder Differenzialschutz werden in den Kapiteln „Thermische Beanspruchung von Motoren und erforderliche Schutzfunktionen“ und „Schutz von großen Asynchronmotoren“ im Detail behandelt. Die Ausführungen gelten in gleicher Weise für große Synchronmotoren.



Bild 1 KKW Olkiluoto, Finnland

LSP2840.tif

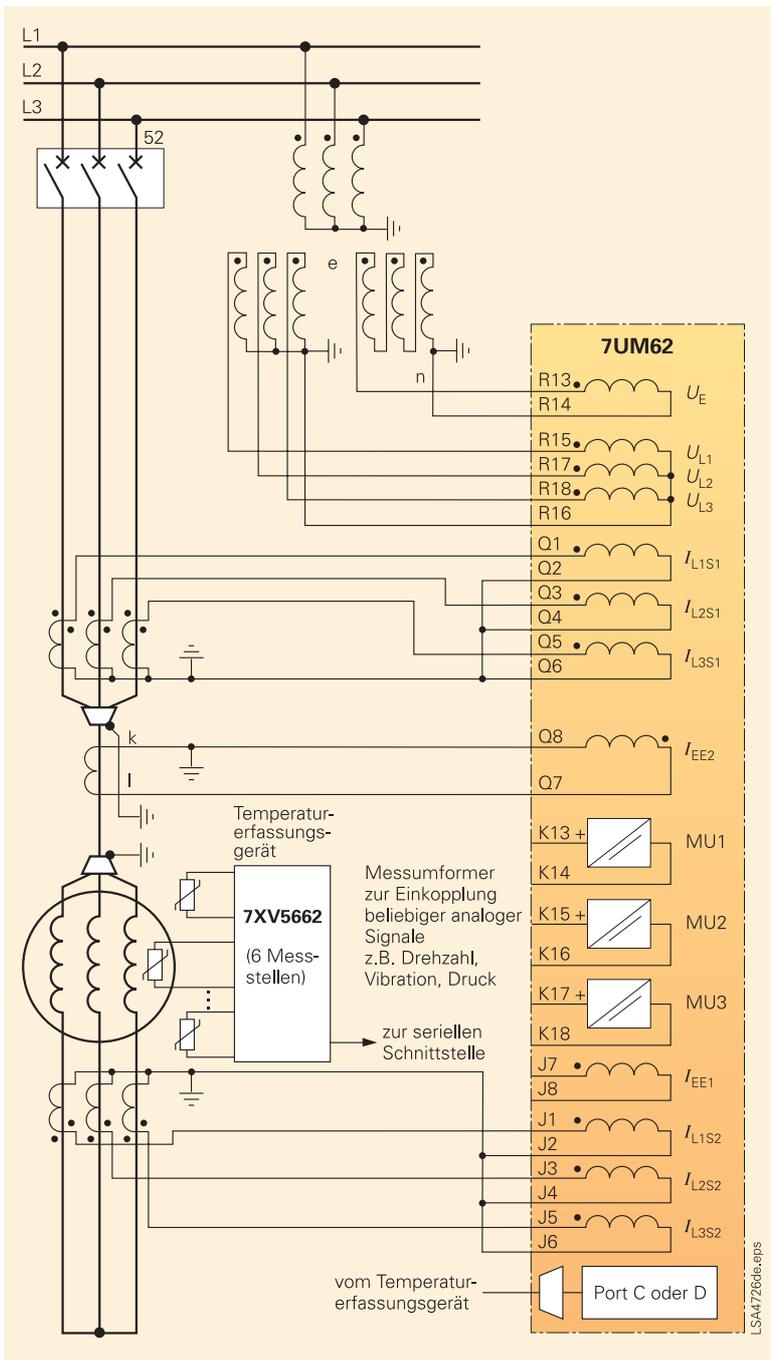


Bild 2 Anschluss Schaltbild Motorschutz 7UM62

Dieses Kapitel befasst sich neben einigen allgemeinen Überlegungen zu Betrieb und Verfügbarkeit von Motoren vorzugsweise mit weiteren Schutzfunktionen bzw. besonders bei Synchronmotoren erforderlichen Schutzarten.

Das Funktionspaket Motorschutz wurde speziell für große Motoren in dem digitalen Schutzgerät 7UM62 implementiert. Es enthält alle Funktionen zum umfassenden Schutz von Motoren großer Leistung.

In Bild 2 ist ein Beispiel für die Anschaltung des Schutzes 7UM62 an einen Synchronmotor zu sehen.

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Zusammenfassung der für große Synchronmotoren vorrangig eingesetzten Schutzfunktionen.

Fehlerart	Schutzfunktion bzw. Messverfahren	Abkürzung	ANSI-Nr.
Kurzschluss	Differenzialschutz, Überstromzeitschutz	$\Delta I >$ $I > t$	87, 51
Ständererdschluss	Gerichteter Erdschlussschutz Verlagerungsspannungsmessung	$I_E >$ $U_0 >$	64, 51N 59N
Ständerüberlast	Überlastschutz als thermisches Abbild Temperaturmessung über PT100	$I^2 t >$ $v >$	49 38
Läuferüberlast	Anlaufzeitüberwachung Wiedereinschaltperre mittels $I^2 t$ Schieflastschutz	$t_A >$ $I^2 t >_{\text{Läufer}}$ $I_2 >$	48 66 (49R) 46
Außertrittfall	Untererregungsschutz	$1/X_d$	40
Netzausfall	Unterspannungsschutz Unterstromschutz	$U <$ $I <$	27 37

Die Ausarbeitung eines angemessenen Schutzsystems für einen Motor orientiert sich an mehreren Faktoren. Selbstverständlich ist es das Bestreben des Schutzingenieurs, den Motor umfassend gegen mögliche Schäden wie z. B. thermische Überlastung zu schützen bzw. unvermeidbare Schäden wie z. B. Kurzschlüsse auf ein Minimum zu begrenzen. Demgegenüber soll der Schutz die Verfügbarkeit des motorischen Antriebes nicht unnötig durch zu frühzeitige Abschaltung einschränken. Dieser Forderung wird durch möglichst exakte Anpassung der Schutzansprechkennlinien an die Betriebsdiagramme der Motoren Rechnung getragen. Zu guter Letzt spielt auch die Kosten-Nutzen-Rechnung eine wesentliche Rolle bei der Auswahl der einzelnen Schutzfunktionen. Die Investition in ein Schutzsystem soll in einem gesunden Verhältnis zu den zu erwartenden Kosten im Falle eines Motorschadens stehen. Diese Kosten umfassen neben den direkten Reparaturaufwendungen auch indirekte Kosten wie Produktionsausfall oder eventuell sogar Folgeschäden an der Prozessanlage. Das bedeutet, der technische Umfang eines Schutzsystems bemisst sich nicht nur an der Größe und damit an den Anschaffungskosten eines Motors, sondern auch an dessen Bedeutung für einen Produktionsprozess.

■ 2. Ausgewählte Schutzfunktionen

2.1 Kurzschlusschutz, Überlastschutz

Die klassische elektrische Messgröße zum Erfassen einer Störung ist der vom speisenden Drehstromnetz aufgenommene Ständerstrom des Motors. Über die Auswertung des Ständerstromes erkennt die elektrische Schutzeinrichtung einen Kurzschluss in der Ständerwicklung, eine bevorstehende thermische Überlastung der Ständerwicklung oder eine thermische Gefährdung der

Läuferwicklung durch eine Unsymmetrie im Drehstromsystem.

Während der Kurzschlusschutz den nach einem elektrischen Fehler auftretenden Schaden begrenzt, kann der Überlastschutz einen Schaden durch rechtzeitiges Erkennen der Gefährdung vermeiden. Letzteres gilt in gleicher Weise für den Schieflastschutz, der eine übermäßige Unsymmetrie im speisenden Drehstromnetz erkennt und den Motor rechtzeitig vor einer thermischen Schädigung abschaltet.

Als schneller und selektiver Kurzschlusschutz wird generell ein Differenzialschutz eingesetzt. Dank der strengen Selektivität dieses Messprinzips sind mit dem Differenzialschutz kürzeste Auslösezeiten realisierbar, wodurch optimale Schadensbegrenzung bei Kurzschlüssen erreicht wird. Diese Schutzeinrichtung wird in dem Kapitel „Schutz von Asynchronmotoren großer Leistung“ ausführlich dargestellt.

Als Kurzschlusschutz findet neben dem Differenzialschutz ein Überstromschutz Verwendung, dessen Ansprechwert über dem maximal zulässigen Betriebsstrom liegt. Üblich sind Ansprechwerte von 10 % bis 20 % über dem maximalen Betriebsstrom. Bei Einsatz eines unabhängigen Maximalstromzeitschutzes (UMZ) ist die Auslösung um eine Zeit zu verzögern, die über der zulässigen Hochlaufzeit des Motors liegt. Um bei stromstarken Kurzschlüssen die Schäden am Motor zu begrenzen, wird eine zweite Stromstufe vorgesehen, deren Stromansprechwert über dem Motoranlaufstrom liegt. Diese Hochstromstufe wird mit einer kurzen Auslöseverzögerung versehen, die den Einschalttrush überbrückt.

Bei Verwendung eines abhängigen Maximalstromzeitschutzes (AMZ) ist die Ansprechkennlinie so zu wählen, dass sie im Strom-Zeit-Diagramm über der Anlaufstromkurve liegt. Bild 3 zeigt den Motoranlaufstrom aufgetragen über der Anlaufzeit. Die abhängige Überstromkennlinie ist so gewählt, dass sie die Anlaufstromkurve nicht schneidet.

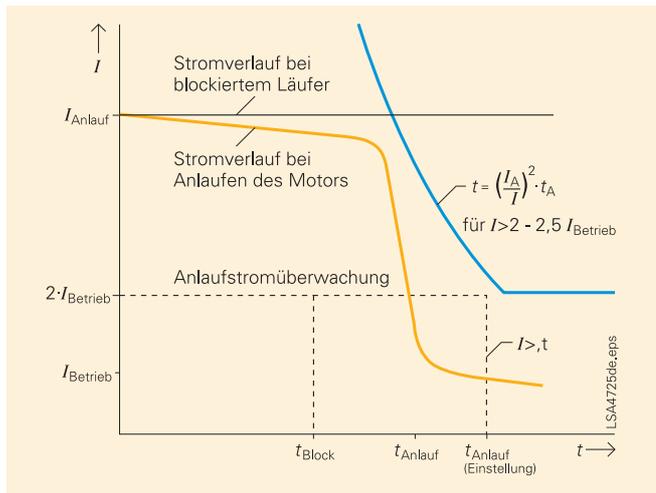


Bild 3 Anlaufstrom mit Überstromzeitschutz

Der Vorteil einer abhängigen oder Inverskennlinie liegt darin, dass die Auslösezeit des Kurzschlusschutzes reziprok zur Höhe des Fehlerstromes ist, sodass die durch einen Kurzschluss verursachten Schäden am Motor besser begrenzt werden können. Im Bereich kleiner Kurzschlussströme unter 2fachem Nennstrom ist die Grenze zwischen Kurzschlusschutz und Überlastschutz fließend. Ein kleiner Motor der Betriebsklasse S1, der mit konstantem Lastmoment gefahren wird, kann mit einem einfachen Überstromschutz mit Inverskennlinie zufriedenstellend gegen thermische Überlastungen geschützt werden. Für Motoren mit wechselnden Lastspielen oder Aussetzbetrieb der Betriebsklassen S3 bis S10 ist ein thermisches Abbild mit vollständigem Gedächtnis für einen wirtschaftlichen und sicheren Betrieb unerlässlich. Ein solches thermisches Abbild errechnet aus dem Ständerstrom über die kumulierte Strömewärme den jeweils aktuellen thermischen Zustand des Motors nach der Rechenvorschrift $\nu = k \cdot I^2 t$. Das thermische Abbild schreibt die mit Lastspielen verbundenen Aufwärm- und Abkühlvorgänge exakt mit. Verglichen mit einem einfachen Überstromschutz gewährt das thermische Abbild optimalen Schutz des Motors gegen Überhitzung bei gleichzeitiger voller Nutzung des Motors innerhalb seiner betrieblich zulässigen Grenzwerte.

Unsymmetrien im speisenden Drehstromsystem können ebenfalls die Ursache für thermische Schäden an einem Motor sein. Nach der Methode der symmetrischen Komponenten kann man jedes dreiphasige System in ein positiv umlaufendes Mitsystem, ein negativ umlaufendes Gegensystem und ein Nullsystem aufspalten. Ein symmetrisches Drehstromsystem besteht nur aus einem Mitsystem. Unsymmetrien im Drehstromsystem erzeugen eine Gegensystemkomponente, die im Läuferkreis des Motors ein Drehfeld induziert, das relativ zum Läufer mit doppelter Frequenz entgegen der Drehrichtung des Läufers umläuft. Dieses gegenläufige Drehfeld verursacht im Läuferisen starke magnetische Verluste, die zu einer unzulässigen Erwärmung führen können.

Der Extremfall einer Schiefast durch Unsymmetrien ist der Phasenausfall. Im Falle einer zweiphasigen Speisung kann der Motor nur mehr kleine und pulsierende Momente entwickeln. Da in der Regel der Momentenbedarf der Antriebsmaschine unverändert bleibt, muss der Motor in den verbliebenen 2 Phasen entsprechend mehr Strom aufnehmen, was die Wicklungen thermisch überlastet.

Im Kapitel „Thermische Beanspruchung von Motoren und erforderliche Schutzfunktionen“ wird das thermische Abbild umfassend dargestellt.

2.2 Außertrittfallschutz

In einem Schutzsystem für Synchronmotoren kommt dem Außertrittfallschutz eine besondere Bedeutung zu. Das Charakteristikum eines Synchronmotors ist es, dass der Läufer im stabilen Betrieb synchron mit dem speisenden Drehfeld umläuft. Dieser Synchronbetrieb kann durch zwei Ursachen gestört werden.

Zum einen kann der Synchronmotor infolge Untererregung außer Tritt fallen. Dieser Zustand entsteht, wenn die Erregerleistung für die von der Arbeitsmaschine geforderte mechanische Leistung unzureichend ist. Je nach konstruktiver Ausführung läuft der Synchronmotor bei zu geringer oder fehlender Erregerleistung als Asynchronmotor weiter oder er wird bis zum Stillstand abgebremst.

Eine zweite Ursache für Außertrittfall kann eine Störung im speisenden Netz sein. Im Falle eines Netzkurzschlusses mit darauf folgender Abschaltung der fehlerbehafteten Leitung fehlt die elektrische Antriebsleistung aus dem Netz. Der Motor kompensiert diese fehlende elektrische Leistung zum Antrieb der Arbeitsmaschine nach dem Reaktanzprinzip durch eine negative Beschleunigungsleistung. Er wird abgebremst und läuft mit steigendem Schlupf als Asynchronmotor weiter. Modellversuche mit verschiedenen Bauformen von Synchronmotoren zeigten, dass ein kurzzeitiger Netzspannungsausfall bis ca. 150 ms praktisch immer gut vom Motor verkraftet wird. Die Drehzahl sinkt während der spannungslosen Pause auf ca. 95 % Nenn Drehzahl und damit nur so weit, dass nach der Spannungswiederkehr das synchronisierende Moment ausreicht, um den Motor wieder in den synchronen Betrieb zu ziehen.

Bleibt der Motor länger als 200 ms spannungslos, sinkt die Drehzahl in den meisten Fällen so weit ab, dass der Motor auch bei wiederkehrender Spannung außer Tritt fällt. Die Mitschriebe der genannten Modellversuche lassen bei Erreger- oder Spannungsausfall starke Wirk- und Blindleistungsschwingungen erkennen. Siehe hierzu Bilder 4 und 5.

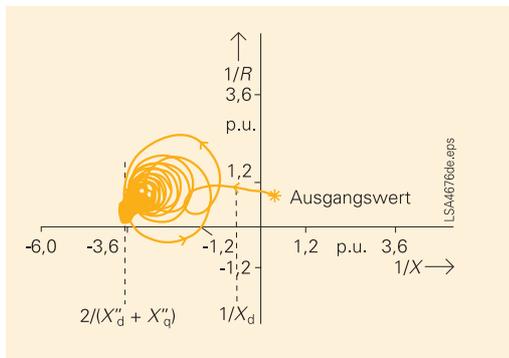


Bild 4 Admittanzverlauf bei Erregerausfall (Motor von 9,88 MVA)

Besonders bei voller Erregerleistung wird die Leistungsschwingung nicht gedämpft, wie in Bild 5 erkennbar. Die von der Wirkleistungsschwingung verursachte mechanische Beanspruchung von Motorwelle, Lagern und Fundament verlangt eine Abschaltung des außer Tritt gefallenen Motors.

In allen untersuchten Fällen von Asynchronlauf des Motors, sei es aufgrund von Untererregung oder einer Netzstörung, bewegen sich die Schwingungskurven des Motors im Leitwertdiagramm jenseits eines Blindleitwertes von $1/X_d$.

Der adäquate Schutz bei Außertrittfall jeglicher Ursache ist folglich der Untererregungsschutz mit einer Ansprechkenlinie, die im Leitwertdiagramm bei $1/X_d$ parallel zur Ordinate verläuft.

Neben dem asynchronen Kippmoment des Motors ist in erster Linie die Dauer des Spannungsausfalls maßgebend dafür, ob sich der Motor nach Spannungswiederkehr resynchronisiert. Die Modellversuche belegen, dass eine erfolgreiche Resynchronisierung 500 ms nach Kurzschlusseintritt abgeschlossen ist. Nach Ablauf dieser Zeitspanne ist nicht mehr mit einer Rückkehr des Motors in den synchronen stabilen Betrieb zu rechnen.

Der Motor fällt unweigerlich außer Tritt. Somit empfiehlt sich für die Auslöseverzögerung des Außertrittfallschutzes eine Zeiteinstellung von ca. 700 ms.

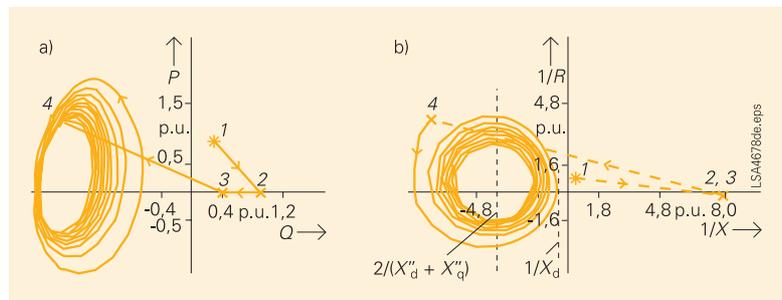


Bild 5 Ortskurvenverlauf der Admittanz infolge eines dreipoligen Kurzschlusses von 0,2 s Dauer (Motor 9,88 MVA)
a) Leistungsortskurven
b) Admittanzortskurven
1 – Ausgangswert, 2 – Wert bei Kurzschlussbeginn, 3 – Wert bei Kurzschlussabschaltung, 4 – Wert nach Kurzschlussabschaltung)

■ 2.3 Unterspannungsschutz

Neben dem Schutz der Betriebsmittel bei elektrischen Fehlern oder Störungen umfasst der Aufgabenbereich des Schutztechnikers auch die Betrachtung von Betriebszuständen der Anlage oder Bedienhandlungen des Betriebspersonals, die bei exakter Einhaltung der geltenden Arbeitsanweisungen (Freischalten, Erden, etc.) gar nicht auftreten dürften. In extremen Ausnahmesituationen, zum Beispiel beim Zusammentreffen mehrerer Störungen in einer Anlage, ist ein Bedienfehler nicht immer hundertprozentig auszuschließen, sei es durch die aufgetretene Stresssituation oder weil solch eine komplexe Störung im Betriebshandbuch bislang keine Berücksichtigung fand. Es obliegt dem verantwortungsbewussten Schutztechniker, im Falle solcher Störungen durch Einsatz geeigneter Messverfahren und automatisierter Schalt- und Steuerbefehle einer Personengefährdung entgegenzuwirken oder die Betriebsmittel vor Schäden zu schützen.

Als Beispiel dient der Unterspannungsschutz für einen Motor. Wird die übergeordnete Einspeisung einer Versorgungsschiene abgeschaltet, werden die von ihr gespeisten Motoren spannungslos und bleiben stehen. Der Unterspannungsschutz erkennt den spannungslosen Motor und öffnet den ihm direkt zugeordneten Schalter. Somit ist gewährleistet, dass der Motor bei plötzlich wiederkehrender Einspeisung nicht unerwartet an Spannung liegt, wodurch möglicherweise Servicepersonal gefährdet wird.

Außerdem erfordert die Inbetriebnahme einer Antriebsanlage mit mehreren von einer Schiene gespeisten Motoren in der Regel ein sequenzielles Hochfahren der einzelnen Motoren. Ein gleichzeitiger Hochlauf mehrerer Motoren wird in vielen Fällen durch die Summe der Anfahrströme die Einspeisung überlasten, was zu einem erneuten Ansprechen einer Schutzeinrichtung, z. B. des Überlastschutzes für den speisenden Transformator, führen wird. Auch hier erfüllt der Unterspannungsschutz an jedem Motorabzweig die Aufgabe, die Gesamtanlage in einen definierten Grundzustand zu bringen aus dem heraus die Antriebsaggregate durch das Betriebspersonal nacheinander wieder hochgefahren werden können.

Eine weitere Aufgabe des Unterspannungsschutzes besteht darin, einen Motor vor Schäden zu schützen, die durch einen unzulässigen Anlauf bei wiederkehrender Spannung entstehen können. Dies trifft beispielsweise für Motoren zu, die über eine Stern-Dreieck-Umschaltung hochgefahren werden müssen.

In der Praxis hat sich ein Einstellwert von 40 % Nennspannung als geeignet erwiesen, um auf Netzausfall zu erkennen und den Leistungsschalter zu öffnen. Die Auslöseverzögerung ist mit dem Außertrittfallschutz zu koordinieren. Bei einem nur kurzzeitigen Spannungseinbruch der Netzspannung kann der Motor häufig nach Spannungswiederkehr weiter betrieben werden. Deshalb ist eine Auslöseverzögerung des Unterspannungsschutzes von ca. 1 bis 2 s angemessen.

■ Zusammenfassung

Große Synchronmotoren erfüllen wichtige und mitunter auch sicherheitsrelevante Aufgaben in einem Verfahrensprozess. Der elektrische Schutz hat die Aufgabe, diese Motoren bestmöglich gegen Schäden zu schützen bzw. das Ausmaß aufgetretener Schäden so weit wie möglich zu begrenzen. Von gleicher Wichtigkeit ist die strenge Selektivität der Schutzeinrichtungen. Das bedeutet, der Motor soll so lange in Betrieb bleiben, wie es seine spezifizierten Betriebsparameter zulassen.

Das digitale Schutzgerät 7UM62 erfüllt beide Anforderungen in hervorragender Weise. Elektrische Fehler oder unzulässige Betriebszustände werden sicher erkannt und bereinigt. Die Ansprech Kennlinien der Schutzfunktionen sind an die Betriebskennlinien der Motoren herangeführt, womit eine hohe Verfügbarkeit des Motorantriebes erreicht wird.

Synchronisation und Schutz von Synchronmotoren mit dem 7UM62

Im Applikationsbeispiel wird die Anwendung des 7UM62 als Steuer- und Schutzgerät von Synchronmotoren beschrieben. Beim Kunden Petrobras (Brasilien) war einerseits der Schutz zu erneuern und andererseits musste die Synchronisation des Motors nach dem Anlauf gelöst werden. In diesem Kapitel wird schwerpunktmäßig die umgesetzte Lösung der Synchronisation beschrieben, das heißt, die kontrollierte Zuschaltung der statischen Erregung.

■ 1. Einführung

Synchronmotoren werden häufig als Asynchronmotoren gestartet und kurz vor Erreichen der synchronen Drehzahl erfolgt die Zuschaltung der Erregung. Dafür gibt es unterschiedliche technischen Lösungen. Eine solche Steuereinrichtung ist meistens im Lieferpaket der Erregung vorzufinden. Das ist auch bei Siemens der Fall, wenn eine schlüsselfertige Lösung (Motor + Erregung) ausgeliefert wird. Hierbei wird nach eingeschaltetem Leistungsschalter durch die Steuereinrichtung (häufig eine SIMATIC) das Abklingen des Anlaufstromes kontrolliert. Parallel dazu erfolgt eine Überwachung der Drehzahl über einen externen Drehzahlgeber. Ist der Anlaufstrom auf unter 120 % des Motornennstromes gesunken und die Drehzahl größer als 96 % der synchronen Drehzahl, wird die Erregung zugeschaltet.

Im konkreten Anwendungsfall waren keine Drehzahlgeber vorhanden. Man hatte aber Zugang zu den Schleifringen und konnte über die in den Läufer induzierte Spannung auf die Läuferfrequenz und damit indirekt auf die Drehzahl schließen. Ist die Spannung Null, hat der Motor die synchrone Drehzahl erreicht.

Wird der Motor nun eingeschaltet, beginnt sich der Läufer zu drehen. Die gemessene Frequenz der Läuferspannung ist proportional zum Schlupf. Beim stehenden Läufer ($s = 1$) misst man die Frequenz des Ständerdrehfeldes. Eine kontinuierliche Beschleunigung des Läufers führt zu einer Verringerung des Schlupfes und damit zu einer Reduktion der gemessenen Frequenz in der Läuferspannung. Gleichzeitig sinkt auch die Amplitude der induzierten Spannung. Kurz vor Erreichen der synchronen Drehzahl muss der Erregerschalter geschlossen werden und der Motor zieht sich dann in den Synchronismus. Wichtig bei dieser technischen Lösung ist die Bestimmung des exakten Augenblicks zum Zuschalten der Erregung. Geschieht das rein zufällig, riskiert man eine Schädigung des Motors.

Bild 1 zeigt den Verlauf der Läuferspannung während eines Motoranlaufs. Man erkennt deutlich die sich ändernde Frequenz, das Absinken der Spannung und das Annähern an die synchrone Drehzahl. Der ideale Zuschaltzeitpunkt zum Schließen des Erregerschalters (Schützes) herrscht dann vor, wenn der Schlupf zwischen dem Ständer und dem Läufer 4 % bis 3 % oder weniger beträgt, was einer sehr niedrigen Frequenz entspricht.

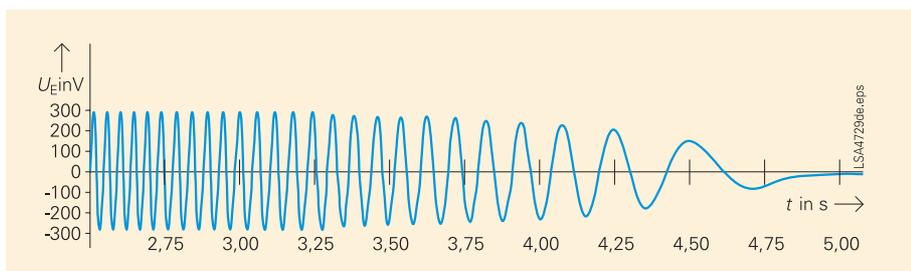


Bild 1 Gemessene Läuferspannung (induzierte Feldspannung)

■ 2. Synchronisationslösung

2.1 Konzept

In Bild 2 ist die Anschaltung des 7UM62 dargestellt. Bei der hier vorgestellten Lösung waren keine sternpunktseitigen Stromwandler am Motor vorhanden, so dass der Differentialschutz nicht zum Einsatz kam. Es bestanden ferner Forderungen, den Erregerstrom und die Erregerspannung zusätzlich zu überwachen, welches über die Messumformereingänge erfolgte. Die Läuferfrequenz wurde über ein an zwei Binäreingänge geschaltetes Widerstandsnetzwerk erfasst. Dieses ist parallel zum Entregungswiderstand geschaltet. Der Spannungseingang U_E wurde dort ebenfalls angeschlossen, um im Störschrieb des Schutzgerätes den Verlauf der Läuferfrequenz zu erfassen und die Qualität der Zuschaltung bewerten zu können. Ferner wurde noch die Sammelschienspannung und der Strom vom Kabelumbauwandler verarbeitet.

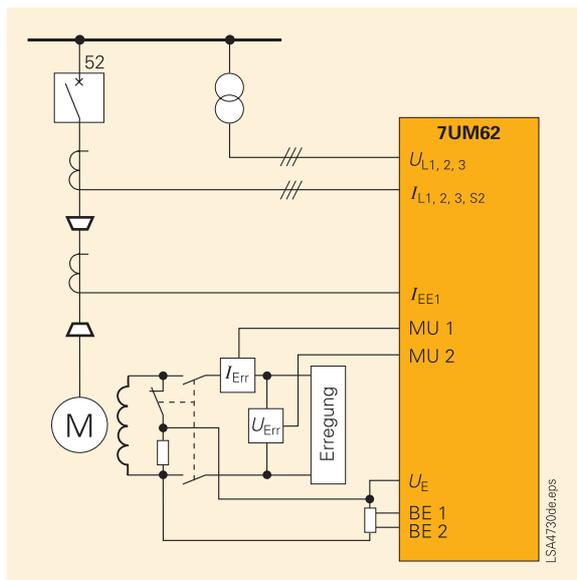


Bild 2 Anschaltung des 7UM62

Zur Bestimmung des Zuschaltzeitpunktes wurden als „Sensor“ zwei Binäreingänge benutzt, deren logische Signale in einer umfangreichen CFC-Logik verarbeitet werden. Es wurden dabei noch Zusatzgrößen wie

- Anlaufstrom und Wirkleistung;
- Verriegelung je nach Anlagenbedingungen;
- Schlupf zwischen Läufer und Ständer sowie Schließbefehl des Netzleistungsschalters

in die Logik eingebunden bzw. zusätzlich überwacht.

Die Erfassung der Läuferfrequenz ist in Bild 3 dargestellt.

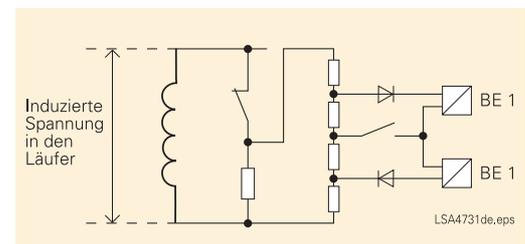


Bild 3 Schaltung zur Auswertung der Läuferfrequenz

Parallel zum Entregungswiderstand wurde ein Spannungsteiler geschaltet, an den die Binäreingänge angeschlossen sind. Über eine Diode wird dem Binäreingang (BE 1) eine positive Spannung, das heißt die positive Halbwelle der Läuferfrequenz, zugeführt und Binäreingang 2 überwacht entsprechend mit dem gleichen Prinzip die negative Halbwelle. Die Binäreingangsschwelle wurde auf 19 V eingestellt, so dass bei einer Sinushalbwelle der Binäreingang bei ausreichender Spannung anspricht und bei Unterschreiten der Schwelle wieder abfällt. Die Rückfallschwelle ist etwas kleiner als die Ansprechschwelle. Bei den Messungen lagen die Schwellen etwa bei 19 V (Ansprechen 19,1 V und Rückfallen 18,9 V).

2.2 Messverfahren

Bild 4 zeigt einen zoomten Ausschnitt der in den Läufer induzierten Spannung. Nähert man sich der synchronen Drehzahl, sinkt die Frequenz rasch, was man auch an dem flacheren Anstieg der Wechselspannung im Nulldurchgang feststellen kann.

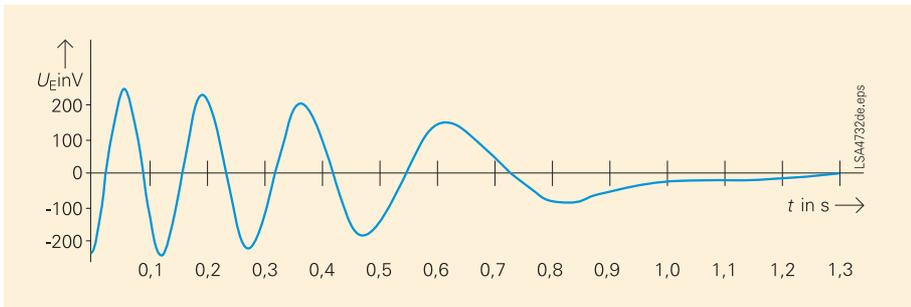


Bild 4 Detailsansicht von Bild 2

Mit den Binäreingängen wird der zeitliche Signalwechsel zwischen den Nulldurchgängen überwacht. Schaut man sich eine weitere Vergrößerung der Läufer Spannung von Bild 4 an, so sind in Bild 5 die Triggerschwellen (ideale Schwelle von 19 V) mit den Cursors dargestellt. Bei einem Wechsel von Negativ nach Positiv, wird BE 2 zurückfallen und somit ein Low-Signal ausgeben. BE 1 wird bei ausreichender Spannung amplituden ansprechen und ein High-Signal erzeugen.

Beide Signale werden einer CFC-Logik zugeführt (CFC = Continuous Function Chart), daraus die Spannungsänderungsgeschwindigkeit „ dV/dt “ ermittelt und überwacht. Die Läuferfrequenz wird damit indirekt bestimmt.

Die aus den beiden Triggerschwellen ermittelte Zeitdifferenz beträgt ca. 10,5 ms, wenn man die Schwellen bei ca. 19 V annimmt. Diese Zeitdifferenz liegt in vergleichbarer Größenordnung wie bei den vorhergehenden Nulldurchgängen.

Die Logik ist so ausgeführt, dass nach einer einstellbaren Zeit mit der Messung der Nulldurchgänge begonnen wird. Diese Zeit ist während der Inbetriebsetzung zu bestimmen. Sie sollte sich am abklingenden Anlaufstrom orientieren. Im konkreten Beispiel wurde die Überwachung nach 4 s gestartet. Hierzu wurde ein Zeitglied nach geschlossenem Leistungsschalter über den Hilfskontakt getriggert.

Nach Ablauf der Zeit schließt der in Bild 3 dargestellte Kontakt und die Binäreingänge sind aktiv. Es können nun die Zeiten zwischen den Nulldurchgängen bestimmt werden.

Schaut man sich den darauf folgenden Nulldurchgangswechsel (von Plus nach Minus) an, so verringert sich der Anstieg deutlich und es wird eine größere Zeitdifferenz gemessen. Gemäß Bild 6 sind das 26,2 ms.

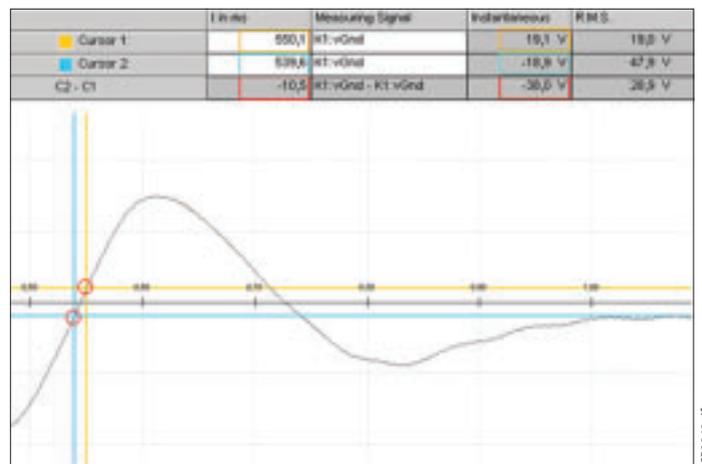


Bild 5 Erster gemessener Nulldurchgang (BE1 ist aktiv und BE2 inaktiv)

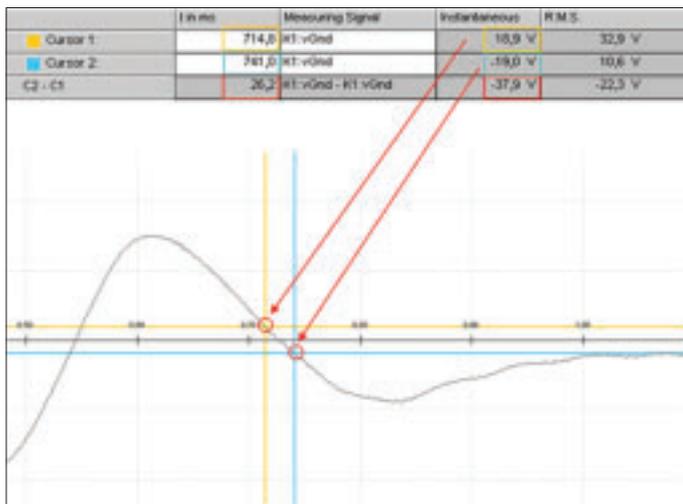


Bild 6 Messung des nächsten Nulldurchganges

Die gemessene Zeitdifferenz ist größer als bei der vorherigen Messung sowie allen anderen Messungen seit dem Motorstart. Daher kann auf einen deutlich sich verringernden Schlupf geschlossen werden. Man nähert sich dem idealen Zeitpunkt zum Schließen des Erregungsschalters. Eine Freigabe wird erteilt, wenn das Zeitkriterium (ausreichend flacher Anstieg der Läuferspannung) erfüllt ist und ein Nulldurchgangswechsel stattgefunden hat. Diese Hauptbedingungen werden in weiteren Logikblocks verarbeitet. Sind alle Bedingungen erfüllt, wird ein EIN-Befehl an den Erregungsschalter gegeben und der Motor synchronisiert.

Die Lastaufschaltung wird von einem weiteren Relais 2 Sekunden nach Anlegen der Erregerspannung (Feldspannung) freigegeben. Zusätzlich findet eine allgemeine Anlaufüberwachung statt, durch die ein Abbruch der Anlauf- und Synchronisationsvorgänge veranlasst wird, sofern nicht alle Bedingungen innerhalb einer bestimmten Zeit erfüllt worden sind. Im konkreten Fall betrug diese Zeitdauer 8 Sekunden. Diese Zeit hängt von der Anlaufzeit des Motors ab.

Zur Überprüfung der gewählten Lösung wurden zahlreiche oszillografische Aufzeichnungen von Motorstarts durchgeführt. Es erfolgte eine Analyse vom Ständerstrom sowie der Ständerspannung und der im Läufer induzierten Spannung. Die aufgezeichneten Vorgänge ergaben nahezu identische Kurvenverläufe, wie sie in den Bildern 1 und 4 zu sehen sind.

Die CFC-Logik wurde ausführlich mit den aufgezeichneten Schrieben getestet.

Danach erfolgte die „scharfe“ Inbetriebnahme am Motor, die ohne Probleme ablief. Anschließend wurden beim Kunden Petrobras alle Synchronmotoren mit dieser Lösung ausgerüstet.

■ 3. Genutzte Schutz- und Zusatzfunktionen

Der 7UM62 verfügt über die für Motoranwendungen notwendigen Schutzfunktionen. Die genutzten Schutzfunktionen sind nachfolgend mit ihrer ANSI-Nummer aufgeführt.

- 27 Unterspannungsschutz
- 46 Schieflastschutz
- 47 Überwachung der Phasenfolge
- 49 thermischer Überlastschutz (Ständer)
- 50BF Schaltversagerschutz
- 50G Erdstromschutz (Nullstrom)
- 50/51 Überstromzeitschutz
- 59 Überspannungsschutz
- 81O/U Über- und Unterfrequenzschutz

Zusätzlich wurden mittels CFC weitere Schutz-/Überwachungsfunktionen realisiert. Dazu erfolgte eine Auswertung von Messgrößen, unter anderem auch über die Funktion Schwellwertüberwachung. Im Detail waren das:

- 55 Leistungsfaktorüberwachung
- 78(40) Asynchronlauf des Synchronmotors (hierzu kann auch vorteilhaft der Untererregungsschutz genutzt werden)
- 86 Verriegelung/Sperre
- Überwachung von Erregerstrom und -spannung
- Berechnung des Läuferwiderstandes aus den Erregergrößen
- Anzeige der Erregungsspannung und des Erregungsstroms sowie des berechneten Läuferwiderstands
- Lastzuschaltung

Es sei noch erwähnt, dass der Erregerstrom sowie die Erregerspannung über Sensoren erfasst und diese wiederum über die 4 – 20 mA-Schnittstellen mit den geräteinternen Messwertumformern verbunden wurden. Der berechnete Läuferwiderstand sowie die Erregerspannung und der Erregerstrom wurden als Messgrößen am Display bereitgestellt und können über das Auswahlmenü für Messwerte am 7UM62 zur Anzeige gebracht werden.

Über die Leistungsfaktor- ($\cos\varphi$) sowie Erregerstromüberwachung wurde zusätzlich das „Außertritt-Fallen“ des Synchronmotors überwacht.

■ Zusammenfassung

Das SIPROTEC 7UM62 verfügt über die für Motorschutz notwendigen Schutzfunktionen. Zusätzlich sind mittels CFC weitere Schutz- und Überwachungsfunktionen realisiert.

Anhang

■ Siemens PTD EA im Internet

Für den Produktsupport beim Einsatz der SIPROTEC-Geräte bieten wir Ihnen folgende Informationen bzw. Dokumente auf unserer Internetseite www.siprotec.de zum kostenlosen Download an:

- Kataloge und Handbücher
- Updates und Bugfixes für DIGSI
- Demo-Software und Gerätetreiber
- Firmware-Updates
- Protokoll-Updates
- ... und vieles mehr



www.siprotec.de

■ PTD Customer Support Center

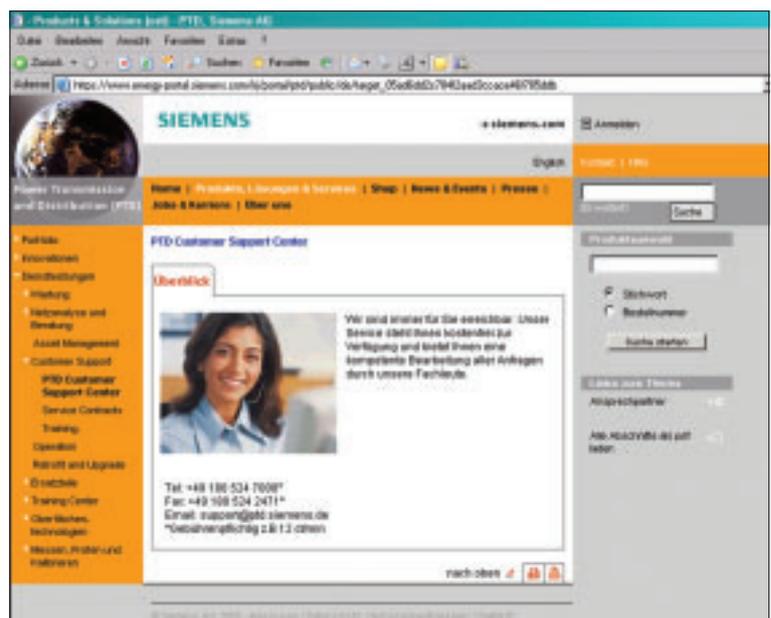
Eine hohe Verfügbarkeit der Anlagen und Systeme der Energieübertragung und -verteilung ist zentrale Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb. Dafür gibt es unseren Customer-Support. Unser Service steht Ihnen kostenfrei zur Verfügung und bietet Ihnen eine kompetente Bearbeitung aller Anfragen durch unsere Fachleute. Das PTD Customer Support Center ist 24 Stunden an 365 Tagen für Sie erreichbar.

Sie erreichen uns:

Tel. +49 180 524 7000*

Fax +49 180 524 2471*

E-mail: support.energy@siemens.com



www.siemens.com/energy-support

* Gebührenpflichtig, z. B. 12 ct/min

Niederlassungen

Hauptniederlassungsstandorte von Siemens PTD

■ Deutschland

Region Hanse

Niederlassung Bremen
 Universitätsallee 16
28359 Bremen
 Postfach 10 78 27
 28078 Bremen
 Tel. +49 421 3 64-0
 Fax +49 421 3 64-26 87

Region Mitte

Niederlassung Hannover
 Werner-von-Siemens-Platz 1
30880 Laatzen
 Postfach 3 08 76 Laatzen
 Tel. +49 511 8 77-0
 Fax +49 511 8 77-27 99

Region Nordbayern

Niederlassung Nürnberg
 Von-der-Tann-Straße 30/31
90439 Nürnberg
 Postfach 48 44
 90327 Nürnberg
 Tel. +49 911 6 54-0
 Fax +49 911 6 54-40 64

Region Nordrhein

Rheinische Niederlassung Köln
 Franz-Geuer-Straße 10
50823 Köln
 Tel. +49 221 5 76-0
 Fax +49 221 5 76-32 15

Region Ost

Niederlassung Berlin
 Nonnendammallee 101
13629 Berlin (Siemensstadt)
 Postfach 1 36 23 Berlin
 Tel. +49 30 3 86-0
 Fax +49 30 3 86-2 50 50

Niederlassung Leipzig

Nordstraße 3 – 15
04105 Leipzig
 Postfach 10 08 20
 04008 Leipzig
 Tel. +49 341 2 10-0
 Fax +49 341 2 10-20 00

Region Rhein-Main

Niederlassung Frankfurt
 Rödelheimer Landstraße 5 – 9
60487 Frankfurt am Main
 Postfach 11 17 33
 60052 Frankfurt
 Tel. +49 69 7 97-0
 Fax +49 69 7 97-22 53

Region Ruhr

Niederlassung Dortmund
 Märkische Straße 8 – 10
44135 Dortmund
 Postfach 10 50 50
 44047 Dortmund
 Tel. +49 231 5 76-0
 Fax +49 231 5 76-12 98

Region Südbayern

Niederlassung München
 Richard-Strauss-Straße 76
81679 München
 Postfach 80286
 Tel. +49 89 92 21-0
www.siemens.de/muenchen

Region Südwest

Niederlassung Stuttgart
 Weissacher Straße 11
70499 Stuttgart
 Postfach 10 60 26
 70049 Stuttgart
 Tel. +49 711 1 37-0
 Fax +49 711 1 37-37 06
www.siemens.de/stuttgart

■ Österreich

Siemens AG Österreich

Ruthnergasse 1
1210 Wien
 Tel. +43 5 17 07-3 15 82
 Fax +43 5 17 07-5 52 18

■ Schweiz

Siemens Schweiz AG

Freilagerstraße 28
8047 Zürich
 Tel. +41 585 585 585
 Fax +41 585 585 390

Haftungsausschluss

Wir haben den Inhalt der Druckschrift auf Übereinstimmung mit der beschriebenen Hard- und Software geprüft. Dennoch können Abweichungen nicht ausgeschlossen werden, so dass wir für die korrekte Funktion der beschriebenen Applikationen in einer Anlage keine Gewähr übernehmen können.

Copyright

Copyright © Siemens AG 2006. All rights reserved.

Weitergabe und Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts ist nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere für den Fall der Patenterteilung oder GM-Eintragung.

Eingetragene Marken

SIPROTEC, SINAUT, SICAM und DIGSI sind eingetragene Marken der SIEMENS AG. Die übrigen Bezeichnungen in diesem Handbuch können Marken sein, deren Benutzung durch Dritte für deren Zwecke die Rechte der Inhaber verletzen können.

Siemens AG
Power Transmission and Distribution
Energy Automation Division
Postfach 48 06
90026 Nürnberg
Deutschland

www.siemens.com/ptd
www.siprotec.de

Fragen zur Energieübertragung und
-verteilung: Unser Customer Support
Center erreichen Sie rund um die Uhr.
Tel.: +49 180/524 70 00
Fax: +49 180/524 24 71
(*gebührenpflichtig: z. B. 12 ct/min*)
E-Mail: support.energy@siemens.com
www.siemens.com/energy-support

Änderungen vorbehalten
Bestell-Nr.: **E50001-K4454-A101-A1**
Printed in Germany
Dispostelle 31900
KG 11.06 2.0 76 De 102012 6101/C6099

Die Informationen in diesem Dokument enthalten allgemeine Beschreibungen der technischen Möglichkeiten, welche im Einzelfall nicht immer vorliegen müssen.
Die gewünschten Leistungsmerkmale sind daher im Einzelfall bei Vertragsschluss festzulegen.