

Inhalt

	Seite
Vorwort	8
1 Allgemeines	10
1.1 Anwendungsbereich	10
1.2 Verweisung auf andere Normen	10
1.3 Anwendung der Faktoren	10
1.3.1 Faktor c	10
1.3.2 Faktoren K_G und K_S oder K_{SO}	10
1.3.3 Faktoren $K_{G,S}$, $K_{T,S}$ oder $K_{G,SO}$, $K_{T,SO}$	10
1.3.4 Faktor K_T	11
1.3.5 Faktor κ	11
1.3.6 Faktoren μ , λ und q	11
1.3.7 Faktoren m und n	11
1.3.8 Beitrag von Asynchronmotoren zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	11
1.4 Formelzeichen, Indizes und hochgestellte Zeichen	11
1.4.1 Formelzeichen	11
1.4.2 Indizes	12
1.4.3 Hochgestellte Zeichen	12
2 In IEC 60909-0 verwendete Faktoren	12
2.1 Spannungsfaktor c für die Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle	12
2.1.1 Allgemeines	12
2.1.2 Berechnungsverfahren	13
2.1.3 Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle und Spannungsfaktor c	13
2.1.4 Ein einfaches Modell zu Veranschaulichung der Bedeutung des Spannungsfaktors c	14
2.2 Impedanzkorrekturfaktoren bei der Berechnung der Kurzschlussimpedanzen von Generatoren, Blocktransformatoren und Kraftwerksblöcken	19
2.2.1 Allgemeines	19
2.2.2 Korrekturfaktor K_G	20
2.2.3 Korrekturfaktoren für Kraftwerksblöcke mit Stufenschaltern	22
2.2.4 Korrekturfaktoren für Kraftwerksblöcke ohne Stufenschalter	33
2.2.5 Einfluss des Impedanzkorrekturfaktors für Kraftwerksblöcke bei der Berechnung der Kurzschlussströme in vermaschten Netzen und größte Kurzschlussströme bei ungünstigstem Leistungsfluss	37
2.3 Impedanzkorrekturfaktor K_T bei der Berechnung der Kurzschlussimpedanzen von Netztransformatoren	40
2.3.1 Allgemeines	40
2.3.2 Beispiel für einen Netztransformator $S_{rT} = 300$ MVA	41
2.3.3 Statistische Untersuchung von 150 Netztransformatoren	45

	Seite	
2.3.4	Impedanzkorrekturfaktoren für Netztransformatoren in vermaschten Netzen.....	46
2.4	Faktor κ für die Berechnung des Stoßkurzschlussstromes	48
2.4.1	Allgemeines	48
2.4.2	Faktor κ für eine R-L-Reihenschaltung	48
2.4.3	Faktor κ bei parallelen R-L-Zweigen	51
2.4.4	Berechnung des Stoßkurzschlussstromes i_p in vermaschten Netzen.....	54
2.4.5	Beispiel für die Berechnung von κ und i_p in vermaschten Netzen.....	56
2.5	Faktor μ für die Berechnung des Ausschaltwechselstromes.....	57
2.5.1	Allgemeines	57
2.5.2	Basiskonzept.....	58
2.5.3	Berechnung des Ausschaltwechselstromes I_b mit dem Faktor μ	60
2.6	Faktor λ (λ_{\max} , λ_{\min}) zur Berechnung des Dauerkurzschlussstromes	62
2.6.1	Allgemeines	62
2.6.2	Einfluss der Sättigung.....	64
2.7	Faktor q zur Berechnung des Ausschaltstromes von Asynchronmotoren	67
2.7.1	Allgemeines	67
2.7.2	Ableitung des Faktors q	68
2.7.3	Ausschaltwechselströme bei unsymmetrischen Kurzschlüssen	71
2.8	Faktoren m und n zur Berechnung des Joule-Integrals oder des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstromes.....	72
2.8.1	Allgemeines	72
2.8.2	Zeitabhängiger dreipoliger Kurzschlussstrom	73
2.8.3	Faktor m	73
2.8.4	Faktor n	74
2.8.5	Faktor n in IEC 60909-0, Bild 22.....	75
2.9	Feststellung des Beitrages von Asynchronmotoren oder Gruppen von Asynchronmotoren (Ersatzmotoren) zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	77
2.9.1	Allgemeines	77
2.9.2	Kurzschluss an den Anschlusspunkten von Asynchronmotoren.....	77
2.9.3	Teilkurzschlussströme von Asynchronmotoren, gespeist über Transformatoren	78
2.9.4	Summe der Teilkurzschlussströme von mehreren Gruppen aus Asynchronmotoren, gespeist über mehrere Transformatoren	79
	Literaturhinweise	82
	Bild 1 – Modell zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen dem Spannungsfall Δu und der Kurzschlussstromabweichung $\Delta i_k''$	15
	Bild 2 – Berechnung von $\Delta i_k''$ nach Gleichung (8) für verschiedene Parameter	18
	Bild 3 – Teilkurzschlussstrom $I_{kG(S)}''$ eines direkt mit einem Netz verbundenen Generators	20
	Bild 4 – Berechnung von $I_{kG(S)}''$ mit dem Überlagerungsverfahren	21

Bild 5 – Symmetrischer Teilkurzschlussstrom I_{kS}'' eines Kraftwerksblockes S auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators mit Stufenschalter	23
Bild 6 – Nachbildung eines Kraftwerksblockes mit Stufenschalter	24
Bild 7 – Teilkurzschlussstrom eines Kraftwerksblockes nach dem Überlagerungsverfahren	26
Bild 8 – Summenhäufigkeit H der nach Gleichung (33) berechneten Abweichungen [22], [23]	27
Bild 9 – Kraftwerksblock mit Stufenschalter und Eigenbedarfstransformator F1, F2, F3: Kurzschlussstellen ($I_{kMF1}'' = I_{kMF2}''$)	28
Bild 10 – Summenhäufigkeit H der Abweichungen $\Delta_{G(v)}$ nach Gleichung (39) für die Teilkurzschlussströme von Generatoren in 47 Kraftwerksblöcken mit Stufenschaltern [23] – Kurzschlussstelle F1 in Bild 9	30
Bild 11 – Summenhäufigkeit H der Abweichungen $\Delta_{T(v)}$ nach Gleichung (42) für die Teilkurzschlussströme von Blocktransformatoren in 47 Kraftwerksblöcken mit Stufenschalter [23] – Kurzschlussstelle F1 in Bild 9	31
Bild 12 – Summenhäufigkeit H der Abweichungen $\Delta_{T(v)}$ nach Gleichung (42), siehe Bild 11, wenn für die Berechnung von $I_{kT(S)}''$ nur übererregter Betrieb vorausgesetzt wird [23]	32
Bild 13 – Summenhäufigkeit H der Abweichungen $\Delta_{F2(v)}$ nach Gleichung (46) für den Teilkurzschlussstrom I_{kF2}'' (Bild 9) im Falle des über- oder untererregten Betriebes vor dem Kurzschluss	33
Bild 14 – Summenhäufigkeit H der mit Gleichung (50) berechneten Abweichungen [22], [23]	34
Bild 15 – Summenhäufigkeit H der mit Gleichung (39) berechneten Abweichungen für 27 Generatoren in Kraftwerksblöcken ohne Stufenschalter	35
Bild 16 – Summenhäufigkeit H der mit Gleichung (42) berechneten Abweichungen für 27 Blocktransformatoren in Kraftwerksblöcken ohne Stufenschalter	36
Bild 17 – Summenhäufigkeit H der mit Gleichung (46) berechneten Abweichungen für die Teilkurzschlussströme I_{kF2}'' (Bild 9) in Kraftwerksblöcken ohne Stufenschalter	37
Bild 18 – Summenhäufigkeit H der Abweichungen Δ [13]	39
Bild 19 – Berechnung von $I_{kT(S)}'' = I^b + I_{kTU}''$ mit dem Überlagerungsverfahren [19], [25]	41
Bild 20 – Kurzschlussströme $I_{kT(S)}''$ abhängig von t , U^b und S_{kQ}'' für den Netztransformator $S_{rT} = 300$ MVA (Daten im Text)	42
Bild 21 – Abweichungen Δ_{NT} nach Gleichung (64) berechnet für den Transformator $S_{rT} = 300$ MVA	44
Bild 22 – Summenhäufigkeit H der nach Gleichung (64) berechneten Abweichungen Δ_{NT} 1: $K_T = 1$; 2: K_T nach Gleichung (63) mit $I_T^b / I_{rT} = 1$	46
Bild 23 – Berechnung des Faktors κ bei einfach gespeistem dreipoligem Kurzschluss (R-L-Serienkreis)	49
Bild 24 – Faktor κ und t_p ($f = 50$ Hz) abhängig von R/X oder X/R	51
Bild 25 – Ersatzschaltplan im Mitsystem für die Berechnung von κ bei zwei parallelen Zweigen	52
Bild 26 – Faktor κ zur Berechnung von $i_p = \kappa \sqrt{2} I_k''$ bei zwei parallelen Zweigen nach Bild 25 mit $Z_I = Z_{II}$; $0,005 \leq R_I / X_I \leq 1,0$ und $0,005 \leq R_{II} / X_{II} \leq 10,0$	53
Bild 27 – Abweichungen $\Delta \kappa_a$, $\Delta(1,15 \kappa_b)$ und $\Delta \kappa_c$ von den genauen Werten κ mit $0,005 \leq Z_I / Z_{II} \leq 1,0$ für die Anordnung nach Bild 25	54

Bild 28 – Beispiel für die Berechnung von κ und i_p mit den Methoden a, b und c (IEC 60909-0, 4.3.1.2)	56
Bild 29 – Netzaufbau (einfach gespeister Kurzschluss) und zugehörige Daten zur Veranschaulichung des Abklingens des Wechselstromanteils bei generatornahem Kurzschluss	59
Bild 30 – Abklingen des symmetrischen Kurzschlussstromes (Faktor μ) ausgehend von Prüffeldmessungen und Berechnungen [5]	62
Bild 31 – Methode der charakteristischen Sättigungskurven zum Auffinden der Potier-Reaktanz X_p in Übereinstimmung mit [4]	65
Bild 32 – Ersatzschaltplan mit der Quellenspannung $E_0(I_f)$ und der Potier-Reaktanz X_p	65
Bild 33 – Faktor q aus gemessenen und berechneten Werten von $I_{bM} = \mu q I''_{kM}$, Gleichung (91), bei verschiedenen Werten t_{min} im Vergleich zu $q = q_{IEC}$ (IEC 60909-0, Bild 17)	68
Bild 34 – Zeitfunktionen μ , q , μq und $e^{-t/T_{AC}}$ zur Berechnung des Ausschaltwechselstromes $I_{bM} = \mu q I''_{kM}$ bei Kurzschluss an den Klemmen eines Asynchronmotors	69
Bild 35 – Wirksame Zeitkonstante T_{AC} zur Bestimmung des Ausschaltwechselstromes I_{bM} und zum Vergleich $T_{\mu q} = -t_{min} / \ln(\mu q)_{IEC}$ (Nummern der Motoren siehe Tabelle 4)	71
Bild 36 – Zeitfunktion I_{bM}/I''_{kM} für den Fall des dreipoligen Kurzschlusses (I_{b3M}/I''_{kM}) und für den Fall des zweipoligen Kurzschlusses (I_{b2M}/I''_{kM}) an den Klemmen eines Asynchronmotors (Beispiel: Motor Nr. 28 aus Tabelle 4)	72
Bild 37 – Beitrag eines Asynchronmotors oder einer Gruppe von Asynchronmotoren zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $I''_k = I''_{kQ} + I''_{kM}$	77
Bild 38 – Beispiel zur Abschätzung des Teilkurzschlussstromes I''_{kM} eines einzelnen Asynchronmotors oder eines Ersatzmotors	78
Bild 39 – Teilkurzschlussströme von mehreren Gruppen aus Asynchronmotoren, gespeist über mehrere Transformatoren (einschränkende Bedingungen siehe Text)	80
Bild 40 – Untersuchung der linken und der rechten Seite der Gleichung (118) zur Feststellung der Abweichung Δ nach Gleichung (120): $u_{kr} = 6\%$, $I_{LR}/I_{rM} = 5$ für die beiden Transformatoren und Motorengruppen	81
Tabelle 1 – Spannungen und Ströme vor dem Kurzschluss auf der Unterspannungsseite der Netztransformatoren	45
Tabelle 2 – Ergebnisse der Berechnungen in vermaschten Hochspannungsnetzen mit Impedanzkorrekturfaktoren für Kraftwerksblöcke und mit K_T nach Gleichung (65) für die Abweichungen Δ nach Gleichung (66) [19]	47
Tabelle 3 – Werte von κ für das Beispiel in Bild 15	57
Tabelle 4 – Daten von Niederspannungs- und Mittelspannungs-Asynchronmotoren (50 Hz) und berechnete Werte	70
Tabelle 5 – Daten für den Modellgenerator [15]	75