

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b> . . . . .	15
1.1. Aufgabe der Schutztechnik . . . . .	15
1.2. Prinzipielle Forderungen an Schutzsysteme . . . . .	16
1.3. Prinzipieller Aufbau eines Schutzsystems . . . . .	18
1.4. Einordnung der Schutztechnik in den Komplex der Anlagenautomatisierung . . . . .	20
1.5. Denkweise und Methodik der Schutztechnik . . . . .	21
<b>2. Schutzkriterien</b> . . . . .	23
2.1. Problemstellung . . . . .	23
2.2. Schutzkriterium Strom . . . . .	23
2.3. Schutzkriterium Stromdifferenz . . . . .	24
2.4. Schutzkriterium Impedanz . . . . .	26
2.5. Schutzkriterium Wirkleistungsrichtung . . . . .	28
2.6. Schutzkriterium Wirkleistungsrichtungsvergleich . . . . .	29
2.7. Schutzkriterium Phasenwinkeldifferenz . . . . .	30
2.8. Schutzkriterium Spannung . . . . .	33
2.9. Schutzkriterium Änderungsgeschwindigkeit des Stroms . . . . .	34
2.10. Schutzkriterium Systemfremder Strom . . . . .	35
2.11. Schutzkriterium Frequenz . . . . .	37
2.12. Schutzkriterium Temperatur . . . . .	37
2.13. Schutzkriterium Ölströmungsgeschwindigkeit . . . . .	38
2.14. Weitere Schutzkriterien . . . . .	39
2.15. Vergleichende Wertung der Schutzkriterien . . . . .	40
<b>3. Geräte und Meßrelais zur Verarbeitung der kritierellen Größen</b> . . . . .	43
3.1. Zielstellung . . . . .	43
3.2. Meßgröße Strom . . . . .	43
3.2.1. Sicherungen . . . . .	43
3.2.2. Überstromrelais . . . . .	49
3.2.2.1. Begriffserläuterung . . . . .	49
3.2.2.2. Elektromagnetische Relais . . . . .	49
3.2.2.3. Dauermagnetische Relais . . . . .	51
3.2.2.4. Induktionsrelais . . . . .	53
3.2.2.5. Thermische Relais . . . . .	54
3.2.2.6. Statische Relais . . . . .	57
3.2.2.7. Relais mit „geschütztem Kontakt“ . . . . .	57
3.2.2.8. Zusammenfassung und Systematisierung der Strom-Meßrelais . . . . .	59
3.3. Meßgröße Stromdifferenz . . . . .	62
3.3.1. Problemstellung . . . . .	62

3.3.2. Differentialrelais mit elektromagnetischem Vergleich („magnetische Waage“)	62
3.3.3. Differentialrelais mit elektrischem Vergleich („elektrische Waage“)	63
3.4. Meßgröße Impedanz	65
3.4.1. Impedanz-Meßrelais nach dem Prinzip der „elektrischen Waage“	65
3.4.2. Sonstige Ausführungsformen von Impedanz-Meßrelais	68
3.5. Meßgröße Leistungsrichtung	71
3.5.1. Elektrodynamische Relais	71
3.5.2. Leistungsrichtungs-Meßrelais nach dem Prinzip der „elektrischen Waage“	73
3.5.3. Statische Relais	75
3.5.3.1. Vorbemerkungen zum Meßprinzip	75
3.5.3.2. Hall-Multiplikator	75
3.5.3.3. Ringmodulator	77
3.5.4. Gemeinsamkeiten beim Einsatz	78
3.6. Meßgröße Phasenwinkeldifferenz	80
3.7. Meßgröße Frequenz	81
3.8. Meßgröße Temperatur	82
3.8.1. Mechanische Berührungsthermometer mit Schaltglied (Ausdehnungskontaktthermometer)	82
3.8.2. Elektrische Berührungsthermometer mit A/D-Signalumformung	84
3.8.2.1. Grundprinzip	84
3.8.2.2. Metall-Widerstandsthermometer	84
3.8.2.3. Halbleiter-Widerstandsthermometer mit Thermistoren	85
3.9. Meßgröße Ölströmungsgeschwindigkeit	86
3.10. Meßgröße Zeit	88
3.10.1. Bedeutung für die Schutztechnik	88
3.10.2. Mechanische Zeitrelais	88
3.10.3. Statische Zeitrelais	89
3.11. Kombination der Meßrelais zu Schutzeinrichtungen	92
3.11.1. Anliegen	92
3.11.2. Überstromzeitrelais	92
3.11.2.1. Ungerichtete Überstromzeitrelais	92
3.11.2.2. Gerichtete Überstromzeitrelais	93
3.11.3. Distanzrelais	94
3.11.3.1. Probleme des Impedanz-Meßrelais	94
3.11.3.2. Anregetufe	99
3.11.3.3. Zusammenwirken aller funktionellen Hauptbaugruppen	101
<b>4. Wandler zur Meßgrößenerfassung und -aufbereitung</b>	<b>105</b>
4.1. Schutztechnische Forderungen	105
4.2. Elektromagnetische Wandler	105
4.2.1. Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm	105
4.2.2. Übertragungsfehler und sonstige Kenngrößen	106
4.2.3. Einfluß der Bürde auf die Betragsfehler $F_u$ , $F_i$ im stationären Betrieb	110
4.2.4. Übertragungsverhalten von Stromwandlern im nichtstationären Betrieb	113
4.2.5. IEC-Empfehlungen für eine neue Klassifizierung von Stromwandlern für Schutzzwecke	116
4.3. Meßwerterfassung nach nichttransformatorischen Prinzipien	118
4.3.1. Problematik	118
4.3.2. Kapazitive Spannungswandler	119
4.3.3. Unkonventionelle Spannungswandler	121
4.3.4. Unkonventionelle Stromwandler	122

<b>5. Hilfsenergieversorgung</b> . . . . .	<b>124</b>
5.1. Besonderheiten der Hilfsenergiebereitstellung . . . . .	124
5.2. Batterieanlagen . . . . .	124
5.3. Kinetische Energiespeicher . . . . .	125
5.4. Elektrische Energiespeicher mittels Kondensatoren . . . . .	125
5.5. Wandlerstrombetätigung und -auslösung . . . . .	126
5.6. Gleichstromsteuerkreise . . . . .	126
5.7. Wechselstromsteuerkreise . . . . .	127
5.8. Dezentrale Hilfsenergieversorgung für elektronische Schutzeinrichtungen . . . . .	128
<b>6. Strategie für den Einsatz der Schutzsysteme im Netz</b> . . . . .	<b>130</b>
6.1. Entwicklung der Netze und des Netzschutzes . . . . .	130
6.2. Gesichtspunkte zur Schutzauswahl . . . . .	131
6.3. Gewährleistung der notwendigen Betriebszuverlässigkeit beim Schutzeinsatz . . . . .	133
6.4. Netzschutzkonzeption und Forderungen an den Schutz . . . . .	135
6.5. Strategie und Probleme des Reserveschutzes . . . . .	136
6.5.1. Schutzdoppelung und Zuverlässigkeit . . . . .	136
6.5.2. Reserveschutzvarianten . . . . .	137
6.5.3. Schalterversagerschutz . . . . .	139
6.6. Maßnahmen zur Vermeidung größerer Störungsauswirkungen . . . . .	139
6.6.1. Störungsausweitungen im Netz und Netzzusammenbrüche . . . . .	139
6.6.2. Vorbeugende netzbetriebliche und schutztechnische Maßnahmen . . . . .	140
6.6.3. Automatischer, frequenzabhängiger Lastabwurf (AFE) . . . . .	140
<b>7. Leitungsschutz</b> . . . . .	<b>142</b>
7.1. Übertragungsarten und Netzformen . . . . .	142
7.2. Fehlerarten, Fehlerhäufigkeit, Fehlerauswirkungen und Anforderungen an den Schutz . . . . .	143
7.2.1. Fehlerarten . . . . .	143
7.2.2. Fehlerhäufigkeiten und Fehlerursachen . . . . .	143
7.2.3. Fehlerauswirkungen . . . . .	146
7.2.4. Anforderungen an den Schutz . . . . .	148
7.3. Kurzschlußschutz in Niederspannungsnetzen . . . . .	148
7.4. Kurzschlußschutz in Mittelspannungs-Strahlennetzen durch Überstromschutzeinrichtungen . . . . .	151
7.4.1. Überstromzeitschutz mit unabhängiger Charakteristik . . . . .	152
7.4.2. Mehrstufen-Überstromschutz mit Schnellstufe . . . . .	154
7.4.3. Überstromzeitschutz mit verriegelter Schnellstufe . . . . .	156
7.5. Kurzschlußschutz in Mittelspannungs-Ringnetzen durch Überstromrichtungsschutzeinrichtungen . . . . .	157
7.5.1. Einsatzmöglichkeiten des Überstromzeitschutzes in Ringnetzen durch zusätzliches Selektivitätskriterium . . . . .	157
7.5.2. Probleme beim Einsatz von Richtungsrelais . . . . .	159
7.5.2.1. Einsatzgrenzen durch die „tote Zone“ . . . . .	159
7.5.2.2. Einsatzgrenzen bei unsymmetrischen Fehlern . . . . .	160
7.5.2.3. Überlagerung von Lastströmen oder von Rückspeisevorgängen während des Kurzschlusses . . . . .	160

7.5.2.4.	Anwendung von Auswahlhaltungen . . . . .	161
7.5.2.5.	Bestimmung der Größenordnung bei Kurzschlüssen jenseits von Transformatoren . . . . .	162
7.6.	Kurzschlußschutz in Maschennetzen durch Distanzschutzeinrichtungen . . . . .	165
7.6.1.	Selektivität im Maschennetz durch entfernungsabhängige Zeitstaffelung . . . . .	165
7.6.2.	Impedanzeinstellung und Staffelplan . . . . .	167
7.6.3.	Reichweite von Distanzrelais . . . . .	171
7.6.4.	Grenzen der distanzgetreuen Messung . . . . .	173
7.6.4.1.	Lichtbogenwiderstand und andere Fehlerübergangswiderstände . . . . .	173
7.6.4.2.	Schaltzustandsveränderungen und gegenseitige Beeinflussung bei Doppelleitungen . . . . .	176
7.6.4.3.	Fehlmessungen bei Verzweigungen im Leitungszug . . . . .	177
7.6.4.4.	Doppelerdschlußfassung . . . . .	180
7.6.4.5.	Zwischenschaltzustände bei Anwendung der automatischen Wiedereinschaltung . . . . .	181
7.6.4.6.	Einfluß der Transformatoren . . . . .	182
7.6.4.7.	Einfluß von Netzpendelungen . . . . .	184
7.6.5.	Ermittlung der Einsatzbedingungen . . . . .	185
7.7.	Einsatz der automatischen Wiedereinschaltung (Kurtrennung) . . . . .	187
7.7.1.	Gründe für den Einsatz und Einsatzmöglichkeiten . . . . .	187
7.7.2.	Erforderliche schutztechnische Maßnahmen . . . . .	189
7.7.3.	Schnellabschaltverfahren . . . . .	190
7.7.4.	AWE-Einsatz in Elektroenergieversorgungsnetzen . . . . .	192
7.8.	Kurzschlußschutz durch Vergleichsschutzeinrichtungen . . . . .	193
7.8.1.	Übersicht zur Anwendung . . . . .	193
7.8.2.	Meßgrößenvergleichsschutzeinrichtungen . . . . .	195
7.8.2.1.	Stromlängsvergleichsschutz . . . . .	195
7.8.2.2.	Spannungslängsvergleichsschutz . . . . .	196
7.8.2.3.	Stromquervergleichsschutz . . . . .	196
7.8.3.	Phasenwinkelvergleichsschutzeinrichtungen . . . . .	196
7.8.3.1.	Vorteile beim Einsatz und Verfahren . . . . .	196
7.8.3.2.	Realisierung des Impulsvergleichsverfahrens . . . . .	197
7.8.3.3.	Realisierung des Überdeckungszeitverfahrens . . . . .	198
7.8.4.	Mischwandler Einsatz . . . . .	201
7.8.5.	Signalvergleichsschutzeinrichtungen . . . . .	203
7.8.6.	Vergleichsschutzeinrichtungen auf der Basis nichtkonventioneller Kriterien . . . . .	205
7.8.7.	Signalverbindungskanäle . . . . .	205
7.9.	Reserveschutz in Leitungsnetzen . . . . .	207
7.10.	Erdfehlererfassung in nicht wirksam geerdeten Netzen . . . . .	208
7.10.1.	Möglichkeiten und Wirkungen der Netzsternpunktbehandlung . . . . .	208
7.10.2.	Möglichkeiten zur selektiven Erdfehlererfassung in Netzen mit freiem Sternpunkt und mit Resonanzsternpunkterdung . . . . .	210
7.10.2.1.	Dauererdschlußfassung in Netzen mit freiem Sternpunkt . . . . .	210
7.10.2.2.	Dauererdschlußfassung in Netzen mit Resonanzsternpunkterdung über den Wirkreststrom . . . . .	211
7.10.2.3.	Dauererdschlußfassung über Oberschwingungsanteile . . . . .	212
7.10.2.4.	Erdschlußfassung unter Benutzung der Einschwingvorgänge . . . . .	213
7.10.3.	Strategie der Sternpunktbehandlung und der Erdfehlererfassung in Verteilungsnetzen . . . . .	213
7.10.4.	Besonderheiten bei der Einführung der niederohmigen Sternpunkterdung (NOSPE) in Verteilungsnetzen . . . . .	215

7.10.4.1. Niederohmige Sternpunktterdung in einfachen Mittelspannungs-Kabelnetzen . . . . .	215
7.10.4.2. Niederohmige Sternpunktterdung in Hochspannungs-Verteilungsnetzen . . . . .	216
<b>8. Transformatorschutz . . . . .</b>	<b>219</b>
8.1. Fehlerarten, Fehlerauswirkungen und Anforderungen an den Schutz . . . . .	219
8.1.1. Besonderheiten von Transformatoren und Trend . . . . .	219
8.1.2. Fehlerarten und Fehlerauswirkungen . . . . .	219
8.1.2.1. Elektrische Fehler im Inneren des Transformators . . . . .	219
8.1.2.2. Äußere elektrische Fehler . . . . .	220
8.1.2.3. Nichtelektrische Fehler . . . . .	220
8.1.2.4. Folgefehler im Transformator durch Fehler im Netz . . . . .	220
8.1.2.5. Fehlerauswirkungen . . . . .	221
8.1.3. Anforderungen an den Schutz . . . . .	221
8.2. Fehlererfassung durch Differentialschutzeinrichtungen . . . . .	224
8.2.1. Besonderheiten beim Transformator-differentialschutz . . . . .	224
8.2.2. Falschstromstabilisierung . . . . .	224
8.2.3. Stabilisierung gegen Schaltvorgänge . . . . .	226
8.2.3.1. Wirkung der Schaltvorgänge auf den Differentialschutz . . . . .	226
8.2.3.2. Begrenzte Verzögerung des Auslösekommandos . . . . .	228
8.2.3.3. Sperrelais mit Resonanzabstimmung . . . . .	229
8.2.3.4. Einsatz von Sperrelais für die 2. und weitere Oberschwingungen . . . . .	229
8.2.4. Schutz mit Einsatz von Zwischenwandlern . . . . .	231
8.2.5. Besonderheiten bei Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	233
8.2.6. Besonderheiten bei Generator-Transformator-Blockbetrieb . . . . .	234
8.3. Fehlerschutz durch Strömungsschutzeinrichtungen . . . . .	235
8.3.1. Fehlerschutz durch Buchholzrelais . . . . .	235
8.3.2. Fehlerwarnung durch Buchholzrelais . . . . .	236
8.3.3. Fehlerschutz und Warnung durch Täuberrelais . . . . .	236
8.3.4. Diagnostik an Transformator-Stufenschaltwerken . . . . .	237
8.4. Überlastschutzeinrichtungen . . . . .	237
8.4.1. Abhängiges Überstromzeitrelais . . . . .	237
8.4.2. Thermisches Abbild . . . . .	237
8.4.3. Temperaturwächter mit Kontaktthermometer . . . . .	238
8.5. Spezielle Erdfehlerschutzeinrichtungen . . . . .	238
8.5.1. Nullspannungsrelais . . . . .	238
8.5.2. Nullstromrelais . . . . .	238
8.5.3. Nullstromdifferentialschutz . . . . .	238
8.5.4. Kesselschutz (Masseschutz) . . . . .	238
8.6. Reserveschutzeinrichtungen . . . . .	239
8.6.1. Unabhängiger Überstromzeitschutz . . . . .	239
8.6.2. Distanzschutz . . . . .	239
8.6.3. Autonomer Transformator-Reserveschutz . . . . .	240
8.7. Schutz von Transformatoren durch Schmelzsicherungen . . . . .	241
8.8. Einsatzbedingungen für Transformatorschutzeinrichtungen . . . . .	243
<b>9. Generatorschutz . . . . .</b>	<b>244</b>
9.1. Fehlerursachen, Fehlerarten, Besonderheiten des Schutzes . . . . .	244
9.2. Ständererdschlußschutz . . . . .	246
9.2.1. Fehlerauswirkungen und Schutzstrategie . . . . .	246
9.2.2. Schutzlösungen bei Generatoren im Blockbetrieb . . . . .	246
9.2.3. Schutzlösungen bei Generatoren im Sammelschienenbetrieb . . . . .	253