

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	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
2. Schutzkriterien	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
3. Geräte und Meßrelais zur Verarbeitung der kritierellen Größen	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 (Ausdehnungs-Kontaktthermometer)	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
4. Wandler zur Meßgrößenerfassung und -aufbereitung	105
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

5. Hilfsenergieversorgung	124
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
6. Strategie für den Einsatz der Schutzsysteme im Netz	130
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
7. Leitungsschutz	142
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 Auswahlschaltungen	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
8. Transformatorschutz	219
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 Täuferrelais	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. Autonome Transformator-Reserveschutz	240
8.7. Schutz von Transformatoren durch Schmelzsicherungen	241
8.8. Einsatzbedingungen für Transformatorschutzeinrichtungen	243
9. Generatorschutz	244
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