

Inhaltsverzeichnis

Teil I Wissensbriefing

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Ausrichtung, Randbedingungen und Begriffe | 3 |
| 1.1 | Inhaltliche Ausrichtung | 3 |
| 1.2 | Aufgaben von Stromrichtern | 4 |
| 1.3 | Kategorisierung von Stromrichtern | 5 |
| 1.4 | Netzbetrieb | 5 |
| 1.5 | Netzschutz | 6 |

Teil II Wissensvernetzung

| | | |
|----------|--|----------|
| 2 | Stromrichter in Einphasensystemen | 9 |
| 2.1 | Einphasige Stromrichter am Gleichspannungszwischenkreis | 9 |
| 2.1.1 | Schaltzellen als Grundbausteine selbstgeführter Stromrichter | 9 |
| 2.1.2 | Halbbrückentopologie | 14 |
| 2.1.3 | Vollbrückentopologie | 21 |
| 2.2 | Filter als Verbindungselement zwischen Stromrichter und Netz | 25 |
| 2.2.1 | Auswirkungen harmonischer Frequenzkomponenten und Gegenmaßnahmen | 25 |
| 2.2.2 | Filtertopologien und Modellierung | 30 |
| 2.2.3 | Auslegung und Wirkungsweise eines LCL-Filters | 40 |
| 2.3 | Einstellung von Strom und Spannung | 47 |
| 2.3.1 | Wirkungsweise eines Stromrichters mit LCL-Filter | 47 |
| 2.3.2 | Mathematische Modellierung | 52 |
| 2.3.3 | Regelungskonzept | 62 |
| 2.4 | Leistungsübertragung und Charakteristik eines Stromrichters mit LCL-Filter | 70 |
| 2.4.1 | Einstellung der Wirk- und Verschiebungsblindleistung | 72 |
| 2.4.2 | Einstellung der Strom-/Spannungscharakteristik | 83 |
| 2.4.3 | Verallgemeinerung der Stromrichtercharakteristik | 87 |
| | Literatur | 91 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3 | Stromrichter in Dreiphasensystemen | 93 |
| 3.1 | Modellierung eines dreiphasigen Stromrichters am elektrischen Netz | 94 |
| 3.2 | Übersicht und Klassifizierung dreiphasiger Stromrichterregelungen | 102 |
| 3.2.1 | Generelle Regelkreisstruktur | 103 |
| 3.2.2 | Klassifizierungsschema für Stromrichterregelungen | 106 |
| 3.3 | Analyse und Entwurf verschiedener Stromrichterregelungen in DSRF-Koordinaten | 109 |
| 3.3.1 | Stromregelung und PQ -Modus | 110 |
| 3.3.2 | Netzfolgende Statikregelung $P(f)Q(U)$ und Synchronmaschinennachbildung $P(\dot{f})Q(U)$ | 122 |
| 3.3.3 | Spannungsregelung uf | 125 |
| 3.3.4 | Netzbildende Statikregelung $f(P)U(Q)$ | 131 |
| 3.3.5 | Virtuelle Trägheit $\dot{f}(P)U(Q)$ | 140 |
| 3.4 | Vergleich von Stromrichter und Synchrongenerator | 144 |
| 3.4.1 | Frequenzregelung und Momentanreserve | 144 |
| 3.4.2 | Stabilitätsverhalten | 151 |
| 3.4.3 | Betriebsverhalten und Ersatzschaltbilder in Symmetrischen Komponenten | 159 |
| | Literatur | 161 |
| 4 | Stromrichter in Dreiphasen-Vierleitersystemen | 165 |
| 4.1 | Erhöhung der Stromrichterspannungen durch Addition einer dritten Harmonischen | 165 |
| 4.2 | Systemmodellierung und Regelung von Nullsystemgrößen | 169 |
| 4.3 | Symmetrierung der Zwischenkreisspannung | 172 |
| | Literatur | 173 |
| 5 | Netzschutz unter Einfluss von Stromrichtern | 175 |
| 5.1 | Grundannahmen zum Netzverhalten | 176 |
| 5.1.1 | Strom- und Spannungsverläufe im Kurzschlussfall | 176 |
| 5.1.2 | Verhalten im fehlerfreien Netzbetrieb | 178 |
| 5.1.3 | Topologie und Leitungsbeschaffenheit | 179 |
| 5.1.4 | Elektromechanische Ausgleichsvorgänge | 180 |
| 5.2 | Messvorschriften des Distanzschutzes | 181 |
| 5.2.1 | Komplexwertige Messvorschrift | 182 |
| 5.2.2 | Reellwertige Messvorschrift | 183 |
| 5.2.3 | Messvorschrift der Reaktanzmethode | 184 |
| 5.3 | Analytische Untersuchungen | 190 |
| 5.3.1 | Methodik | 191 |
| 5.3.2 | Konfiguration Ia: einseitige Einspeisung durch eine Drehfeldmaschine | 194 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3.3 | Konfiguration Ib: einseitige Einspeisung durch einen Stromrichter | 203 |
| 5.3.4 | Konfiguration IIa: beidseitige Einspeisung durch zwei Drehfeldmaschinen | 211 |
| 5.3.5 | Konfiguration IIb: beidseitige Einspeisung durch eine Drehfeldmaschine und einen Stromrichter | 224 |
| 5.3.6 | Konfiguration IIc: beidseitige Einspeisung durch zwei Stromrichter | 238 |
| 5.3.7 | Konfiguration IIIa: beidseitige Einspeisung durch zwei Drehfeldmaschinen mit Zwischeneinspeisung durch eine Drehfeldmaschine | 248 |
| 5.3.8 | Konfiguration IIIb: beidseitige Einspeisung durch zwei Drehfeldmaschinen mit Zwischeneinspeisung durch einen Stromrichter | 269 |
| 5.3.9 | Konfiguration IIIc: beidseitige Einspeisung durch zwei Stromrichter mit Zwischeneinspeisung durch einen Stromrichter | 284 |
| 5.4 | Zusammenfassende Bewertung des Einflusses von Stromrichtern auf den Netzschutz | 296 |
| 5.4.1 | Grundlegende Unterschiede zwischen Drehfeldmaschinen- und Stromrichtereinspeisung | 296 |
| 5.4.2 | Auswirkungen von Zwischeneinspeisung und Stromrichter auf das Schutzsystem | 297 |
| | Literatur | 301 |

Teil III Wissenscontainer

| | | |
|----------|--|------------|
| 6 | Modal- und Koordinatentransformationen | 305 |
| 6.1 | Raumzeiger und Nullgröße | 305 |
| 6.2 | Raumzeiger und Symmetrische Komponenten | 312 |
| 6.3 | DSRF-Komponenten | 317 |
| | Literatur | 321 |
| 7 | Elektrische Leistungsbegriffe | 323 |
| 7.1 | Energiestrom, Energiestromdichtevektor und Leistung | 323 |
| 7.1.1 | Ladungsmodell | 324 |
| 7.1.2 | Feldenergiemodell für widerstands- und querschnittslose Leiter | 325 |
| 7.1.3 | Feldenergiemodell für reale Leiter | 326 |
| 7.2 | Spannungs- und Stromsignale | 329 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.3 | Herleitung der Wirkleistung aus der Momentanleistung für Wechsel- und Gleichgrößen | 330 |
| 7.4 | Beurteilung der Wirkleistungsbereitstellung | 333 |
| 7.5 | Einführung der Scheinleistung | 334 |
| 7.6 | Beziehung von Wirk- und Scheinleistung und der Leistungsfaktor . . . | 335 |
| 7.7 | Einführung der Blindleistung, Verschiebungs- und Verzerrungsblindleistung | 338 |
| 7.8 | Leistungen mit komplexwertigen Zeigern, komplexe Scheinleistung, komplexe Wechselleistung | 342 |
| 7.9 | Leistungen im Mehrleitersystem | 347 |
| 7.10 | Komplexwertige Leistungen im Drehstromsystem | 351 |
| 7.11 | Leistungen im Mehrleitersystem mit Symmetrischen Komponenten . . | 352 |
| 7.12 | Leistungsfaktor und Blindleistung für den verzerrten und unsymmetrischen Betrieb | 355 |
| 7.13 | Komplexe momentane Drehstromleistungen mit Raumzeiger, $\alpha\beta$ -, dq- und DSRF-Komponenten | 360 |
| | Literatur | 367 |
| 8 | Stromrichtertopologien | 369 |
| 8.1 | Grundlagen | 369 |
| 8.1.1 | Zweistufiger Elementarstromrichter | 370 |
| 8.1.2 | Aspekte mehrstufiger Topologien | 372 |
| 8.2 | Schalterbasierte Multilevel-Topologien | 373 |
| 8.2.1 | Diode-clamped Stromrichter | 373 |
| 8.2.2 | Flying-capacitor Stromrichter | 374 |
| 8.3 | Modulare Multilevel-Topologien | 376 |
| 8.3.1 | Stromrichterzellen und Stromrichterzweige | 376 |
| 8.3.2 | Dreieckschaltung | 380 |
| 8.3.3 | Doppelsternschaltung | 382 |
| | Literatur | 387 |
| 9 | Regelungstechnik | 389 |
| 9.1 | Struktur und Wirkungsweise einer Regelung | 389 |
| 9.2 | Digitale Reglerimplementierung | 392 |
| 9.3 | Modellierung der Regelstrecke | 395 |
| 9.4 | Analyse des Regelkreises | 397 |
| 9.5 | Reglersynthese | 404 |
| 9.6 | Zusätzliche Komponenten der Regeleinrichtung | 413 |
| 9.7 | Kaskadierte Regelkreise | 418 |
| 9.8 | Ausblick: Zustandsregler | 420 |
| | Literatur | 421 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 10 | Aufbau und Betrieb elektrischer Netze | 423 |
| 10.1 | Struktur und Aufbau elektrischer Netze | 423 |
| 10.2 | Physikalische Grundlagen für den Betrieb von Wechselstromnetzen | 425 |
| 10.2.1 | (Polrad-) Winkel- und Frequenzstabilität | 426 |
| 10.2.2 | Zusammenhang zwischen Spannung, Frequenz, Wirk- und Blindleistung | 428 |
| 10.3 | Eigenschaften und Regelung von Synchrongeneratoren | 430 |
| 10.3.1 | Übersicht | 431 |
| 10.3.2 | Elektromagnetische Vorgänge im Fehlerfall und Ersatzschaltbilder | 432 |
| 10.3.3 | Elektromechanisches Verhalten und Polradwinkelstabilität | 435 |
| 10.3.4 | Drehzahl-, Spannungs- und Statikregelung | 443 |
| 10.4 | Bilanzmodell und Frequenzverhalten des elektrischen Netzes | 448 |
| | Literatur | 453 |
| 11 | Schutztechnik | 455 |
| 11.1 | Generatorverhalten im Kurzschluss | 455 |
| 11.2 | Gleichanteil des Kurzschlussstroms in ohmsch-induktiven Netzen | 458 |
| 11.3 | Source Impedance Ratio (SIR) | 460 |
| 11.4 | Darstellung von Netzfehlern | 461 |
| 11.4.1 | Querfehler | 462 |
| 11.4.2 | Längsfehler | 463 |
| 11.5 | Sättigung | 465 |
| 11.6 | Netzpendelungen | 467 |
| 11.7 | Anregung im Distanzschutz | 468 |
| 11.7.1 | Überstromanregung | 468 |
| 11.7.2 | U/I -Anregung | 469 |
| 11.7.3 | $U/I/\varphi$ -Anregung | 470 |
| 11.7.4 | Impedanzanregung | 471 |
| 11.7.5 | Allgemeines | 471 |
| 11.8 | Distanzschutzstaffelung | 472 |
| 11.8.1 | Einseitig gespeister Leitungszug | 472 |
| 11.8.2 | Beidseitig gespeister Leitungszug | 473 |
| 11.8.3 | Verzweigte Leitungen | 474 |
| 11.9 | Zwischeneinspeiseeffekt im Distanzschutz | 475 |
| 11.10 | Richtungsbestimmung | 477 |
| 11.11 | Maßnahmen zur Frequenzhaltung | 479 |
| 11.12 | Modellierung von Stromrichtern in Symmetrischen Komponenten | 480 |
| 11.13 | Anforderungen an dezentrale Energieumwandlungsanlagen bei Netzfehlern | 481 |
| | Literatur | 484 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 12 | Distanzschutzalgorithmen | 487 |
| 12.1 | Funktionsprinzip | 487 |
| 12.2 | Leistungsmodell in der Distanzschutztechnik | 489 |
| 12.3 | Erdimpedanzanpassungsfaktoren | 493 |
| 12.4 | Fehlerschleifen | 494 |
| 12.5 | Messvorschrift in der Distanzschutztechnik | 497 |
| 12.6 | Impedanzmessmethode: Leitungsdifferentialgleichung | 501 |
| 12.7 | Impedanzmessmethode: Grundschrwingungszeiger | 501 |
| 12.8 | Messvorschrift f#r Leiter-Leiter-Schleifen | 504 |
| 12.8.1 | Komplexwertige Messvorschrift | 505 |
| 12.8.2 | Reellwertige Messvorschrift | 505 |
| 12.8.3 | Messfehler der Messvorschrift f#r Leiter-Leiter-Schleifen | 506 |
| 12.9 | Messvorschrift f#r Leiter-Erde-Schleifen | 509 |
| 12.9.1 | Komplexwertige Messvorschrift | 510 |
| 12.9.2 | Reellwertige Messvorschrift | 511 |
| 12.9.3 | Messfehler der Messvorschrift f#r Leiter-Erde-Schleifen | 513 |
| 12.10 | Algorithmus zur Lastflusskompensation | 519 |
| 12.11 | Reaktanzmethode | 522 |
| 12.11.1 | Problemstellung | 522 |
| 12.11.2 | Zielstellung | 524 |
| 12.11.3 | L#sungsidee | 524 |
| 12.11.4 | Varianten der Reaktanzmethode | 524 |
| 12.11.5 | Messvorschriften auf Basis der Reaktanzmethode | 537 |
| | Literatur | 551 |