



Netzschutzkonzepte für zukünftige Netze

Version 2.0
Juni 2022



Inhalt

1	Höhere Auslastung der Netze	11
1.1	Freileitungsmonitoring	11
1.2	Maximal zulässige Lastströme	13
1.3	Adaptiver Schutz	17
2	Bidirektionale Leistungsflüsse über Transformatoren	19
2.1	Einleitung – Transformatorschutz	19
2.2	Reichweite Impedanzanregung am Netzkuppeltransformator	20
2.3	Begrenzung induktiver Leistungsflüsse aufgrund winkelabhängiger Anregung	24
2.4	Lösungsansätze	26
2.4.1	Einstellkonvention ÜNB/VNB und Visualisieren der Begrenzung	26
2.4.2	Ortsnaher Reserveschutz und Leistungsschaltversagerschutz – Ansatz 1	28
2.4.3	Ortsnaher Reserveschutz und Leistungsschaltversagerschutz – Ansatz 2	29
3	Schutzkonzepte an den Netzschnittstellen ÜNB/VNB	30
4	Entwicklung der Schutzkonzepte im Mittelspannungsnetz	33
4.1	Bisher verwendete Netzstrukturen und zugehörige Schutzkonzepte	33
4.2	Netzveränderung durch Einspeiser – vom offenen Ring zu geschlossenen Ringen	33
4.3	Netzveränderung durch Einspeiser – vom geschlossenen Ring zu Maschennetzen	34
4.4	Besondere Netzformen auf Grund großer Einspeisepunkte	35
4.5	Netzanschluss von Kunden	36
4.6	Besonderheiten bei der Sternpunktbehandlung	36
5	Schutz der Sammelschiene im neuen Umfeld	38
5.1	Redundanter Sammelschienenendifferentialschutz	38
5.2	Sammelschienenendifferentialschutz und LSV bei schwachen Einspeisungen (Kondensatorbank)	40
5.3	Alternative zum Sammelschienenendifferentialschutz	41
5.4	Vollständige rückwärtige Verriegelung	42
6	Stichanschlüsse an das HS-Netz und 3-Beine im HÖS-Netz	44
6.1	Begriffsklärung und Klassifikation von Dreibeinen	44
6.1.1	Leitungsdreibein mit passiven Stichanschluss	44
6.1.2	Leitungsdreibein mit schwach einspeisendem Stichanschluss	44
6.1.3	Aktive Leitungsdreibeine	44
6.2	Messwertverfälschung durch Zwischeneinspeisung	45
6.3	Hochspannungsnetz	46
6.3.1	Allgemeines	46
6.3.2	Schutzkonzepte bei Leitungsdreibein mit passivem Stichanschluss	47
6.3.3	Schutzkonzept bei Leitungsdreibein mit schwach einspeisendem Stichanschluss	48
6.3.4	Schutzkonzept bei aktivem Leitungsdreibein	49
6.4	Höchstspannungsnetz	49
6.4.1	Allgemeines	49
6.4.2	Schutzkonzept bei Leitungsdreibein mit schwach einspeisendem Stichanschluss	49

6.4.3	Schutzkonzept bei aktivem Leitungsdreibein.....	49
6.5	Praktische Hinweise.....	52
7	Erhöhte Verkabelung in Netzen der elektrischen Energieversorgung	53
7.1	Erhöhte Verkabelung – eine (schutz-)technische Herausforderung.....	53
7.2	Das Nullsystem und dessen Abhängigkeit von der Kabelschirmbehandlung	53
7.2.1	Einseitige Erdung eines Kabelschirms	54
7.2.2	Zweiseitige Erdung eines Kabelschirms	54
7.2.3	Crossbonding.....	55
7.2.4	Stromtragfähigkeit von Kabelschirmen und Hauptleitern.....	56
7.2.5	Fehlerstromwege, Nullsystem in Abhängigkeit der Kabelschirmbehandlung.....	56
7.2.6	Berechnung des Erdkompensationsfaktors (k_E -Faktor) in Abhängigkeit der Kabelschirmerdung	60
7.2.7	Messergebnisse von Erdkompensationsfaktor (k_E -Faktor) bei Mittelspannungskabeln in Abhängigkeit der Kabelschirmerdung	63
7.2.8	Auswirkungen auf die Schutzfunktion bei nicht korrekt eingestelltem Erdkompensationsfaktor	65
7.2.9	Verarbeitung des Erdkompensationsfaktors in den Schutzgeräten und ihre Auswirkungen auf die Schutzfunktion.....	67
7.2.10	Allgemeine Empfehlungen für die Einstellung des Erdkompensationsfaktors	70
7.2.11	Strommessung über Kabelumbauwandler.....	70
7.3	Verlegearten von Kabeln	70
7.3.1	Verlegearten.....	71
7.3.2	Berechnung der Induktivität und des Reaktanzwertes	72
7.3.3	Betrachtung im Kurzschlussfall.....	73
7.3.4	Auswirkung der unsymmetrischen Leiterimpedanz auf die Erdschlussortung	73
7.4	Vom gelöschten Netz zur niederohmigen Sternpunktterdung als Folge hoher Verkabelungsanteile im Netz – Schutzbetrachtungen.....	74
7.5	Der Ersatz von Freileitung durch Kabel – Schutzbetrachtungen speziell für Mittelspannungsnetze	75
7.5.1	Übersicht und Fallbeispiel.....	75
7.5.2	Hauptschutzbetrachtungen für 20-kV-Abgang (Schutzeinrichtung B).....	76
7.5.3	Reserveschutzbetrachtungen (z.B. Betrachtung Schutzsystem A).....	78
7.5.4	Genauigkeitsanforderungen bei kleinen Leitungswinkeln	79
7.5.5	Vergleich des Ladestroms zwischen Kabel und Freileitung	80
7.6	Schutzkonzepte an Fallbeispielen	80
7.6.1	Kabelstrecke mit Kompensationsdrosselspule	80
7.6.2	Kompensationsdrosselspule an einer Sammelschiene	82
7.6.3	Kabelstrecke mit Trenntrafo.....	82
7.7	Erhöhung der E-Spulenleistung und Schutz von Eigenbedarf-, Erdungstransformatoren	82
7.8	Minimierung des Doppelerdschlussrisikos durch kurzzeitig niederohmige Sternpunktterdung	85
7.9	Kurzschlussortung	87
7.10	Fehlerortung im gelöscht und isoliert betriebenen Netz	91
7.11	AWE in gemischten Freileitungs-/Kabelstrecken.....	94

7.12 Überlastbarkeit von Kabeln.....	95
7.13 U-Wandler und Entladung	98
7.14 Richtwerte für Kabelparameter	99
8 Literaturverzeichnis	101
9 Anhang	102

Bildverzeichnis

Bild 1	Mindestsicherheitsabstand Durchhang Freileitung zum Boden [Bildquelle: Westnetz GmbH Dortmund].....	11
Bild 2	Einfluss von Wetterbedingungen auf die Strombelastbarkeit [Bildquelle: Dr. R. Puffer, RWTH Aachen].....	12
Bild 3	Notwendige Resistanzreichweite der ersten Zone p_{hE} , $l_{LB} = 5 \text{ m}$, $R_F = 5 \Omega$, $R_E/R_L = 1$, $3I_0, A/I_{ph}, A = 1$	14
Bild 4	Notwendige Resistanzreserven nach Gleichung 1 p_{ph} , $l_{LB} = 5 \text{ m}$, $v_{LB} = 10 \text{ m/s}$	15
Bild 5	Anregebereich und Lastausschnitt in der Impedanzebene, Betrachtung der 380-kV-Spannungsebene.....	16
Bild 6	Anregebereich der Distanzschutzfunktion und Lastbereich der Leitungsstrecke in der Impedanzebene	17
Bild 7	Bidirektionaler Leistungsfluss über Transformatoren	19
Bild 8	Thevenin-Modell	20
Bild 9	Leitungsimpedanz mit Lichtbogenreserve	21
Bild 10	Vereinfachung aus Kreisgleichung	22
Bild 11	Minimale Reichweite Impedananzregung bei unterschiedlichen Trafobemessungsleistungen.....	23
Bild 12	Reichweite Mittelspannungsabgangsfeld, Lichtbogenreserve ist berücksichtigt.....	24
Bild 13	Beispiel 300 MVA Trafoeinspeisung – Impedanz- und Überstromanregung in Impedanzebene ($X_v = 50 \Omega$, $R_v = 24 \Omega$, $\beta = 50^\circ$, $I_{\gg} = 2360 \text{ A}$, $U_{min} = 99 \text{ kV}$).....	25
Bild 14	Beispiel 300 MVA Trafoeinspeisung – Impedanz- und Überstromanregung in Leistungsebene ($X_v = 50 \Omega$, $R_v = 24 \Omega$, $\beta = 50^\circ$, $I_{\gg} = 2360 \text{ A}$, $U_{min} = 99 \text{ kV}$)	26
Bild 15	Mögliche Definition einer Blindleistungsgrenze	26
Bild 16	Beispiel für die Überwachung der Impedananzregung mit aktuellem Arbeitspunkt (grün) ..	28
Bild 17	Reserveschutz Hochspannung – Konzept	28
Bild 18	Schutzkonzept konventioneller Netzanschluss	30
Bild 19	Schutzkonzept strategischer Netzanschluss	31
Bild 20	Schutzkonzept ausgeprägter Netzanschluss mit HS-Sammelschiene des ÜNB	31
Bild 21	Offen betriebener Netzring	33
Bild 22	Geschlossen betriebener Netzring	33
Bild 23	Vermaschtes Netz	34
Bild 24	Besondere Netzformen auf Grund großer Einspeisepunkte	36
Bild 25	Sternpunkt der Erzeugungsanlage	37
Bild 26	Redundanter Sammelschienenenschutz (hier Prinzip Master-Follower)	39
Bild 27	Schutz der Sammelschiene durch den Distanzschutz	41
Bild 28	Bild aus ETG/ITG SuA - Rückwärtige Verriegelung (Blockade bei Abgangsfehler).....	42
Bild 29	Leitungsdreibein mit passivem Stichanschluss	44
Bild 30	Leitungsdreibein mit schwach einspeisendem Stichanschluss	44
Bild 31	Aktives Leitungsdreibein.....	45
Bild 32	Zwischeneinspeisung Leitungsdreibein.....	45
Bild 33	Schutzkonzept bei Leitungsdreibein mit passivem Stichanschluss.....	47

Bild 34	Schutzkonzept bei Leitungs-dreibein mit schwach einspeisendem Stichanschluss	48
Bild 35	Netztopologie aktives Leitungs-dreibein	50
Bild 36	Messung der Fehlerimpedanz des Relais in A	50
Bild 37	Schwer zu erfassende Fehlerstellen (rot) und leicht zu erfassende Fehlerstellen (grün) bei überreichenden Verfahren (oben) und unterreichenden Verfahren (unten).....	51
Bild 38	Verkabelungsgrad im deutschen Hochspannungs- (HS) und Mittelspannungsnetz (MS) in den Jahren 2006 bis 2019 [10]	53
Bild 39	Schematische Darstellung einer ein- bzw. zweiseitigen Erdung eines Kabelschirms.....	54
Bild 40	Beispiel für zulässige Dauerströme (Herstellerangaben) in Abhängigkeit der Schirmerdung und Verlegeart für ein 110-kV-VPE-Kabel ohne zusätzliche Crossbondingmaßnahmen	55
Bild 41	Schematische Darstellung eines Crossbonding für eine Kabelstrecke	56
Bild 42	Beispiel für Strompfade bei einseitiger Schirmerdung an der Einspeisung	57
Bild 43	Beispiel für Strompfade bei einseitiger Schirmerdung von der Einspeisung entfernt	57
Bild 44	Beispiel für Strompfade bei zweiseitiger Schirmerdung (oben) sowie schematische Darstellung als Drehstromsystem (unten)	58
Bild 45	Allgemeines und symmetrisches Gleichungssystem für ein Kabelsystem.....	58
Bild 46	Reale Kabelstrecke mit einem Leiter-Schirm-Fehler im Leiter 3	59
Bild 47	Eigen- und Koppelimpedanz auf realen Kabelstrecken am Beispiel eines Leiter-Schirm-Fehlers in Leiter 3	59
Bild 48	Berechnete Schleifenimpedanz einer Kabelstrecke mit einem Leiter-Schirm-Fehler in Leiter 3 in Abhängigkeit des Fehlerorts in %-Leitungslänge	60
Bild 49	Vereinfachtes Model (ohne Kopplung) zur Bestimmung des kE -Faktors.....	61
Bild 50	Topologie der Netzstörung	65
Bild 51	Verkürzung der ermittelten Reaktanz aufgrund falschem Erdkompensationsfaktor	66
Bild 52	Fehlerbild einseitig gespeister einpoliger Kurzschluss mit Übergangswiderstand.....	67
Bild 53	Schirmstromrückführung bei Kabelumbauwandler.....	70
Bild 54	Verlegung im Dreieck direkt in Erde	71
Bild 55	Verlegung nebeneinander direkt in Erde	71
Bild 56	Verlegung im Dreieck in getrennten Rohren	71
Bild 57	Verlegung in einem gemeinsamen Rohr	72
Bild 58	Fallbeispiel 20-kV-Abgang mit Fehler am Ende des betrachteten Selektionsabschnittes ...	76
Bild 59	Anregesicherheiten des Stromkriteriums.....	76
Bild 60	Darstellung der zweipoligen Kurzschlussströme des Fallbeispiels bei Annahme einer 20-kV-Freileitung und einem 20-kV-Kabel im Vergleich nach Abschnitt 7.14, Tabelle 22	77
Bild 61	Einstellbeispiel für eine Unterimpedanzanregung	79
Bild 62	Winkelfehler bewirkt einen Reaktanzmessfehler, der mit zunehmenden R/X-Verhältnis größer wird.....	80
Bild 63	Übersicht Schutzkonzept 110-kV-Kabelstrecke mit Kompensationsdrosselspule	81
Bild 64	Kompensationsdrosselspule an der 110-kV-Sammelschiene	81
Bild 65	Übersicht Schutzkonzept für 110-kV-Kabelstrecke mit Trenntransformatoren	82
Bild 66	Prinzipdarstellung Schutzkonzept Eigenbedarf-, Erdungstransformator.....	83
Bild 67	Statistische Dauer des Übergangs vom Erdschluss zum Doppelerdschluss (Quelle: Interne Statistik eines großen Verteilnetzbetreibers)	85

Bild 68	Funktionsweise kurzzeitige niederohmige Erdung (KNOSPE).....	86
Bild 69	Prinzipschaltbild – kurzzeitig niederohmige Erdung (KNOSPE)	86
Bild 70	Abschätzung Verbesserungspotenzial in der Nichtverfügbarkeit durch Einsatz der KNOSPE (X-Achse: Netzgebiete kodiert als Zahl, Y-Achse: Jahre mit potenzieller Verbesserung/Verschlechterung, Quelle: interne Abschätzung eines großen Verteilnetzbetreibers).....	87
Bild 71	Fehlereingrenzung durch die Intervallhalbierungsmethode	87
Bild 72	Auswertung für Fehler auf 100 % Freileitungsanteil (Auswertung etwa 200 Fehler)	88
Bild 73	Auswertung für Fehler auf 100 % Kabelanteil mit $kE = 1$ (Auswertung etwa 400 Fehler)...	89
Bild 74	Fehlerintervall im Netzleitsystem	90
Bild 75	"ideale" Station zum Ablesen des KSA.....	90
Bild 76	Fehlerintervalle bei Verzweigung	90
Bild 77	Prinzip Fehlerortung mit Unterstützung ferngemeldeter KSA	91
Bild 78	Wellenausbreitung (blau) und Reflexionen (grün, orange).....	93
Bild 79	Wellenausbreitung zweiseitige Messmethode.....	93
Bild 80	Schutzkonzept für teilverkabelte Leitungen ohne Blockade der AWE	94
Bild 81	Schutzkonzept für teilverkabelte Leitungen mit Blockade der AWE	95
Bild 82	Zuordnung der Betriebszustände eines Betriebsmittels in Abhängigkeit der Belastung.....	96
Bild 83	Inhomogenität eines Kabels	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zusammenfassung der Schutzgrenz- und Engpassströme der 380-kV- und 110-kV-Spannungsebene unter verschiedenen Leitungswinkeln	13
Tabelle 2	Resistanzreichweite auf der 380-kV-Spannungsebene	15
Tabelle 3	Erfahrungswerte der Resistanzreichweite auf der 110-kV-Spannungsebene	15
Tabelle 4	Blindleistungsgrenzen	27
Tabelle 5	Beispiele für typische Leiter- und Schirmquerschnitte	56
Tabelle 6	Berechnete Parameter mit symmetrischer (oben) und asymmetrischer (unten) Stromquelle für ein einseitig geerdetes Mittelspannungskabel	62
Tabelle 7	Berechnete Parameter mit symmetrischer (oben) und asymmetrischer (unten) Stromquelle für ein zweiseitig geerdetes Mittelspannungskabel.....	63
Tabelle 8	Gemessene Impedanzwerte in Ohm je km und Erdkompensationsfaktor	63
Tabelle 9	Gemessene Strom- und Spannungswerte	64
Tabelle 10	Zusammenfassung der Beispielmessungen für Mittelspannungskabel kE-Faktor beidseitig und einseitig	65
Tabelle 11	Vergleich errechnete Werte (Netzplanung) mit gemessenen Werten an Kabel 1	65
Tabelle 12	Vom Schutz gemessene R- und X-Werte am Beispiel Kabel	69
Tabelle 13	Vom Schutz gemessene R- und X-Werte am Beispiel Freileitung.....	69
Tabelle 14	Empfehlungen Erdkompensationsfaktor in Mittelspannungsnetzen	70
Tabelle 15	Berechnete induktive Reaktanzwerte für verschiedene Verlegearten bei Kabeltyp NA2XS(F)2Y 1x240 RM/25 18/30 kV	72
Tabelle 16	Gegenüberstellung der induktiven Reaktanzwerte in Ruhelage zu Kurzschluss bei Kabeltyp NA2XS(F)2Y 1x240 RM/25 18/30 kV bei Verlegung in Rohr RXKV 160 mm.....	73
Tabelle 17	Eigenschaften von NOSPE-Netzen – wirksam oder strombegrenzend geerdet.....	75
Tabelle 18	Vergleich der maximalen Leitungslänge zwischen Freileitung und Kabel ($I_{k2min}'' = 900$ A und digitale Schutzeinrichtungen).....	78
Tabelle 19	Maximale Länge der Freileitung mit Distanzschutz als Reserveschutz und reiner Stromanregung.....	78
Tabelle 20	Vergleich der Ladeleistung einer 20-kV-Freileitung und eines 20-kV-Kabels [16].....	80
Tabelle 21	Elektrische Kennwerte von vergleichbaren 110-kV-Freileitung und -Kabeln [21]	99
Tabelle 22	Elektrische Kennwerte von vergleichbaren 20-kV-Freileitung und -Kabeln [16]	100
Tabelle 23	Elektrische Kennwerte von vergleichbaren 110-kV-Freileitung und -Kabeln und Nullsystem [21]	100

Vorwort

Die Entwicklungen in den Netzen haben konkrete Folgen auf den Netzschutz. Der hier vorliegende FNN-Hinweis ist als Kompendium zu verstehen, welches in einzelnen Kapiteln verschiedene Folgen auf den Netzschutz beschreibt und Lösungen anbietet. Es verfolgt das Ziel, den ebenfalls vom VDE FNN herausgegebenen „Leitfaden zum Einsatz von Schutzsystemen in elektrischen Netzen“ [1], als Basis guter netzschutztechnischer Herangehensweisen und Empfehlungen, mit einzeln betrachteten Zukunftsthemen zu ergänzen. Die Kapitel können damit unabhängig voneinander gelesen werden und das Kompendium insgesamt mit weiteren Themen erweitert werden.

Die vorliegende Ausgabe 2.0 ersetzt Ausgabe 1.0 aus dem Jahr 2018 und erweitert diese um Kapitel 7. Dieses Kapitel fokussiert sich insbesondere auf eine erhöhte Verkabelung und die damit verbundenen schutztechnischen Herausforderungen.

Dieser FNN-Hinweis wurde vom FNN-Expertenetzwerk Netzschutz im Auftrag des FNN-Lenkungskreises Netztechnik und Netzbetrieb erstellt und überarbeitet. Er ist mit dem Arbeitskreis „Schutztechnik“ von ÖESTERREICHS ENERGIE und dem VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen abgestimmt und wird gemeinschaftlich herausgegeben.