



# Netzschutzkonzepte für zukünftige Netze

Version 2.0  
Juni 2022



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Höhere Auslastung der Netze .....</b>	<b>11</b>
1.1	Freileitungsmonitoring.....	11
1.2	Maximal zulässige Lastströme.....	13
1.3	Adaptiver Schutz.....	17
<b>2</b>	<b>Bidirektionale Leistungsflüsse über Transformatoren .....</b>	<b>19</b>
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
<b>3</b>	<b>Schutzkonzepte an den Netzschnittstellen ÜNB/VNB .....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>Entwicklung der Schutzkonzepte im Mittelspannungsnetz .....</b>	<b>33</b>
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
<b>5</b>	<b>Schutz der Sammelschiene im neuen Umfeld.....</b>	<b>38</b>
5.1	Redundanter Sammelschienendifferentialschutz .....	38
5.2	Sammelschienendifferentialschutz und LSV bei schwachen Einspeisungen (Kondensatorbank) .....	40
5.3	Alternative zum Sammelschienendifferentialschutz .....	41
5.4	Vollständige rückwärtige Verriegelung .....	42
<b>6</b>	<b>Stichanschlüsse an das HS-Netz und 3-Beine im HÖS-Netz.....</b>	<b>44</b>
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
<b>7</b>	<b>Erhöhte Verkabelung in Netzen der elektrischen Energieversorgung .....</b>	<b>53</b>
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
<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>101</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>102</b>

# 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 Impedanzanregung 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 Impedanzanregung 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 Leitungsdreibein mit schwach einspeisendem Stichanschluss .....	48
Bild 35	Netztopologie aktives Leitungsdreibein .....	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.