



Maßnahmen zur Vermeidung spannungskritischer Netzzustände

Version 2.0
September 2022

Inhalt

Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	9
2 Begriffe	9
3 Herausforderungen bei der Spannungshaltung	9
3.1 Aktuelle Situation und Entwicklung im Übertragungsnetz	9
3.2 Niedrige Netzspannungen	10
3.3 Hohe Netzspannungen	11
3.4 Spannungsschwankungen.....	11
4 Beschreibung Grundlagen	12
4.1 Zusammenhang Strom – Blindleistung in HS und HöS	12
4.2 Das Phänomen „Spannungskollaps“	16
4.2.1 Allgemein	16
4.2.2 Netzbedingter Spannungskollaps	17
4.2.3 Drehstromleitung bei variierendem Lastwinkel	17
4.2.4 Drehstromleitung bei konstanten Blindleistungsabgaben.....	18
4.2.5 Drehstromleitung bei variierender Eingangsspannung	19
4.2.6 Erkenntnisse aus den betrachteten Varianten	20
4.2.7 Verlust der Spannungsstabilität durch automatische Stufung der Spannungsregler.....	20
4.2.8 Q(U)-Regelung und statische Kompensationsanlagen	21
4.2.9 Störungsursachen für das Entstehen eines Spannungskollaps	23
4.2.10 Spannungskollaps aufgrund von Netzstörungen	25
4.2.11 Kraftwerksbedingter Spannungskollaps durch Ausfall von Synchrongeneratoren	25
4.3 Spannungsüberhöhungen	28
4.4 Konsequenzen der Höherauslastung von Netzen und Ausfälle von hochbelasteten Netzelementen	29
4.4.1 Physikalische Grenzen des Blindleistungsflusses aufgrund des Netzschutzes...30	
5 Gesamtkonzept zur Vermeidung spannungskritischer Netzzustände	31
5.1 Maßnahmen in Netzplanung	31
5.2 Maßnahmen Betriebsplanung	31
5.3 Maßnahmen Netzführung (Echtzeitbetrieb)	31
5.3.1 Spannungsbereiche	31
5.3.2 Übersicht möglicher Maßnahmen im Netzbetrieb	33
6 Beschreibung der Einzelmaßnahmen	35
6.1 Maßnahmen in der Betriebsplanung	35

6.1.1	Blindleistungseinsatz bei erwarteten Blindleistungsdefiziten.....	35
6.1.2	Blindleistungseinsatz bei erwarteten Spannungseinbrüchen (präventiv).....	41
6.2	Maßnahmen Netzführung (Echtzeitbetrieb)	42
6.2.1	Maßnahmen bei steigender Spannung oberhalb des Vorzugsspannungsbandes	42
6.2.2	Maßnahmen bei sinkender Spannung unterhalb des Vorzugsspannungsbandes	45
6.3	Koordinierte Zusammenarbeit zwischen Netzbetreibern im Echtzeitbetrieb	50
6.3.1	Beschreibung Handlungsabsprachen zwischen ÜNB - VNB.....	50
Anhänge		56
A. Anhang Verhalten einer Synchronmaschine.....		56
B. Tabelle Übersicht Großstörungen mit Ausgangspunkt „Spannungsproblem“		59

Bildverzeichnis

Abbildung 1: Spannungsprofile während hoher Nord-Süd-Leistungsfluss-Auslastungen am 27. Juli 2020	11
Abbildung 2: Spannungsschwankungen aufgrund gleichzeitiger Einspeiseänderungen von Erzeugungseinheiten	12
Abbildung 3: PI-Ersatzschaltbild einer Freileitung	13
Abbildung 4: Blindleistungsbedarf und Leitungsverluste in Abhängigkeit der übertragenen Wirkleistung am Beispiel einer 400-kV- Freileitung	14
Abbildung 5: Blindleistungsbedarf und Leitungsverluste in Abhängigkeit der übertragenen Wirkleistung am Beispiel einer 110-kV- Freileitung	14
Abbildung 6: Beispiel der unterschiedlichen Spannungspegel im Höchstspannungsnetz zu einem Zeitpunkt im Oktober 2017	15
Abbildung 7: Verlauf ausgewählter Netzspannungen im Netzgebiet der Amprion am 19.11.2011	16
Abbildung 8: Ersatzschaltbild einer Drehstrom-Freileitung	17
Abbildung 9: PU-Kurve bei Spannung am Anfang der Freileitung konstant und variierten Lastwinkel als Parameter am Beispiel eines Zweiknoten-Netzes	18
Abbildung 10: Übersichtsbild für die Leistungsübertragung z. B. einer Freileitung mit schaltbaren Blindleistungselementen (Spannung U_{Anfang} konstant)	18
Abbildung 11: PU-Kurve bei konstanter Spannung am Leitungsanfang und Variation der Blindleistungskompensation am Leitungsende	19
Abbildung 12: Übersichtsbild für die Leistungsübertragung z. B. einer Freileitung (Spannung am UW A variiert)	19
Abbildung 13: PU-Kurve bei Leistungsflüssen mit $Q_{\text{Ende}} = 0$ und Spannung am Anfang der Freileitung als Parameter am Beispiel eines Zweipunkte-Netzes	20
Abbildung 14: Auswirkungen der Transformatorstufung während eines Spannungseinbruches	21
Abbildung 15: Übersichtsbild für die Leistungsübertragung z. B. einer Freileitung (Regelung an einer Erzeugungsanlage aktiv)	22
Abbildung 16: Grenzkurven einer Kurvenschar in Abhängigkeit vom Blindleistungsregelvermögen der EZA mit $Q(U)$ -Regelung	22
Abbildung 17: Szenario Ausfall von großen Erzeugungsleistungen	23
Abbildung 18: Szenario Ausfall einer Freileitung	23
Abbildung 19: Szenario Wirkleistungssprung	24
Abbildung 20: Szenario Blindleistungssprung	24
Abbildung 21: Beispiel Spannungskollaps Frankreich 1987	25
Abbildung 22: Beispiel Blindleistungsbereitstellung am Netzanschlusspunkt nach VDE-AR-N 4120	27
Abbildung 23: Verlauf der Netzspannungen an einem Netzknoten von 50Hertz am 22.04.2012	29
Abbildung 24: Beispiel 300 MVA Trafoeinspeisung - Impedanz- und Überstromanregung in Impedanz- und Leistungsebene	30
Abbildung 25: Empfohlene Spannungsbereiche im Grundfall	33
Abbildung 26: Maßnahmen in der Netzführung bei ÜNB und VNB	34
Abbildung 27: Ablauf der Ermittlung der Blindleistungsbilanz einer Region	36

Abbildung 28: Beispiel Blindleistungsbilanz einer Region mit Maßnahmen	37
Abbildung 29: Beispiel Schwachlastszenario	38
Abbildung 30: Beispiel Starklastszenario	39
Abbildung 31: Spannungsänderung nach 100 MW Lastabschaltung im Raum Frankfurt und verteilter Lastausgleich.....	47
Abbildung 32: Spannungsänderung nach 100 MW Lastabschaltung im Raum Frankfurt und Leistungsausgleich durch das Heizkraftwerk „Reuter West“	48
Abbildung 33: Spannungsänderung nach 100 MW Lastabschaltung im Raum Frankfurt und Leistungsausgleich durch das Heizkraftwerk „Altbach/Deizisau“	48
Abbildung 34: Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Standorts von der Lastabschaltung auf das Spannungsniveau	49
Abbildung 35: Beispiel für Spannungs-Blindleistungs-Management (U-Q-Management) zwischen ÜNB und VNB	51
Abbildung 36: Beispiel für die Blockierung der Spannungsregler über mehrere Netzebenen	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Mindestanforderungen entsprechend der Anwendungsregeln für Erzeugungsanlagen für den quasistationären Betrieb im Frequenzbereich zwischen 49,0 Hz – 51,0 Hz ²⁶
--

Vorwort

Dieser FNN Hinweis wurde von der Projektgruppe „Automatische Letztmaßnahmen“ des Lenkungskreises Systemfragen und Netzcodes erarbeitet.

Der Hinweis beschreibt Maßnahmen zur Vermeidung spannungskritischer Zustände in den Übertragungs- und Verteilungsnetzen. Diese Maßnahmen beginnen bei Abweichungen vom betriebsüblichen Spannungsbereich und erstrecken sich bis zu den automatischen Letztmaßnahmen zur Verhinderung eines Spannungskollapses und Maßnahmen gegen Spannungen, die die Gefahr von Betriebsmittelschäden in sich bergen.

Der Hinweis ersetzt den FNN-Hinweis „Maßnahmen zur Vermeidung spannungskritischer Netzzustände“ September 2013 und unterstützt bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen nach VDE-AR-N 4142.

Einleitung

Die Übertragungs- und Verteilungsnetze stellen das Rückgrat für eine sichere elektrische Energieversorgung in Deutschland und Europa dar. Diese wurden ursprünglich für eine bedarfsgerechte Einspeisung elektrischer Energie ausgelegt (lastnah und lastfolgend) und optimiert. Lastferne und zudem fluktuierende Erzeugung spielte bei der Entwicklung der Übertragungs- und Verteilungsnetze im Zeitraum 1920-2000 keine Rolle.

Die Umsetzung der energiepolitischen Ziele in Europa und besonders in Deutschland („Energiewende“) führt zu einer grundlegenden Neustrukturierung der Elektrizitätswirtschaft, die u. a. gekennzeichnet ist durch:

- die Zunahme des europäischen Stromhandels mit dezentraler Erzeugung
- den massiven Ausbau der Windenergie, zukünftig mit Offshore-Windpark-Kraftwerken hoher Leistung vornehmlich im Norden Deutschlands
- den massiven Ausbau der Solarenergie vornehmlich im Süden Deutschlands
- die stetig zunehmende Integration Erneuerbarer Energien in die Verteilungsnetze
- die Stilllegung aller Kernkraftwerke sowie von Braun-/Steinkohlekraftwerke
- neue, zunehmend lastferne Standorte konventioneller Kraftwerksleistung
- die Notwendigkeit der Energieübertragung von Erzeugungs- zu den Verbrauchszentren (häufig von Nord nach Süd)
- den zunehmenden Leistungsaustausch mit den Nachbarländern Deutschlands

Diese Entwicklungen erschweren die Spannungshaltung im Übertragungs- und Verteilungsnetz. In der Vergangenheit erfolgte die Spannungshaltung durch Ausgleich des regionalen Blindleistungshaushaltes vornehmlich mit Hilfe der in der Höchstspannung angeschlossenen konventionellen Erzeugungsanlagen. Die genannten strukturellen Änderungen führen in Bezug auf die Spannungshaltung u. a. zu den folgenden Effekten, die im Netzbetrieb beherrscht werden müssen:

- In Starklastzeiten führen hohe und weiträumige Stromtransite im stark übernatürlichen Bereich zu einem überproportional ansteigenden Blindleistungsbedarf des Übertragungsnetzes. Dieser Effekt wird noch durch die Anwendung des NOVA-Prinzips z. B. mit Einsatz von Hochtemperaturleiterseilen und des witterungsabhängigen Freileitungsbetriebs oder mit Anwendung kurativer Maßnahmen weiter verstärkt. Infolgedessen kann es regional zu kritischen Spannungsrückgängen kommen.
- In Schwachlastzeiten und bei gleichzeitig stark regenerativer Einspeisung sind mitunter nur wenige konventionelle Kraftwerke mit dem Netz verbunden. In diesem Fall ist die Möglichkeit, einem Blindleistungsüberschuss durch den untererregten Betrieb der Kraftwerksblöcke entgegen zu wirken, nur eingeschränkt vorhanden. Dadurch kann es regional zu deutlichen Spannungserhöhungen kommen.
- Bei starker regenerativer Einspeisung und gleichzeitig einer untererregten Fahrweise der dezentralen Erzeugungsanlagen zum Zwecke der Begrenzung der Spannung in den NS- und MS-Netzen, kann es zu deutlichen Spannungsrückgängen im HS- und HöS-Netz kommen, weil die notwendige Blindleistung aus diesen Ebenen bezogen wird.

Vor diesem Hintergrund werden zukünftig zur Aufrechterhaltung eines sicheren Netzbetriebes weitreichende Maßnahmen und Anpassungen erforderlich:

- Ausbau der Netzinfrastruktur in den Übertragungs- und Verteilnetzen (dazu gehören auch Kompensationseinrichtungen)

- Ggf. Anpassung der Sekundär- und Leittechnik an die neuen Anforderungen (optimale Netzzustandsüberwachung bei Betrieb des Netzes näher an den physikalischen Grenzen)
- Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch Verteilnetze
- Implementierung von manuellen und automatischen Letztmaßnahmen (Systemschutzplan) zur Vermeidung von Netzzusammenbrüchen

Der Technische Hinweis beschreibt Maßnahmen im Bereich Netzplanung, Betriebsplanung und der Netzführung zur Vermeidung spannungskritischer Netzzustände und eines Spannungskollapses. Die Umsetzung der Maßnahmen erfolgt sowohl im Übertragungsnetz als auch in den Verteilungsnetzen, wobei die Letztmaßnahmen vornehmlich in den Verteilungsnetzen vorzubereiten und durchzuführen sind. Dies erfordert eine enge Kooperation zwischen Übertragungsnetzbetreibern und Verteilungsnetzbetreibern bei der Erstellung verpflichtender Regelwerke und deren zügige Umsetzung bis zum 18.12.2022 gemäß ENTSO-E NC ER.