

4-ÜNB-Positionspapier zu Fault-Ride-Through- und Modell- anforderungen an Elektrolyseanlagen

4-TSO position paper on
Fault-Ride-Through and modelling requirements for electrolyser
facilities

1. Eine gemeinsame 4-ÜNB-Position zu den Anforderungen an Elektrolyseanlagen	3
1.1. Anforderungen für den Netzanschluss von Elektrolyseanlagen	3
1.2 Motivation für ein gemeinsames 4-ÜNB-Papier	3
2. Grundlegende Anforderungen an Elektrolyseanlagen	4
2.1 Fault-ride-through(FRT)-Fähigkeit	4
2.2 Wiederkehr der Wirkleistungsaufnahme nach einem Fehler	6
2.3 Modelle	6
2.4 Nachweis Modelle	7
2.5 Nachweis FRT-Fähigkeit	8
3. Zusammenfassung und Ausblick	9

1. Eine gemeinsame 4-ÜNB-Position zu den Anforderungen an Elektrolyseanlagen

1.1. Anforderungen für den Netzanschluss von Elektrolyseanlagen

Die Ziele der Bundesregierung sehen in den nächsten Jahren einen Ausbau von Elektrolyseanlagen in der Größenordnung von mehreren hundert Megawatt bis hin zu einigen Gigawatt an Bezugsleistung vor. Nach dem Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung sollen heimische Erzeugungspotenziale auf rund 10 GW Elektrolyseurkapazität bis 2030 im Vergleich zur bisherigen Wasserstoffstrategie verdoppelt werden. Zudem nehmen die Übertragungsnetzbetreiber im Entwurf des Szenariorahmen des NEP(2023) eine Leistung zwischen 16 und 20 GW im Jahr 2037 bzw. von 36 bis 40 GW im Jahr 2045 an. Die Bundesnetzagentur geht in allen Szenarien von einer höheren Leistung aus.

Diese beispiellose Größenordnungen an Zubau einer neuen Technologie in sehr kurzer Zeit wird voraussehbar hauptsächlich an einzelnen Netzknoten geschehen und kann zu Herausforderungen für die Stabilität des Stromnetzes führen. Deshalb sind - anders als bisher - besondere Anforderungen für diese neuartigen und großen Bezugsanlagen erforderlich.

Um einen sicheren Netzbetrieb und einen schnellen Ausbau der Elektrolysekapazitäten zu gewährleisten müssen grundsätzliche Mindestanforderungen für das gesamte deutsche Höchstspannungsnetz gestellt werden. Eine herausragende Rolle kommt dabei der Fault-ride-through(FRT)-Fähigkeit zu. Diese vermeidet eine unzulässige Störungsausweitung nach Netzfehlern, durch einen gesicherten Verbleib und Betrieb der Anlagen am Netz.

1.2 Motivation für ein gemeinsames 4-ÜNB-Papier

Die zukünftigen technischen Herausforderungen an die Stabilität, die Sicherheit und die Verfügbarkeit des Übertragungsnetzes können nur gemeinschaftlich gelöst werden. Daher obliegt zwar die Verantwortung für den stabilen Netzbetrieb in seiner Regelzone jedem einzelnen Übertragungsnetzbetreiber, doch eine gemeinsame Position ist hier grundlegend für eine langfristige Lösung.

Das Ziel dieses Positionspapiers ist es, die Bedeutung von Elektrolyseanlagen für die Stabilität des deutschen und europäischen Verbundnetzes zu berücksichtigen. Dies soll umgesetzt werden indem die FRT-Fähigkeit von Elektrolyseanlagen in der Neuauflage des entsprechenden europäischen Netzkodizes NC DC beschrieben und bereits jetzt auf nationaler Ebene Anforderungen an Elektrolyseanlagen für das deutsche Übertragungsnetz im Rahmen einer kommenden Revision der Technischen Anwendungsregeln (TAR) bzw. in den Netzanschlussbedingungen der ÜNBs (TAB) formuliert werden.

Es ist nicht der Anspruch dieses Positionspapiers, alle aus Sicht der deutschen Übertragungsnetzbetreiber notwendigen Anforderungen hinsichtlich Robustheit, Funktionalitäten, Studien und Modelle lückenlos zu beschreiben. Vielmehr werden in diesem Positionspapier einzelne, wichtige Aspekte zur Fault-Ride-Through-Fähigkeit, zur Wirkleistungswiederkehr nach Fehlerklärung und zur zugehörigen Modellierung der Anlagen adressiert.

Eine gemeinsame Abstimmung aller ÜNB zu den Netzanschlussregeln für Elektrolyseure trägt dazu bei, eine einheitliche und harmonisierte Vorgehensweise bei der Integration von Elektrolyseuren in das Stromnetz zu gewährleisten, die Netzstabilität und -sicherheit zu erhöhen und in einen zukunftsfähigen Betrieb zu ermöglichen.

Hierbei sei auch auf die Weiterentwicklungen der Technische Anschlussregeln des FNN hingewiesen, die Anforderungen für regelbare Bezugsanlagen dort etabliert. Im Hinblick darauf sind die ÜNB bereit die Anforderungen gemäß dem Vermögen der technischen Anlagen stetig weiterzuentwickeln und an die weiteren Anforderung und technischen Gegebenheiten, sowie Netzsituationen und

Erfahrungswerten anzupassen.

2. Grundlegende Anforderungen an Elektrolyseanlagen

Im Folgenden werden diejenigen Eigenschaften der Elektrolyseanlagen aufgeführt und weitergehend definiert, die aus Sicht der vier deutschen ÜNB zeitnah und mit hoher Priorität umgesetzt werden müssen. Begriffe und Formelzeichen nehmen Bezug auf die VDE-AR-N 4130.

2.1 Fault-ride-through(FRT)-Fähigkeit

Ziel der FRT-Fähigkeit¹ ist es, bei kurzzeitigen Spannungseinbrüchen oder -erhöhungen eine ungewollte Abschaltung von Elektrolyseanlagen und damit eine Gefährdung der Netzstabilität zu verhindern.

ANMERKUNG 1 Ereignisse, die zu kurzzeitigen Spannungseinbrüchen oder -erhöhungen führen, sind typischerweise Netzfehler (Kurzschlüsse), können aber auch andere Ursachen haben. Zur besseren Lesbarkeit wird im Folgenden der Begriff Netzfehler verwendet.

Elektrolyseanlagen müssen eine FRT-Fähigkeit aufweisen. Dies bedeutet, dass Elektrolyseanlagen in der Lage sein müssen, alle folgenden Grundanforderungen zu erfüllen. Diese Grundanforderungen gelten sowohl für symmetrische als auch für unsymmetrische Fehler im Netz:

- Sie dürfen sich bei Netzfehlern in den in Abbildung 1 und 2 dargestellten Grenzen nicht vom Netz trennen. Bezugspunkt ist der Netzanschlusspunkt.
- Elektrolyseanlagen müssen in der Lage sein, eine beliebige Folge von Netzfehlern nacheinander zu durchfahren.
- Wenn zum Durchfahren der Netzfehler eine Energieaufnahme aus den angeschlossenen Netzen durch die Elektrolyseanlagen erforderlich ist, kann in begründeten Fällen die Folge der zu durchfahrenden Netzfehler eingeschränkt werden. In diesem Fall darf eine Einschränkung jedoch nicht erfolgen, solange die gesamte kumulierte Energie, die in den vorangegangenen 30 min aufgrund von Netzfehlern während der Netzfehler nicht aus dem Netz aufgenommen werden konnte, kleiner als das Äquivalent einer elektrischen Energie der vereinbarten Anschlusswirkleistung $P_{AV} \cdot 2 \text{ s}$ ist.

Die FRT-Kurven nach Abbildung 1 und 2 gelten nicht für einpolige Fehler (Erdkurzschluss) im Netz. Elektrolyseanlagen dürfen sich bei einpoligen Fehlern (Erdkurzschluss) im Netz, die vom Netzschutz geklärt werden, konstruktionsbedingt nicht vom Netz trennen.

ANMERKUNG 2 Einpolige Netzfehler sind in der Regel für die Stabilität von Elektrolyseanlagen nicht kritisch und werden daher hier nicht betrachtet.

ANMERKUNG 3 Die FRT-Grenzkurven beschreiben die Grundanforderungen an das Verbleiben der Elektrolyseanlagen am Netz. Sie sind nicht dafür konzipiert, einen Unterspannungsschutz zu parametrieren.

Nach Fehlerklärung kommt es aufgrund der dynamischen Wechselwirkungen zwischen Elektrolyseanlagen und Netz zu einem über die Fehlerdauer hinaus andauernden Ausgleichsvorgang in der Spannung (Netzanschlusspunkt wie auch Eigenbedarfsspannung). Über- und Unterspannungseignis treten dabei zeitlich unabhängig voneinander auf, können aber dieselbe Ursache haben. Dies muss bei der Auslegung der Elektrolyseur-Stromrichterstationen berücksichtigt werden.

Die vorgehend beschriebenen Grundanforderungen müssen nicht erfüllt werden, wenn eine auftretende kurzzeitige Spannungserhöhung ΔU_{NAP} (Differenz der höchsten Leiter-Leiter Spannung am Netzanschlusspunkt zu deren 1-Minuten-Mittelwert U_{1min} bei Fehlerbeginn bezogen auf die Netznominalspannung) die Grenzkurve nach Abbildung 1 überschreitet. Dabei entspricht P_{ref} 400 kV für Anschlüsse am 380-kV-Netz und 220 kV für Anschlüsse am 220-kV-Netz.

¹ FRT steht für fault-ride-through und kann nach einer Robustheit gegenüber temporären Spannungserhöhungen (HVRT) und Absenkungen (LVRT) differenziert werden.

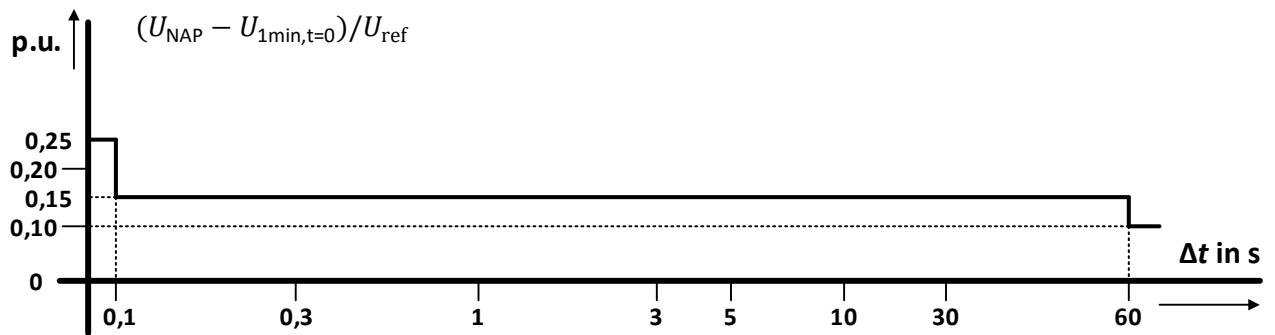


Abbildung 1 – Grenzkurve für relative Spannungserhöhungen

Solange alle Leiter-Leiter-Spannungen am Netzanschlusspunkt innerhalb der in Abbildung 1 und 2 dargestellten Grenzkurven liegen, darf es im gesamten Betriebsbereich nicht zur Instabilität der Elektrolyseanlage und nicht zu einer Trennung vom Netz kommen. Dies gilt, wenn die am Netzanschlusspunkt netzseitig verbleibende minimale Netzkurzschlussleistung S_{KV} nach Fehlerklärung größer ist als der 5-fache Zahlenwert der Summe der Nennwirkleistung der an diesem Netzanschlusspunkt galvanisch verbundenen Anlagen. Bei netzseitig anstehender geringerer Netzkurzschlussleistung S_{KV} ist im Einzelfall in Absprache mit dem Netzbetreiber durch spezielle Stabilitätsberechnungen zu untersuchen und zu begründen, unter welchen Bedingungen ein Elektrolyseur an das Netz angeschlossen werden kann.

Zur Beurteilung der FRT-Grenzkurven bei Spannungseinbruch ist jeweils die kleinste der drei Leiter-Leiter-Spannungen heranzuziehen, bei Spannungserhöhung die größte der drei Leiter-Leiter-Spannungen. Des Weiteren ist vor dem Netzfehler eine quasistationäre Spannung (Spannungsgradient $< 0,05$ pu/min) am Netzanschlusspunkt von 1,0 pu bis 1,1 pu (bzw. 1,0 pu bis 1,118 pu im 220-kV-Netz) anzunehmen.

Die Wirkleistung darf zugunsten einer Blindstromstützung und zur Sicherung der Anlagenstabilität abgesenkt werden, wobei auch während des Fehlers nach Möglichkeit der bisher bezogene Wirkstrom zu beziehen ist (nach Können und Vermögen entsprechend Herstellerangaben).

ANMERKUNG 4 Eine Blindstromstützung während und nach Netzfehlern analog zu VDE-AR-N 4130 Abschnitt 10.2.3.3 ist zulässig und kann die Anlagenstabilität verbessern, wird im Rahmen dieses Positionspapiers aber nicht als Mindestanforderung gefordert.

Für Fehler mit Restspannungen $< 30\%$ U_n am Netzanschlusspunkt bestehen keine Anforderungen an den Strom.

ANMERKUNG 5 Die „Fault-Ride-Through“-Kurven (FRT) sind wie folgt zu interpretieren: Bei $t = 0$ tritt ein Fehler (Kurzschluss) im Netz ein. Die Spannung am Netzanschlusspunkt der Bezugsanlage bricht auf einen Wert U_{NAP} ein. Nach der Fehlerklärungszeit t_F ist der Fehler durch die Schutzeinrichtungen abgeschaltet, die Spannung „springt“ auf einen höheren Wert. Die Grenzkurven in den Abbildungen stellen Einhüllende einer möglichen Kurvenschar dar. Bei einem realen Netzfehler ist zu erwarten, dass sich die Leiter-Leiter-Spannungen gedämpft oszillierend verhalten und in der Regel zwischen den Grenzkurven verbleiben. Der zeitliche Verlauf der Spannung hängt stark vom Netzfehler, der Netztopologie und evtl. elektromechanischen Schwingungen von betroffenen Bezugseinheiten ab, und ist deshalb nicht im Detail vorhersehbar.

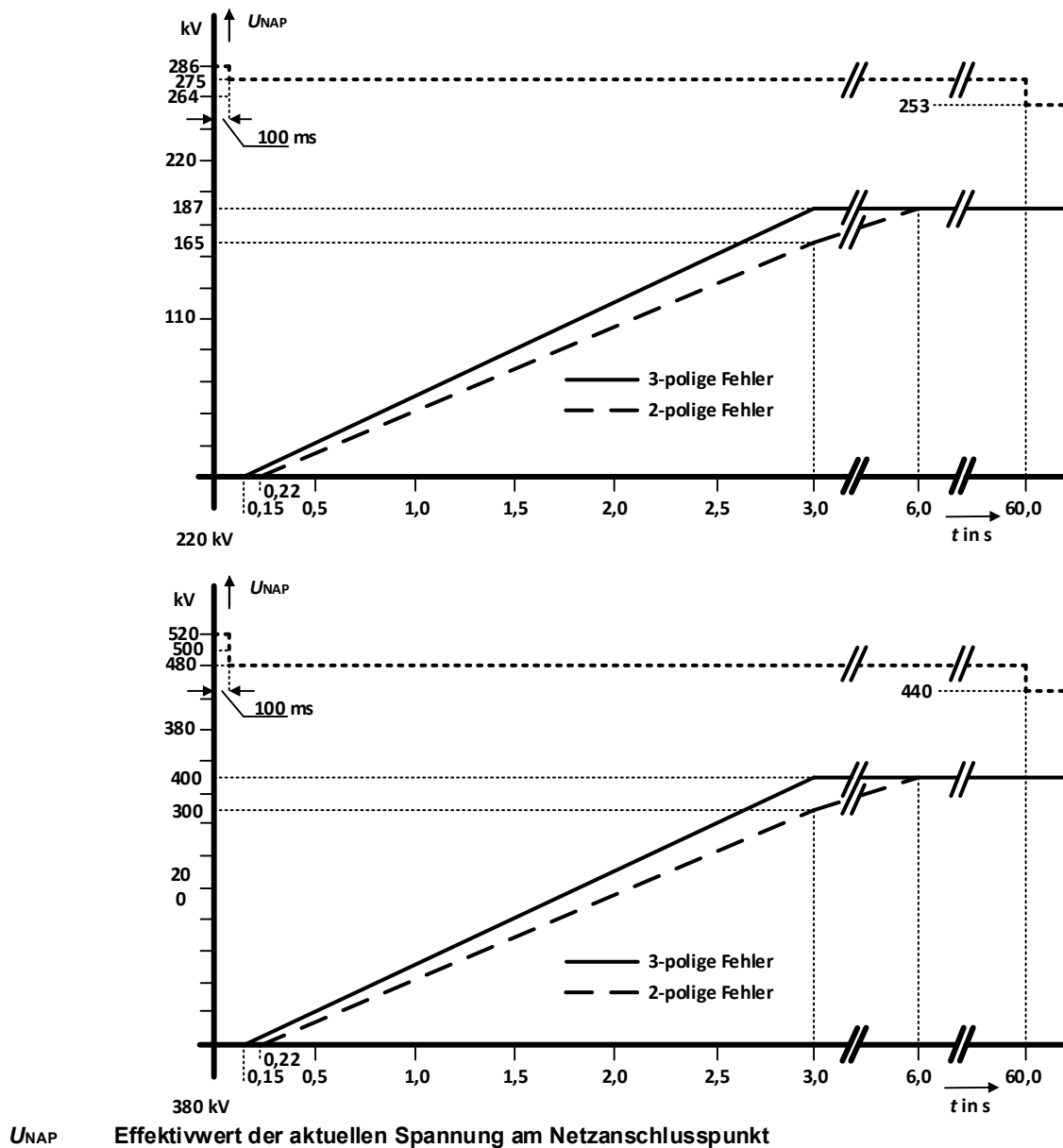


Abbildung 2 – Fault-Ride-Through-Grenzkurve am Netzanschlusspunkt

2.2 Wiederkehr der Wirkleistungsaufnahme nach einem Fehler

Falls sich die Netzspannung nach Fehlerende wieder innerhalb des Spannungsbandes $U_n \pm 10 \% U_n$ befindet und der Wirkstrom der Elektrolyseanlage während des Netzfehlers reduziert wurde, muss der Wirkstrom sofort nach Fehlerende so schnell wie möglich gesteigert werden, bis der Vorfehlerwert des Wirkstromes oder der Wirkleistung erreicht ist.

Die Anschlagzeit darf maximal 1 s betragen. Hierbei kann die Sicherung der Anlagenstabilität weiterhin begrenzend wirken.

2.3 Modelle

Der Netzbetreiber ist berechtigt, Daten für stationäre Netzberechnungen und Modelle für dynamische RMS-Simulationen der Anlage vom Anlagenbetreiber zu verlangen. Für den Nachweis der FRT-

Fähigkeit sind detaillierte Modelle für Konformitätssimulationen und lokale Netzstudien des Übertragungsnetzbetreibers erforderlich („Detailliertes Modell“). Dabei ist das Verhalten der gesamten Anlage am Netzanschlusspunkt nachzubilden. Details muss der Netzbetreiber mit dem Anlagenbetreiber im Rahmen des Netzanschlussprozesses gemeinsam vereinbaren.

Das detaillierte Modell ist als herstellerepezifisches Simulationsmodell („Herstellerepezifisches Modell“), bereitzustellen.

ANMERKUNG 6 Der Zeitpunkt zur Bereitstellung der Daten und Modelle ergibt sich aus dem Anschlussprozess.

Detaillierte Modelle

Die Voraussetzung für eine hinreichend genaue Bewertung der elektrischen Eigenschaften ist ein detailliertes Modell inklusive sämtlicher Komponenten, die einen nennenswerten Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems haben. Das detaillierte Modell muss dabei die erforderliche Genauigkeit aufweisen, so dass ein Nachweis der geforderten Eigenschaften anhand dieses Simulationsmodells am Netzanschlusspunkt möglich ist.

Für die Modelle gelten folgende Mindestanforderungen:

- Das Modell muss geeignet sein, ausgehend von einem beliebigen Arbeitspunkt im quasistationären Betrieb, das Verhalten bei einem Netzfehler und die Rückkehr zum quasistationären Betrieb abzubilden.

Sofern vorhanden sollten validierte Modelle für Bezugseinheiten oder Komponenten verwendet werden. Die zeitliche Schrittweite darf maximal 10 ms betragen. Eine automatische Simulationsschrittweitanpassung auf bis zu 200 ms ist zulässig.

In der Modelldokumentation sind notwendige variable Einstellgrößen des Modells (z. B. FRT- Schwellen, Schutzeinstellungen usw.) zusammen mit den zulässigen Einstellbereichen aufzuführen. Für diese Einstellgrößen des Modells sind zudem die zugehörigen Einstellgrößen in Steuerungs- und Schutzsystemen der Bezugsanlage zu dokumentieren.

Es sind nur die Schutzfunktionen und Systemautomatiken zu implementieren, die für typische Stabilitätsbetrachtungen mit RMS-Modell relevant sind. Die Schutzfunktionen und Systemautomatiken können auch vereinfacht modelliert werden

2.4 Nachweis Modelle

Im Folgenden werden Anforderungen an die Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften Anlagen zur Elektrolyse beschrieben, die im Rahmen des Netzanschlussprozesses verwendet werden.

Das Ziel der Modellierung ist, die elektrischen Eigenschaften der Anlage in einem rechnerlauffähigen Modell ausreichend genau abzubilden.

Funktionsumfang der Modelle

Es sind mindestens die folgenden Funktionen/Eigenschaften der Anlage nachzubilden:

- quasistationärer Betrieb;
- FRT-Fähigkeit;
- Sofern vorhanden dynamische Blindstromstützung;
- Schutzeinrichtungen und -einstellungen.

Mindestanforderungen an Modelle

Für die Modelle der Anlagen gelten folgende Mindestanforderungen:

Modell für die FRT-Fähigkeit:

- Das Modell ist als Effektivwertmodell auszuführen. Sofern hiervon abweichend in begründeten Fällen Electromagnetic Transient (EMT)-Modelle verwendet werden, sind die mit diesen Modellen gewonnenen Berechnungsergebnisse auf Robustheit unter Variation der Randbedin-

- gungen (z. B. Phasenlage zum Fehlereintrittszeitpunkt) zu überprüfen.
- Die Modelle dienen der Simulation von Netzfehlern
 - Um auch unsymmetrische Fehler darstellen zu können, müssen die Modelle das Mit- und Gegensystem sowie – sofern die Nullsysteme von Netz- und Bezugseinheit nicht entkoppelt sind – das Nullsystem abbilden.
 - Die Modelle müssen geeignet sein, ausgehend von einem beliebigen Arbeitspunkt im quasistationären Betrieb, das Verhalten bei einem Netzfehler und die Rückkehr zum quasistationären Betrieb abzubilden.
 - Die Modelle umfassen die Bezugseinheiten in der Regel ohne anlageninterne Transformatoren, aber mit den relevanten Schutzeinrichtungen, sofern diese Teil der Bezugseinheit sind.

Modelle für alle weiteren Funktionen:

- Die Modelle müssen die im Normalbetrieb auftretenden Wirk- und Blindleistungen sowie die Wirk- und Blindleistungen der Bezugseinheiten in ihrem zeitlichen Verhalten so nachbilden, dass die Anforderungen an alle Einstellzeiten und Einstellgenauigkeiten in der rechnerischen Nachbildung dargestellt werden können.
- Die zeitliche Schrittweite darf für dynamische und quasistationäre Vorgänge maximal 10 ms betragen. Eine automatische Schrittweitenanpassung auf bis zu 0,2 s ist zulässig.

Plausibilisierung des Modells

Die Modelle müssen für nicht-vermessene Arbeitspunkte angewandt werden können. Um dies sicherzustellen, müssen Plausibilisierungstests mit dem Modell durchgeführt werden.

Modelldokumentation

In der Modelldokumentation sind variable Einstellgrößen des Modells zusammen mit den zulässigen Einstellbereichen aufzuführen. Für diese Einstellgrößen des Modells sind zudem die zugehörigen Einstellgrößen in der Anlagensteuerung zu dokumentieren. Weiterhin ist die Einbindung und Anwendung des Modells in der genutzten Simulationsumgebung eindeutig zu beschreiben.

2.5 Nachweis FRT-Fähigkeit

Durchführung der Simulationen

Das korrekte Verhalten der Anlage ist rechnerisch für symmetrische und unsymmetrische Spannungseinbrüche bei Absinken der Netzspannung von 100 % U_{ref} auf jeweils einen Wert zwischen 95 % U_{ref} und 90 % U_{ref} , 70 % U_{ref} und 80 % U_{ref} , 45 % U_{ref} und 60 % U_{ref} , 20 % U_{ref} und 30 % U_{ref} sowie für kleiner 5 % für mindestens eine Dauer nach der Grenzlinie aus Abbildung 2 nachzuweisen. Für die unsymmetrischen Fehlerfälle ist jeweils eine Leiter-Leiter-Spannung auf den oben genannten prozentualen Wert zu bringen.

Das Verhalten der Anlage bei symmetrischen Spannungserhöhungen ist durch einen Spannungssprung von 100 % U_{ref} auf 105 % U_{ref} , und von 110 % U_{ref} auf 120 % U_{ref} mit der Dauer von jeweils 5 s rechnerisch nachzuweisen. Für unsymmetrische Fehlerfälle ist der Spannungssprung in einer Leiter-Leiter-Spannung von 100 % U_{ref} auf 110 % U_{ref} mit einer Dauer von 5 s rechnerisch nachzuweisen. Die Toleranz darf bei diesen Spannungssprüngen maximal ± 2 % U_{ref} betragen.

ANMERKUNG 8 Die Angabe der Residualspannung während des Netzfehlers erfolgt in diesem Abschnitt jeweils ohne Berücksichtigung des Kurzschlussstrombeitrags der Erzeugungsanlage (Leerlaufversuch an den Ausgangsklemmen der Prüfeinrichtung).

Es ist auszuweisen unter welchen Annahmen zu den relevanten Einflussgrößen und welchen etwaigen Einschränkungen die Beherrschung eines symmetrischen Spannungssprungs von 105 % U_{ref} auf 120 % U_{ref} für 5 s (für $U_{ref} = 400$ kV) bzw. von 110 % U_{ref} auf 125 % U_{ref} für 5 s (für $U_{ref} = 220$ kV) möglich oder ggf. nicht möglich ist.

Annahmen zu den relevanten Einflussgrößen und welchen etwaigen Einschränkungen eine Einhaltung möglich oder ggf. nicht möglich ist.

Die Berechnungen sind mit einer Blindleistung vor Fehlereintritt von $Q = 0$ sowie mit der vom Netzbetreiber geforderten maximalen Blindleistung der Erzeugungsanlage untererregt und übererregt durch-

zuführen.

Es ist nachzuweisen, dass die Anlage am Netz verbleibt. Eigenschutzeinrichtungen der Anlage dürfen nicht durch den erhöhten Blindstrombeitrag und die damit verbundene Spannungserhöhung auslösen.

Das Verhalten der Erzeugungsanlage nach Fehlerende hinsichtlich des Verbleibens der Anlage am Netz ist bei einer Netzspannung im Spannungsband $\pm 15 \% U_n$ über 60 s auszuweisen und zu bewerten. Der Nachweis der Steigerung des Wirkstromes der Anlage nach Fehlerende ist zu erbringen.

Die Spannungsverhältnisse sollen innerhalb der Anlage eine ausreichend große Spannungsdifferenz zu den Kriterien des Fehlerbeginns (Spannungen $> 1,1$ UMS bzw. $< 0,9$ UMS) aufweisen. Ist das nicht der Fall, sind die Grenzen in Abstimmung mit dem Netzbetreiber zu verschieben.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Papier zu den Anforderungen an Elektrolyseanlagen wurde aufgrund des zukünftigen schnellen Ausbaus zahlreicher Elektrolyseanlagen und deren Bedeutung für den sicheren Netzbetrieb gemeinschaftlich von den vier deutschen Übertragungsnetzbetreibern erarbeitet.

Die Übertragungsnetzbetreiber sind daran interessiert die beschriebenen FRT-Anforderungen entsprechend der technologischen Fähigkeiten von Elektrolyseanlagen weiterzuentwickeln. Dazu können z.B. gehören:

- Die maximale nichtbezogene Energiemenge bei aufeinanderfolgenden Netzfehlern,
- Die maximale Tiefe und Dauer temporärer Spannungseinbrüche und
- Die Geschwindigkeit der Wirkstromwiderkehr nach Fehlerende.

Darüber hinaus sind weitere Mindestanforderungen in Diskussion, die zeitlich nachgelagert zu entwickeln sind.

Vor dem Hintergrund eines dringenden Handlungsbedarfs bezüglich der Fähigkeit Netzfehler zu Durchfahren (FRT-Fähigkeit), soll dieser Hinweis eine transparente Anwendung in aktuellen Netzanschlussprojekten ermöglichen. Unabhängig davon kann im bilateralen Austausch mit dem ÜNB die Bereitstellung weiterer Systemdienstleistung, nicht-frequenzgebundene-Systemdienstleistungen und der reguläre Einsatz in Redispatchprozessen vereinbart werden.

Die Erfahrung aus diesen Netzanschlussprojekten sollte aus Sicht der Übertragungsnetzbetreiber in die Weiterentwicklung der nationalen Regelwerke des VDE FNN (vorrangig VDE-AR-N 4130) einfließen.