

DIN EN 61400-27-2
(VDE 0127-27-2)
DIN

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 27.180

Einsprüche bis 2017-07-05

Entwurf
Windenergieanlagen –
Teil 27-2: Elektrische Simulationsmodelle –
Validierung der Modelle
(IEC 88/604/CD:2016)

Wind energy generation systems –
 Part 27-2: Electrical simulation models –
 Model validation
 (IEC 88/604/CD:2016)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-05-05 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 91 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

	Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....		6
Einleitung		7
1 Anwendungsbereich		8
2 Normative Verweisungen		8
3 Begriffe, Abkürzungen und Indizes		9
3.1 Begriffe		9
3.2 Abkürzungen und Indizes		13
3.2.1 Abkürzungen		13
3.2.2 Indizes		13
4 Symbole und Einheiten.....		13
4.1 Allgemeines		13
4.2 Symbole (Einheiten)		13
5 Funktionale Spezifikationen und Anforderungen an das Validierungsverfahren		15
5.1 Allgemeines		15
5.2 Allgemeine Spezifikationen		15
5.3 Validierung der Modelle von Windenergieanlagen.....		16
5.4 Validierung der Modelle von Windkraftwerken		17
6 Allgemeine Methodik der Modellvalidierung.....		17
6.1 Allgemeines		17
6.2 Prüfergebnisse		17
6.3 Simulationen		17
6.4 Signalverarbeitung.....		18
6.4.1 Berechnung von Fehlerzeitreihen		18
6.4.2 Fehlerstatistik der Zeitfenster		19
6.4.3 Spezifikation des Spannungseinbruchfensters		20
6.4.4 Kennlinie der Sprungantwort		22
7 Validierung der Modelle von Windenergieanlagen.....		23
7.1 Allgemeines		23
7.2 Verhalten bei einem Spannungseinbruch		23
7.2.1 Allgemeines		23
7.2.2 Prüfanforderungen		24
7.2.3 Anforderungen an die Simulation		24
7.2.4 Validierungsergebnisse		25
7.3 Wirkleistungsregelung		25
7.3.1 Allgemeines		25

7.3.2	Prüfanforderungen	25
7.3.3	Anforderungen an die Simulation.....	26
7.3.4	Validierungsergebnisse	26
7.4	Blindleistungsregelung	26
7.4.1	Allgemeines.....	26
7.4.2	Prüfanforderungen	27
7.4.3	Anforderungen an die Simulation.....	27
7.4.4	Validierungsergebnisse	27
7.5	Spannungsregelung	27
7.5.1	Allgemeines.....	27
7.5.2	Prüfanforderungen	28
7.5.3	Anforderungen an die Simulation.....	28
7.5.4	Validierungsergebnisse	28
8	Validierung der Modelle von Windkraftwerken.....	28
8.1	Allgemeines.....	28
8.2	Verhalten bei einem Spannungseinbruch	29
8.2.1	Allgemeines.....	29
8.2.2	Prüfanforderungen	29
8.2.3	Anforderungen an die Simulation.....	30
8.2.4	Validierungsergebnisse	30
8.3	Wirkleistungsregelung.....	30
8.3.1	Allgemeines.....	30
8.3.2	Prüfanforderungen	30
8.3.3	Anforderungen an die Simulation.....	31
8.3.4	Validierungsergebnisse	31
8.4	Frequenzregelung	31
8.4.1	Allgemeines.....	31
8.4.2	Prüfanforderungen	31
8.4.3	Anforderungen an die Simulation.....	32
8.4.4	Validierungsergebnisse	32
8.5	Blindleistungsregelung	32
8.5.1	Allgemeines.....	32
8.5.2	Prüfanforderungen	32
8.5.3	Anforderungen an die Simulation.....	33
8.5.4	Validierungsergebnisse	33
8.6	Leistungsfaktorregelung.....	33
8.6.1	Allgemeines.....	33
8.6.2	Prüfanforderungen	33
8.6.3	Anforderungen an die Simulation.....	34

	Seite
8.6.4 Validierungsergebnisse	34
8.7 Spannungsregelung	34
8.7.1 Allgemeines	34
8.7.2 Prüfanforderungen	34
8.7.3 Anforderungen an die Simulation	35
8.7.4 Validierungsergebnisse	35
Anhang A (informativ) Dokumentation der Validierungsprüfung von WEA-Modellen	36
A.1 Allgemeines	36
A.2 Informationen zum Simulationsmodell und zur Durchführung der Validierung	36
A.3 Vorlage für die Ergebnisse der Validierungsprüfung	37
A.3.1 Allgemeines	37
A.3.2 Spannungseinbrüche	37
A.3.3 Referenzpunktänderungen	37
A.3.4 Netzschutz	38
Anhang B (informativ) Dokumentation der Validierungsprüfung von WKW-Modellen	39
B.1 Allgemeines	39
B.2 Informationen zum Simulationsmodell und zur Durchführung der Validierung	39
B.3 Vorlage für die Ergebnisse der Validierungsprüfung	40
B.3.1 Allgemeines	40
B.3.2 Spannungseinbrüche	40
B.3.3 Referenzpunktänderungen	40
Anhang C (informativ) Referenznetz für die Validierung anhand eines anderen Modells	41
Anhang D (informativ) Unsicherheit der Modellvalidierung	42
D.1 Allgemeines	42
D.2 Unsicherheiten der Simulation	42
D.3 Messunsicherheiten	42
D.4 Einfluss der Unsicherheiten der Modellvalidierung	43
Anhang E (normativ) Kritisch gedämpftes Digital-Tiefpassfilter zweiter Ordnung	44
Literaturhinweise	45
Bilder	
Bild 1 – Einteilung der Netzstabilität nach IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions	7
Bild 2 – Signalverarbeitungsstruktur für das „Rückkopplungs“-Verfahren	18
Bild 3 – Signalverarbeitungsstruktur für das Verfahren der „Simulation des gesamten Netzes“	19
Bild 4 – Fenster eines Spannungseinbruchs	21
Bild 5 – Kennlinie der Sprungantwort	22
Bild 6 – Gemessene und simulierte Einschwingzeit mit einer unzureichenden Auswahl des Grenzbereichs	23
Bild C.1 – WECC-Prüfsystem	41

Tabellen

Tabelle 1 – Für Fehlerberechnungen benutzte Fenster	22
Tabelle A.1 – Erforderliche Informationen über das Simulationsmodell und die Durchführung der Validierung	36
Tabelle A.2 – Weitere Informationen, die erforderlich sind, wenn eine Simulation des gesamten Netzes durchgeführt wird	36
Tabelle A.3 – Zusammenfassung der Validierung von Spannungseinbrüchen	37
Tabelle A.4 – Zusammenfassung der Validierung von Referenzpunktänderungen.....	38
Tabelle A.5 – Zusammenfassung der Validierung des Netzschutzes.....	38
Tabelle B.1 – Erforderliche Informationen über das Simulationsmodell und die Durchführung der Validierung	39
Tabelle B.2 – Weitere Informationen, die erforderlich sind, wenn eine Simulation des gesamten Netzes durchgeführt wird	39
Tabelle B.3 – Zusammenfassung der Validierung von Referenzpunktänderungen.....	40
Tabelle C.1 – Leitungsdaten für das WECC-Prüfsystem	41
Tabelle C.2 – Transformatordaten für das WECC-Prüfsystem	41

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 88/604/CD:2016 „Wind energy generation systems – Part 27-2: Electrical simulation models – Model validation“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine autorisierte deutsche Übersetzung.

Das internationale Dokument wurde vom T 88 „Wind turbine systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 383 „Windenergieanlagen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Windenergieanlagen – Teil 27-2: Elektrische Simulationsmodelle – Validierung der Modelle

Einleitung

Die Norm IEC 61400-27-2 legt Validierungsverfahren für elektrische Simulationsmodelle von Windenergieanlagen und Windkraftwerken fest.

Die zunehmende Durchdringung von Windenergie in Stromversorgungsnetze bringt mit sich, dass Übertragungsnetzbetreiber (en: Transmission System Operators, TSOs) und Verteilungsnetzbetreiber (en: Distribution System Operators, DSOs) dynamische Modelle der Erzeugung von Windenergie für Untersuchungen der Netzstabilität anwenden müssen. Die von den Herstellern von Windenergieanlagen entwickelten Modelle geben das Verhalten ihrer Anlagen mit einer großen Detailgenauigkeit wieder. Diese Detailgenauigkeit ist für Stabilitätsuntersuchungen großer Stromversorgungsnetze mit einer großen Anzahl von Windkraftwerken aus folgenden Gründen nicht geeignet: erstens, weil die große Detailgenauigkeit die Komplexität und damit die Simulationszeit des Computers immens erhöht, und zweitens, weil die Anwendung der detaillierten herstelleraufspezifischen Modelle eine erhebliche Menge an Eingabedaten erfordert, um die einzelnen Typen von Windenergieanlagen darzustellen.

Der Zweck der vorliegenden Norm ist die Festlegung generischer dynamischer Modelle, die zur Untersuchung der Netzstabilität angewendet werden können. Die IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions hat die Stabilität von Stromversorgungsnetzen in Kategorien nach Bild 1 eingeteilt.

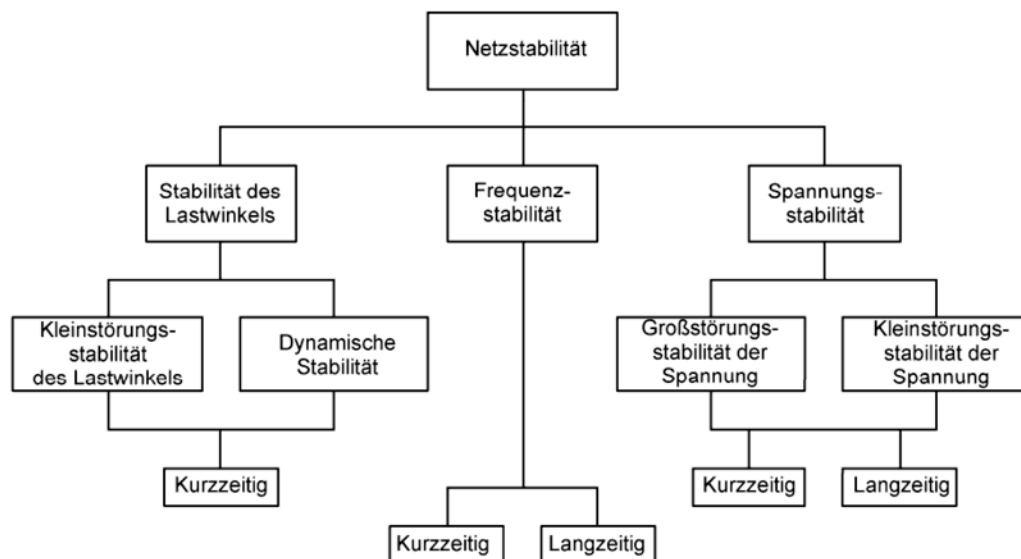


Bild 1 – Einteilung der Netzstabilität nach IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions

Unter Bezugnahme auf diese Kategorien werden die Modelle entwickelt, um die Erzeugung von Windenergie in Untersuchungen der kurzzeitigen Großstörungsstabilität der Spannung darzustellen, sie können aber auch für Untersuchungen anderer kurzzeitiger dynamischer Erscheinungen wie die Stabilität des Lastwinkels, die Frequenzstabilität und die Kleinstörungsstabilität der Spannung angewendet werden. Damit sind die Modelle für dynamische Simulationen von Ereignissen in Stromversorgungsnetzen wie Kurzschlüssen (Netzstützung bei Spannungseinbruch), Erzeugungsausfall oder Lastwegfall und Netzauftrennung eines synchronen Bereichs in mehrere synchrone Bereiche anwendbar, wie im Anwendungsbereich angegeben.

Das in dieser Norm festgelegte Validierungsverfahren wird für die in IEC 61400-27-1 angegebenen generischen Modelle und andere Grundfrequenzmodelle von Windkraftwerken und Windenergieanlagen angewendet. Das Validierungsverfahren unterliegt den folgenden Einschränkungen:

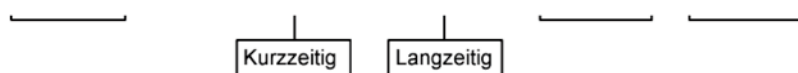


Bild 1 – Einteilung der Netzstabilität nach IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions

Unter Bezugnahme auf diese Kategorien werden die Modelle entwickelt, um die Erzeugung von Windenergie in Untersuchungen der kurzzeitigen Großstörungsstabilität der Spannung darzustellen, sie können aber auch für Untersuchungen anderer kurzzeitiger dynamischer Erscheinungen wie die Stabilität des Lastwinkels, die Frequenzstabilität und die Kleinstörungsstabilität der Spannung angewendet werden. Damit sind die Modelle für dynamische Simulationen von Ereignissen in Stromversorgungsnetzen wie Kurzschlüssen (Netzstützung bei Spannungseinbruch), Erzeugungsausfall oder Lastwegfall und Netzauftrennung eines synchronen Bereichs in mehrere synchrone Bereiche anwendbar, wie im Anwendungsbereich angegeben.

Das in dieser Norm festgelegte Validierungsverfahren wird für die in [IEC 61400-27-1](#) angegebenen generischen Modelle und andere Grundfrequenzmodelle von Windkraftwerken und Windenergieanlagen angewendet. Das Validierungsverfahren unterliegt den folgenden Einschränkungen:

- Entwickler moderner Software für Simulationswerkzeuge für Stromversorgungsnetze, die die Norm zur Implementierung von normierten Modellen der Windenergie als Teil der Softwarebibliothek nutzen werden;
- Zertifizierungsstellen für eine unabhängige Validierung von Modellen von Windenergieanlagen;
- Ausbildungseinrichtungen und Forschungsgemeinschaften, die auch einen Nutzen aus generischen Modellen ziehen können, da herstellereinspezifische Modelle in der Regel vertraulich sind.

1 Anwendungsbereich

IEC 61400-27-2 legt Verfahren für die Validierung elektrischer Simulationsmodelle von Windenergieanlagen und Windkraftwerken fest, die für Untersuchungen von Stromversorgungsnetzen und der Netzstabilität vorgesehen sind. Die Validierungsverfahren beruhen auf den in [IEC 61400-21](#) festgelegten Prüfungen. Sie gelten für die in [IEC 61400-27-1](#) festgelegten generischen Modelle und für herstellereinspezifische Modelle.

Die Validierungsverfahren für Modelle von Windenergieanlagen basieren auf Prüfungen des Verhaltens bei Spannungseinbrüchen und Referenzpunktänderungen und auf Prüfungen des Netzschutzes. Diese Validierungsverfahren beziehen sich auf die Anschlussklemmen der Windenergieanlage.

Die Validierungsverfahren für Modelle von Windkraftwerken basieren auf Prüfungen des Verhaltens bei Referenzpunktänderungen. Diese Validierungsverfahren beziehen sich auf den Verbindungspunkt des Windkraftwerks.

Die in IEC 61400-27 festgelegten Validierungsverfahren beruhen auf einem Vergleich der Prüfergebnisse mit Simulationen, sie sind aber nicht vom ausgewählten Softwaresimulationswerkzeug abhängig.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene

¹⁾ [Abschnitt 6](#) legt eine große Anzahl von Messwerten für die Genauigkeit des Modells fest. Die Bedeutung der einzelnen Messwerte hängt vom Typ des Netzes und vom Typ der Stabilitätsuntersuchung ab. [Anhang B](#) beschreibt Grenzen für die mögliche Genauigkeit der Modelle.

Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050, *International Electrotechnical Vocabulary*

IEC 61400-21, *Wind turbines – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines*

IEC 61400-27-1, *Wind turbines – Part 27-1: Electrical simulation models – Generic models*

3 Begriffe, Abkürzungen und Indizes

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-415 und die folgenden Begriffe.

3.1.1

verfügbare Leistung

größtmögliche Leistung unter Berücksichtigung von Windgeschwindigkeit, Bemessungsleistung, Grenzen der Rotordrehzahl und Begrenzungen des Blatteinstellwinkels

3.1.2

äquivalentes Netzmodell

Ersatzmodell des Netzes, das gewöhnlich als Thevenin-Äquivalent mit einem Widerstand und einer Reaktanz hinter einer Konstantspannungsquelle angegeben wird

3.1.3

generisches Modell

Modell, das durch Änderung der Modellparameter so angepasst werden kann, dass verschiedene Windenergieanlagen oder Windkraftwerke nachgebildet werden können

3.1.4

Integrationszeitschritt

Simulationszeitintervall zwischen zwei aufeinander folgenden numerischen Lösungen der Differentialgleichungen eines Modells

3.1.5

Gegenkomponente (eines Dreiphasensystems)

diejenige der drei symmetrischen Komponenten, die nur in einem unsymmetrischen Dreiphasensystem sinusförmiger Größen vorhanden ist und durch die folgende komplexe mathematische Beziehung definiert ist:

$$\underline{X}_2 = \frac{1}{3} (\underline{X}_{L1} + \underline{a}^2 \underline{X}_{L2} + \underline{a} \underline{X}_{L3})$$

dabei sind $\underline{a}$ der 120-Grad-Operator und $\underline{X}_{L1}$, $\underline{X}_{L2}$ sowie $\underline{X}_{L3}$ die komplexen Ausdrücke der betreffenden Phasengröße, wobei $\underline{X}$ den Phasenvektor der Stromstärke oder der Spannung darstellt

Anmerkung 1 zum Begriff: Spannungs- oder Stromkomponenten des Gegensystems sind nur dann erheblich, wenn die Spannungen bzw. Ströme unsymmetrisch sind. Wenn z. B. die Phasenvektoren der Phasenspannung $\underline{U}_{L1} = U e^{j\theta}$, $\underline{U}_{L2} = U e^{j(\theta+4\pi/3)}$ und $\underline{U}_{L3} = U e^{j(\theta+2\pi/3)}$ symmetrisch sind, dann ist $\underline{U}_2 = (U e^{j\theta} + e^{j4\pi/3} U e^{j(\theta+4\pi/3)} + e^{j2\pi/3} U e^{j(\theta+2\pi/3)})/3 = U e^{j\theta} (1 + e^{j2\pi/3} + e^{j4\pi/3})/3 = 0$.

[QUELLE: IEC 60050-448:1995, 448-11-28, modifiziert (Ergänzung von Anmerkung 1 zum Begriff)]

3.1.6

Nennwirkleistung

Nennwert der Wirkleistung der Windenergieanlage, die vom Hersteller anzugeben ist und als bezogener Nennwert für alle Leistungen (Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung) angewendet wird

3.1.7

Nennstrom

Nennwert I_n des Stroms der Windenergieanlage, der aus der Nennwirkleistung P_n und der Nennspannung U_n

berechnet wird nach $I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n}$

3.1.8

Nennfrequenz

Nennwert der Frequenz der Windenergieanlage, die vom Hersteller anzugeben ist

3.1.9

Nennspannung

Nennwert der Spannung der Windenergieanlage, die vom Hersteller anzugeben ist

3.1.10

Zeiger

Effektivwertzeiger

für eine sinusförmige Größe $a(t) = \hat{A} \cos(\omega t + \nu_0)$ der komplexe Wert $\underline{A} = A e^{j\nu_0}$ mit $A = \frac{\hat{A}}{\sqrt{2}}$, dabei ist j die imaginäre Einheit, $\hat{A}$ die komplexe Amplitude, ω die Kreisfrequenz und ν_0 der Nullphasenwinkel

[QUELLE: IEC 60050-103:2009, 103-07-14]

3.1.11

Verbindungspunkt

Bezugspunkt im Elektrizitätsversorgungssystem, an dem die elektrische Anlage des Nutzers angeschlossen ist

[QUELLE: IEC 60050-617:2009, 617-04-01]

3.1.12

Mitkomponente (eines Dreiphasensystems)

diejenige der drei symmetrischen Komponenten, die nur in symmetrischen und unsymmetrischen Dreiphasensystem sinusförmiger Größen vorhanden ist und durch die folgende komplexe mathematische Beziehung definiert ist:

$$\underline{X}_1 = \frac{1}{3} (\underline{X}_{L1} + \underline{a} \underline{X}_{L2} + \underline{a}^2 \underline{X}_{L3})$$

dabei ist $\underline{a}$ der 120-Grad-Operator und $\underline{X}_{L1}$, $\underline{X}_{L2}$ sowie $\underline{X}_{L3}$ sind die komplexen Ausdrücke der betreffenden Phasengröße, wobei $\underline{X}$ den Phasenvektor der Stromstärke oder der Spannung darstellt

[QUELLE: IEC 60050-448:1995, 448-11-27]

3.1.13

Netzstabilität

Fähigkeit eines Netzes, nach einer Zustandsänderung, z. B. einer Leistungs- oder Impedanzänderung, wieder einen stationären, durch Synchronismus der Generatoren gekennzeichneten Betriebszustand zu erreichen

Anmerkung 1 zum Begriff: IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions: Netzstabilität ist die Fähigkeit eines Stromversorgungsnetzes, bei einer gegebenen Anfangsbetriebsbedingung nach einer physikalischen Störung wieder einen Gleichgewichtszustand des Betriebs zu erreichen, wobei die meisten Systemvariablen so begrenzt werden, dass praktisch das ganze System unbeschädigt bleibt.

[QUELLE: IEC 60050-603:1986, 603-03-01]

3.1.14

quasi-stationärer Zustand eines Netzes

kurzzeitiger stationärer Zustand, z. B. während eines Spannungseinbruchs, mit einer ausreichend langen Dauer, während der die Netzvariablen als nahezu konstant betrachtet werden können

3.1.15

Reaktionszeit

vergangene Zeit von der Ausgabe eines Sprungbefehls bis der beobachtete Wert 10 % des Sprungs erreicht

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Reaktionszeit ist in [Bild 5](#) dargestellt.

3.1.16

Führungsgröße

aus der Zielgröße abgeleitete, den Sollwert der Regelgröße festlegende Eingangsgröße eines Vergleichsgliedes einer Regeleinrichtung

[QUELLE: IEC 60050-351:2006, 351-27-02]

3.1.17

Ansprechzeit

vergangene Zeit von der Ausgabe eines Sprungbefehls bis der beobachtete Wert das erste Mal den vordefinierten Grenzabweichungsbereich des Zielwerts erreicht

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Ansprechzeit ist in [Bild 5](#) dargestellt.

3.1.18

Einschwingzeit

vergangene Zeit von der Ausgabe eines Sprungbefehls bis der beobachtete Wert dauerhaft im vordefinierten Grenzabweichungsbereich des Zielwerts bleibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einschwingzeit ist in [Bild 5](#) dargestellt.

3.1.19

Kurzschlussleistung

Produkt Kurzschlussstrom an einer Stelle des Netzes mal eine Nennspannung, im Allgemeinen die Betriebsspannung

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei Anwendung der physikalischen Einheiten für den Netzstrom (A) und die Nennspannung (V) sollte das Produkt außerdem mit dem Faktor $\sqrt{3}$ multipliziert werden.

[QUELLE: IEC 60050-601:1985, 601-01-14]

3.1.20

Kurzschlussimpedanz

Wert Z_k , der aus der Kurzschlussleistung S_k und der Nennspannung U_n wie folgt berechnet werden muss:

$$Z_k = \frac{U_n^2}{S_k}$$

3.1.21

stationärer Zustand eines Netzes

Betriebszustand eines Netzes, in dem die Netzvariablen als nahezu konstant betrachtet werden können

[QUELLE: IEC 60050-603:1986, 603-02-06]

3.1.22

Netzvariable

mit dem Betriebszustand veränderliche Größen eines Netzes

Beispiele: Spannungen, Ströme, Leistungen, elektrische Ladungen, magnetische Flüsse

[QUELLE: IEC 60050-603:1986, 603-02-02]

3.1.23

Übergangsperiode

Zeiträume mit gemessenen elektromagnetischen Übergangsvorgängen, die nicht in die Grundfrequenzmodelle aufgenommen werden

3.1.24

Spannungseinbruch

plötzliches Absinken der Spannung mit Spannungswiederkehr nach kurzer Dauer (im Bereich zwischen einigen Perioden bis einigen Sekunden)

[QUELLE: IEC 60050-604:1987, 604-01-25]

3.1.25

Windkraftwerk

Kraftwerk, das aus einer oder mehreren Windenergieanlage(n), Hilfseinrichtungen und dem Betriebssystem der Anlage besteht

3.1.26

Windturbine

drehende Maschine, mit deren Hilfe die kinetische Energie des Windes in eine andere Energieform umgewandelt wird

[Quelle: IEC 60050-415:1999, 1987, 415-01-01]

3.1.27

Anschlussklemmen der Windenergieanlage

Punkt, der Bestandteil der Windenergieanlage ist und vom Zulieferer der Windenergieanlage gekennzeichnet wird, an dem die Windenergieanlage mit dem elektrischen Kraftwerksnetz verbunden wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Mit der gleichen Definition wird in IEC 61400-21 der Messpunkt für die Prüfungen definiert.

3.1.28

Nullkomponente (eines Dreiphasensystems)

diejenige der drei symmetrischen Komponenten, die nur in einem unsymmetrischen Dreiphasensystem sinusförmiger Größen vorhanden ist und durch die folgende komplexe mathematische Beziehung definiert ist:

$$\underline{X}_1 = \frac{1}{3}(\underline{X}_{L1} + \underline{X}_{L2} + \underline{X}_{L3})$$

dabei sind $\underline{X}_{L1}$, $\underline{X}_{L2}$ und $\underline{X}_{L3}$ die komplexen Ausdrücke der betreffenden Phasengröße, wobei $\underline{X}$ den Phasenvektor der Stromstärke oder der Spannung darstellt

[QUELLE: IEC 60050-448:1995, 448-11-29]

3.2 Abkürzungen und Indizes

3.2.1 Abkürzungen

In der vorliegenden Norm werden die folgenden Abkürzungen benutzt:

CIGRE	Internationales Gremium für große elektrische Netze
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
WKW	Windkraftwerk
WEA	Windenergieanlage
WTT	Anschlussklemmen einer Windenergieanlage

3.2.2 Indizes

base	bezogener Nennwert
E	Fehler zwischen Simulation und Messung
MAE	mittlerer absoluter Fehler zwischen Simulation und Messung
max	größter Wert
ME	mittlerer Fehler zwischen Simulation und Messung
mea	gemessener Wert
MXE	größter Fehler zwischen Simulation und Messung
n	Nennwert
u	Spannung
WTref	Referenzwert der Windenergieanlage
sim	simulierter Wert
WT	Größe an den Anschlussklemmen einer Windenergieanlage

4 Symbole und Einheiten

4.1 Allgemeines

Wenn es nicht anders festgelegt ist, sind die Spannungs- und Stromwerte in der vorliegenden Norm Mitkomponenten der Grundschwingung.

Bei Größen mit physikalischen Einheiten sind die Einheiten in Klammern angegeben. Für bezogene Größen sind die bezogenen Nennwerte in Klammern angegeben.

4.2 Symbole (Einheiten)

f_n	Netznennfrequenz (50 Hz oder 60 Hz)
-------	-------------------------------------

f_{sys}	globale Netzfrequenz (f_n)
f_{WT}	Netzfrequenz an den WEA-Anschlussklemmen (f_n)
I_n	Nennstrom an den WEA-Anschlussklemmen (A)
$\underline{i}_{\text{WT}}$	Stromzeiger an den WEA-Anschlussklemmen in den Netzkoordinaten (I_n)
i_{WTmea}	gemessener und signalverarbeiteter Strom an den WEA-Anschlussklemmen (I_n)
i_{WTraw}	nach IEC 61400-21 gemessener Rohstrom an den WEA-Anschlussklemmen (I_n)
i_{WTsim}	simulierter und signalverarbeiteter Strom an den WEA-Anschlussklemmen (I_n)
P_n	Nennwirkleistung der WEA (W)
p_{WT}	Wirkleistung an den WEA-Anschlussklemmen (Vorzeichenregel der Erzeugung) (P_n)
p_{WTref}	Referenzwert der Wirkleistung an den WEA-Anschlussklemmen (P_n)
q_{WT}	Blindleistung an den WEA-Anschlussklemmen (kapazitive Vorzeichenregel) (P_n)
T_{com}	allgemeine Abtastzeit für den Vergleich gemessener und simulierter Werte (s)
T_{mea}	Abtastgeschwindigkeit der gemessenen Rohdaten (s)
T_s	Integrationszeitschritt (s)
U_n	Außenleiternennspannung an den WEA-Anschlussklemmen (V)
u_{WT}	Spannung an den WEA-Anschlussklemmen (U_n)
$\underline{u}_{\text{WT}}$	Spannungszeiger an den WEA-Anschlussklemmen in den Netzkoordinaten (U_n)
u_{WTmea}	gemessene und signalverarbeitete Spannung an den WEA-Anschlussklemmen (U_n)
u_{WTraw}	nach IEC 61400-21 gemessene Rohspannung an den WEA-Anschlussklemmen (U_n)
u_{WTsim}	simulierte und signalverarbeitete Spannung an den WEA-Anschlussklemmen (U_n)
W_{fault}	Zeitfenster für die Definition der Dauer eines Fehlzustands (s)
W_{faultQS}	quasi-stationärer Teil von W_{fault} (s)
W_{post}	Zeitfenster für die Definition der Dauer nach einem Fehlzustand (s)
W_{postQS}	quasi-stationärer Teil von W_{post} (s)
W_{pre}	Zeitfenster für die Definition der Dauer vor einem Fehlzustand (s)
$x_E(n)$	durch die Signalverarbeitung bereitgestellte Zeitreihen von Simulationsfehlern
x_{MAE}	mittlerer absoluter Fehler im Zeitfenster
x_{ME}	mittlere Fehler im Zeitfenster
$x_{\text{mea}}(n)$	durch die Signalverarbeitung bereitgestellte gemessene Zeitreihen
x_{MXE}	größter Fehler im Zeitfenster
$x_{\text{sim}}(n)$	durch die Signalverarbeitung bereitgestellte simulierte Zeitreihen
x_{WTref}	Referenzwert der Blindleistung an den WEA-Anschlussklemmen (kapazitive Vorzeichenregel) oder Referenzwert der Dreieckspannung in Abhängigkeit von der Regelbetriebsart der WEA (P_n oder U_n)

5 Funktionale Spezifikationen und Anforderungen an das Validierungsverfahren

5.1 Allgemeines

Abschnitt 5 enthält die funktionalen Spezifikationen und Anforderungen an das Validierungsverfahren für WEA-Modelle nach den Festlegungen in [Abschnitt 7](#) und für WKW-Modelle nach den Festlegungen in [Abschnitt 8](#). Die allgemeinen Spezifikationen für die Validierung von WEA-Modellen sowie von WKW-Modellen sind in 5.2 angegeben, während die spezifischen Anforderungen an die Validierung von WEA-Modellen in 5.3 und die spezifischen Anforderungen an die Validierung von WKW-Modellen in 5.4 festgelegt werden.

5.2 Allgemeine Spezifikationen

Die Validierungsverfahren für WEA-Modelle und WKW-Modelle sind unter Berücksichtigung folgender Spezifikationen entwickelt worden:

- Das Validierungsverfahren gilt für Grundfrequenz-Simulationsmodelle. Das Validierungsverfahren muss für die WEA-Simulationsmodelle angewendet werden, die in [IEC 61400-27-1](#) festgelegt sind. Das Validierungsverfahren kann auch für andere Grundfrequenz-WEA-Modelle wie z. B. hersteller- oder projektspezifische Modelle angewendet werden.
- Die mögliche Modellgenauigkeit nach dem in Abschnitt 5 festgelegten Validierungsverfahren ist aufgrund von Simulations- und Messunsicherheiten, die in [Anhang D](#) näher erläutert werden, begrenzt. Für die in [IEC 61400-27-1](#) festgelegten Modelle wird die mögliche Genauigkeit weiter begrenzt, weil die Modelle generisch und damit nicht so detailgenau sind wie herstellerspezifische Modelle.
- Die Ergebnisse des Validierungsverfahrens müssen mit dem Ziel der Anwendung in verschiedenen Bewertungs- und Planungsuntersuchungen der Netzstabilität für eine quantitative Angabe der Genauigkeit des Simulationsmodells geeignet sein.
- Das Validierungsverfahren umfasst keine Spezifikation von Prüfverfahren. Die Spezifikation der Prüfverfahren gehört zum Anwendungsbereich von [IEC 61400-21](#). Für die Validierung der Modelle werden daher die nach den Anforderungen in [IEC 61400-21](#) durchgeführten und dokumentierten Prüfungen angewendet. Da die vorliegende Ausgabe von [IEC 61400-21](#) keine Prüfverfahren für WKW festlegt, müssen weitere Prüfungen für die Validierung von WKW-Modellen ergänzt werden.
- Vorhandene Prüfergebnisse (die vor der Veröffentlichung der vorliegenden Norm ermittelt wurden), die den gleichen Arbeitsbereich erfassen wie in [IEC 61400-21](#) festgelegt, können für die Validierung herangezogen werden, sofern diese Ergebnisse den Anforderungen in [IEC 61400-21](#) entsprechend ermittelt und dokumentiert werden.
- In Übereinstimmung mit dem Validierungsverfahren müssen simulierte Mitsystemwerte anhand der gemessenen Mitsystemwerte validiert werden. Bei Modellen, die Gegenkomponenten einbeziehen, müssen zusätzlich zur Validierung der Mitkomponenten die simulierten Gegenkomponenten anhand der gemessenen Gegenkomponenten validiert werden.
- Die Ergebnisse des Validierungsverfahrens müssen sein:
 - Zeitreihen von gemessenen und simulierten Grundfrequenzgrößen;
 - Zeitreihen von Fehlern zwischen simulierten und gemessenen Grundfrequenzströmen und -spannungen;
 - der mittlere Fehler, der mittlere absolute Fehler und der größte Fehler in Fenstern von Spannungseinbrüchen vor dem Fehlzustand, während des Fehlzustands und nach dem Fehlzustand;
 - die gemessene und die simulierte Ansprechzeit, Anstiegszeit und Einschwingzeit und das gemessene und simulierte Überspringen bei Referenzpunktänderungen;
 - der gemessene und der simulierte Schutzpegel und die gemessenen und simulierten Abschaltzeiten des Netzschutzes;

- die Spezifikation des Anwendungsbereichs²⁾ des validierten Simulationsmodells.
- Die Abtastung von Informationen und Daten zur Visualisierung muss mit einer Abtastzeit von 10 ms oder besser erfolgen. Die Visualisierung der gemessenen und der simulierten Daten muss nach **IEC 61400-21** so erfolgen, wie Mitsystem- und Gegensystemdaten der Grundschiwingung oder Nullsystemdaten gefordert werden.
- Zur Berechnung der Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Werten muss eine gemeinsame Zeitbasis für die beiden Datensätze aufgestellt werden. Diese kann durch Zeitsynchronisation, Dezimierung oder Interpolation der abgetasteten Werte erzielt werden.
- Sämtliche beobachteten Hochfrequenzerscheinungen elektromagnetischen Ursprungs, die weniger als z. B. eine Periodendauer andauern, müssen vernachlässigt werden, da sie nicht zum festgelegten Anwendungsbereich der Simulationsmodelle gehören. Z. B. gehören gedämpfte Hochfrequenzschwingungen wie Transformatoreinschaltströme mit Oberschwingungen der zweiten Ordnung und höher nicht zu dem Frequenzbereich, der für Stabilitätsuntersuchungen von Interesse ist.
- Wenn ein gemessener Wert keinen zugehörigen simulierten Wert besitzt, muss zur Aufstellung eines Fehlerdatensatzes ein interpolierter Wert benutzt werden.
- Die gemessenen, verarbeiteten und simulierten Werte müssen als bezogene Werte angegeben werden, wobei die Nennwirkleistung und die Nennspannung am Messpunkt als Grundlage für die Berechnung der bezogenen Parameter nach den Definitionen in 4.2 benutzt werden.
- Die Simulationen für die Modellvalidierung sollten eine weitere Darstellung des Netzes und der entsprechenden Prüfeinrichtung umfassen. Alternativ darf die gemessene Spannung für die Modellvalidierung wieder eingespeist werden.

5.3 Validierung der Modelle von Windenergieanlagen

Das Validierungsverfahren für WEA-Modelle erfüllt zusätzlich zu den allgemeinen Spezifikationen in 5.1 die folgenden Spezifikationen:

- Das Validierungsverfahren legt nicht die Validierung von Modellen anhand eines anderen Modells fest. Bei ähnlichen WEA können Validierungen eines Modells jedoch so erweitert werden, dass sie bei einer angemessenen Begründung durch den WEA-Hersteller auch für diese WEA gelten³⁾.
- Die Begründung durch den Hersteller kann mit einem detaillierten dreiphasigen Modell der Einrichtung erfolgen. In Fällen, in denen durch genaue Simulationen gezeigt werden kann, dass Veränderungen des Werkstoffs das elektrische Verhalten der Einheit nicht maßgeblich beeinflussen, müssen keine neuen Feldprüfungen und -messungen durchgeführt werden.
- Das Validierungsverfahren muss mindestens die folgenden WEA-Funktionskennwerte einbeziehen:
 - Validierung des Verhaltens des Simulationsmodells bei geprüften Spannungseinbrüchen;
 - Validierung des Verhaltens des Simulationsmodells bei geprüften Sprungänderungen⁴⁾ in den Referenzwerten;

²⁾ Der „Anwendungsbereich“ bezeichnet die Simulationen, für die das elektrische Simulationsmodell zutrifft.

³⁾ Es gibt Fälle, in denen sich aufgrund von Instandhaltung, unterschiedlichen Standortbedingungen, Leistungssteigerung oder Aufrüstung von Einrichtungen bestimmte mechanische Teile der WEA verändern können. Typische Beispiele sind der Einbau eines neuen Getriebes, eine Veränderung der Rotorblätter oder von deren Länge und andere Turmhöhen. Solche Veränderungen der mechanischen Teile der WEA haben in der Regel keinen erheblichen Einfluss auf das dynamische elektrische Verhalten des WEA-Generators. In dieser Hinsicht werden WEA als ähnlich angesehen, wenn sie sowohl vom gleichen WEA-Typ sind als auch ihre Betriebsführungsstrategien gleich sind und wenn die gesamte spezifische Hardware, die einen Einfluss auf das dynamische WEA-Verhalten ausübt (d. h. Stromrichter, Überspannungsschutz, Brems-Chopper und ein weiterer spezifischer Schutz gegen Spannungseinbrüche), gleich ist. Weitere Beispiele für hinsichtlich der Modellvalidierung ähnliche WEA sind WEA mit anderen Spannungsbemessungswerten auf der Primärseite des Transformators, WEA mit anderen Rotordurchmessern, WEA mit anderen Herstellern der Komponenten und WEA mit anderen Nennspannungswerten.

⁴⁾ Das festgelegte Verfahren für die Validierung von Sprungänderungen setzt voraus, dass der Regler eine Integralzeit besitzt, der sicherstellt, dass der Referenzwert erreicht wird.

- Validierung der Netzschutzfunktionen des Simulationsmodells.
- Modell und Prüfung müssen sich auf dieselben WEA-Anschlussklemmen beziehen, um sicherzustellen, dass sich Messungen und Simulationen auf denselben Punkt beziehen. Nach IEC 61400-21 werden die WEA-Anschlussklemmen vom Hersteller festgelegt und das können sein:
 - 1) die Niederspannungsseite des WEA-Transformators oder
 - 2) die Hochspannungsseite des WEA-Transformators.

5.4 Validierung der Modelle von Windkraftwerken

Das Validierungsverfahren für WKW-Modelle erfüllt zusätzlich zu den allgemeinen Spezifikationen in 5.1 die folgenden Spezifikationen:

- Das Validierungsverfahren basiert auf Prüfprotokollen der Inbetriebnahmeprüfung und auf Fehlerprotokollen von WKW. Das Validierungsverfahren bezieht WKW-Prüfungen ein, die nach der zukünftigen Norm IEC 61400-21-2 durchgeführt werden. Das Validierungsverfahren legt keine weiteren Prüfungen oder Prüfverfahren fest, sondern stützt sich allein auf die in den Prüfprotokollen von Inbetriebnahmeprüfungen und Fehlerprotokollen angegebenen Verfahren.
- Das Validierungsverfahren muss mindestens die folgenden WKW-Funktionskennwerte einbeziehen:
 - Validierung des Verhaltens des Simulationsmodells bei protokollierten Spannungseinbrüchen;
 - Validierung des Verhaltens des Simulationsmodells bei geprüften Sprungänderungen in den Referenzwerten;
- Modell und Prüfung müssen sich auf denselben WKW-Verbindungspunkt beziehen, um sicherzustellen, dass sich Messungen und Simulationen auf denselben Punkt beziehen.

6 Allgemeine Methodik der Modellvalidierung

6.1 Allgemeines

Abschnitt 6 gibt Spezifikationen der allgemeinen Methodik der Validierung von Modellen nach Abschnitt 7 und Abschnitt 8 an.

6.2 Prüfergebnisse

Die bei der Modellvalidierung angewendeten Prüfergebnisse müssen in einem Prüfbericht dokumentiert werden. Für jede Prüfung müssen die angewendeten Regelbetriebsarten festgelegt werden.

Die gemessenen Zeitreihen müssen entweder als Rohdaten von momentanen Dreiphasenwerten oder als Mitsystemwerte der Wirk- und Blindstrom- und -spannungskomponenten angegeben werden, die nach IEC 61400-21 berechnet werden. Wenn das Modell das gegenläufige System einbezieht, sind für die Validierung auch gemessene Werte des Gegensystems erforderlich sind.

Die gemessene Wirk- und Blindleistung sollte anhand der gemessenen Spannung und des gemessenen Wirk- und Blindstroms berechnet werden.

6.3 Simulationen

Die Validierung darf nach einem von zwei allgemeinen Ansätzen durchgeführt werden. Für den ersten Ansatz wird das WKW- oder das WEA-System modelliert und es erfolgt eine äquivalente Darstellung des Netzes und der Schnittstelle zwischen WEA und Netz. Für den zweiten Ansatz (der mitunter als „Rückkopplungs“-Ansatz bezeichnet wird) wird nur das WKW- oder das WEA-System modelliert und eins der gemessenen Signale (in der Regel die Spannung) wird wieder in das Modell eingespeist, wobei das Verhalten der anderen Messgrößen (gewöhnlich Wirk- und Blindstrom sowie Wirk- und Blindleistung) anhand des simulierten Verhaltens des Modells validiert wird.

Die Validierungsmethode der Simulation des gesamten Netzes ist für den Nachweis der Modellstabilität erforderlich, wobei sämtliche Regelkreise geschlossen sind. Der Nachteil der Simulation des gesamten Netzes besteht darin, dass dabei Netzmodelle und Modelle der Prüfeinrichtungen einbezogen werden, was zusätzliche Unsicherheiten einführt, die nicht aus dem zu validierenden WKW- oder WEA-Modell herrühren.

Die Methode der Validierung durch Rückkopplung beseitigt die Unsicherheiten infolge der Netzmodelle und der Modelle der Prüfeinrichtungen und wird daher für die Bewertung der Genauigkeit des WKW- oder des WEA-Modells empfohlen. Bei der Validierung der Spannungsregelung sollte das Rückkopplungsverfahren der Spannung mit Vorsicht angewendet werden. Nach Göksu u. a. (2016) kann Leistung auch in Langzeitsimulationen z. B. zur Validierung der Leistungsfaktorregelung eingespeist werden.

6.4 Signalverarbeitung

6.4.1 Berechnung von Fehlerzeitreihen

Um sicherzustellen, dass die Validierung die tatsächlichen Merkmale des Modells unter Berücksichtigung der in Teil 27-1 angegebenen Spezifikationen der Bandbreite dieser Modelle widerspiegelt, wird ein Signalverarbeitungsverfahren festgelegt. Das Signalverarbeitungsverfahren ist in Bild 2 für das „Rückkopplungs“-Verfahren und in Bild 3 für das Verfahren der „Simulation des gesamten Netzes“ angegeben.

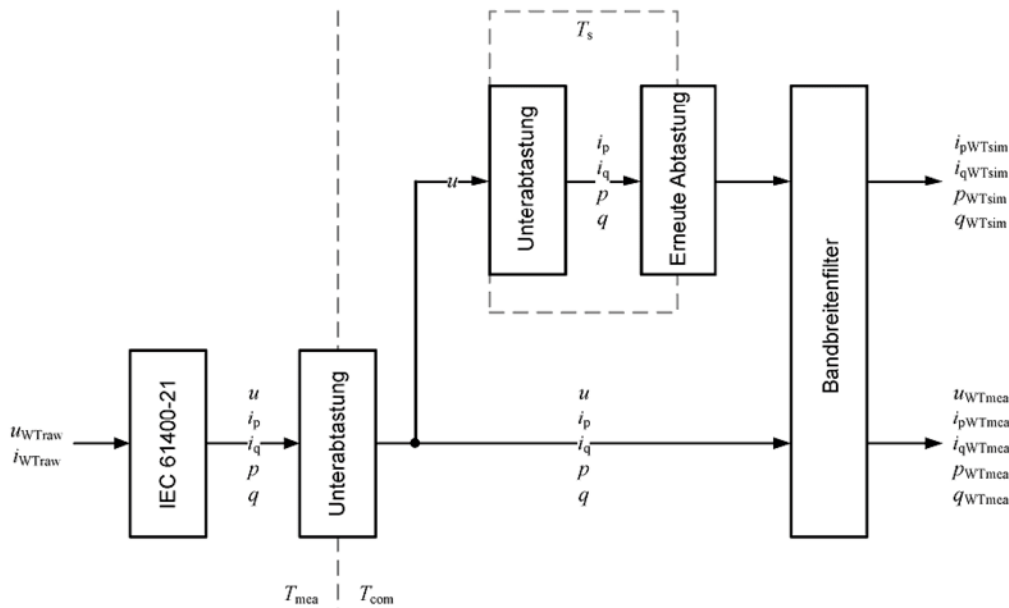


Bild 2 – Signalverarbeitungsstruktur für das „Rückkopplungs“-Verfahren

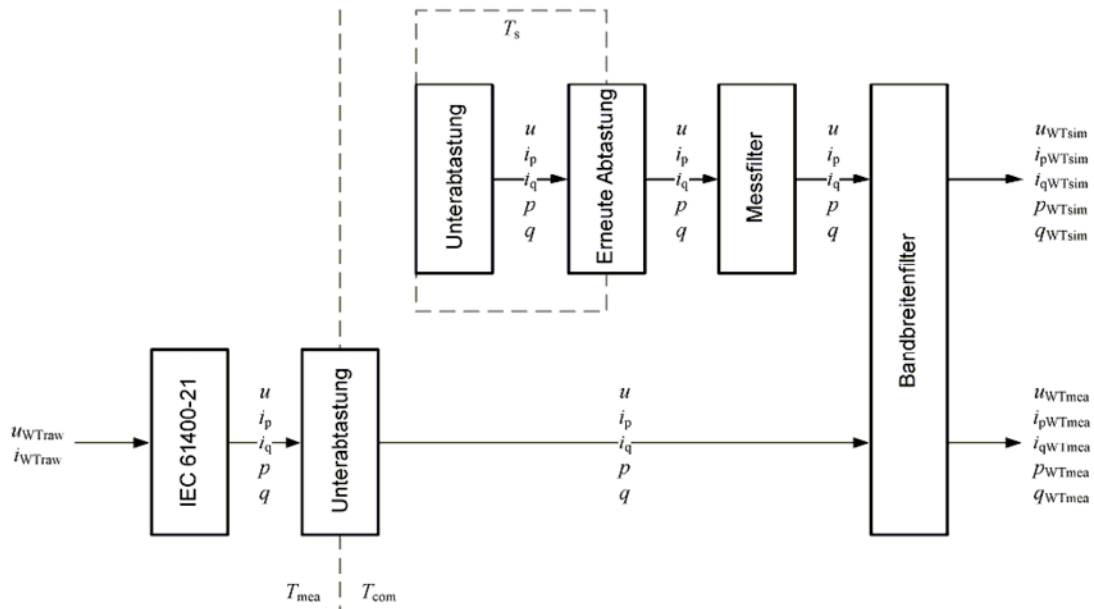


Bild 3 – Signalverarbeitungsstruktur für das Verfahren der „Simulation des gesamten Netzes“

In den Bildern ist T_{mea} die Abtastrate der gemessenen Rohdaten (Strom- und Spannungswellenformen), T_{com} ist die gemeinsame Abtastzeit, für die die gemessenen und die simulierten Werte verglichen werden, und T_s ist der Integrationszeitschritt des zu bewertenden Simulationsmodells. Bei Modellen mit einem festen Integrationszeitschritt ist T_{com} gleich T_s . Bei Solvern mit veränderlichen Integrationszeitschritten müssen die Ausgabewerte des Simulationsmodells für die endgültige Validierung erneut mit T_{com} abgetastet werden.

Die Unterabtastung von T_{mea} auf T_{com} kann als Teil der Berechnung der Mitkomponenten und gegebenenfalls der Gegenkomponenten im Block „IEC 61400-21“ durchgeführt werden⁵⁾.

Das in die Signalverarbeitungsstruktur integrierte „Bandbreitenfilter“ muss als kritisch gedämpftes Filter zweiter Ordnung nach der Beschreibung im [Anhang E](#) mit einer Grenzfrequenz von f_{cut} von 15 Hz entsprechend der in Teil 27-1 festgelegten Bandbreite der Modelle ausgeführt werden.

Das in die Signalverarbeitungsstruktur der „Simulation des gesamten Netzes“ integrierte „Messfilter“ muss als gleitender Mittelwert mit der Mittelungszeit einer Periodendauer der Netzspannung ausgeführt werden. Dieses Filter passt bei den Simulationen die Filterung der Messungen an die Grundfrequenzberechnungen nach [IEC 61400-21](#) an⁶⁾.

6.4.2 Fehlerstatistik der Zeitfenster

Für jede zu überprüfende WEA-Anschlussvariable x (u_{WT} , i_{pWT} , i_{qWT} , p_{WT} und q_{WT}) werden die Zeitreihen des Fehlers $x_E(n)$ aus den verarbeiteten, gemessenen Zeitreihen $x_{mea}(n)$ und den simulierten Zeitreihen $x_{sim}(n)$ wie folgt abgeleitet

$$x_E(n) = x_{sim}(n) - x_{mea}(n) \quad (1)$$

⁵⁾ Unter Anwendung der in [IEC 61400-21](#) beschriebenen Grundfrequenzmethoden für die Berechnung der Messwerte wird davon ausgegangen, dass die Bandbreite von T_{mea} gering genug ist, um einen erheblichen Alias-Effekt aufgrund der Unterabtastung zu vermeiden.

⁶⁾ Das „Messfilter“ ist in der Signalverarbeitungsstruktur der „Rückkopplung“ nicht enthalten, weil die Eingangsstörspannung die gemessene Spannung ist, die bereits nach [IEC 61400-21](#) gefiltert ist.

Sämtliche Ausgangswerte der Signalverarbeitungsstruktur sind bezogene Werte, wobei die Grundlage für die Berechnung nach den Festlegungen in [Abschnitt 3](#) der Nennwert der Parameter ist.

Aus diesen Fehlerzeitreihen müssen für jede der bei der Validierung betrachteten Variablen aus jedem definierten Zeitfenster drei verschiedene Kenngrößen abgeleitet werden.

Der größte Fehler (MXE) ist hauptsächlich auf die Angabe eines Maßes für das dynamische Verhalten des Modells ausgerichtet, er kann aber auch große Fehler während des „stationären“ Verhaltens angeben. Der größte Fehler fügt einen größten absoluten Grenzabweichungsbereich für das Modell innerhalb der geforderten Bandbreite des Modells ein.

Der mittlere Fehler (ME) betrifft das stationäre Verhalten des Modells – sowohl in den Zeitabschnitten vor und nach dem Fehlzustand als auch in der stationären Periode während des Fehlzustands. Der mittlere Fehler fügt einen absoluten Grenzabweichungsbereich für die Leistungsabweichung zwischen gemessenen und simulierten Ergebnissen ein.

Der mittlere absolute Fehler (MAE) betrifft das stationäre Verhalten des Modells – sowohl in den Zeitabschnitten vor und nach dem Fehlzustand als auch in der stationären Periode während des Fehlzustands. Der mittlere Fehler fügt einen absoluten Grenzabweichungsbereich für die mittlere Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Ergebnissen ein.

Der größte Fehler x_{MXE} in einem Zeitfenster mit N Zeitschritten wird berechnet als der Größtwert der absoluten Fehler über dem gesamten Fenster nach

$$x_{MXE} = \max(|x_E(1)|, |x_E(2)|, \dots, |x_E(N)|) \quad (2)$$

Der mittlere Fehler x_{ME} in einem Zeitfenster wird berechnet als der Mittelwert des Fehlers über dem gesamten Fenster nach

$$x_{ME} = \frac{\sum_{n=1}^N x_E(n)}{N} \quad (3)$$

Der mittlere absolute Fehler x_{MAE} in einem Zeitfenster wird berechnet als der Mittelwert des absoluten Fehlers über dem gesamten Fenster nach

$$x_{MAE} = \frac{\sum_{n=1}^N |x_E(n)|}{N} \quad (4)$$

6.4.3 Spezifikation des Spannungseinbruchfensters

Um die Leistungsfähigkeit eines Modells für eine vorgegebene Prüfung zu validieren, müssen die Messdaten in drei aneinander grenzende Fenster unterteilt werden, wie in [Bild 4](#) dargestellt.

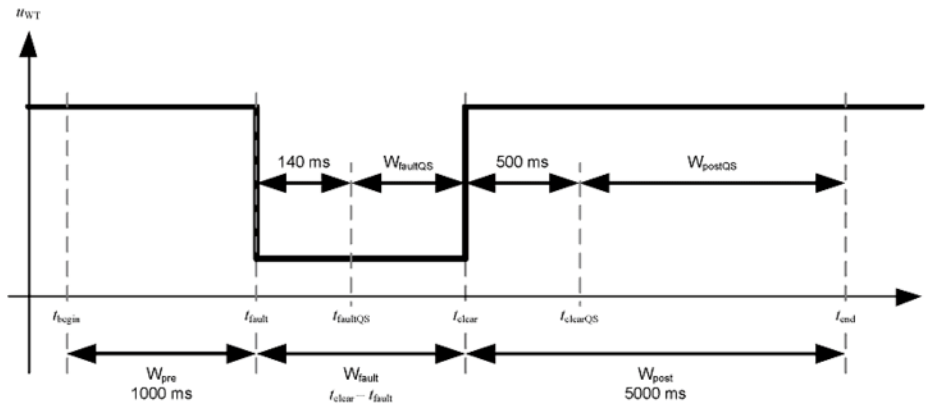


Bild 4 – Fenster eines Spannungseinbruchs

Die drei Fenster sind wie folgt definiert:

- W_{pre} ist das Fenster vor dem Fehlzustand im Zeitraum von t_{begin} bis t_{fault} ;
- W_{fault} ist das Fenster mit dem Fehlzustand im Zeitraum von t_{fault} bis t_{clear} ;
- W_{post} ist das Fenster nach dem Fehlzustand im Zeitraum von t_{clear} bis t_{end} .

Dabei gilt im Allgemeinen $t_{begin} = t_{fault} - 1\,000\text{ ms}$ und $t_{end} = t_{clear} + 5\,000\text{ ms}$.

ANMERKUNG Falls vor dem Fehlzustand eine Längsimpedanz geschaltet wird, sollte t_{begin} beginnen, nachdem die mit dem Schaltereignis verbundenen Übergangsvorgänge abgeklungen sind.

t_{fault} und t_{clear} folgen Übergangsperioden mit gemessenen elektromagnetischen Übergangsvorgängen, die in den Grundfrequenzmodellen nicht enthalten sind. Anstelle der quantitativen Angabe der größten dynamischen Fehler in W_{fault} und W_{post} werden die größten absoluten Fehler in den folgenden quasi-stationären Teilfenstern mit x_{MXA} quantitativ wie folgt angegeben:

- $W_{faultQS}$ ist der quasi-stationäre Teil des Fensters während des Fehlzustands im Zeitraum von $t_{faultQS}$ bis t_{clear} mit $t_{faultQS} = t_{fault} + 140\text{ ms}^{7)}$;
- W_{postQS} ist der quasi-stationäre Teil des Fensters nach dem Fehlzustand im Zeitraum von $t_{clearQS}$ bis t_{end} mit $t_{clearQS} = t_{clear} + 500\text{ ms}^{8)}$

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die berechneten Fehlerwerte und die Berechnungsfenster.

⁷⁾ Der Ausschluss der ersten 140 ms von W_{fault} aus $W_{faultQS}$ erfolgt hauptsächlich wegen der Einschränkungen des Modells bei der Nachbildung der Gleichspannungskomponente des Generatorflusses.

⁸⁾ Der Ausschluss der ersten 500 ms von W_{post} aus W_{postQS} erfolgt wegen der Einschränkungen des Modells. Die Genauigkeit der Blindleistung wird durch den Einschaltstoß des Transformators beeinflusst, der mitunter länger als 500 ms dauern kann. Die Genauigkeit der Wiederkehr der Wirkleistung wird durch nichtlineare aerodynamische Effekte und Schwankungen der Windgeschwindigkeit beeinflusst.

Tabelle 1 – Für Fehlerberechnungen benutzte Fenster

Zeitraum	x_{MXE}	x_{ME}	x_{MAE}
Vor dem Fehlzustand	W_{pre}	W_{pre}	W_{pre}
Während des Fehlzustands	$W_{faultQS}^a$	W_{fault}	$W_{faultQS}$
Nach dem Fehlzustand	W_{postQS}	W_{post}	W_{post}
^a Wenn W_{fault} in einem speziellen Fall kleiner als 280 ms und damit $W_{faultQS}$ kleiner als 140 ms ist, dann darf für diesen Fall x_{MAXE} im Zeitraum während des Fehlzustands nicht berechnet werden.			

6.4.4 Kennlinie der Sprungantwort

Die Sprungantwort sollte mit der in Bild 5 angegebenen Kennlinie quantitativ angegeben werden.

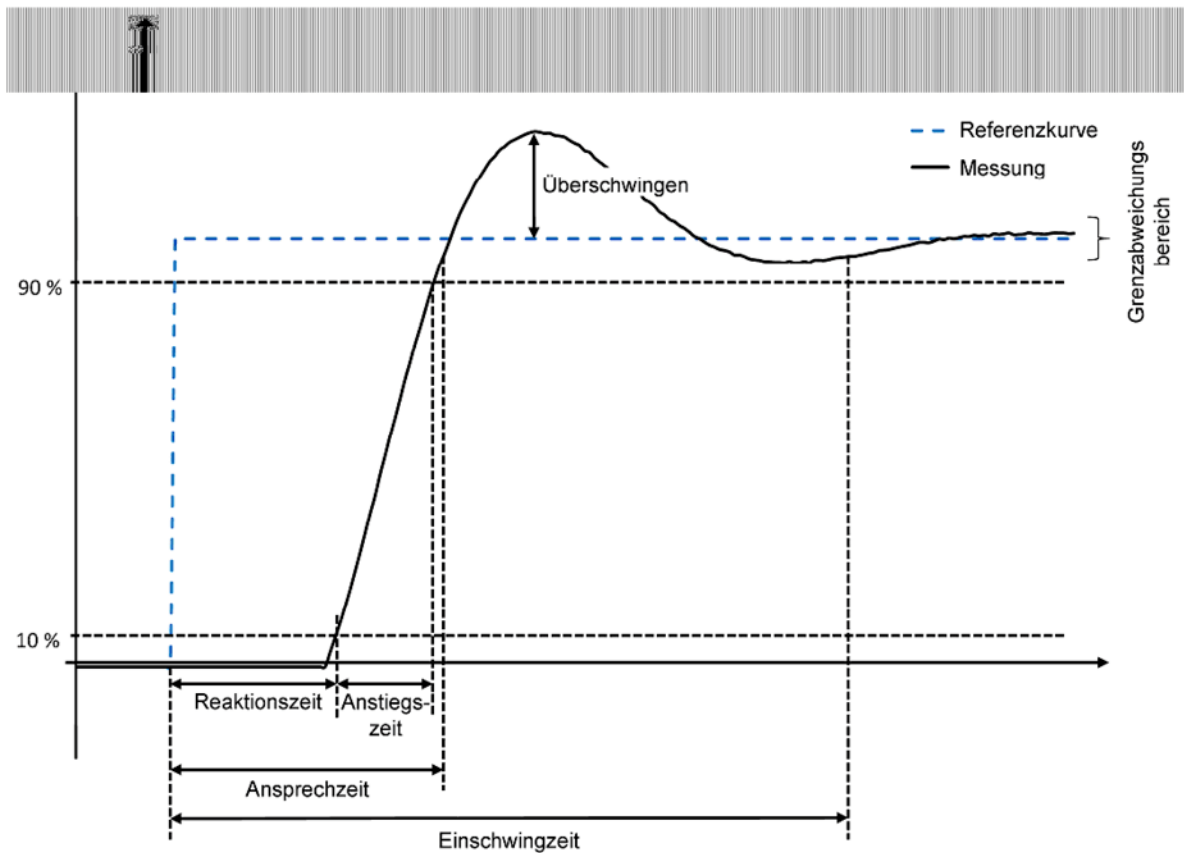


Bild 5 – Kennlinie der Sprungantwort

Die Kennlinie der Sprungantwort wird wie folgt definiert:

- Die Reaktionszeit ist definiert als die vergangene Zeit von der Ausgabe eines Sprungbefehls bis der beobachtete Wert 10 % des Sprungs erreicht.
- Die Anstiegszeit ist definiert als die vergangene Zeit von dem Zeitpunkt, zu dem der beobachtete Wert 10 % des Sprungs erreicht, bis zu dem Zeitpunkt, zu dem der beobachtete Wert 90 % des Sprungs erreicht.
- Die Ansprechzeit ist definiert als die vergangene Zeit von der Ausgabe eines Sprungbefehls bis der beobachtete Wert das erste Mal den vordefinierten Grenzabweichungsbereich des Zielwerts erreicht.

- Die Einschwingzeit ist definiert als die vergangene Zeit von der Ausgabe eines Sprungbefehls bis der beobachtete Wert dauerhaft im vordefinierten Grenzabweichungsbereich des Zielwerts bleibt. Es sollte beachtet werden, dass eine unzuweckmäßige Auswahl des Grenzabweichungsbereichs zu einer erheblichen Diskrepanz zwischen der simulierten und der gemessenen Einschwingzeit führen kann, obwohl die simulierte Sprungantwort mit der gemessenen Sprungantwort recht gut übereinstimmt. Ein derartiger Fall ist in Bild 6 dargestellt. Solche Fälle sollten vermieden werden, indem eine Anpassung des Grenzabweichungsbereichs zugelassen wird.
- Überschwingen ist definiert als die Differenz zwischen dem größten Wert der Sprungantwort und dem stationären Endwert.

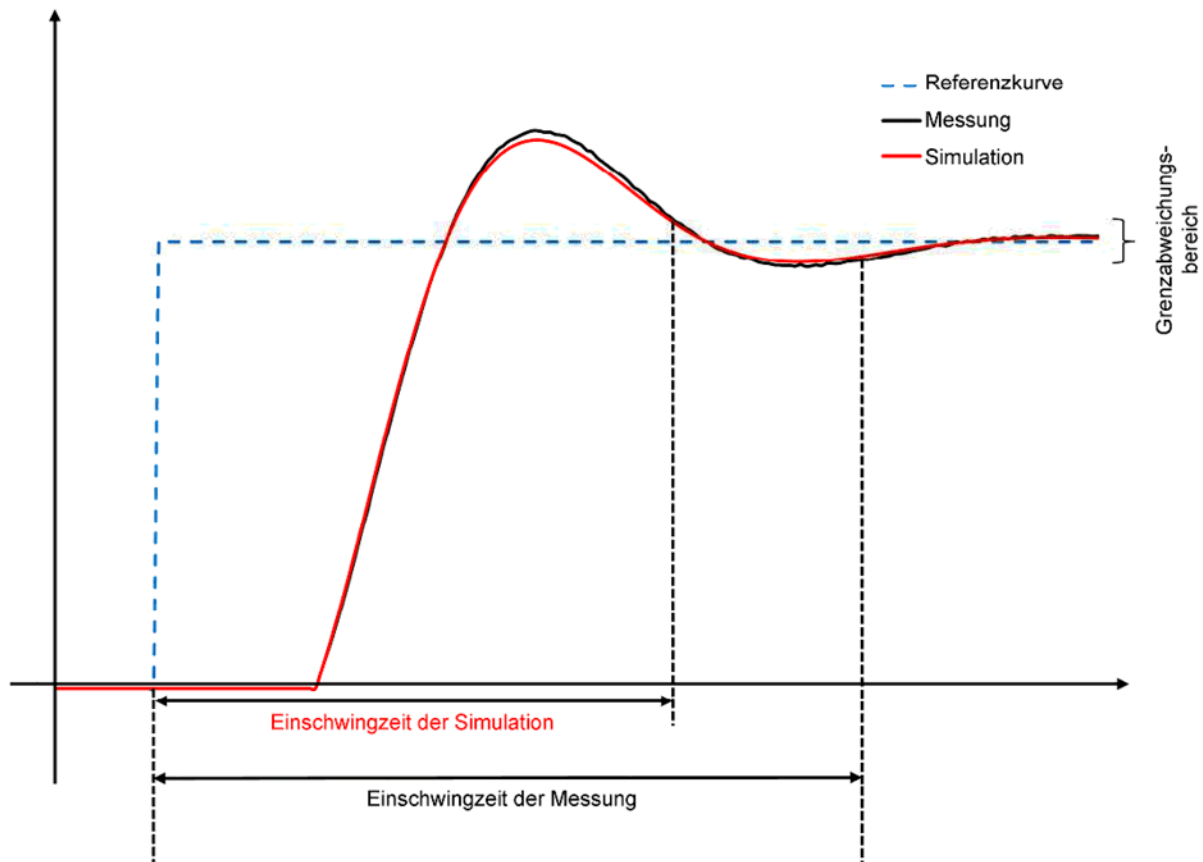


Bild 6 – Gemessene und simulierte Einschwingzeit mit einer unzuweckmäßigen Auswahl des Grenzabweichungsbereichs

7 Validierung der Modelle von Windenergieanlagen

7.1 Allgemeines

Der Zweck von Abschnitt 7 ist die Festlegung des genormten Verfahrens für die Validierung eines WEA-Simulationsmodells anhand von Prüfungen an der betreffenden WEA. Das bevorzugte Verfahren ist die Durchführung von Prüfungen nach IEC 61400-21, es können aber auch andere Prüfergebnisse angewendet werden, sofern die erforderlichen Messergebnisse zur Verfügung stehen.

7.2 Verhalten bei einem Spannungseinbruch

7.2.1 Allgemeines

Die Validierung des Verhaltens des Modells bei einem Spannungseinbruch beruht auf einem Vergleich der gemessenen mit den simulierten Werten von Spannung, Wirkstrom, Blindstrom, Wirkleistung und Blindleistung bei einem Spannungseinbruch.

7.2.2 Prüfanforderungen

IEC 61400-21 legt die Prüffälle für Spannungseinbrüche fest⁹⁾. Jeder geprüfte Betrag und jede geprüfte Dauer eines symmetrischen und unsymmetrischen¹⁰⁾ Fehlzustands muss durch mindestens eine Messung validiert werden. In der neuesten Version von **IEC 61400-21** festgelegte Prüffälle für Spannungseinbrüche werden bevorzugt, es dürfen aber auch andere Prüffälle angewendet werden, sofern die Prüfung die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Zu Beginn der Prüfung muss die WEA einen stationären Anfangszustand eingenommen haben, in dem die Spannung eingeschwungen ist.
- Am Ende der Prüfung muss die WEA einen stationären Endzustand eingenommen haben, in dem die Spannung eingeschwungen ist.
- Die Prüfung muss in einem Zeitfenster durchgeführt werden, das mindestens 1 s des stationären Anfangszustands und mindestens 1 s des stationären Endzustands einbezieht.
- Innerhalb des Prüffeststers darf sich kein WEA-Referenzwert ändern.
- Die folgenden Zeitreihen müssen mit der Prüfung ermittelt werden:
 - eine Zeitreihe der gemessenen Mitsystemspannung der Grundfrequenz;
 - eine Zeitreihe des gemessenen Mitsystem-Wirkstroms der Grundfrequenz;
 - eine Zeitreihe des gemessenen Mitsystem-Blindstroms der Grundfrequenz;
 - eine Zeitreihe der gemessenen Mitsystem-Wirkleistung der Grundfrequenz;
 - eine Zeitreihe der gemessenen Mitsystem-Blindleistung der Grundfrequenz.
- Die Messungen müssen auf die WEA-Anschlussklemmen bezogen werden.
- Die gemessenen Zeitreihen müssen synchronisiert werden.
- Die simulierten Zeitreihen müssen mit einer Auflösung der Zeitschritte von mindestens $\frac{1}{4}$ Periode bereitgestellt werden.¹¹⁾
- Der Zeitpunkt t_{fault} zu dem der Fehlzustand eingeleitet wird¹²⁾, und der Zeitpunkt t_{clear} zu dem die Fehlerbeseitigung eingeleitet wird¹³⁾, sind anzugeben.

7.2.3 Anforderungen an die Simulation

Die folgenden Anforderungen gelten für die Simulationen des Prüffalls:

- Bei den Simulationen muss das WEA-Simulationsmodell die gleichen Einstellungen der Regelbetriebsart für das System nutzen wie die WEA.
- Das WEA-Modell kann mit dem in **Anhang C** festgelegten Referenznetz verbunden werden oder die gemessene Spannung kann wieder in die WEA-Anschlussklemmen eingespeist werden.

⁹⁾ **IEC 61400-21:2008** legt sechs Prüffälle für Spannungseinbrüche mit symmetrischen und unsymmetrischen Fehlzuständen nach **IEC 61400-21:2008, Tabelle 1**, fest. Jeder Prüffall wird durch die Anzahl der betroffenen Phasen sowie durch den Betrag und die Dauer des Spannungseinbruchs gekennzeichnet. Zukünftige Ausgaben von **IEC 61400-21** dürfen weitere Prüffälle für Spannungseinbrüche festlegen.

¹⁰⁾ Anmerkung: Mitsystemmodelle unterliegen der Einschränkung, dass sie nicht das Verhalten der Gegen- und der Nullkomponente wiedergeben.

¹¹⁾ Die generischen Modelle in Teil 27-1 erfordern Integrationszeitschritte bis zu einer $\frac{1}{4}$ Periode.

¹²⁾ Das Ziel ist die Ermittlung des Zeitpunkts, zu dem der erste Kurzschluss in einer der Phasen auftritt.

¹³⁾ Das Ziel ist die Ermittlung des Zeitpunkts, zu dem der erste Kurzschluss in einer der Phasen beseitigt ist.

7.2.4 Validierungsergebnisse

Die folgenden Validierungsergebnisse sollten angegeben werden:

- ein Diagramm mit den Zeitreihen der folgenden Variablen:
 - gemessene Mitsystemspannung der Grundfrequenz;
 - simulierte Mitsystemspannung der Grundfrequenz;
- ein Diagramm mit den Zeitreihen der folgenden Variablen:
 - gemessener Mitsystem-Wirkstrom der Grundfrequenz;
 - simulierter Mitsystem-Wirkstrom der Grundfrequenz;
- ein Diagramm mit den Zeitreihen der folgenden Variablen:
 - gemessener Mitsystem-Blindstrom der Grundfrequenz;
 - simulierter Mitsystem-Blindstrom der Grundfrequenz;
- ein Diagramm mit den Zeitreihen der folgenden Variablen:
 - absoluter Fehler des simulierten Mitsystem-Wirkstroms der Grundfrequenz;
 - absoluter Fehler des simulierten Mitsystem-Blindstroms der Grundfrequenz;
- eine Tabelle, die MXE, ME und MAE der Wirkleistung, der Blindleistung, des Wirkstroms und des Blindstroms in den Fenstern vor dem Fehlzustand, während des Fehlzustands und nach dem Fehlzustand nach den Festlegungen in [Tabelle 1](#) angibt.

Falls Modelle validiert werden, die das gegenläufige System einbeziehen, sollte die Validierung unsymmetrischer Fehlerfälle die folgenden zusätzlichen Ergebnisse beinhalten:

- ein Diagramm mit Zeitreihen der gemessenen und der simulierten Gegensystemspannung;
- ein Diagramm mit Zeitreihen des gemessenen und des simulierten Gegensystem-Wirkstroms;
- ein Diagramm mit Zeitreihen des gemessenen und des simulierten Gegensystem-Blindstroms;
- ein Diagramm mit Zeitreihen des absoluten Fehlers des Gegensystem-Wirkstroms und des Gegensystem-Blindstroms.

7.3 Wirkleistungsregelung

7.3.1 Allgemeines

Die Validierung der Wirkleistungsregelung des WEA-Modells kann nur bei WEA erfolgen, die eine Wirkleistungsregelung mit Zugriff auf einen Referenzwert der Wirkleistung unterstützen.

Die Validierung beruht auf dem Vergleich des gemessenen mit dem simulierten Verhalten der Wirkleistung bei Änderungen des Referenzwerts der Wirkleistung.

7.3.2 Prüfanforderungen

In der neuesten Version von [IEC 61400-21](#) festgelegte Prüffälle von Änderungen des Referenzwerts der WEA-Wirkleistung werden bevorzugt, es dürfen aber auch andere Prüffälle angewendet werden, sofern die Prüfung die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Zu Beginn der Prüfung muss die WEA einen stationären Anfangszustand eingenommen haben, in dem die Wirkleistung auf einen konstanten Referenzwert eingeschwungen ist.
- Am Ende der Prüfung muss die WEA einen stationären Endzustand eingenommen haben, in dem die Wirkleistung auf einen konstanten Referenzwert eingeschwungen ist.
- Die Prüfung muss in einem Zeitfenster durchgeführt werden, das mindestens 1 s des stationären Anfangszustands und mindestens 5 s des stationären Endzustands einbezieht.

- Innerhalb des Prüffesters darf sich kein anderer Referenzwert verändern als der Referenzwert der Wirkleistung.
- Der Referenzwert der Wirkleistung muss kleiner oder gleich der verfügbaren Leistung im gesamten Messfenster sein.¹⁴⁾
- Die folgenden Zeitreihen müssen mit der Prüfung ermittelt werden:
 - eine Zeitreihe der Wirkleistungsreferenz;
 - eine Zeitreihe der gemessenen Mitsystem-Wirkleistung der Grundfrequenz;
 - eine Zeitreihe der geschätzten verfügbaren Leistung.
- Die gemessenen Zeitreihen müssen synchronisiert werden.
- Die gemessenen Zeitreihen sollten als Mittelwerte für jeden Zeitschritt mit einer Auflösung der Zeitschritte von mindestens 200 ms angegeben werden.¹⁵⁾

7.3.3 Anforderungen an die Simulation

Die folgenden Anforderungen gelten für die Simulation des Prüffalls:

- Bei der Prüfung muss das Simulationsmodell die gleichen Einstellungen der Regelbetriebsart für das System nutzen wie die WEA.
- Das WEA-Modell kann mit einem äquivalenten Netzmodell verbunden werden oder die gemessene Spannung kann wieder in die WEA-Anschlussklemmen eingespeist werden.
- Die Zeitreihen der Wirkleistungsreferenz müssen aus der Prüfung wieder in die Simulation eingespeist werden.

7.3.4 Validierungsergebnisse

Die folgenden Validierungsergebnisse sollten angegeben werden:

- ein Diagramm mit den Zeitreihen der folgenden Variablen:
 - gemessener Referenzwert der Wirkleistung;
 - gemessene Mitsystem-Wirkleistung der Grundfrequenz;
 - simulierte Mitsystem-Wirkleistung der Grundfrequenz;
- Wenn die Prüfung einen einzigen Sprung des Referenzwerts der Leistung umfasst, muss eine Tabelle mit der Reaktionszeit, der Anstiegszeit, der Einschwingzeit und dem Überschwingen der simulierten und der gemessenen Wirkleistung angegeben werden.

7.4 Blindleistungsregelung

7.4.1 Allgemeines

Die Validierung der Blindleistungsregelung des WEA-Modells kann nur bei WEA erfolgen, die eine Blindleistungsregelung mit Zugriff auf einen Referenzwert der Blindleistung unterstützen.

Die Validierung beruht auf dem Vergleich des gemessenen mit dem simulierten Verhalten der Blindleistung bei Änderungen des Referenzwerts der Blindleistung.

¹⁴⁾ IEC 61400-21:2008, Bild 1, legt fünf Prüffälle für Sprungänderungen am Referenzpunkt der Wirkleistung fest. Für die Validierung dürfen nur die Fälle herangezogen werden, in denen die verfügbare Leistung die Referenzleistung überschreitet, so dass in der Regel nur drei der fünf festgelegten Sprünge maßgeblich sind.

¹⁵⁾ Prüfungen nach IEC 61400-21:2008 müssen mit Mittelwerten mit einer Auflösung von 200 ms durchgeführt werden.

7.4.2 Prüfanforderungen

In der neuesten Version von IEC 61400-21 festgelegte Prüffälle von Änderungen des Referenzwerts der WEA-Blindleistung werden bevorzugt, es dürfen aber auch andere Prüffälle angewendet werden, sofern die Prüfung die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Zu Beginn der Prüfung muss die WEA einen stationären Anfangszustand eingenommen haben, in dem die Blindleistung auf einen konstanten Referenzwert eingeschwungen ist.
- Am Ende der Prüfung muss die WEA einen stationären Endzustand eingenommen haben, in dem die Blindleistung auf einen konstanten Referenzwert eingeschwungen ist.
- Die Prüfung muss in einem Zeitfenster durchgeführt werden, das mindestens 1 s des stationären Anfangszustands und mindestens 5 s des stationären Endzustands einbezieht.
- Innerhalb des Prüffensers darf sich kein anderer Referenzwert verändern als der Referenzwert der Blindleistung.
- Die folgenden Zeitreihen müssen mit der Prüfung ermittelt werden:
 - Blindleistungsreferenz;
 - gemessene Mitsystem-Blindleistung der Grundfrequenz.
- Die gemessenen Zeitreihen müssen synchronisiert werden.
- Die gemessenen Zeitreihen sollten als Mittelwerte für jeden Zeitschritt mit einer Auflösung der Zeitschritte von mindestens 200 ms angegeben werden.¹⁶⁾

7.4.3 Anforderungen an die Simulation

Die folgenden Anforderungen gelten für die Simulation des Prüffalls:

- Bei der Prüfung muss das Simulationsmodell die gleichen Einstellungen der Regelbetriebsart für das System nutzen wie die WEA.
- Das WEA-Modell kann mit einem äquivalenten Netzmodell verbunden werden oder die gemessene Spannung kann wieder in die WEA-Anschlussklemmen eingespeist werden.
- Die Zeitreihen der Blindleistungsreferenz müssen aus der Prüfung wieder in die Simulation eingegeben werden.

7.4.4 Validierungsergebnisse

Die folgenden Validierungsergebnisse sollten angegeben werden:

- ein Diagramm mit den Zeitreihen der folgenden Variablen:
 - gemessener Referenzwert der Blindleistung;
 - gemessene Mitsystem-Blindleistung der Grundfrequenz;
 - simulierte Mitsystem-Blindleistung der Grundfrequenz;
- Wenn die Prüfung einen einzigen Sprung des Referenzwerts der Blindleistung umfasst, muss eine Tabelle mit der Reaktionszeit, der Anstiegszeit, der Einschwingzeit und dem Überschwingen der simulierten und der gemessenen Wirkleistung angegeben werden.

7.5 Spannungsregelung

7.5.1 Allgemeines

Die Validierung der Spannungsregelung des WEA-Modells kann nur bei WEA erfolgen, die eine Spannungsregelung mit Zugriff auf einen Referenzwert der Spannung unterstützen.

¹⁶⁾ Prüfungen nach IEC 61400-21:2008 müssen mit Mittelwerten mit einer Auflösung von 200 ms durchgeführt werden.