

Swissgrid AG  
Bleichemattstrasse 31  
Postfach  
5001 Aarau  
Schweiz

T +41 58 580 21 11  
info@swissgrid.ch  
www.swissgrid.ch

Technische Mindestanforderungen für den  
Anschluss von konverterbasierten  
Energiespeichersystemen ans ÜN

Version 1.1 vom 29. Mai 2026

Überarbeitung

| Datum                                                 | Version | Änderungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 14.12.2025                                            | 1.01    | Übersetzung sämtlicher Grafiken sowie Korrektur von Verweisen in der französischen, englischen und italienischen Version                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Änderungen bzw. Klarstellungen in folgenden Kapiteln: |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 29.05.2026                                            | 1.1     | <ul style="list-style-type: none"><li>- 2.1: Abkürzungsverzeichnis</li><li>- 3.1.1: Steuerung der Wirkleistung im Normalbetrieb</li><li>- 3.2.1: Spannungs- und Blindleistungsregelung</li><li>- 3.2.2: Blindleistungskapazität</li><li>- 3.2.4: Widerstandsfähigkeit gegen kurzzeitige Unter- und Überspannungen</li><li>- 3.2.5: Wiederherstellung der Wirkleistung nach einer Spannungsstörung</li><li>- 3.5: Netzbildende Eigenschaften</li><li>- 3.5.2: Synthetische Trägheit (Virtual Inertia)</li><li>- 4.1: Betriebsgrenzen</li><li>- 4.3: Frequenzänderungsrate (RoCoF)</li><li>- 6.2: Modellierungsanforderungen</li><li>- 7.1.1: Konformitätstests</li><li>- 8.3.1.1: Kurzschlussstudie</li><li>- 8.3.2.1: Studie zur harmonischen Stabilität, Allgemeines</li><li>- 8.3.2.3: Detaillierte EMT-Studie</li></ul> |

## Inhalt

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                                | <b>4</b>  |
| 1.1      | Ziel, Geltungsbereich und Zielgruppe                             | 4         |
| 1.2      | Bedarf für zusätzliche Anforderungen an kESS                     | 4         |
| 1.3      | Anforderungen an das Dokument                                    | 4         |
| 1.3.1    | Branchen- und Swissgrid Dokumente                                | 4         |
| 1.3.2    | Vorgaben ENTSO-E                                                 | 4         |
| 1.3.3    | Normen und Standards                                             | 5         |
| <b>2</b> | <b>Allgemeine Grundlagen und Konventionen</b>                    | <b>6</b>  |
| 2.1      | Abkürzungsverzeichnis                                            | 6         |
| 2.2      | Definitionen                                                     | 8         |
| 2.3      | Vorzeichenkonvention                                             | 8         |
| 2.4      | Betriebskonvention                                               | 8         |
| <b>3</b> | <b>Anforderungen an das Verhalten des kESS</b>                   | <b>9</b>  |
| 3.1      | Wirkleistungsregelung und Betriebsmodi                           | 9         |
| 3.1.1    | Steuerung der Wirkleistung im Normalbetrieb                      | 9         |
| 3.1.2    | Änderung von Regelungsmodi                                       | 9         |
| 3.2      | Blindleistungsregelung                                           | 9         |
| 3.2.1    | Spannungs- und Blindleistungsregelung                            | 9         |
| 3.2.2    | Blindleistungskapazität                                          | 9         |
| 3.2.3    | Blindstromversorgung                                             | 11        |
| 3.2.4    | Widerstandsfähigkeit gegen kurzzeitige Unter- und Überspannungen | 11        |
| 3.2.5    | Wiederherstellung der Wirkleistung nach einer Spannungsstörung   | 12        |
| 3.2.6    | Spannungsregelung                                                | 12        |
| 3.3      | Voraussetzungen für die (Wieder-)Inbetriebnahme                  | 13        |
| 3.4      | Resonanzen und Regler-Interaktionen                              | 13        |
| 3.5      | Netzbildende Eigenschaften                                       | 14        |
| 3.5.1    | Stabilität                                                       | 15        |
| 3.5.2    | Synthetische Trägheit (Virtual Inertia)                          | 15        |
| 3.6      | Netzurückwirkungen                                               | 16        |
| 3.6.1    | Allgemeines                                                      | 16        |
| 3.6.2    | Bewertung der Netzurückwirkungen                                 | 16        |
| 3.6.3    | Massnahmen                                                       | 16        |
| <b>4</b> | <b>Betriebsverhalten</b>                                         | <b>17</b> |
| 4.1      | Betriebsgrenzen                                                  | 17        |
| 4.2      | Betriebsspannung und Frequenzbereich                             | 17        |
| 4.3      | Frequenzänderungsrate (RoCoF)                                    | 17        |
| 4.4      | Wiedereinschaltung nach Netztrennung                             | 18        |
| 4.5      | Kontaktstelle des kESS-Betreibers                                | 18        |
| 4.6      | Frequenzregelung                                                 | 18        |

|          |                                                 |           |
|----------|-------------------------------------------------|-----------|
| 4.6.1    | Überfrequenz                                    | 19        |
| 4.6.2    | Unterfrequenz                                   | 19        |
| 4.7      | Verhalten bei Netzwiederaufbau                  | 20        |
| <b>5</b> | <b>Ausführung des Netzanschlusses</b>           | <b>21</b> |
| 5.1      | Primärtechnik am Anschlusspunkt                 | 21        |
| 5.1.1    | Allgemeines                                     | 21        |
| 5.1.2    | Anschlussanlage kESS                            | 21        |
| 5.1.3    | Sternpunktbehandlung                            | 22        |
| 5.1.4    | Leistungsschalter                               | 22        |
| 5.1.5    | Wandler                                         | 23        |
| 5.1.6    | Überspannungsableiter                           | 23        |
| 5.1.7    | Kabelanlagen                                    | 23        |
| 5.1.8    | Erdungsanlage                                   | 23        |
| 5.2      | Sekundärtechnik                                 | 23        |
| 5.2.1    | Allgemeines                                     | 23        |
| 5.2.2    | Synchronisierung                                | 23        |
| 5.2.3    | Steuerhoheit                                    | 24        |
| 5.2.4    | Schnittstelle Steuerung Wirk- und Blindleistung | 24        |
| 5.3      | Schutz                                          | 24        |
| 5.3.1    | Allgemeines                                     | 24        |
| 5.3.2    | Automatische Frequenzentlastung                 | 24        |
| 5.3.3    | Inselnetzerkennung und Inselbetrieb             | 25        |
| 5.3.4    | Störungsanalysen                                | 25        |
| 5.4      | Eigenbedarf und Hilfsenergie                    | 25        |
| 5.5      | Kommunikation und IT-Sicherheit                 | 25        |
| 5.6      | Zugang zur physischen Infrastruktur             | 26        |
| <b>6</b> | <b>Studien und Nachweise</b>                    | <b>27</b> |
| 6.1      | Anforderungen an dynamische Studien             | 27        |
| 6.2      | Modellierungsanforderungen                      | 27        |
| 6.2.1    | Oberschwingungsmodelle                          | 28        |
| <b>7</b> | <b>Konformitätstests</b>                        | <b>30</b> |
| 7.1      | Prüfverfahren                                   | 30        |
| 7.1.1    | Inbetriebnahme                                  | 30        |
| <b>8</b> | <b>Anhang</b>                                   | <b>33</b> |
| 8.1      | Tabellen und Formeln                            | 33        |
| 8.2      | Abbildungen                                     | 33        |
| 8.3      | Studien                                         | 33        |
| 8.3.1    | Transiente Stabilität                           | 33        |
| 8.3.2    | Studie zur harmonischen Stabilität              | 34        |
| <b>9</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>                     | <b>36</b> |

# 1 Einführung

## 1.1 Ziel, Geltungsbereich und Zielgruppe

Dieses Dokument definiert die technischen und betrieblichen Anschlussbedingungen für konverterbasierte Energiespeichersysteme (kESS), die an das Übertragungsnetz (ÜN) in der Schweiz angeschlossen werden sollen. Ziel ist es, klare, einheitliche und transparente Anforderungen bereitzustellen, die sowohl die Netzstabilität als auch die Sicherheit und Effizienz des Gesamtsystems gewährleisten.

Der Geltungsbereich umfasst alle kESS, die an Netzebene 1 des Schweizer Übertragungsnetzes angeschlossen werden. Die Anforderungen gelten für neue Anlagen, sowie für Anlagen, an denen wesentliche Änderungen vollzogen werden, die Auswirkungen auf den Netzanschluss oder das Betriebsverhalten haben.

Die Zielgruppe dieses Dokuments sind alle Anschlussnehmer, insbesondere Projektentwickler, Betreiber, Planer und Hersteller von kESS, die einen Netzanschluss an das Schweizer Übertragungsnetz anstreben. Das Dokument dient als verbindliche Grundlage für die Planung, Auslegung, Genehmigung und Inbetriebnahme solcher Systeme.

## 1.2 Bedarf für zusätzliche Anforderungen an kESS

Der zunehmende Ausbau konverterbasierter Energiesysteme (kESS) im schweizerischen Übertragungsnetz stellt neue Anforderungen an deren Integration, insbesondere im Hinblick auf die Erbringung von Systemdienstleistungen zur Sicherstellung der Versorgungsqualität und Netzstabilität. kESS müssen daher über systemstützende Eigenschaften verfügen, um einen volkswirtschaftlich effizienten Beitrag zur Stabilität des Stromsystems im Zuge der Energiewende leisten zu können.

Da der rasche Zulauf von kESS neue technische Herausforderungen mit sich bringt, sind ergänzende Anforderungen notwendig, die über die bestehenden Dokumente hinausgehen. Die in diesem Dokument enthaltenen Anforderungen gelten zusätzlich zu den in der bestehenden Vertragslandschaft von Swissgrid genannten Vorgaben (siehe Kapitel 1.3.1). Im Zweifelsfall und gilt die jeweils strengere Anforderung.

Bei der Erarbeitung des vorliegenden Dokuments wurde sowohl auf Erfahrungen bestehender Anschlussbedingungen für kESS bei anderen TSOs basiert sowie Bezug auf die Rahmenbedingungen der unterliegenden Netzebenen genommen.

## 1.3 Anforderungen an das Dokument

### 1.3.1 Branchen- und Swissgrid Dokumente

Des Weiteren sind folgende Dokumente in der jeweils gültigen Fassung ebenfalls einzuhalten:

- Transmission Code, im Folgenden referenziert als TC [1];
- Netzanschlussvertrag, im Folgenden referenziert als NAV [2];
- Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss an das Schweizer Übertragungsnetz, ABNA [3];
- Verträge über Systemdienstleistungen und deren Anforderungen;
- Spannungshaltungskonzept [4];
- Betriebsvereinbarung; [5]
- Anschlussbetriebsvereinbarung;
- Betriebsführungshandbuch bzw. Schnittstellenhandbuch Betriebsführung (SHBF);
- Alle anderen Verträge mit Swissgrid und zugrunde liegende Branchendokumente.

### 1.3.2 Vorgaben ENTSO-E

Im Hinblick auf eine internationale technische Harmonisierung spielen ebenfalls die Anforderungen der ENTSO-E eine bedeutende Rolle. Die Requirements for Generators (RfG) legen die Mindestanforderungen für den Netzanschluss von Erzeugern und der Demand connection code (DCC) diejenigen für Verbraucher fest.

### 1.3.3 Normen und Standards

Wenn keine expliziten Standards im Dokument angegeben sind, sind die folgenden Normensysteme in der angegebenen Reihenfolge zu beachten:

- Schweizerische Gesetze und Normen (insbesondere Transmission Code);
- Normen Cenelec;
- Normen IEC;
- Empfehlungen der Cigré;
- Technische Anschlussregeln europäischer Übertragungsnetzbetreiber für Höchstspannungsanlagen;
- Normen und Technische Anschlussregeln der IEEE.

## 2 Allgemeine Grundlagen und Konventionen

### 2.1 Abkürzungsverzeichnis

| ABKÜRZUNG                | BEDEUTUNG                                                        | BESCHREIBUNG/ERKLÄRUNG                                                               |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ABNA</b>              | Allgemeine Bedingungen für den Anschluss an das Übertragungsnetz | Vertragsbestandteil des Netzanschlussvertrages                                       |
| <b>ABV</b>               | Anschlussbetriebsvereinbarung                                    |                                                                                      |
| <b>AC</b>                | Alternating Current                                              | Wechselstrom                                                                         |
| <b>AIS</b>               | Air insulated switchgear                                         | Luftisolierte Schaltanlage                                                           |
| <b>AVR</b>               | automatic voltage regulator                                      | Automatischer Spannungsregler                                                        |
| <b>AWE</b>               | Automatische Wiedereinschaltung                                  | Schutzfunktion zur Wiederinbetriebnahme nach kurzzeitigen Störungen                  |
| <b>BESS</b>              | Batterie-Energiespeichersystem                                   |                                                                                      |
| <b>BV</b>                | Betriebsvereinbarung                                             | Regelt die Zusammenarbeit im Betrieb zwischen Swissgrid und Anschlussnehmer          |
| <b>CSV</b>               | Comma-separated values                                           | Dateiformat                                                                          |
| <b>DC</b>                | Direct current                                                   | Gleichstrom                                                                          |
| <b>DEKWE</b>             | Direkter Eingriff in den Kraftwerks-Einsatz                      |                                                                                      |
| <b>EMT</b>               | Electromagnetic transients                                       | Transiente Vorgänge                                                                  |
| <b>EMTP</b>              | Electromagnetic transients program                               | Programm zur Analyse von elektromagnetischen Transienten                             |
| <b>FCR</b>               | Frequency Containment Reserve                                    | Primärregelenergie                                                                   |
| <b>FFR</b>               | Fast Frequency Response                                          | Schnelle Frequenzantwort                                                             |
| <b>FRT</b>               | Fault ride through                                               | Fähigkeit, bei Netzfehlern am Netz zu bleiben und aktiv zur Netzstützung beizutragen |
| <b>FSM</b>               | Frequency sensitive mode                                         | Frequenzabhängige Wirkleistungsregelung                                              |
| <b>KAS</b>               | Kraftwerksanlage-Steuerstelle                                    | Direkter Partner von Swissgrid beim Netzwiederaufbau                                 |
| <b>KESS</b>              | konverterbasiertes Energiespeichersystem                         | Energiespeicher, der über leistungselektronische Umrichter ans Netz angebunden ist   |
| <b>NAV</b>               | Netzanschlussvertrag                                             | Netzanschlussvertrag an das Übertragungsnetz                                         |
| <b>P<sub>MAX,B</sub></b> | Maximale Wirkleistung im Bedarfsmodus                            | Höchste aktive Leistung, die ein Speicher beziehen kann                              |

|                          |                                                  |                                                                                                  |
|--------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>P<sub>MAX,E</sub></b> | Maximale Wirkleistung im Erzeugungsmodus         | Höchste aktive Leistung, die ein Speicher liefern kann                                           |
| <b>P<sub>N</sub></b>     | Nennleistung                                     | Elektrische Nennleistung (in MW oder MVA), auf die ein System oder eine Komponente ausgelegt ist |
| <b>PSSE</b>              | Power System Simulator for Engineering           | Software zur Simulation von Energiesystemen                                                      |
| <b>ROCOF</b>             | Rate of Change of Frequency                      | Frequenzänderungsrate, wichtig für Schutzsysteme                                                 |
| <b>RMS</b>               | Root mean square                                 | Quadratmittelwert, um schwankende Werte mit einer einzigen Zahl zu vergleichen                   |
| <b>RV</b>                | Restructured Version                             |                                                                                                  |
| <b>S<sub>MAX</sub></b>   | Maximale Scheinleistung                          |                                                                                                  |
| <b>SDL</b>               | Systemdienstleistungen                           |                                                                                                  |
| <b>SHBF</b>              | Schnittstellenhandbuch Betriebsführung           | Beschreibt für Betrieb relevante Prozesse zwischen Swissgrid und Anschlussnehmer, Teil der BV    |
| <b>SSCI</b>              | Subsynchronous Control Interactions              |                                                                                                  |
| <b>SSO</b>               | Subsynchronous oscillations Studie               |                                                                                                  |
| <b>SSR</b>               | Subsynchronresonanzen                            | Unerwünschte Schwingungen < 50 Hz, die Netzstabilität oder Generatoren gefährden können          |
| <b>SSTI</b>              | Subsynchronous Torsional Interactions            |                                                                                                  |
| <b>TC</b>                | Transmission Code                                | Branchendokument, Schlüsseldokument                                                              |
| <b>THDI</b>              | Total Harmonic Distortion Current                | Mass für Oberschwingungsverzerrung im Strom                                                      |
| <b>THDV</b>              | Total Harmonic Distortion Voltage                | Mass für Oberschwingungsverzerrung in der Spannung                                               |
| <b>ÜN</b>                | Übertragungsnetz                                 |                                                                                                  |
| <b>ÜNB</b>               | Übertragungsnetzbetreiber                        |                                                                                                  |
| <b>VAS</b>               | Verteilnetzanlagen-Steuerstelle                  | Direkter Partner von Swissgrid beim Netzwiederaufbau                                             |
| <b>VE</b>                | Verfügungserlaubnis                              |                                                                                                  |
| <b>VSE</b>               | Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen |                                                                                                  |

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

## 2.2 Definitionen

Unter kESS werden der Einfachheit halber konverterbasierte Energiespeichersysteme wie Batteriespeichersysteme (BESS) und alternative Energiespeichersysteme (z.B. FlyWheel, Druckluftspeicher, Supercaps etc.) mit direkt angehängtem Speicher verstanden. Power-to-X Anlagen ohne direkten Speicher werden in diesem Dokument nicht abgehandelt.

## 2.3 Vorzeichenkonvention

In diesem Dokument wird grundsätzlich das Verbraucherzählpfeilsystem angewendet:

$Q < 0$ , negativer Wert: Lieferung induktiver Blindleistung an das Übertragungsnetz führt zu einer Erhöhung der Spannung am Einspeiseknoten, Verhalten wie Kapazität;

$Q > 0$ , positiver Wert: Bezug induktiver Blindleistung aus dem Übertragungsnetz führt zu einer Absenkung der Spannung am Einspeiseknoten, Verhalten wie Induktivität.

Für die Wirkleistungsbereitstellung gelten dieselben Vorzeichen. In der Tabelle 2 ist eine Übersicht zur Vorzeichenkonvention.

|                             | Übererregt (kapazitives Verhalten)                                                                               | Untererregt (induktives Verhalten)                                                                                |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>kESS Bedarfsmodus</b>    | $P > 0$ , das kESS bezieht Wirkleistung aus dem Netz<br><br>$Q < 0$ , das kESS liefert Blindleistung in das Netz | $P > 0$ , das kESS bezieht Wirkleistung aus dem Netz<br><br>$Q > 0$ , das kESS bezieht Blindleistung aus dem Netz |
| <b>kESS Erzeugungsmodus</b> | $P < 0$ , das kESS liefert Wirkleistung an das Netz<br><br>$Q < 0$ , das kESS liefert Blindleistung in das Netz  | $P < 0$ , das kESS liefert Wirkleistung an das Netz<br><br>$Q > 0$ , das kESS bezieht Blindleistung aus dem Netz  |

Tabelle 2: Übersicht Vorzeichenkonvention

## 2.4 Betriebskonvention

In diesem Dokument wird folgende Terminologie verwendet:

- Bedarfsmodus: Bezug von Wirkleistung durch das kESS aus dem ÜN;
- Erzeugungsmodus: Einspeisen von Wirkleistung durch das kESS ins ÜN.

### **3 Anforderungen an das Verhalten des kESS**

#### **3.1 Wirkleistungsregelung und Betriebsmodi**

##### **3.1.1 Steuerung der Wirkleistung im Normalbetrieb**

Die Wirkleistungsregelung des kESS muss so ausgelegt sein, dass sie mit der netzbildenden Regelung in Kapitel 3.5 abzustimmen (grid-forming) koordiniert wird. Die schnelle netzbildende Reaktion erfolgt vorrangig, während die langsamere Frequenzregelung die Wirkleistung auf den vorgegebenen Zielwert bringt. Der Sollwert der Wirkleistung muss sowohl im Erzeugungs- als auch im Bedarfsmodus einstellbar sein, mit einer Mindestauflösung von 0,1 MW. Der Istwert der Wirkleistung darf den Sollwert nicht überschreiten, gemessen als gleitender 10-Sekunden-Mittelwert.

Das kESS muss einen stufenlosen Übergang zwischen Erzeugung und Bedarf ermöglichen (bidirektionaler Betrieb). Die Änderungsrate der Wirkleistung (Ramp Rate) muss sowohl bei Sollwertänderungen als auch bei frequenzbedingten Anpassungen begrenzt sein. Der einstellbare Bereich für die Rampen reicht von mindestens 10% bis 100% der Nennleistung pro Minute. In der BV [5] und Anhängen wird die maximale Änderung der Wirkleistung festgelegt. Die Änderung muss linear und ohne Sprünge erfolgen. Für den Systemdienstleistungsmarkt können weitergehende Anforderungen gelten.

##### **3.1.2 Änderung von Regelungsmodi**

Der Wechsel zwischen den Betriebsmodi und Sollwerten muss jederzeit lokal und fernbedient möglich sein und darf keine abrupten Leistungsänderungen im Netz verursachen.

#### **3.2 Blindleistungsregelung**

##### **3.2.1 Spannungs- und Blindleistungsregelung**

Das kESS muss Spannung bzw. Blindleistung automatisch, kontinuierlich und stufenlos regeln können, Details dazu liefert das aktuelle Spannungshaltungskonzept [4]. Änderungen der Blindleistung am Anschlusspunkt müssen analog zu Kapitel 3.1.1 erfolgen. Die Regelung darf durch Frequenz- und Spannungsschwankungen oder kurzzeitige Störungen nicht beeinträchtigt werden.

Der Regelbereich muss der tatsächlichen Blindleistungskapazität des kESS entsprechen und darf nicht künstlich begrenzt werden. Technisch notwendige Begrenzungen sind zu dokumentieren und zu begründen.

Die Regelung muss stabil auf schrittweise, sprunghafte und kontinuierliche Änderungen reagieren und darf keine Schwingungen verursachen. Im grid-forming Modus ist die Blindleistung keine unabhängig regelbare Grösse und ist ein Ergebnis aus der Spannungsregelung. Wenn die Spannungsregelung mit einem Q(V)- oder V-Statik-Mechanismus arbeitet, kann der Blindleistungs-Statik-Sollwert unabhängig eingestellt werden. In diesem Fall reagiert die schnelle Spannungs-/grid-forming-Regelung zuerst, während die Blindleistungsregelung auf den Zielwert führt (Kaskadenregelung).

Vor der Inbetriebnahme sind die Regelkonzepte mit Swissgrid abzustimmen. Ab erster Inbetriebnahme ist die Spannungsregelung zu erbringen. Bei Bedarf sind die Regelungseinstellungen während des Betriebs anzupassen, um die jeweils geltenden Vorschriften einzuhalten.

##### **3.2.2 Blindleistungskapazität**

Für kESS gilt die aktive Spannungshaltung gemäss TC Kapitel 4.4.3. Das kESS muss Blindleistung (Q) einspeisen und beziehen können.

Das kESS mit Energiespeicheranlage und Wechselrichter wird als eine Einheit betrachtet und muss Blindleistungsressourcen unter Berücksichtigung der Capability Curve gemäss Abbildung 1 bereitstellen.

Bei Nennleistung muss Blindleistung in sowohl positiver als auch negativer Richtung von mindestens  $\cos(\Phi) = 0,925$  zur Verfügung gestellt werden können. Ein Blindleistungskapazitätsdiagramm analog zu Abbildung 2 und Abbildung 3 ist erforderlich. Höhere Blindleistungsbereitstellung ist zulässig und erwünscht.

Bei allen Betriebszuständen einschliesslich dessen eines Wirkleistungsaustauschs von Null muss die Einheit in der Lage sein, Blindleistung gemäss Capability Curve in Abbildung 1 und Blindleistungskapazitätsdiagramm Abbildung 2 und Abbildung 3 einzuspeisen bzw. zu beziehen.

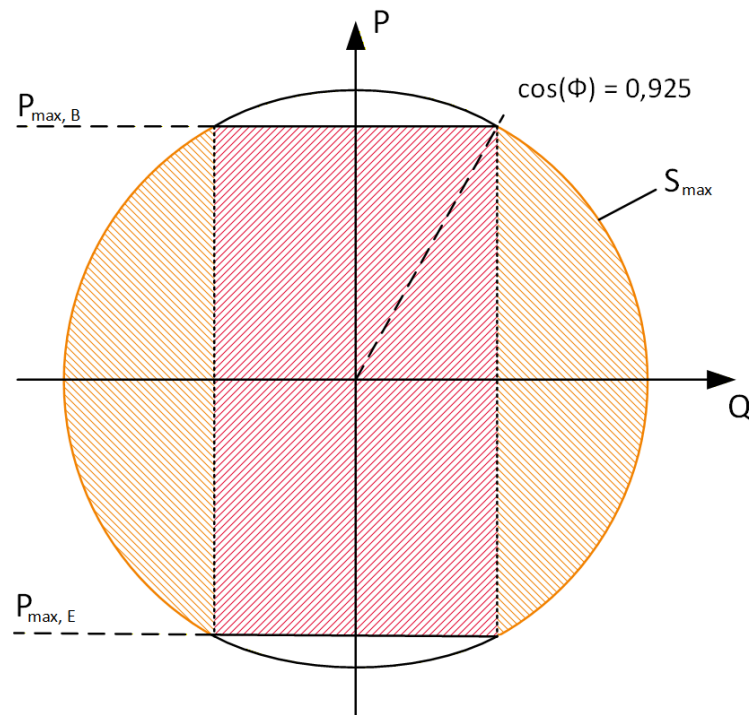


Abbildung 1: Blindleistung muss unter Berücksichtigung der Capability Curve bereitgestellt werden

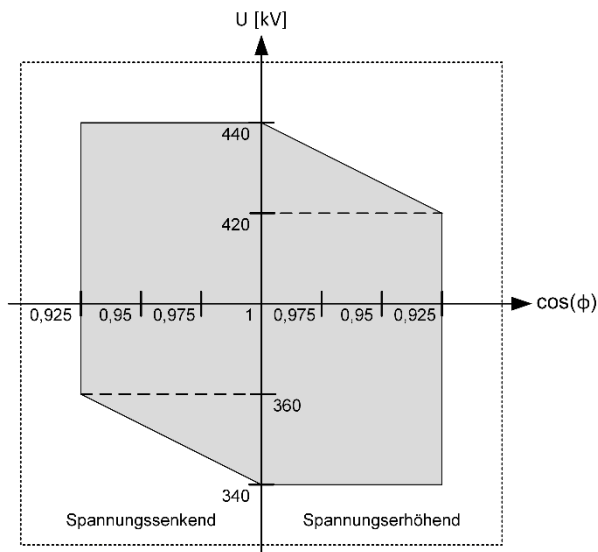


Abbildung 2: Blindleistungskapazitätsdiagramm 380 kV

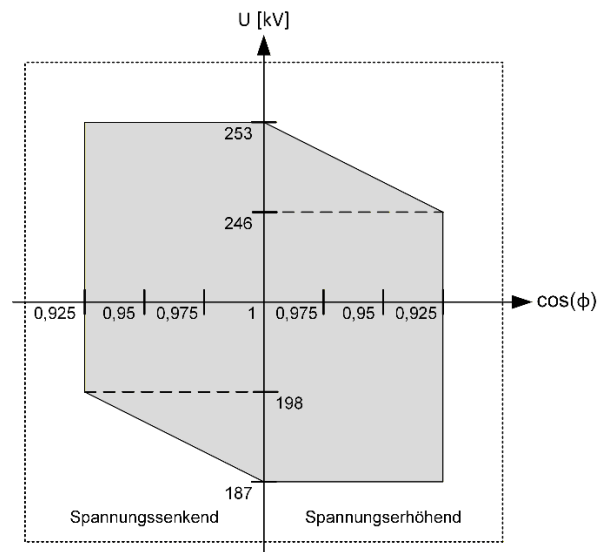


Abbildung 3: Blindleistungskapazitätsdiagramm 220 kV

### 3.2.3 Blindstromversorgung

Ein kESS untersteht der aktiven Spannungshaltung gemäss Spannungshaltungskonzept [4] und muss deshalb erfolgreich für die aktive Spannungshaltung präqualifiziert werden.

Teilnehmer an der aktiven Spannungshaltung müssen Swissgrid betriebliche Informationen zu ihren Anlagen zur Verfügung stellen (u.a. Wirkleistungs-Blindleistungs-Diagramm).

Ein kESS muss bei Unterspannung (d.h. tiefer als die untere Grenze für den Dauerbetrieb gemäss Schnittstellenhandbuch Betriebsführung (SHBF)) kapazitiven Blindstrom und bei Überspannung (d.h. höher als die obere Grenze für den Dauerbetrieb gemäss SHBF) induktiven Blindstrom einspeisen. Die Einspeisung von Blindstrom ( $I_q$ ) muss in diesen Fällen Vorrang vor Wirkstrom ( $I_p$ ) haben. Beim Betrieb innerhalb des normalen Spannungsbereichs hat die Einspeisung von Wirkstrom ( $I_p$ ) Vorrang.

### 3.2.4 Widerstandsfähigkeit gegen kurzzeitige Unter- und Überspannungen

Das kESS muss in der Lage sein, während und nach einer kurzzeitigen Unter- oder Überspannung, die möglicherweise andere Frequenzkomponenten enthält, am Anschlusspunkt gemäss Kapitel 4.1 und Abbildung 4 weiterzuarbeiten, ohne sich vom Netz zu trennen. Die Anforderung an die Unter- und Überspannungsfestigkeit gilt für alle Betriebszustände, Fehlerfälle und Schaltvorgänge. Die Anforderung an die Spannungsfestigkeit wird mittels folgender Bedingungen festgelegt:

- Vor der Unter- bzw. Überspannung ist die Spannung am Anschlusspunkt des kESS im Normbereich;
- Vor der Spannungsstörung speist das kESS keine Blindleistung an dem Anschlusspunkt ein und bezieht keine Blindleistung aus dem Anschlusspunkt;
- Vor der Spannungsstörung ist der automatische Spannungsregler (AVR) des kESS in Betrieb;
- Es wird davon ausgegangen, dass die Kurzschlussleistung des Anschlusspunktes vor und nach einer Störungsbehebung am unteren Ende des möglichen Bandes liegt.

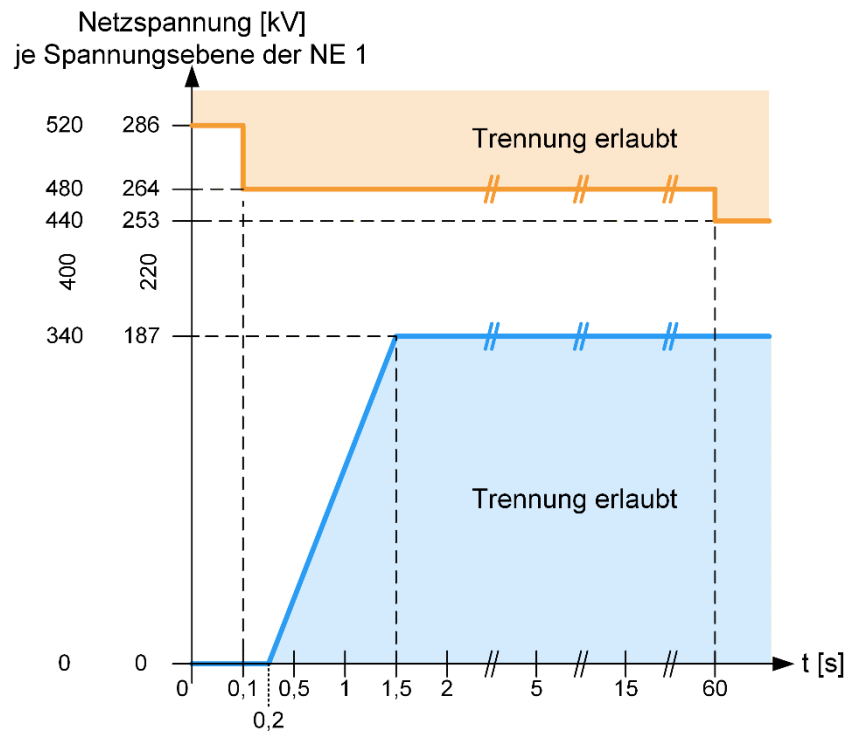


Abbildung 4: Verhalten zur Fehlerüberbrückung bei kurzzeitigen Über- oder Unterspannungen

### 3.2.5 Wiederherstellung der Wirkleistung nach einer Spannungsstörung

Nach einer kurzzeitigen Spannungsstörung muss das kESS die vor der Störung eingespeiste bzw. bezogene Wirkleistung innerhalb von drei Sekunden wiederherstellen, falls das kESS im grid-following Modus arbeitet. Als wiederhergestellt gilt die Wirkleistung, wenn sie am Netzanschlusspunkt das vorherige Niveau mit einer Toleranz von  $\pm 5\%$  des Sollwerts erreicht. Dauerhafte Abweichungen oder Leistungsänderungen infolge der Störung sind nicht zulässig. Im grid-following gilt diese Voraussetzung nicht, da die Wirkleistungseinspeisung nach einer Störung von der resultierenden Netzfrequenz abhängig ist.

Wenn die Wiederherstellung der Wirkleistung spannungsabhängig ist, muss diese Abhängigkeit inklusive einer technischen Beschreibung der Auswirkungen auf die Wiederherstellung transparent dokumentiert an Swissgrid übermittelt werden.

### 3.2.6 Spannungsregelung

Das kESS muss so betrieben werden können, dass dem Spannungsplan von Swissgrid zeitgenau gefolgt werden kann.

Der Sollwert für die Spannungsregelung muss innerhalb der zulässigen Spannungsgrenzen des Anschlusspunktes in Schritten von höchstens 0,1 kV einstellbar sein. Änderungen des Sollwerts, lokal oder von fern, müssen über eine Rampenfunktion erfolgen, die die durchschnittliche Spannungsänderungsrate auf maximal 0,1 kV/s begrenzt – sofern nicht im netzbildenden Modus.

Bei Spannungssprüngen am Anschlusspunkt von weniger als  $\pm 0,02$  p.u. muss das kESS wie folgt reagieren:

1. Die netzbildende Regelung gemäss dem Kapitel 3.5 Netzbildende Eigenschaften steuert die schnelle Anfangsreaktion der Blindleistung;
2. Die Anstiegszeit der Blindleistungsreaktion von 0% auf 80% der Gesamtänderung darf 1 s nicht überschreiten;
3. Die Überschwingung darf maximal 15% der Gesamtänderung betragen;
4. Die Blindleistungsreaktion muss sich innerhalb von 5 s auf den Zielwert einpendeln;
5. Die Abweichung im eingeschwungenen Zustand darf  $\pm 5\%$  der Veränderung nicht überschreiten;
6. Der Startzeitpunkt für die Zeitangaben ist der Zeitpunkt der Sollwertänderung.

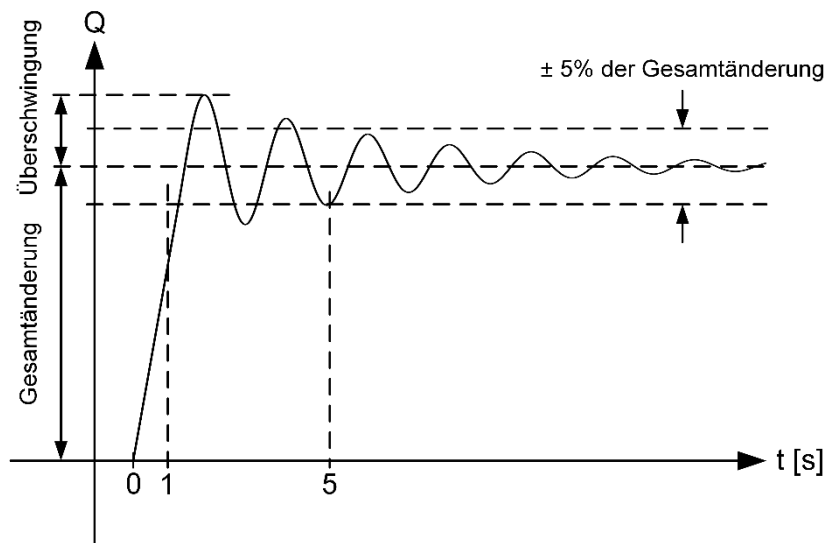


Abbildung 5: Blindleistungsregelung bei Spannungssprüngen

Bei Änderungen an bestehenden Anlagen, die die Spannungsregelung beeinflussen, legt Swissgrid die Anforderungen im Einzelfall fest.

### 3.3 Voraussetzungen für die (Wieder-)Inbetriebnahme

Der Bezug oder die Produktion von Wirkleistung des kESS nach einer fehlenden Übertragungsnetzspannung von mindestens 5 Minuten darf erst wieder erfolgen, wenn dies von Swissgrid, einer Kraftwerksanlagen-Steuerstelle (KAS) oder Verteilnetzanlagen-Steuerstelle (VAS) mündlich freigegeben worden ist.

Bei einer dauerhaften Vektorverschiebung (Phasensprung) der Netzspannung von bis zu  $\pm 30$  Grad während einer Spannungsstörung darf sich das kESS nicht abschalten. Dasselbe gilt bei mehreren aufeinanderfolgenden Spannungsstörungen.

### 3.4 Resonanzen und Regler-Interaktionen

Der Umrichter darf in keinem Betriebszustand harmonische Schwingungen verursachen, die die zulässigen Grenzwerte - IEC 61000-3-6 [6] im Swissgrid-Netz überschreiten. Der Umrichter darf elektrische Resonanzen im Swissgrid-Netz nicht aktiv anregen, d. h. keine rückgekoppelte Regelung verwenden.

### 3.5 Netzbildende Eigenschaften

kESS müssen Konverter verwenden, die fähig sind, im netzbildenden (grid-forming) Modus zu arbeiten. Im folgenden Abschnitt wird präzisiert, welche allgemeinen Anforderungen das kESS im netzbildenden Modus zu erfüllen hat.

Die netzbildende Regelung eines kESS muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Das kESS muss jederzeit aktiv und betriebsbereit sein, sobald das kESS mit dem Netz verbunden ist. Änderungen oder Störungen im Netz dürfen die Betriebsart nicht beeinflussen;
- Der Wechsel zwischen netzbildendem und netzfolgendem Modus und zurück muss ohne Betriebsunterbrechung erfolgen;
- Die Regelung muss auch dann betriebsbereit sein, wenn das kESS zu einem beliebigen Zeitpunkt innerhalb der Grenzen seiner Nennkapazität betrieben wird – sowohl im Erzeugungs- als auch im Bedarfsmodus – inklusive der erforderlichen Blindleistungskapazität;
- Die Betriebsbereitschaft muss unabhängig vom aktuellen Ladezustand des kESS gewährleistet sein.
- Die Regelung muss in allen Betriebsmodi der Wirkleistungsregelung (z.B. Konstantleistungsregelung, Frequenzregelung) uneingeschränkt funktionieren.
- Ebenso muss die Blindleistungsregelung gemäss Kapitel 3.2 betriebsbereit sein.
- Koordination mit Stromgrenzen: Falls der Konverter die Strombegrenzung erreicht, kann keine grid-forming-Regelung gewährleistet werden. Durch dies gilt folgende Voraussetzung nur solange der Konverter unter der Strombegrenzung arbeitet. Eine notwendige Begrenzung des Stroms darf weder die Funktion der netzbildenden Regelung unterbrechen noch den sicheren Betrieb des kESS gefährden. Die festgelegten Stromgrenzen müssen der tatsächlichen Leistungsfähigkeit der Anlage entsprechen und die kurzfristige Überlastfähigkeit der eingesetzten Komponenten berücksichtigen. Dabei ist sicherzustellen, dass die Regelung innerhalb dieser Grenzen koordiniert mit anderen Steuerungen arbeitet, um eine kontinuierliche Bereitstellung netzbildender Eigenschaften zu gewährleisten – auch bei Netzstörungen oder dynamischen Lastwechseln muss das kESS koordiniert an den Stromgrenzen der Umrichter arbeiten. Eine Strombegrenzung darf nicht zu einer Unterbrechung der netzbildenden Reglerfunktion führen. Die für die Regelung festgelegten Stromgrenzen müssen der tatsächlichen Leistung der Anlage entsprechen und die kurzfristige Überlastbarkeit der Geräte ausnutzen.
- Die netzbildende Regelung muss mit anderen Steuerungen, sowohl lokal als auch auf Anlagenebene, abgestimmt sein, um eine stabile Betriebsweise sicherzustellen und unerwünschte Wechselwirkungen zu vermeiden.

Eine Überdimensionierung der Kapazität des kESS aufgrund der netzbildenden Regelungsfunktionen ist nicht erforderlich. Limitierungen daraus sind Swissgrid zu melden.

Die folgenden funktionalen Anforderungen gelten für netzbildende Steuerung:

#### 1) **Autonome, schnelle Frequenz- und Spannungsstützung:**

Das kESS muss im Netz eine autonome, nahezu verzögerungsfreie Frequenz- und Spannungsstützung bereitstellen:

- a) Bei einer schrittweisen Vektorverschiebung (Phasensprung) der Netzspannung muss das kESS dieser Verschiebung durch Bereitstellung von Wirk- und Blindleistung entgegenwirken;
- b) Bei einer Amplitudenänderung der Netzspannung muss das kESS durch Einspeisung von Blindleistung die Spannungssteifigkeit lokal erhöhen, siehe Kapitel 3.2.3;
- c) Die Reaktion auf die beiden Anforderungen a) und b) muss innerhalb von 10 ms nach einer Änderung im Netz erfolgen (der Strom muss sich entsprechend der Regelung anpassen). Ziel ist es, den Spannungszeiger der internen Spannungsquelle im subtransienten Zeitrahmen mit der gesamten verfügbaren Stromkapazität konstant zu halten.

## 2) Dämpfung von Netzschwingungen und Sicherstellung der Kleinsignalstabilität:

Gemäss dem TC, Kapitel 6.5.6 darf die Reaktion des kESS auf Frequenz- und Spannungsschwankungen im Stromnetz diese nicht verstärken, sondern dämpfen:

- a) das kESS muss kleinsignalstabil arbeiten;
- b) Besonders wichtig ist die Dämpfung von Schwingungen in folgenden Frequenzbereichen:
  - i) 0,1–1 Hz: Leistungspendeln (Inter-Area Oscillations);
  - ii) 1–2 Hz: Lokale Oszillationen;
  - iii) 2–15 Hz: Spannungsschwingungen und Steuerungsinteraktionen;
  - iv) 15–45 Hz: Subsynchron- und Resonanzschwingungen.
- c) Falls das kESS diese Anforderungen nicht von Natur aus erfüllt, ist eine geeignete Dämpfungsregelung zu implementieren.

### 3.5.1 Stabilität

Das kESS und seine Steuerung müssen so ausgelegt sein, dass ein stabiler Betrieb auch im Netz mit hohem Anteil an kESS-Anlagen gewährleistet ist. Stabil bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das kESS innerhalb der in Kapitel 4.1 präzisierten Spannungs- und Frequenzgrenzen dauerhaft synchron am Netz bleibt und in jedem zulässigen Betriebspunkt stationär und ohne Schwingungen arbeitet.

Bei Netzstörungen wie Spannungsschwingungen oder Phasensprüngen muss das kESS aktiv gegenregeln, um die Abweichungen zu dämpfen und die Netzstabilität zu unterstützen. Bei dauerhaften Überschreitungen der zulässigen Spannung am Anschlusspunkt darf sich das kESS automatisch abschalten, siehe Abbildung 6 in Kapitel 4.1. Das kESS muss auch bei ein- oder dreiphasigen Selbstabschaltungen auf vermaschten Leitungen am Netz bleiben, sofern der eigene Netzabschnitt nicht abgeschaltet wird. Bei plötzlichen Phasensprüngen der Netzspannung bis zu  $\pm 30$  Grad sowie in einem weiten, von Swissgrid individuell pro Anschluss festgelegten Kurzschlussleistungsbereich muss das kESS stabil weiterarbeiten und synchron bleiben, siehe Abbildung 4 in Kapitel 3.2.4.

### 3.5.2 Synthetische Trägheit (Virtual Inertia)

kESS müssen in der Lage sein, synthetische Trägheit bereitzustellen, um die Frequenzstabilität des ÜN unmittelbar nach plötzlichen Leistungsungleichgewichten zu unterstützen. Da kESS im Gegensatz zu synchronen Maschinen keine physikalische Trägheit besitzen, muss synthetische Trägheit mittels geeigneten Regelstrategien, wie zum Beispiel einer Virtual Synchronous Machine (VSM), emuliert werden.

Die Bereitstellung von synthetischer Trägheit muss spätestens innerhalb von maximal 10 ms nach einer Frequenzstörung beginnen und eine stabilisierende Wirkung auf das Netz entfalten. Die Reaktion erfolgt durch gezielte Einspeisung oder Ausspeisung von Wirkleistung proportional zur Frequenzänderungsrate (RoCoF).

Diese Funktion muss unabhängig vom Betriebsmodus (Erzeugen oder Bedarf) aktiv sein, mit anderen Regelungen (z.B. Frequenz- und Wirkleistungsregelung) koordiniert werden und die Stromgrenzen der Konverter berücksichtigen. Die Abbildung und der Nachweis dieser Regelung in Simulationsmodellen (RMS und EMT) erfolgen gemäss dem Kapitel 6.2.

## **3.6 Netzurückwirkungen**

### **3.6.1 Allgemeines**

Das kESS ist so zu planen, zu bauen und zu betreiben, dass Rückwirkungen auf das ÜN und die Anlagen anderer Kunden auf ein zulässiges Mass begrenzt werden.

Die maximal zulässigen Amplituden für Oberschwingungsströme der kESS werden von Swissgrid projektspezifisch festgelegt und hängen vom Standort des kESS und der Beschaffenheit des umliegenden Netzes ab.

Grundlagen dazu sind insbesondere:

- die Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen DACHCZ [7];
- die Planungspegel gemäss IEC/TR 61000-3-6 [6] und der SN EN 50160 [8].

Swissgrid trägt die Verantwortung für die Koordination der Störgrössen über alle Netzebenen hinweg. Der zulässige Störeintrag eines kESS ins ÜN stellt daher nur einen Teil der Verträglichkeitspegel dar.

Werden durch Swissgrid projektspezifisch detailliertere Verfahren zur Grenzwertbestimmung angewendet, so ist deren Anwendung zu bevorzugen. Bei der Notwendigkeit einer Verschärfung teilt Swissgrid den technischen Nachweis (z.B. Netzdaten, Berechnungen) mit dem Kunden. Abweichungen werden schriftlich vereinbart.

### **3.6.2 Bewertung der Netzurückwirkungen**

Swissgrid führt am geplanten Anschlussknoten der kESS-Anlage zur Bestimmung des Hintergrund-Pegels eine Netzqualitätsmessung durch. Die Messung wird unter vergleichbaren Bedingungen (insbesondere Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt) im Betrieb der kESS-Anlage wiederholt. Die Betriebszustände der kESS während der Messung sind mit Swissgrid abzustimmen. Auf Grundlage der Messergebnisse wird eine Bewertung der Netzurückwirkungen vorgenommen.

Für Messungen sind grundsätzlich die Messverfahren gemäss SN EN 61000-4-30 (Klasse A) [6] anzuwenden.

### **3.6.3 Massnahmen**

Treten unzulässige Rückwirkungen auf, ist der Anschlussnehmer verpflichtet, geeignete Massnahmen zur Begrenzung zu treffen. Diese Massnahmen sind mit Swissgrid abzustimmen.

Alle Massnahmen zur Reduktion von Netzurückwirkungen bedürfen der Prüfung und Zustimmung durch Swissgrid.

Nach Implementierung von Massnahmen zur Reduktion von Netzurückwirkungen wird eine Netzqualitätsmessung durchgeführt, aufgrund derer die Wirksamkeit der Massnahmen bewertet wird.

## 4 Betriebsverhalten

### 4.1 Betriebsgrenzen

Im TC Kapitel 6 [1] sind grundlegende Bedingungen für den Anschluss an das ÜN formuliert. Analog zum Kapitel 6.5 im TC werden in diesem Kapitel präzisierte und zusätzliche Anforderungen an die Eigentümer von kESS am ÜN beschrieben, welche im TC nicht beschrieben sind. Ansonsten gilt der TC.

kESS müssen innerhalb der in Abbildung 6 angegebenen Werte der Netzspannung und der Netzfrequenz betrieben werden können, d.h. in diesen Bereichen dürfen diese nicht durch spannungs- oder frequenzabhängige Auslösegeräte automatisch vom Netz getrennt werden. Des Weiteren darf sich im «dauernd» dargestellten Bereich kein kESS vom Netz trennen und den mit Zeiten beschrifteten Bereichen muss das kESS den jeweiligen Zeitwert am Netz bleiben, soweit dies technisch, z.B. mit einem Transformator mit automatischem Stufensteller, möglich ist. Wenn die Spannungs- bzw. Frequenzabweichung noch grösser ist (grauer Bereich), dann ist die sofortige Netztrennung erlaubt. Die Spannungswerte gelten für den Anschlusspunkt. Das kESS muss in der Lage sein, sich zwischen 49 Hz und 51 Hz mit dem ÜN zu verbinden.

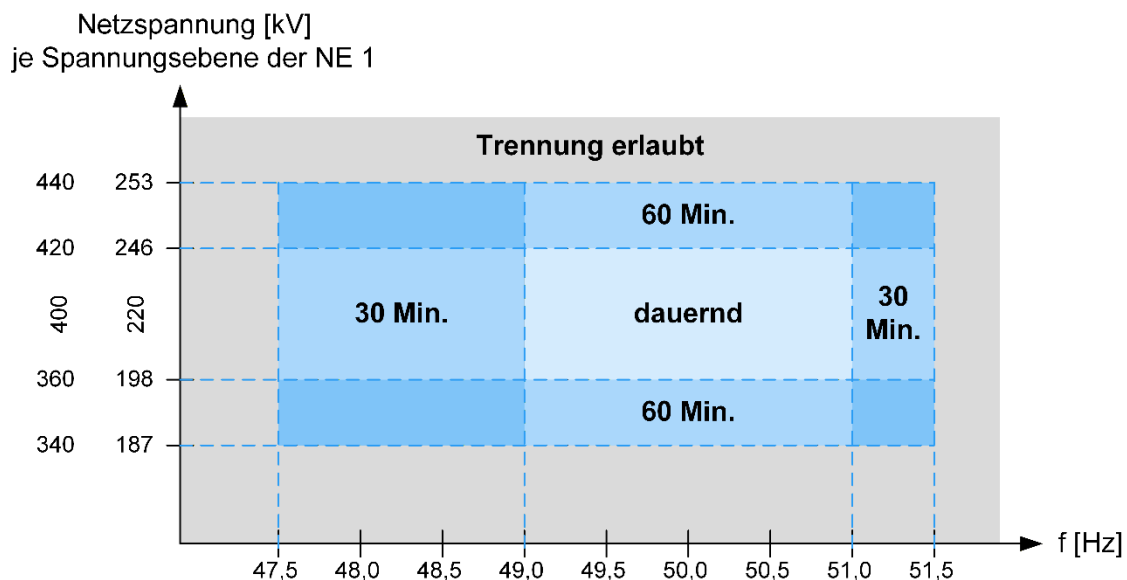


Abbildung 6: Frequenz- und Spannungsbereich, bei welchem sich kESS nicht trennen dürfen

### 4.2 Betriebsspannung und Frequenzbereich

Das kESS muss im Normalbetrieb in der Lage sein, stetig innerhalb des in Kapitel 4.1 festgelegten Spannung- und Frequenzbereichs zu arbeiten.

### 4.3 Frequenzänderungsrate (RoCoF)

Das kESS muss in der Lage sein, den normalen Betrieb fortzusetzen, solange die gemittelte Frequenzänderungsrate von  $\pm 2,0$  Hz/s, ermittelt über ein gleitendes Zeitfenster von 500 ms, nicht überschritten ist.

Die Messung der Frequenzänderungsrate darf nicht auf plötzliche Änderungen der Spannungswellenform aufgrund von Störungen im System reagieren. Um den RoCoF und die dafür benötigte Frequenz zu messen, müssen gängige Standards wie die IEC-IEEE Std 60255-118-1 eingehalten werden.

#### 4.4 Wiedereinschaltung nach Netztrennung

Eine Netztrennung des kESS aufgrund einer Störung oder eines geplanten Ausfalls darf nicht dazu führen, dass nach Wiederherstellung der Netzverbindungen Änderungen am bestimmungsgemässen Betrieb des kESS vorgenommen werden (z.B. Rücksetzen der Konfigurationen der Geräte auf die Werkseinstellungen). Zudem muss eine Wiederverbindung nach Netztrennung sowie der eingestellte Betriebsmodus gemäss Kapitel 3.3 erfolgen.

#### 4.5 Kontaktstelle des kESS-Betreibers

Der Betreiber des kESS muss über eine Kraftwerksanlagen-Steuerstelle (KAS) gemäss BV [5] verfügen, die jederzeit (24/7 an allen Tagen des Jahres) über den Zustand des kESS informiert ist und dessen Betrieb in Echtzeit steuern kann – vor Ort oder aus der Ferne.

Die KAS muss:

- den Betriebszustand und Regelungsmodus ändern können;
- externe Steuerbefehle genehmigen oder begrenzen;
- Bei direktem Eingriff in den Kraftwerks-Einsatz (DEKWE) ohne Zeitverzögerung reagieren können;
- bei Fernsteuerung über die relevanten Messdaten und geeignete Steuerungstechnik verfügen.

Auf Anforderung von Swissgrid muss die KAS-Betriebsführung den Betriebszustand oder Sollwerte des kESS ändern können. Die Anforderung kann elektronisch oder telefonisch erfolgen.

#### 4.6 Frequenzregelung

Die Frequenzregelung muss dabei in der Lage sein, bei den Übergängen zwischen den Frequenzbereichen und zwischen Produktions- und Bezugsmodus kontinuierlich zu funktionieren. Dabei gilt es zu beachten, dass die Statik wie folgt definiert ist:

$$Statik = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_N}} = - \frac{\frac{f - f_0}{f_n}}{\frac{P_{e,b} - P_0}{P_N}}$$

- $f$ : Frequenz [Hz]
- $f_n$ : Nennfrequenz [50 Hz]
- $f_0$ : Sollfrequenz [Hz]
- $P_e$ : Wirkleistung des kESS im Erzeugungsmodus
- $P_b$ : Wirkleistung des kESS im Bedarfsmodus
- $P_{e,b}$ :  $P_e$  oder  $P_b$ , je nachdem ob die Formel für den Erzeugungs- oder Bedarfsmodus angewendet wird
- $P_0$ : Wirkleistungssollwert des kESS
- $P_N$ : Nennleistung des kESS im Erzeugungsmodus

#### 4.6.1 Überfrequenz

Die Überfrequenzsteuerung muss stets aktiviert sein. Bei Netzfrequenzen über 50,2 Hz muss das kESS:

- im Erzeugungsmodus seine Wirkleistung linear reduzieren;
- im Bedarfsmodus seine Wirkleistungsaufnahme linear erhöhen.

Alle kESS, welche an das ÜN angeschlossen sind, müssen ab einer Frequenz von 50,2 Hz die Wirkleistung linear reduzieren mit einer Statik zwischen 2% und 12%. Als Standardwert soll 5% eingestellt sein.

Die Leistungsreaktion muss innerhalb von 1 Sekunde nach dem Überschreiten von 50,2 Hz einsetzen, um ein Überschreiten der kritischen Frequenz von 51,5 Hz zu verhindern. Die oben geschilderten Massnahmen kommen insbesondere dann zur Anwendung, wenn sich das ÜN gemäss TC Kapitel 2 in einer kritischen Situation befindet. In diesem Fall sind die oben genannten Anweisungen zuzüglich zu den Massnahmen gem. TC Kapitel 5.3 zu erfüllen und erfolgen zusätzlich zu der bereits erbrachten Regelernergie.

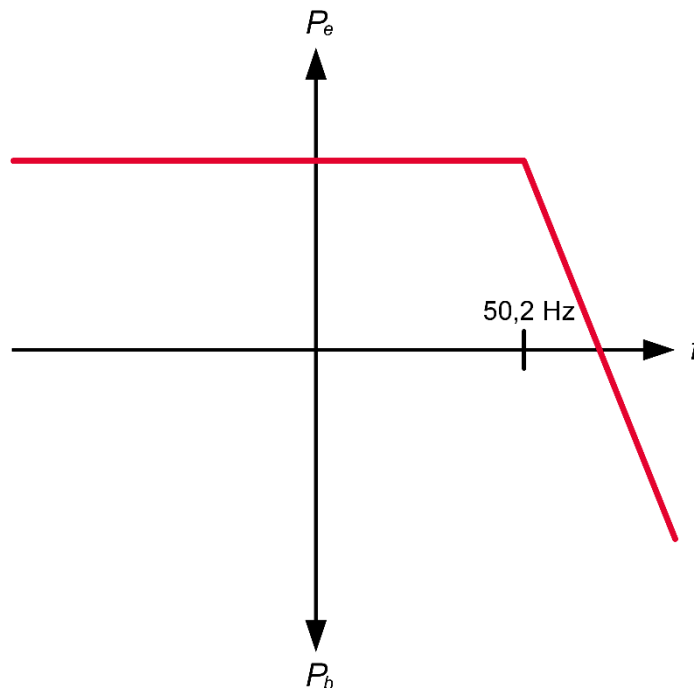


Abbildung 7: Frequenzabhängigkeit in ausserordentlicher Situation – Überfrequenz

#### 4.6.2 Unterfrequenz

Bei Frequenzen unter 49,8 Hz muss das kESS im Bedarfsmodus:

- Die Wirkleistungsaufnahme linear auf 0 MW reduzieren;
- Falls technisch möglich, zur Netzstabilisierung die Wirkleistungsabgabe erhöhen;
- Bei 0 MW weiterhin betriebsbereit bleiben, um somit nach Können Blindleistung netzdienlich einzuspeisen.

Alle kESS, welche an das ÜN angeschlossen sind, müssen ab einer Frequenz von 49,8 Hz die Wirkleistungsaufnahme linear reduzieren mit einer Statik zwischen 0,2% und 5%. Als Standardwert muss 1,6% eingestellt sein.

Die Leistungsreaktion muss innerhalb von 1 Sekunde nach dem Unterschreiten von 49,8 Hz einsetzen, um ein Unterschreiten der kritischen Frequenz von 48,5 Hz zu verhindern. Die oben geschilderten Massnahmen kommen insbesondere dann zur Anwendung, wenn sich das ÜN gemäss TC Kapitel 2 in einer kritischen Situation befindet. In diesem Fall sind die oben genannten Anweisungen zusätzlich zu den Massnahmen gem. TC Kapitel 5.3 zu erfüllen und erfolgen zusätzlich zu der bereits erbrachten Regelernergie.

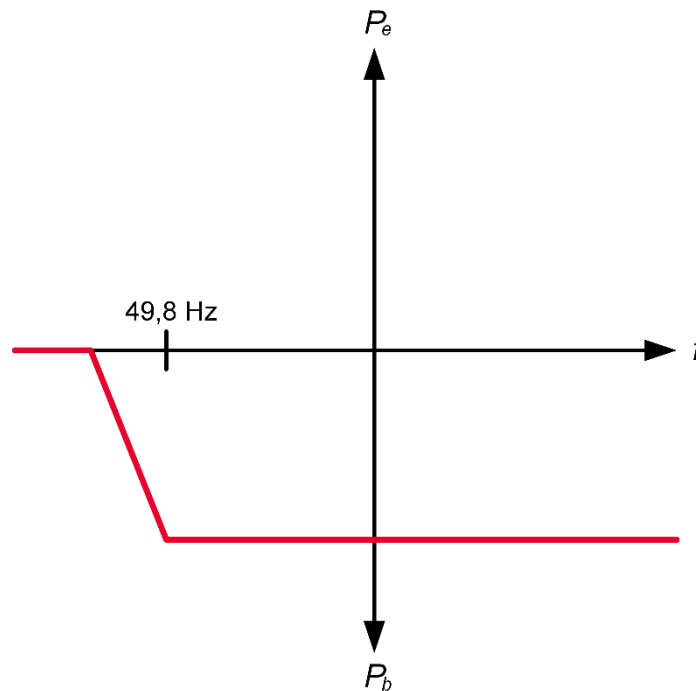


Abbildung 8: Frequenzabhängigkeit in ausserordentlicher Situation – Unterfrequenz

## 4.7 Verhalten bei Netzwiederaufbau

Nach einem Netzausfall dürfen kESS bei zurückkehrender Spannung keine Lade- oder Einspeisevorgänge durchführen. Wirk- und Blindleistungsbezug- und abgabe sind unter allen Umständen mit Swissgrid zu koordinieren. Ein kontrollierter und stabiler Netzwiederaufbau des vorgelagerten Netzes ist immer prioritär zu behandeln. kESS, welche sich während bzw. nach des Netzausfalls im Inselbetrieb befinden, melden sich proaktiv bei Swissgrid.

## **5 Ausführung des Netzanschlusses**

### **5.1 Primärtechnik am Anschlusspunkt**

Für alle Primärtechnik-Anlagen und -Komponenten gelten die Swissgrid Standards. Dieses Kapitel beschreibt ergänzend spezifische Anforderungen und Besonderheiten beim Anschluss eines kESS.

#### **5.1.1 Allgemeines**

Swissgrid gibt die für die Dimensionierung des für das kESS erforderlichen Kennwerte am Netzanschlusspunkt vor. Diese beinhalten unter anderem:

- Maximal anschliessbare Scheinleistung;
- Nennspannung;
- Bemessungsspannung für Betriebsmittel;
- Betriebsbereich Spannung;
- Betriebsbereich Frequenz;
- Maximaler Betriebsstrom;
- Maximale Erd- und Kurzschlussströme;
- Isolationspegel.

Ferner stellt Swissgrid dem kESS zur Dimensionierung der anschlussnehmereigenen Schutzeinrichtungen und für Netzrückwirkungsbetrachtungen folgende Daten zur Verfügung:

- voraussichtlich minimaler Anfangs-Kurzschlusswechselstrom und der Impedanzwinkel aus dem Netz von Swissgrid am Netzanschlusspunkt;
- gesamte Fehlerabschaltzeit des Hauptschutzes aus dem Netz von Swissgrid am Netzanschlusspunkt.

Bei der Bemessung der Betriebsmittel sind Kurzschlussströme sowohl aus dem Netz von Swissgrid als auch aus dem kESS zu berücksichtigen.

Der Anschlussnehmer muss die in seinem Eigentum befindlichen elektrischen Anlagen für Kurzschlussströme mindestens im Rahmen der Kurzschlussfestigkeit der Anlagen von Swissgrid am Netzanschluss auslegen. Bei perspektivisch höheren relevanten Kurzschlussströmen gibt Swissgrid dem Anschlussnehmer die geforderte Kurzschlussfestigkeit des kESS vor. Wird durch einen Anstieg der Kurzschlussleistung über die bisherige Kurzschlussfestigkeit der Anlagen des Netzbetreibers am Netzanschluss hinaus eine Erhöhung der Kurzschlussfestigkeit des bestehenden kESS erforderlich, wird die Massnahme mit Swissgrid abgestimmt.

#### **5.1.2 Anschlussanlage kESS**

Der Anschluss der kESS erfolgt in der Swissgrid-Schaltanlage über ein Anschlussfeld gemäss Abbildung 9 oder, falls es beispielsweise Anschlussleistung oder spezifische Anforderungen an die Verfügbarkeit nötig machen, über mehrere Anschlussfelder oder eine eigene Schaltanlage.

Der Anschluss der kESS erfolgt über eine kundenseitige Anschlussanlage am Anschlusspunkt.

Die gesamte Anschlussanlage ist gemäss gültigen Normen und gemäss den anerkannten Regeln der Technik auszuführen. Über Trennvorrichtungen unterteilbare Abschnitte müssen auf Spannungslosigkeit überprüft und geerdet werden können (Erdfixpunkte oder Erdtrenner mit manuellem Antrieb bei grösseren Anschlussdistanzen, bei einem Trafo-Anschluss in AIS, siehe Abbildung 9).

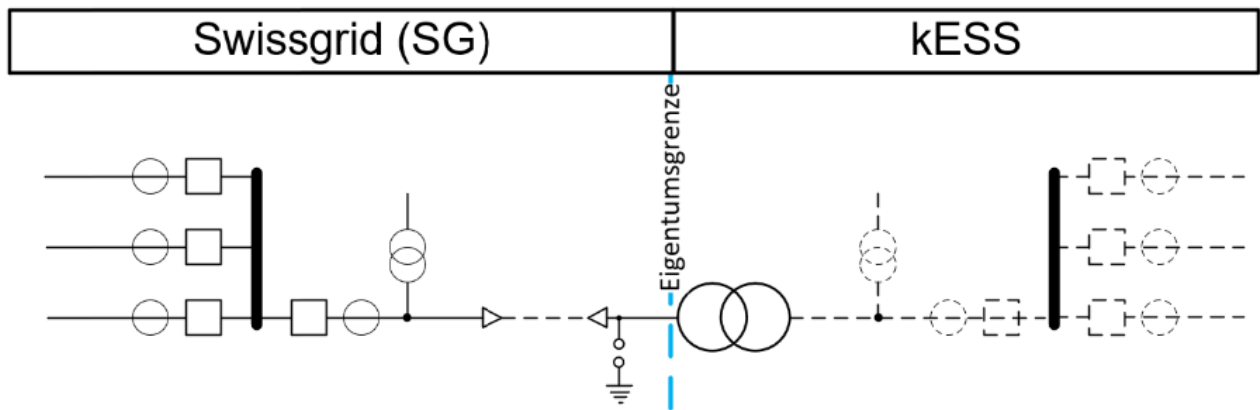


Abbildung 9: Anschluss kESS schematisch

### 5.1.3 Sternpunktbehandlung

Die Sternpunktbehandlung für das ÜN wird durch Swissgrid festgelegt. Für alle Betriebsmittel des Anschlussnehmers, die galvanisch mit dem ÜN von Swissgrid verbunden sind, gibt Swissgrid auch die Art der Sternpunktbehandlung vor.

Der höchstspannungsseitige Sternpunkt der Transformatoren zwischen dem ÜN und dem Netz des Kunden ist herauszuführen und nach Vorgabe von Swissgrid auszuführen und zu beschalten (dies gilt auch für andere sternpunktbildende Betriebsmittel).

Die Isolationskoordination und die Belastbarkeit des Sternpunktes sind zwischen Swissgrid und Anschlussnehmer abzustimmen. Dabei darf die höchstspannungsseitige Sternpunktbehandlung durch das kESS nicht beeinträchtigt werden.

Die Rückwirkungen unsymmetrischer Fehler aus dem kESS sind zu minimieren (insbesondere dürfen keine Nullsystemkomponenten aus dem Netz des Anschlussnehmers übertragen werden). Die gleichzeitige Sternpunkterdung (starr oder strombegrenzend) auf mehr als einer Seite eines Transformators ist daher nicht erlaubt. Bei Bedarf der gleichzeitigen Benutzung mehrerer Sternpunkte an einem Transformator ist ein entsprechendes Konzept mit Swissgrid abzustimmen und zu vereinbaren.

Swissgrid legt die Sternpunktbehandlung nicht nur technisch, sondern auch betrieblich fest, d. h. sie bestimmt, wie die Sternpunkte im laufenden Betrieb zu behandeln und zu überwachen sind.

Der Anschlussnehmer hat sicherzustellen, dass durch den Betrieb des kESS keine unzulässigen DC-Ströme in den Sternpunkten der überspannungsseitigen Wicklungen eingespeist werden.

### 5.1.4 Leistungsschalter

Die höchstspannungsseitigen Leistungsschalter müssen für die sichere Abschaltung aller möglichen Kurzschlussströme sowohl bei kESS-seitigen als auch netzseitigen Fehlern ausgelegt sein.

Leistungsschalter müssen alle geforderten Schaltaufgaben ausführen können, ohne transiente Überspannungen zu erzeugen, die Swissgrid-Anlagenteile beschädigen könnten.

Spezifische Schalt-Anforderungen sind mit Swissgrid abzustimmen.

### **5.1.5 Wandler**

Auswahl und Anschluss der Wandler sind zwischen Swissgrid und dem kESS-Betreiber abzustimmen.

### **5.1.6 Überspannungsableiter**

Bedarf und Spezifikation von Überspannungsableitern zum Schutz des kESS sind mit Swissgrid abzustimmen.

### **5.1.7 Kabelanlagen**

Die Schirmbehandlung und Erdung von Kabelanlagen, die zum Anschluss des kESS dienen, ist mit Swissgrid abzustimmen.

### **5.1.8 Erdungsanlage**

Das Erdungskonzept des kESS ist mit Swissgrid abzustimmen.

Die Erdungsanlage des kESS ist gemäss den Netzdaten von Swissgrid für die maximalen Kurzschluss- sowie Erdschlussströme zu dimensionieren und zu errichten. Die Einhaltung der zulässigen Berührungsspannungen muss messtechnisch nachgewiesen werden. Die Erdungsmessprotokolle inkl. Erdungsplan sind Swissgrid rechtzeitig vor dem erstmaligen Unter-Spannung-Setzen zu übergeben.

Die Erdung des kESS wird standardmässig mit der Swissgrid-Anlagenerdung verbunden. Die Verbindungsleitungen müssen ausreichend dimensioniert sein, um Fehlerströme sicher zu leiten und Potentialdifferenzen zwischen den Erdungsnetzen der Anlagen zu minimieren.

## **5.2 Sekundärtechnik**

### **5.2.1 Allgemeines**

Die Netzelemente auf Seite des ÜN sind gemäss den Anforderungen des Betriebsführungshandbuchs bzw. der BV/ABV [5], [9] zu überwachen und gegebenenfalls zu steuern. Dazu ist ein abgestimmter Signalaustausch zwischen dem kESS und Swissgrid erforderlich.

Der Signalaustausch an der Schnittstelle zwischen ÜNB und kESS hat grundsätzlich den Anforderungen gemäss VSE-Handbuch «Technische Anforderungen an die Schutz- und Leittechniksschnittstellen von Transformatoren zum Übertragungsnetz» [10] zu folgen und ist zwischen den Partnern abzustimmen.

Wenn im Anschlussfeld auf Seite des kESS fernsteuerbare Elemente vorhanden sind (beispielsweise ferngesteuerte Trenner bei mehreren parallel betriebenen Transformatoren auf Seite der kESS oder bei räumlich getrennten Anlagen (Richtwert >300 m)), muss der Betreiber des kESS separate Räumlichkeiten für die Steuer-, Mess- und Schutzeinrichtungen bereitstellen. Diese Räumlichkeiten müssen mit einer geeigneten Stromversorgung ausgestattet, jederzeit für Swissgrid zugänglich und vor unbefugtem Zutritt geschützt sein.

### **5.2.2 Synchronisierung**

Der Netzanschlussnehmer muss ein sicheres synchrones Zuschalten seiner Anlagen an das ÜN ermöglichen (mit eigenen Schaltgeräten).

Der Betreiber der kESS ist für die Steuerungs- und Synchronisierungseinrichtungen seiner Anlage verantwortlich. Die Synchronisierung der kESS hat durch Primärkomponenten im Eigentum des kESS-Betreibers zu erfolgen.

### 5.2.3 Steuerhoheit

Die Steuerhoheit am Anschlusspunkt muss zwischen Swissgrid und dem kESS-Betreiber vor Inbetriebnahme des kESS geregelt werden und muss die Anforderungen des Betriebsführungshandbuchs und der BV/ABV einhalten.

### 5.2.4 Schnittstelle Steuerung Wirk- und Blindleistung

Die Steuerung der kESS muss über eine geeignete Schnittstelle (analoge, binäre Eingänge oder eine Systemschnittstelle) verfügen, über die Swissgrid (z.B. zur Verhinderung eines Netzzusammenbruchs) den Arbeitspunkt der kESS (Wirk- und Blindleistung) beeinflussen könnte. Dies ist aktuell nicht so vorgesehen und wird im Detail im Betriebskonzept des kESS festgehalten. Des Weiteren müssen die im Kapitel 3.2 beschriebenen Vorgaben zur Blindleistungsregelung erfüllt sein.

## 5.3 Schutz

### 5.3.1 Allgemeines

Die Schutzsysteme des kESS werden vom kESS-Betreiber vollständig sichergestellt und müssen die Anforderungen am Anschlusspunktes einhalten als auch mit den in den Swissgrid Standards festgelegten Schutzkonzepten technisch abgestimmt und kompatibel sein. Der Anlagenschutz des kESS muss durch den kESS-Betreiber sichergestellt werden.

Die Schutzsysteme müssen elektrische Fehler auf der kESS-Seite zuverlässig erkennen und selektiv und rückwirkungsfrei abschalten können. Dabei sind die Vorgaben des VSE-Handbuchs «Schutzleitfaden Schweiz» [11] sowie die Festlegungen gemäss TC Kapitel 6.3.7 zu beachten. Innerhalb der zulässigen Spannungs- und Frequenzbereiche dürfen Schutzsysteme nicht auf normale Netzschwankungen reagieren (siehe Kapitel 4).

Zur Gewährleistung eines selektiven Schutzkonzepts sind geeignete Stromwandler vorzusehen.

Die Schutzsysteme dürfen die Anforderungen an das Durchfahren von Netzfehlern nicht beeinträchtigen und sind so auszulegen, dass sie mit den Anforderungen an die frequenzabhängige Regelung der Anlage kompatibel sind und deren festgelegte Reaktion auf schnelle Frequenzänderungen zur Unterstützung der Systemstabilität nicht behindern.

Fehler am Anschlusspunkt müssen ebenfalls erkannt werden, damit sich das kESS nach einer definierten Zeit vom Netz trennen kann. Der Anschlussnehmer hat hierfür geeignete Schutzmassnahmen vorzusehen, dies gilt auch für den Inselbetrieb, falls das kESS inselbetriebsfähig ist. Zusätzlich ist ein Schalterversager-schutz zu integrieren, um das Versagen von Leistungsschaltern im Schutzkonzept zu berücksichtigen.

Erfolgt eine Netztrennung des kESS durch eine Schutzauslösung, darf eine Wiedereinschaltung nur nach Klärung der Störungsursache und nach Freigabe durch Swissgrid erfolgen (keine AWE).

Aufbau und Auslegung der notwendigen Wandler, insbesondere die gemeinsame Nutzung dieser, sind zwischen den Vertragspartnern abzustimmen.

### 5.3.2 Automatische Frequenzentlastung

Der Betreiber des kESS ist dafür verantwortlich, dass das kESS die Anforderungen gemäss VSE-Branchenempfehlung «Technische Anforderungen an die automatische Frequenzentlastung» [12] erfüllt. Dabei ist zu beachten, dass die Anforderungen abhängig vom Betriebszustand unterschiedlich sind und Kapitel 4.6.1 sowie 4.6.2 beachtet und eingehalten werden.

### **5.3.3 Inselnetzerkennung und Inselbetrieb**

kESS können bei Störungen im vorgelagerten Netz zur Deckung des eigenen Energiebedarfs in den Inselbetrieb gehen ohne Verbindung zum ÜN. Sämtliche Vorkehrungen zur Beherrschung der Insel und die Betriebssicherheit während des Inselbetriebs obliegen dem Betreiber der kESS.

Die Vorkehrungen zur Synchronisierung (technisch und organisatorisch) der Insel mit dem ÜN ist mit Swissgrid zu koordinieren, wobei die Synchronisation nicht über die Primärtechnik des ÜN erfolgen darf.

Die Schwarzstartfähigkeit ist für kESS nicht zwingend. Schwarzstartfähige kESS können an der SDL Ausschreibung Schwarzstart und Inselbetriebsfähigkeit teilnehmen, wenn sie die Anforderungen von Swissgrid erfüllen.

### **5.3.4 Störungsanalysen**

Swissgrid führt eine systematische Störungsanalyse im ÜN durch und erarbeitet basierend auf den Ergebnissen mit den betroffenen kESS-Betreibern geeignete Lösungsansätze für die Verbesserung der bestehenden Prozesse. Notwendige Informationen (z.B. Messdaten, Schutzreaktionen und Aufzeichnungen zum Verhalten des kESS während des Störungsverlaufs) zur Fehleraufklärungen werden zwischen Swissgrid und den kESS-Betreibern am ÜN auf Anforderung gegenseitig ausgetauscht. Die Parteien stimmen die Kommunikation an die Öffentlichkeit zu Störungsanalysen vorgängig ab.

## **5.4 Eigenbedarf und Hilfsenergie**

Das Eigenbedarfssystem des kESS muss über ein Drehstromsystem für die Eigenbedarfsversorgung sowie über mindestens eine netzunabhängige Notenergieversorgung verfügen. Der Betrieb des kESS ohne funktionstüchtige Notenergieversorgung ist unzulässig.

Der Anlagenbetreiber des kESS ist für die Überwachung und Instandhaltung des Eigenbedarfs und der Hilfsenergieversorgung verantwortlich.

Die Funktion der Schutzeinrichtungen oder die Auslösung der Schaltgeräte erfordern zwei von der Netzspannung unabhängige Hilfsenergieversorgungen (z.B. Batterie, Kondensator, Wandlerstrom). Das Gleiche gilt beim Einsatz von Steuergeräten zur Fernsteuerung der Primärkomponenten.

Wenn die Hilfsenergieversorgung über eine längere Dauer erforderlich ist, ist deren Kapazität so zu bemessen, dass das kESS bei fehlender Netzspannung mit allen Schutz-, Sekundär- und Notbetriebseinrichtungen gemäss Anforderung der kESS betrieben werden kann. Zu beachten ist, dass allfällige Anforderungen aus den SDL die notwendige Überbrückungszeit verlängern können.

## **5.5 Kommunikation und IT-Sicherheit**

Der Betreiber gewährleistet durch angemessene technische und organisatorische Massnahmen den sicheren Betrieb des kESS und verhindert unbefugten Zugriff, insbesondere über Fernzugriffsverbindungen. Diese Pflicht gilt auch für externe Dienstleister mit Zugang zu Einrichtungen oder IT-Systemen des kESS. Der Betreiber legt Swissgrid auf Anfrage regelmässig Berichte über die Informationssicherheit und die Telekommunikationsanbindung vor; Form und Umfang werden zwischen den Parteien vereinbart.

Im Falle einer Grossstörung stellt der Betreiber sicher, dass relevante Echtzeitdaten für mindestens 72 Stunden verfügbar und abrufbar bleiben, um eine vollständige Analyse zu ermöglichen. Die Sicherheitsmassnahmen sind laufend an den Stand der Technik anzupassen und müssen einen der operativen Bedeutung des kESS angemessenen Schutz vor Informationssicherheitsbedrohungen gewährleisten. Informationssicherheitsrisiken sind laufend aktiv zu identifizieren, zu bewerten und angemessen zu behandeln.

## **5.6 Zugang zur physischen Infrastruktur**

Zur Installation und Erweiterung notwendiger Anlagen und Betriebsmittel für die Herstellung und Unterhaltung des Netzanschlusses stellen sich der kESS-Betreiber und Swissgrid gegenseitig geeignete Flächen und/oder Räume nach Abstimmung zur Verfügung (beispielsweise für Sekundärtechnik).

Der kESS-Betreiber und Swissgrid gewähren sich unentgeltlich gegenseitig sowie Beauftragten den Zutritt zu den wechselseitig genutzten Flächen und/oder Räumen.

Einzelheiten zur baulichen Ausführung der wechselseitig genutzten Flächen und/oder Räumen werden vertraglich zwischen Swissgrid und kESS-Betreiber geregelt.

## 6 Studien und Nachweise

Ein Bericht über die durchgeführten Studien zu kESS und die dafür verwendeten Simulationsmodelle mit Swissgrid im Rahmen des Netzanschlussverfahrens sind sechs Monate vor der ersten Einspeisung bzw. des ersten Bezugs vorzulegen.

### 6.1 Anforderungen an dynamische Studien

Der Anschlussnehmer des kESS ist verpflichtet, im Rahmen der Vorplanung alle erforderlichen spezifischen Studien selbst zu initiieren, durchzuführen und zu koordinieren. Swissgrid übernimmt dabei ausschliesslich eine prüfende und überwachende Rolle, um die Konformität der geplanten Anlage mit den Anforderungen des Netzanschlusses zu bewerten.

Swissgrid empfiehlt dem Anschlussnehmer des kESS, die Bewertung der Anforderungen an eine spezifische Studie abzuwarten, bevor ein verbindlicher Beschaffungsvertrag für die Hauptkomponenten des kESS unterzeichnet wird. Dies liegt daran, dass spezifische Studien die Auswahl und Dimensionierung der stromerzeugenden Ausrüstung sowie den Zeitplan des Projekts beeinflussen können.

Mindestens folgende Studien sind erforderlich, um die Auswirkungen des kESS auf das Netz angemessen zu bewerten:

- Transiente Stabilität;
- «Subsynchronous Oscillations» Studie;
- Studie zur harmonischen Stabilität.

Die genaue Beschreibung des Umfangs der jeweiligen Studien befindet sich im Anhang, siehe Kapitel 8.3.

Sollten die spezifischen Untersuchungen besondere Massnahmen für den Netzanschluss des Energiespeichers erfordern, so gelten diese Massnahmen als verbindliche Vorgaben und der Anschlussnehmer des kESS ist für deren Umsetzung verantwortlich.

### 6.2 Modellierungsanforderungen

Im Rahmen der Vorplanung ist der Anschlussnehmer des kESS verpflichtet, Swissgrid ein vollständiges und validiertes Simulationsmodell des kESS zur Verfügung zu stellen. Dieses Modell muss die Hauptfunktionen und -eigenschaften des kESS realistisch und nachvollziehbar abbilden, einschliesslich des dynamischen Verhaltens bei Netzstörungen.

Swissgrid verwendet dieses Modell für eigene Netzstudien, um den potenziellen Einfluss des kESS auf die Netzstabilität, die Systemdynamik und die Einhaltung des vorliegenden Dokuments zu bewerten. Die Bereitstellung des Modells ist eine Voraussetzung für die Durchführung dieser Studien und muss rechtzeitig erfolgen, damit die Ergebnisse in die Bewertung des Netzanschlusses einfließen können.

Die Simulationsmodelle müssen alle Hauptkomponenten des kESS umfassen, einschliesslich der Kompensationsanlagen und der Regler, Begrenzer und Schutzeinrichtungen, die den Betrieb des kESS im Netz beeinflussen. Es muss möglich sein, die Simulationsmodelle hinsichtlich der Merkmale im Rahmen der Spezifikationen zu parametrisieren. Die Simulationsmodelle müssen mit einer umfassenden Dokumentation versehen sein, die es ermöglicht, das Modell für verschiedene Studien von Betriebs- und Störungssituationen zu verwenden und zu parametrieren. Die Modelle sind im Root Mean Square (RMS)-Format unter Verwendung der Software Siemens PSSE sowie im Electromagnetic Transient (EMT)-Format unter Verwendung der Software EMTP bereitzustellen. Die im EMT-Modell verwendete numerische Integrationsschrittweite darf 5 µs nicht überschreiten. Swissgrid unterhält detaillierte Modellierungsanweisungen, in denen die aktuell verwendeten Softwareversionen und die erforderlichen Eigenschaften der damit erstellten Modelle beschrieben

sind. Diese werden dem Anschlussnehmer als Erstellungshilfe zur Verfügung gestellt und sind einzuhalten. Einschränkungen im Anwendungsbereich, den Betriebszustände und vereinfachende Annahmen sind zu dokumentieren.

## **6.2.1 Oberschwingungsmodelle**

### **6.2.1.1 Allgemeines**

- Der Anschlussnehmer muss harmonische Modelle bereitstellen, die jeden Umrichter sowie alle relevanten Hilfssysteme darstellen, die am Netzanschlusspunkt angeschlossen sind;
- Die Modelle sind in maschinenlesbarem Format (z.B. Text, CSV oder Excel) oder in einem anderen von Swissgrid geforderten Format zu liefern;
- Die Modelle müssen auf Messungen und/oder verifizierten Berechnungen basieren;
- Falls Asymmetrien bestehen, sind sowohl Positiv- als auch Negativsequenzmodelle bereitzustellen;
- Nullsystem-Betrachtung ist nur auf Anforderung von Swissgrid erforderlich.

### **6.2.1.2 Stationäres Oberschwingungsmodell**

Der Umrichter ist als frequenzabhängiges Norton- oder Thevenin-Äquivalent darzustellen und muss folgende Bestandteile enthalten:

#### **6.2.1.2.1 Harmonische Emissionsquelle**

- Harmonische Spannungs- oder Stromemissionen sind für ganzzahlige Vielfache von 50 Hz im Bereich von 100 Hz bis 2500 Hz mit einer Frequenzauflösung von 50 Hz anzugeben;
- Interharmonische und hochfrequente Emissionen sind bis 9 kHz in 200 Hz-Bändern zu dokumentieren;
- Für jeden Betriebspunkt sind sowohl Betrag als auch Phase der Emissionen bereitzustellen.

#### **6.2.1.2.2 Frequenzabhängige Impedanz**

- Die Umrichterimpedanz (Real- und Imaginärteil) ist als Funktion der Frequenz unter Berücksichtigung der Regelungseffekte anzugeben;
- Die Impedanz ist anzugeben: in 1 Hz-Schritten von 100 Hz bis 2500 Hz und in 10 Hz-Schritten von 2500 Hz bis 9 kHz;
- Impedanzdaten sind für repräsentative Betriebszustände bereitzustellen (z.B. 0%, 50% und 100% Wirkleistung sowie zugehörige Blindleistungszustände);
- Wenn Abweichungen mit Leistung, Spannung oder Regelmodus kleiner als 10% oder 5  $\Omega$  sind, ist dies schriftlich zu begründen.

#### **6.2.1.2.3 Zugehörige Betriebsmittel**

Die frequenzabhängigen Impedanzen der primären Komponenten, z.B. Transformatoren, Filter, Kabel und Umrichterdrosseln, sind ebenfalls auf Grundlage von Hersteller- oder Messdaten bereitzustellen.

### **6.2.1.3 Harmonisches Stabilitätsmodell**

Ein harmonisches Stabilitätsmodell ist bereitzustellen, das denselben Aufbau und denselben Frequenzbereich wie das stationäre Modell verwendet.

Wenn Impedanzwerte zwischen beiden Modellen voneinander abweichen, sind diese Abweichungen und deren Begründung zu dokumentieren.

#### **6.2.1.4 Modell mit aktiver Dämpfung (falls vorhanden)**

Wenn der Umrichter über eine aktive Dämpfungsfunktion verfügt, ist zusätzlich ein harmonisches Modell mit aktivierter Dämpfung bereitzustellen.

Das Modell muss folgende Angaben enthalten:

- a) Ziel- und Bandbreite der Dämpfung sowie;
- b) verwendete Parameter (z.B. virtueller Widerstand).

#### **6.2.1.5 Validierung**

Die Genauigkeit des Oberschwingungsmodells ist durch eine Validierung gemäss folgenden Punkten nachzuweisen.

##### **6.2.1.5.1 Validierungsquellen**

Zur Überprüfung sind mindestens zwei der folgenden Quellen zu verwenden (ausgenommen diejenige Modellart, mit der das Modell erstellt wurde):

- a) Elektromagnetische Transientensimulation (EMT);
- b) Fabrikprüfung;
- c) Analytisches Modell;
- d) Inbetriebnahme- oder Feldmessung.

##### **6.2.1.5.2 Validierung der Impedanz**

- a) Die Validierung ist über den gesamten Frequenzbereich von 100 Hz bis 9 kHz durchzuführen;
- b) Frequenzschrittweite:  $\leq 1$  Hz bis 2500 Hz, und  $\leq 10$  Hz oberhalb 2500 Hz;
- c) Das Modell gilt als gültig, wenn Real- und Imaginärteil der Impedanz um weniger als 10% oder 5  $\Omega$  von den validierten Daten abweichen.

##### **6.2.1.5.3 Validierung der harmonischen Emission**

- a) Die harmonischen Emissionen sind für alle angegebenen Betriebspunkte zu validieren;
- b) Mindestens eine unabhängige Validierungsquelle ist zu verwenden;
- c) Abweichungen dürfen 10% im Betrag und 10° in der Phase nicht überschreiten.

#### **6.2.1.6 Dokumentation**

Ein Modellbericht und Benutzerhandbuch sind zusammen mit dem Modell bereitzustellen und müssen folgende Inhalte umfassen:

- a) Modellübersicht: Beschreibung des Modellaufbaus, der Ersatzschaltung (Norton/Thevenin) und des Softwareformats;
- b) Datenquellen: Angabe, ob die Daten gemessen, simuliert oder von Herstellern bereitgestellt wurden;
- c) Methodik: Beschreibung der Verfahren zur Ermittlung der Impedanz- und Emissionsdaten, einschliesslich eventueller Filterung oder Mittelwertbildung;
- d) Validierungszusammenfassung: Beschreibung der verwendeten Validierungsmethoden mit Vergleichsdiagrammen und quantitativen Abweichungen;
- e) Einschränkungen: Anwendungsbereich, Betriebszustände und vereinfachende Annahmen;
- f) Messberichte: Falls Messungen verwendet wurden, sind vollständige Prüfberichte mit Kalibrierangaben beizulegen.

## **7 Konformitätstests**

### **7.1 Prüfverfahren**

Es liegt in der Verantwortung des Anschlussnehmers des kESS zu überprüfen, dass der Betrieb des kESS die Anforderungen des vorliegenden Dokuments erfüllt. Der Anschlussnehmer des kESS ist für die Kosten des Konformitätsprozesses verantwortlich. Die Konformität mit den Spezifikationen ist in erster Linie durch Versuche während der Inbetriebnahme des kESS nachzuweisen. Um für Systemdienstleistungen zugelassen zu werden, sind zusätzlich die aktuellen Präqualifikationsbedingungen zu erfüllen.

#### **7.1.1 Inbetriebnahme**

Die Inbetriebsetzung wird in Zusammenarbeit zwischen dem Anschlussnehmer des kESS und Swissgrid durchgeführt. Die Vertreter von Swissgrid haben das Recht, an allen Inbetriebnahmeprüfungen teilzunehmen und diese zu begleiten.

Der Anschlussnehmer des kESS muss einen Inbetriebnahmeprüfplan für das kESS erstellen. Die Unterlagen müssen vorgängig, mindestens aber 3 Monate vor der Inbetriebnahme Swissgrid vorgelegt werden. Der Anschlussnehmer des kESS schlägt darin geeignete Prüfverfahren vor, um die nötigen Anforderungen nachzuweisen. Als Nachweise können unter anderem Konstruktionsunterlagen, Studien, Simulationen, Prüfungen während der Inbetriebnahme oder Prüfungen im Betrieb dienen. Wobei, sofern immer technisch möglich, Nachweise im Echtzeitbetrieb erbracht werden sollen. Swissgrid hat das Recht, den Zeitplan der Inbetriebsetzungsprüfungen abzusagen oder zu ändern, wenn die Durchführung der Prüfungen zum vorgesehenen Zeitpunkt aufgrund der Betriebssituation des Netzes nicht möglich ist.

Gemäss TC Kapitel 6.4. sind die Termine für die Konformitätsprüfungen mit Swissgrid frühzeitig abzusprechen. Die von Swissgrid bestätigte erfolgreiche Durchführung aller Konformitätsprüfungen bildet die Voraussetzung für den definitiven Anschluss an das ÜN.

Bei allen Inbetriebnahmeprüfungen sind mindestens die nachstehenden Variablen zu messen und aufzeichnen:

- Wirkleistung des kESS;
- Blindleistung des kESS;
- Spannung am Anschluss;
- Frequenz am Anschlusspunkt.

Bei der Inbetriebnahmeprüfung sind die folgenden Funktionen zu überprüfen:

- 1) Änderungsrate der Wirkleistung:
  - a) Mit der Prüfung soll die Fähigkeit nachgewiesen werden, die Wirkleistung gemäss dem im Kapitel 3.1 definierten Betriebsbereich und mit der dort festgelegten Änderungsrate zu modellieren. Die Prüfung wird mit zwei Wirkleistungen durchgeführt:  $0,1 \times P_{\max}/\min$  und die maximale Änderungsrate sowohl im Einspeisemodus wie auch im Bezugsmodus;
  - b) Die Prüfung gilt als erfolgreich, wenn die in Kapitel 3.1 festgelegten Parameter eingehalten werden und keine ungedämpften Leistungsschwingungen auftreten.

- 2) Steuerung der konstanten Spannung:
  - a) Mit der Prüfung wird die technische Fähigkeit des kESS nachgewiesen, die Spannung zu regeln und gemäss den im Kapitel 3.2 festgelegten Anforderungen zu funktionieren;
  - b) Die Prüfung besteht aus Spannungsregelungs-Sprungantworttests. Die Prüfungen sollen die Leistung der Spannungsregelung und die Fähigkeit, den erforderlichen Sollwert und die Steigung einzustellen, nachweisen;
  - c) Die Prüfung gilt als erfolgreich, wenn die in Kapitel 3.2 definierten Anforderungen erfüllt sind und das kESS nach der Sprungantwort einen stabilen Betriebspunkt ohne schlecht gedämpfte Blind- oder Wirkleistungsschwingungen erreichen kann.
- 3) Konstante Blindleistungsregelung:
  - a) Mit der Prüfung ist die technische Fähigkeit des kESS nachzuweisen, die Blindleistung zu regeln und gemäss im Kapitel 3.2 festgelegten Anforderungen zu funktionieren, wenn das kESS am Netz angeschlossen ist;
  - b) Die Prüfung muss eine schrittweise Änderung der Blindleistung umfassen und es muss dabei kontrolliert werden, ob die vorgegebenen Sollwerte eingehalten werden können;
  - c) Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Anforderungen gemäss Kapitel 3.2 erfüllt sind und das kESS nach der schrittweisen Änderung der Blindleistung einen stabilen Betriebspunkt mit gedämpften Schwingungen erreichen kann.
- 4) Regelung des konstanten Leistungsfaktors:
  - a) Mit der Prüfung ist die technische Fähigkeit des kESS nachzuweisen, den am Anschlusspunkt gemessenen Leistungsfaktor gemäss den Anforderungen im Kapitel 3.2.2 zu regeln;
  - b) Die Prüfung besteht aus einer schrittweisen Änderung der Blindleistung mithilfe des Leistungsfaktors. Die Prüfungen sollen die Leistung der Leistungsfaktorregelung und die Fähigkeit, den erforderlichen Sollwert einzustellen, nachweisen;
  - c) Die Prüfung gilt als erfolgreich, wenn das kESS nach einer schrittweisen Änderung des Leistungsfaktors einen stabilen Betriebspunkt mit gedämpften Schwingungen erreichen kann.
- 5) Prüfung der Blindleistungsfähigkeit und Begrenzung der Wirkleistung:
  - a) Bei der Prüfung ist nachzuweisen, dass das kESS in der Lage ist, Blindleistung einzuspeisen und zu beziehen. Es ist ausserdem zu überprüfen, ob die Wirkleistungsbegrenzung funktioniert;
  - b) Die Prüfung ist bei maximaler induktiver und maximaler kapazitiver Blindleistung des kESS durchzuführen und dies bei fünf verschiedenen Betriebspunkten.
- 6) Prüfung der Frequenz am Anschlusspunkt:
  - a) Die Messungen sind mit einer Abtastfrequenz von mindestens 1 kHz durchzuführen, und die Aufzeichnungsfrequenz muss mindestens 50 Hz betragen;
  - b) Eine Ausnahme bildet die Inbetriebnahmeprüfung der Konstantspannungsregelung sowie auch Messungen der Spannung und des Stroms an einem Umrichtermodul, welche mit einer Abtast- und Aufzeichnungsfrequenz von mindestens 2 kHz aufgezeichnet werden müssen.
- 7) Starten und Anhalten:
  - Mit der Prüfung ist nachzuweisen, dass das Ein- und Ausschalten des kESS keine Qualitätsabweichungen gemäss IEC 61000-3-6 in Spannung und Frequenz im Netz provoziert.
- 8) Verhalten bei Störung der Spannungsregelung:
  - Die Prüfung muss nachweisen, dass die Spannungsregelung des kESS im Fall einer Störung korrekt ihren Modus ändert.

- 9) Fernsteuerung:
- a) Die Prüfung muss zeigen, dass die für den Betrieb notwendige Fernsteuerung für das kESS einwandfrei funktioniert;
  - b) Die Prüfung muss alle Steuerstellen umfassen, einschliesslich des elektronischen Steueranschlusses von Swissgrid. Es wird ausserdem überprüft, ob die Priorisierung der Steuerrechte zwischen die Steuerstellen einwandfrei funktioniert;
  - c) Es wird zudem überprüft, ob das von der Partei mit primärer Steuerbefugnis ausgegebene Steuersignal Vorrang hat.
- 10) Resynchronisation nach Netzverlust:
- Der kESS-Betreiber muss sicherstellen, dass seine internen Prozesse zur Resynchronisation nach dem Netzverlust gemäss Kapitel 3.3 aufgestellt sind.
- 11) Kleinsignalstabilität und Dämpfung:
- Das kESS muss nachweisen, dass es und seine Regelung bei kleinen Netzstörungen keine ungedämpften Schwingungen verursacht und aktiv zu deren Dämpfung beiträgt.
- 12) Dokumentationspflichten:
- Allgemeine Dokumentationspflichten werden im Kapitel 7 & 9 des Netzanschlussvertrags [2] und der ABNA [3] geregelt.

Die Aufzeichnungen der Inbetriebnahmeprüfungen dienen als Nachweis für die Richtigkeit und Gültigkeit der in Kapitel 6 spezifizierten Simulationsergebnisse. Der Anschlussnehmer des kESS ist verpflichtet, diese Nachweise in einem formellen Validierungsbericht zusammenzufassen, der:

- die Übereinstimmung zwischen den gemessenen Inbetriebnahmedaten und den in Kapitel 6 durchgeführten Simulationen;
- die Einhaltung sämtlicher Anforderungen gemäss Kapitel 6 sowie dieses Dokuments belegt;
- Swissgrid zur Prüfung und Genehmigung vor der endgültigen Anschlussfreigabe vorzulegen ist.

## 8 Anhang

### 8.1 Tabellen und Formeln

|                                           |   |
|-------------------------------------------|---|
| Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis          | 7 |
| Tabelle 2: Übersicht Vorzeichenkonvention | 8 |

### 8.2 Abbildungen

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Blindleistung muss unter Berücksichtigung der Capability Curve bereitgestellt werden | 10 |
| Abbildung 2: Blindleistungskapazitätsdiagramm 380 kV                                              | 11 |
| Abbildung 3: Blindleistungskapazitätsdiagramm 220 kV                                              | 11 |
| Abbildung 4: Verhalten zur Fehlerüberbrückung bei kurzzeitigen Über- oder Unterspannungen         | 12 |
| Abbildung 5: Blindleistungsregelung bei Spannungssprüngen                                         | 13 |
| Abbildung 6: Frequenz- und Spannungsbereich, bei welchem sich kESS nicht trennen dürfen           | 17 |
| Abbildung 7: Frequenzabhängigkeit in ausserordentlicher Situation – Überfrequenz                  | 19 |
| Abbildung 8: Frequenzabhängigkeit in ausserordentlicher Situation – Unterfrequenz                 | 20 |
| Abbildung 9: Anschluss kESS schematisch                                                           | 22 |

### 8.3 Studien

In diesem Anhang werden die für den Anschluss von kESS an das Swissgrid-Netz erforderlichen Studien beschrieben. Diese Anforderungen sind als Orientierung zu verstehen. Swissgrid behält sich das Recht vor, die erforderlichen Studien je nach spezifischem Fall anzupassen oder zusätzliche Anforderungen zu stellen.

#### 8.3.1 Transiente Stabilität

Ziel der Stabilitätsstudie ist es, die Interoperabilität des kESS mit dem ÜN unter transienten Bedingungen zu überprüfen. Dies erfolgt anhand von RMS-Simulationen. Darüber hinaus soll die Konformität der Netzstützungsfunktionen der Vertragslandschaft von Swissgrid nachgewiesen und deren Auslegung validiert werden.

Der Anschlussnehmer hat eine Testmatrix zu erstellen, die alle zu berücksichtigenden Simulationsfälle der Stabilitätsstudie auflistet. Die Testmatrix wird gemeinsam vom Anschlussnehmer und Swissgrid entwickelt und muss vor Beginn der Studie von Swissgrid genehmigt werden. Falls während der Studie oder bei der Auswertung der Ergebnisse zusätzliche kritische oder relevante Szenarien bzw. Fehlerfälle identifiziert werden, hat der Anschlussnehmer diese zu untersuchen und der ursprünglichen Testmatrix hinzuzufügen.

##### 8.3.1.1 Kurzschlussstudie

Der Anschlussnehmer hat verschiedene Kurzschlussorte im reduzierten AC-Netzmodell zu simulieren und dabei folgende Parameter zu berücksichtigen:

- Kurzschluss am Netzanschlusspunkt;
- Kurzschlüsse auf allen vom Batteriespeichersystem ausgehenden AC-Leitungen, einschliesslich des Ausfalls der betroffenen Leitungen (Einzel- und Doppelleitungen);
- Weitere Fehlerorte im AC-Netz, einschliesslich Leitungen und Sammelschienen.

Kurzschlüsse mit unterschiedlichen Restspannungen und Fehlerdauern sind zu simulieren.

Am Netzanschlusspunkt sind mindestens die folgenden Betriebspunkte und Betriebsbedingungen zu berücksichtigen:

- Wirkleistung: 100%, 50%, 0% von  $P_{\max}$  – sowohl Einspeisung als auch Verbrauch;
- Blindleistung: maximal kapazitiv, maximal induktiv, null;
- Unterschiedliche Spannungsniveaus im AC-Netz am Netzanschlusspunkt;
- Unterschiedliche Kurzschlussleistungen am Netzanschlusspunkt.

### 8.3.1.2 Untersuchung der Blindleistungsregelungsmodi

Der Anschlussnehmer soll die Dynamik der Blindleistungsregelung nachweisen.

Der Anschlussnehmer soll das Verhalten des kESS bei Erreichen der Blindleistungsgrenzen für alle Regelungsmodi anhand eines vereinfachten Modells des AC-Systems nachweisen. Der Umfang und die Erweiterung des vereinfachten AC-Modells werden im gegenseitigen Einvernehmen zwischen dem Anschlussnehmer und Swissgrid festgelegt. Zudem soll ein Übergang von maximal induktiv zu maximal kapazitiv im Regelungsmodus „Q = konstant“ simuliert werden, ebenfalls unter Verwendung des vereinfachten AC-Modells.

Der Anschlussnehmer soll nachweisen, wie die Blindleistungsregelung zur Stabilisierung des Spannungsniveaus im AC-Netz beitragen. Dabei ist zu analysieren, wie die Regelungsmodi und deren Reglereinstellungen das Verhalten bei Netzstörungen (FRT) sowie die Spannungsstabilität während und nach solchen Ereignissen beeinflussen.

Zusätzlich soll untersucht werden, wie der Spannungsregelungsmodus mit Blindleistungs-Statik zur Stabilisierung der Spannung nach FRT beiträgt. Ebenso ist zu analysieren, wie dieser Regelungsmodus die Spannungsstabilität bei Netzereignissen unterstützt, die zu Spannungsänderungen führen.

## 8.3.2 Studie zur harmonischen Stabilität

### 8.3.2.1 Allgemeines

- Die Studie zur harmonischen Stabilität dient dem Nachweis, dass die kESS unter allen Betriebs- und Netzbedingungen ein stabiles Verhalten im vorgesehenen Frequenzbereich aufweisen;
- Ziel ist es, unerwünschte Wechselwirkungen zwischen Umrichterregelungen, Netzresonanzen und anderen netzgekoppelten Anlagen zu identifizieren und zu vermeiden;
- Die Untersuchung gliedert sich in eine Screening-Studie im Frequenzbereich und eine detaillierte EMT-Studie im Zeitbereich. Die Studie muss in positiver und negativer Sequenz durchgeführt werden; eine Nullsystem-Betrachtung ist nur auf Anforderung von Swissgrid erforderlich;
- Der relevante Frequenzbereich erstreckt sich bis 2500 Hz;
- Swissgrid stellt dem Anschlussnehmer die für die Durchführung der Studien erforderlichen Daten zur Verfügung; der genaue Umfang dieser Daten wird in bilateralen Abstimmungen festgelegt.

### 8.3.2.2 Screening-Studie

- Die Screening-Studie ist eine frequenzbereichsbasierte Untersuchung zur Beurteilung der Stabilitätsreserven (Phasen- und Amplitudenreserve) an der Netzanschlusspunkt;
- Die Methode basiert auf dem Impedanzkriterium nach J. Sun: „Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters“ [13];
- Die Studie ist durchzuführen, sofern die Anlage kein nachweislich positiv gedämpftes Verhalten für alle internen Schaltzustände zeigt;
- Zur Begründung eines positiven Dämpfungsverhaltens sind Frequenzgänge der Anlage auf Basis des harmonischen Modells bereitzustellen. Der Anschlussnehmer hat alle von Swissgrid bereitgestellten Netzfrequenzgänge (Schaltzustände) zu berücksichtigen;
- Die Phasen- und Amplitudenreserve an der Netzanschlusspunkt ist zu berechnen und zu dokumentieren. Als kritisch gelten Werte unter 15° Phasenreserve oder 15 dB Amplitudenreserve;

- Die Untersuchung ist für alle relevanten Betriebszustände (Wirk- und Blindleistungsvariationen, Spannungsniveaus, Regelungsarten, Schaltkonfigurationen, Alterungszustände, Ladezustände) durchzuführen, sofern sich die Ausgangsimpedanz um mehr als 10% oder 5  $\Omega$  im Real- oder Imaginärteil ändert;
- Die relevanten Schaltkonfigurationen der Anlage sind im Studienkonzept anzugeben und mit Swissgrid abzustimmen.

#### **8.3.2.3 Detaillierte EMT-Studie**

- Für alle Szenarien mit Phasenreserve < 15° oder Amplitudenreserve < 15 dB ist eine detaillierte EMT-Studie im Zeitbereich durchzuführen;
- Die frequenzabhängigen Netzimpedanzen, die zur Unterschreitung der Stabilitätsreserven führen, sind in das EMT-Modell zu integrieren;
- Die Stabilität des Gesamtsystems ist ohne externe Störung zu prüfen. Bleibt das System stabil, ist die Robustheit gegenüber kleinen und grossen Signalanregungen (z.B. Spannungssprüngen) zu testen;
- Eine Einzelfrequenz-Injektion bei den im Screening identifizierten kritischen Frequenzen ist durchzuführen, um das Dämpfungsverhalten gegenüber erzwungenen Oszillationen zu überprüfen;
- Sofern Gegenmassnahmen erforderlich sind, sind sämtliche Berechnungen mit implementierten Gegenmassnahmen zu wiederholen und die Ergebnisse mit den ursprünglichen Berechnungen zu vergleichen;
- Der Anschlussnehmer muss nachweisen, dass die vorgeschlagenen Gegenmassnahmen eine stabile Betriebsweise sicherstellen;
- Alle Gegenmassnahmen sind mit Swissgrid abzustimmen.

#### **8.3.2.4 Bewertungskriterien**

- Swissgrid bewertet die gelieferten Frequenzgänge, sofern ein positiv gedämpftes Verhalten angenommen wird;
- Die Ergebnisse der Screening-Studie werden anhand der definierten Stabilitätsreserven überprüft ;
- Falls erforderlich, werden Modellierungsansatz und Simulationsergebnisse der detaillierten EMT-Studie bewertet;
- Gegebenenfalls werden vorgeschlagene Gegenmassnahmen hinsichtlich Wirksamkeit und Umsetzbarkeit beurteilt.

#### **8.3.2.5 Dokumentation**

- Vor Beginn der Studie ist ein Studienkonzept einzureichen und Swissgrid freizugeben;
- Das Konzept muss Methode, Annahmen, betrachtete Betriebspunkte und Netzszenarien beschreiben;
- Nach Abschluss der Screening-Studie ist ein Bericht mit allen Frequenzgängen (Betriebszustände und Schaltkonfigurationen) bereitzustellen;
- Alle Impedanzkurven sind in maschinenlesbarer Form zu liefern (z.B. CSV);
- Die Berichte der Screening- und EMT-Studien müssen mindestens folgende Inhalte enthalten:
  - 1) Übersicht des Modells und der Methode;
  - 2) Beschreibung der Simulationsparameter und Betriebsfälle;
  - 3) Darstellung der Stabilitätsreserven (Phasen- und Amplitudenreserve);
  - 4) Darstellung der angewandten Gegenmassnahmen (falls vorhanden);
  - 5) Bewertung der Stabilitätsergebnisse und Schlussfolgerungen.
- Das Simulationsmodell ist mit jeder Studienrevision bereitzustellen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Swissgrid, „Transmission Code 2019,“ Aarau, 2019.
- [2] Swissgrid, *Netzanschlussvertrag*, Laufenburg, 2017.
- [3] Swissgrid AG, *NAV Anhang 2: Allgemeine Bedingungen für den Netzanschlussvertrag an das Schweizer Übertragungsnetz (ABNA)*, Laufenburg: Swissgrid AG, 2017.
- [4] Swissgrid, *Spannungshaltungskonzept - Konzept für die Spannungshaltung im Übertragungsnetz der Schweiz ab 2020*, Aarau, 2019.
- [5] Swissgrid AG, *Betriebsvereinbarung mit KWB für direkt am Übertragungsnetz angeschlossene Kraftwerke*, Aarau: Swissgrid, 2010.
- [6] IEC, „Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV, and EHV power systems,“ IEC, 2008.
- [7] VDE FNN, VSE, Österreichs Energie, CSRES, „Technische Regeln für die Beurteilung von Netzzrückwirkungen. Teil A: Grundlagen,“ VDE FNN, VSE, Österreichs Energie, CSRES, Aarau/ Berlin/ Prag/ Wien, 2021.
- [8] Electrosuisse, *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*, Fehraltorf: Electrosuisse, 2020.
- [9] Swissgrid AG, *Anschlussbetriebsvereinbarung*, Aarau: Swissgrid, 2025.
- [10] VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, *Technische Anforderungen an die Schutz- und Leittechniksschnittstellen von Transformatoren zum Übertragungsnetz*, Aarau: VSE, 2023.
- [11] VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, *Schutzleitfaden Schweiz*, Aarau: VSE, 2020.
- [12] VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, *Technische Anforderungen an die automatische Frequenzentlastung*, Aarau: VSE, 2025.
- [13] J. Sun, „Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 26, Nr. 11, pp. 3075-3078, 2011.
- [14] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, *Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Höchstspannung)*, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, 2018.