swissgrid

Swissgrid SA
Bleichemattstrasse 31
Case postale
5001 Aarau
Suisse

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

Exigences techniques minimales pour le raccordement de systèmes de stockage d'énergie basés sur des convertisseurs

Version 1.1 du 29 mai 2026

Révisions

Date	Version	Changement
14.12.2025	1.01	Traduction de tous les figures et correction des références dans les versions française, anglaise et italienne
29.05.2026	1.1	Modifications et clarifications dans les chapitres suivants : - 2.1 : Liste des abréviations - 3.1.1: Commande de la puissance active en exploitation normale - 3.2.1: réglage de la tension-puissance réactive - 3.2.2: Capacité de puissance réactive - 3.2.4: Résistance aux sous-tensions et surtensions de courte durée - 3.2.5: rétablissement de la puissance active après une perturbation de la tension - 3.5: Propriétés de la formation du réseau - 3.5.2: Inertie synthétique (Virtual Inertia) - 4.1: Limites d'exploitation - 4.3: Taux de variation de fréquence (RoCoF) - 6.2: Exigences de modélisation - 7.1.1: Mise en service - 8.3.1.1: Étude sur les courts-circuits - 8.3.2.1: Généralités - 8.3.2.3: Étude de dépistage

Contenu

1	Introduction	4
1.1	Objet, champ d'application et groupe cible	4
1.2	Besoin d'exigences supplémentaires concernant les ssec	4
1.3	Exigences relatives au document	4
1.3.1	Documents de la branche et de Swissgrid	4
1.3.2	Directives ENTSO-E	5
1.3.3	Normes et standards	5
2	Bases générales et conventions	6
2.1	Liste des abréviations	6
2.2	Définitions	8
2.3	Convention relative aux signes	8
2.4	Convention d'exploitation	8
3	Exigences relatives au comportement du ssec	9
3.1	Réglage de la puissance active et modes d'exploitation	9
3.1.1	Commande de la puissance active en exploitation normale	9
3.1.2	Modification des modes de réglage	9
3.2	Réglage de la puissance réactive	9
3.2.1	Réglage de la tension-puissance réactive	9
3.2.2	Capacité de puissance réactive	9
3.2.3	Approvisionnement en courant réactif	11
3.2.4	Résistance aux sous-tensions et surtensions de courte durée	11
3.2.5	Rétablissement de la puissance active après une perturbation de la tension	12
3.2.6	Réglage de la tension	12
3.3	Conditions préalables à la (re)mise en service	13
3.4	Résonances et interactions du régulateur	13
3.5	Propriétés de formation du réseau	14
3.5.1	Stabilité	15
3.5.2	Inertie synthétique (Virtual Inertia)	15
3.6	Répercussions sur le réseau	16
3.6.1	Généralités	16
3.6.2	Évaluation des répercussions sur le réseau	16
3.6.3	Mesures	16
4	Comportement opérationnel	17
4.1	Limites d'exploitation	17
4.2	Tension d'exploitation et plage de fréquence	17
4.3	Taux de variation de fréquence (RoCoF)	17
4.4	Réenclenchement après une séparation du réseau	18
4.5	Point de contact de l'exploitant du ssec	18
4.6	Réglage de fréquence	18
4.6.1	Surfréquence	18

4.6.2 Sous-fréquence 19
4.7 Comportement en cas de reconstruction du réseau 20

5 Exécution du raccordement au réseau 21
5.1 Technique des circuits primaires au point de raccordement 21
5.1.1 Généralités 21
5.1.2 Installation de raccordement des ssec 21
5.1.3 Traitement du point neutre, 22
5.1.4 Disjoncteurs 23
5.1.5 Transformateurs 23
5.1.6 Parafoudres 23
5.1.7 Installations câblées 23
5.1.8 Dispositif de mise à la terre 23
5.2 Technique des circuits secondaires 23
5.2.1 Généralités 23
5.2.2 Synchronisation 24
5.2.3 Autorité de commande 24
5.2.4 Interface entre la commande de la puissance active et réactive 24
5.3 Protection 24
5.3.1 Généralités 24
5.3.2 Délestage automatique de fréquence 25
5.3.3 Détection de réseau en îlotage et marche en îlotage 25
5.3.4 Analyse des perturbations 25
5.4 Besoin propre et énergie auxiliaire 25
5.5 Communication et sécurité informatique 26
5.6 Accès à l'infrastructure physique 26

6 Études et justifications 27
6.1 Exigences relatives aux études dynamiques 27
6.2 Exigences de modélisation 27
6.2.1 Modèles d'harmoniques 28

7 Tests de conformité 30
7.1 Procédure d'essai 30
7.1.1 Mise en service 30

8 Annexe 33
8.1 Tableaux et formules 33
8.2 Figures 33
8.3 Études 33
8.3.1 Stabilité transitoire 33
8.3.2 Étude de la stabilité harmonique 34

9 Bibliographie 36

1 Introduction

1.1 Objet, champ d'application et groupe cible

Le présent document définit les conditions techniques et opérationnelles de raccordement pour les systèmes de stockage d'énergie basés sur des convertisseurs (ssec) qui doivent être raccordés au réseau de transport (RT) en Suisse. L'objectif est de fournir des exigences claires, uniformes et transparentes garantissant à la fois la stabilité du réseau et la sécurité et l'efficacité du système dans son ensemble.

Le champ d'application comprend tous les ssec raccordés au niveau de réseau 1 du réseau de transport suisse. Les exigences s'appliquent aux nouvelles installations ainsi qu'aux installations qui subissent des modifications importantes ayant un impact sur le raccordement au réseau ou sur le comportement opérationnel.

Le groupe cible de ce document est constitué de toutes les parties prenantes au raccordement, notamment les développeuses et développeurs de projets, les exploitant(e)s, les planificatrices et planificateurs et les fabricant(e)s de ssec, qui souhaitent se raccorder au réseau de transport suisse. Ce document sert de base contraignante pour la planification, la conception, l'approbation et la mise en service de tels systèmes.

1.2 Besoin d'exigences supplémentaires concernant les ssec

Le développement croissant de systèmes de stockage d'énergie basés sur des convertisseurs (ssec) dans le réseau de transport suisse pose de nouvelles exigences en matière d'intégration, notamment en ce qui concerne la fourniture de services système visant à garantir la qualité d'approvisionnement et la stabilité du réseau. Les ssec doivent donc disposer de propriétés de soutien du système afin de pouvoir contribuer de manière efficace sur le plan économique à la stabilité du système électrique dans le cadre de la transition énergétique.

L'afflux rapide de ssec entraînant de nouveaux défis techniques, des exigences complémentaires sont nécessaires, qui vont au-delà des documents existants. Les exigences contenues dans ce document s'appliquent en sus des directives mentionnées dans le paysage contractuel existant de Swissgrid (voir chapitre 1.3.1). En cas de doute, l'exigence la plus stricte s'applique.

Lors de l'élaboration du présent document, nous nous sommes basés sur l'expérience des conditions de raccordement existantes pour les ssec auprès d'autres TSO, ainsi que sur les conditions générales des niveaux de réseau inférieurs.

1.3 Exigences relatives au document

1.3.1 Documents de la branche et de Swissgrid

En outre, les documents suivants, dans leur version en vigueur, doivent également être respectés :

- le Transmission Code, référencé ci-après comme TC [1] ;
- le contrat de raccordement au réseau, référencé ci-après comme CRR [2] ;
- les conditions générales pour le raccordement au réseau de transport suisse, CGRR [3] ;
- les contrats de services système et leurs exigences ;
- le concept de maintien de la tension [4] ;
- la convention d'exploitation [4] ;
- la convention d'exploitation de raccordement ;
- le manuel de conduite et de gestion du réseau suisse ou le manuel d'interface de gestion opérationnelle du réseau (MIGOR) ;
- tous les autres contrats avec Swissgrid et les documents de la branche sur lesquels ils reposent.

1.3.2 Directives ENTSO-E

Les exigences d'ENTSO-E jouent également un rôle important dans la perspective d'une harmonisation technique internationale. Les Requirements for Generators (RfG) définissent les exigences minimales pour le raccordement au réseau de productrices et producteurs et le Demand connection code (DCC) celles pour les consommatrices et consommateurs.

1.3.3 Normes et standards

Si aucune norme explicite n'est indiquée dans le document, les systèmes de normes suivants doivent être respectés dans l'ordre indiqué :

- les lois et normes suisses (notamment le Transmission Code) ;
- les normes du CENELEC ;
- les normes de la CEI ;
- les recommandations du Cigré ;
- les règles techniques de raccordement des gestionnaires de réseau de transport européens pour les installations à très haute tension ;
- les normes et règles techniques de raccordement de l'IEEE.

2 Bases générales et conventions

2.1 Liste des abréviations

ABRÉVIATION	SIGNIFICATION	DESCRIPTION/EXPLICATION
AC	Alternating Current	Courant alternatif
AES	Association des entreprises électriques suisses	
AIS	Air Insulated Switchgear	Poste de couplage isolé à l'air
AVR	Automatic Voltage Regulator	Régulateur de tension automatique
BESS	Battery Energy Storage System (système de stockage d'énergie sur batterie)	
CE	Convention d'exploitation	Régit la collaboration dans l'exploitation entre Swissgrid et la partie prenante raccordée au réseau
CER	Convention d'exploitation de raccordement	
CGRR	Conditions générales pour le raccordement au réseau de transport	Partie intégrante du contrat de raccordement au réseau
CRR	Contrat de raccordement au réseau	Contrat de raccordement au réseau de transport
CSV	Comma-separated values	Format de fichier
DC	Direct Current	Courant continu
DEKWE	Intervention directe dans l'engagement des centrales	
EMT	Electromagnetic Transients	Régimes transitoires
EMTP	Electromagnetic Transients Program	Programme d'analyse de régimes transitoires électromagnétiques
FCR	Frequency Containment Reserve	Énergie de réglage primaire
FFR	Fast Frequency Response	Réponse en fréquence rapide
FRT	Fault Ride Through	Capacité à rester connecté au réseau en cas de défaut du réseau et à contribuer activement au soutien du réseau
FSM	Frequency Sensitive Mode	Réglage de la puissance active en fonction de la fréquence
GRT	Gestionnaire du réseau de transport	
KAS	Centre de commande de centrale électrique	Partenaire direct de Swissgrid pour la reconstruction du réseau

MIGOR	Manuel d'interface de gestion opérationnelle du réseau	Décrit les processus importants pour l'exploitation entre Swissgrid et la partie prenante raccordée au réseau, partie de la CE
NR	Niveau de réseau	
$P_{MAX,E}$	Puissance active maximale en mode demande	La plus grande puissance active qu'un accumulateur puisse prélever
$P_{MAX,B}$	Puissance active maximale en mode production	La plus grande puissance active qu'un accumulateur puisse fournir
P_N	Puissance nominale	Puissance électrique nominale (en MW ou MVA) pour laquelle un système ou un composant est conçu
PSS	Services système	
PSSE	Power System Simulator for Engineering	Logiciel de simulation de systèmes énergétiques
RE	Réenclenchement automatique	Fonction de protection pour la remise en service après des perturbations de courte durée
RMS	Root Mean Square	Moyenne quadratique, pour comparer des valeurs fluctuantes avec un seul chiffre
ROCOF	Rate of Change of Frequency	Taux de variation de fréquence, important pour les systèmes de protection
RSS	Résonances sous-synchrones	Vibrations indésirables < 50 Hz susceptibles de menacer la stabilité du réseau ou les générateurs
RT	Réseau de transport	
RV	Restructured Version	
S_{MAX}	puissance apparente maximale	
SOA	Safe Operating Area	Conditions de tension et de courant dans lesquelles le ssec peut vraisemblablement fonctionner sans être endommagé
SSCI	Subsynchronous Control Interactions	
SSEC	Système de stockage d'énergie basé sur des convertisseurs	Réservoir d'énergie relié au réseau par des convertisseurs électroniques de puissance
SSO	Subsynchronous Oscillations Study	
SSTI	Subsynchronous Torsional Interactions	
TC	Transmission Code	Document de la branche, document clé
THDI	Total Harmonic Distortion Current	Mesure de la distorsion harmonique du courant

THDV	Total Harmonic Distortion Voltage	Mesure de la distorsion harmonique de la tension
VAS	Centre de commande des installations du réseau de distribution	Partenaire direct de Swissgrid pour la reconstruction du réseau
VE	Autorisation de disposer	

Tableau 1: Liste des abréviations

2.2 Définitions

Par ssec, on entend, pour simplifier, les systèmes de stockage d'énergie basés sur des convertisseurs, tels que les systèmes de stockage par batterie (BESS) et les systèmes de stockage d'énergie alternatifs (p. ex. FlyWheel, accumulateur d'air comprimé, supercondensateurs, etc.) avec un accumulateur directement rattaché. Les installations Power-to-X sans accumulateur direct ne sont pas traitées dans ce document.

2.3 Convention relative aux signes

Dans ce document, on utilise en principe le système vectoriel de consommation :

$\boldsymbol{Q < 0}$, Valeur négative : la fourniture de puissance réactive inductive au réseau de transport entraîne une augmentation de la tension au nœud d'injection, comportement identique à la capacité ;

$\boldsymbol{Q > 0}$, Valeur positive : le prélèvement de puissance réactive inductive sur le réseau de transport entraîne une baisse de la tension au nœud d'injection, comportement identique à celui de l'inductance.

Les mêmes signes s'appliquent à la mise à disposition de puissance active. Le Tableau 2 contient un aperçu de la convention relative aux signes.

	Surexcité (comportement capacitif)	**Sous-excité (comportement inductif)**
ssec : mode de demande	P > 0, le ssec prélève de la puissance active sur le réseau Q < 0, le ssec fournit de la puissance réactive au réseau	P > 0, le ssec prélève de la puissance active sur le réseau Q > 0, le ssec prélève de la puissance réactive sur le réseau
ssec : mode de production	P < 0, le ssec fournit de la puissance active au réseau Q < 0, le ssec fournit de la puissance réactive au réseau	P < 0, le ssec fournit de la puissance active au réseau Q > 0, le ssec prélève de la puissance réactive sur le réseau

Tableau 2: Aperçu de la convention relative aux signes

2.4 Convention d'exploitation

La terminologie suivante est utilisée dans ce document :

- Mode de demande : prélèvement de puissance active par le ssec à partir du RT ;
- Mode de production : injection de puissance active par le ssec dans le RT.

3 Exigences relatives au comportement du ssec

3.1 Réglage de la puissance active et modes d'exploitation

3.1.1 Commande de la puissance active en exploitation normale

Le réglage de la puissance active du ssec doit être conçu de manière à être coordonné avec le réglage formant le réseau au chapitre 3.5 (grid-forming). La réaction rapide de formation du réseau a lieu en priorité, tandis que le réglage plus lent de la fréquence amène la puissance active à la valeur cible prédéfinie. La valeur de consigne de la puissance active doit être réglable à la fois en mode production et en mode demande, avec une résolution minimale de 0,1 MW. La valeur réelle de la puissance active ne doit pas dépasser la valeur de consigne, mesurée en tant que valeur moyenne glissante sur 10 secondes.

Le ssec doit permettre une transition progressive entre la production et la demande (exploitation bidirectionnelle). Le taux de variation de la puissance active (Ramp Rate) doit pouvoir être limité aussi bien en cas de modification de la valeur de consigne qu'en cas d'adaptation liée à la fréquence. La plage réglable pour les rampes va d'au moins 10% à 100% de la puissance nominale par minute. La CE [4] et ses annexes fixent la variation maximale de la puissance active. La modification doit être effectuée de manière linéaire et sans saut. Des exigences plus strictes peuvent s'appliquer au marché des services système.

3.1.2 Modification des modes de réglage

Le passage d'un mode d'exploitation à l'autre et d'une valeur de consigne à l'autre doit être possible à tout moment, localement et à distance, et ne doit pas entraîner de variations brutales de la puissance du réseau.

3.2 Réglage de la puissance réactive

3.2.1 Réglage de la tension-puissance réactive

Le ssec doit pouvoir réguler la tension ou la puissance réactive de manière automatique, continue et progressive. Le concept actuel de maintien de la tension fournit des détails à ce sujet [5]. Les modifications de la puissance réactive au point de raccordement doivent être effectuées de manière analogue au chapitre 3.1.1. Le réglage ne doit pas être affecté par des fluctuations de fréquence et de tension ou par des perturbations de courte durée.

La plage de réglage doit correspondre à la capacité réelle de puissance réactive du ssec et ne doit pas être limitée artificiellement. Les limitations techniquement nécessaires doivent être documentées et justifiées.

Le réglage doit réagir de manière stable aux modifications progressives, brusques et continues et ne doit pas provoquer d'oscillations. En mode grid-forming, la puissance réactive n'est pas une grandeur réglable indépendamment et résulte du réglage de la tension. Si le réglage de la tension fonctionne avec un mécanisme de type Q(V) ou une statique V, la consigne de statique de puissance réactive peut être définie indépendamment. Dans ce cas, la régulation rapide de tension / grid-forming réagit en premier, tandis que la régulation de la puissance réactive converge vers la valeur cible (réglage en cascade).

Avant la mise en service, les concepts de réglage doivent être convenus avec Swissgrid. Dès la première mise en service, le réglage de la tension doit être effectué. Si nécessaire, les paramétrages du réglage doivent être adaptés en cours de fonctionnement afin de respecter les prescriptions en vigueur.

3.2.2 Capacité de puissance réactive

Pour les ssec, le maintien actif de la tension s'applique conformément au chapitre 4.4.3 du TC. Le ssec doit pouvoir injecter et prélever de la puissance réactive (Q).

Le ssec avec l'installation de stockage d'énergie et l'onduleur sont considérés comme une unité et doivent mettre à disposition des ressources de puissance réactive en tenant compte de la capability curve conformément à Figure 1.

Pour la puissance nominale, il doit être possible de mettre à disposition une puissance réactive dans le sens positif comme dans le sens négatif d'au moins cos(Φ) = 0,925. Un diagramme de capacité de puissance réactive analogue à la Figure 2 et Figure 3 est nécessaire. La mise à disposition d'une puissance réactive plus élevée est autorisée et souhaitable.

Dans tous les états d'exploitation, y compris ceux où l'échange de puissance active est nul, l'unité doit être en mesure d'injecter ou d'obtenir de la puissance réactive conformément à la capability curve et au diagramme de capacité de puissance réactive de la Figure 1.

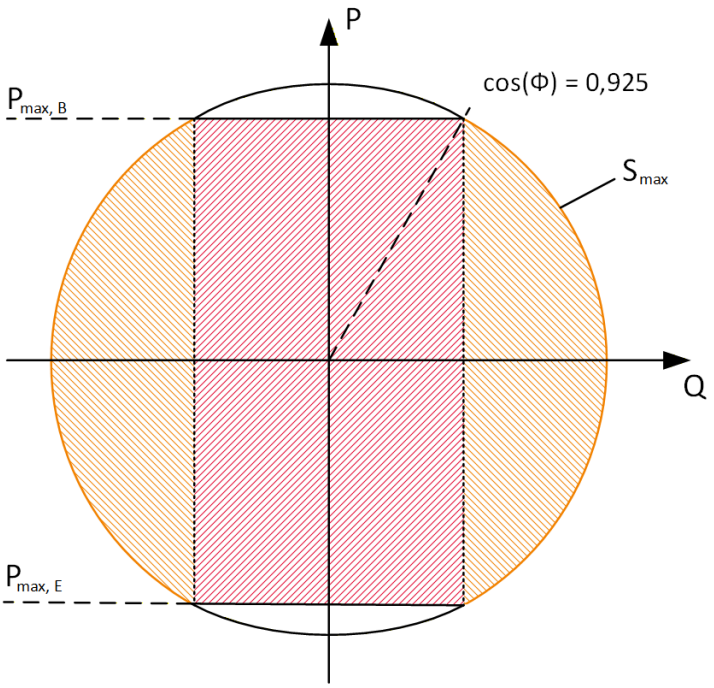

Figure 1: La puissance réactive doit être fournie en tenant compte de la capability curve

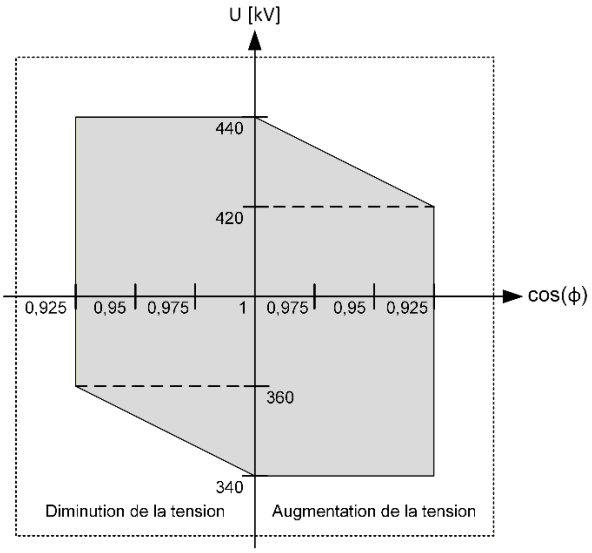

Figure 2: Diagramme de capacité de puissance réactive 380 kV

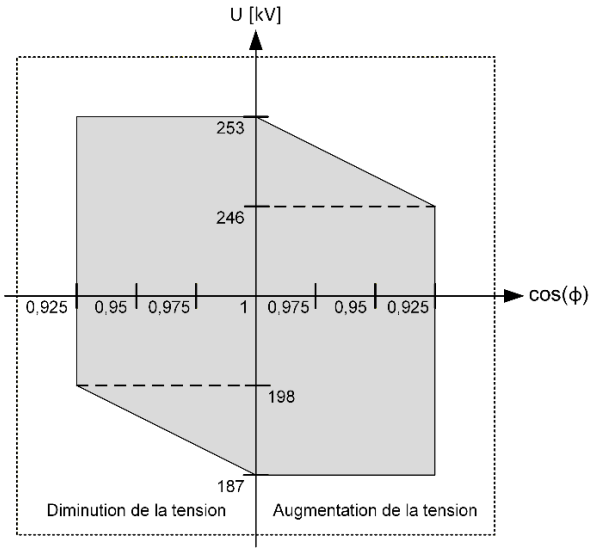

Figure 3: Diagramme de capacité de puissance réactive 220 kV

3.2.3 Approvisionnement en courant réactif

Un ssec est soumis au maintien actif de la tension conformément au concept de maintien de la tension [5] et doit donc être préqualifié avec succès pour le maintien actif de la tension.

Les participant(e)s au maintien actif de la tension doivent mettre à la disposition de Swissgrid des informations d'exploitation sur leurs installations (notamment le diagramme puissance active - puissance réactive).

Un ssec doit injecter du courant réactif capacitif en cas de sous-tension (c'est-à-dire plus bas que la limite inférieure pour le service continu selon le manuel d'interface de gestion opérationnelle du réseau (MIGOR)) et du courant réactif inductif en cas de surtension (c'est-à-dire plus haut que la limite supérieure pour le fonctionnement continu selon le MIGOR). Dans ces cas, l'injection de courant réactif (I_q) doit avoir la priorité sur le courant actif (I_p). En cas d'exploitation dans la plage de tension normale, l'alimentation en courant actif (I_p) est prioritaire.

3.2.4 Résistance aux sous-tensions et surtensions de courte durée

Le ssec doit être en mesure de continuer à fonctionner au point de raccordement conformément aux chapitres 4.1 et à la Figure 4 pendant et après une sous-tension ou surtension de courte durée contenant éventuellement d'autres composantes de fréquence, sans se déconnecter du réseau. L'exigence relative à la résistance aux sous-tensions et aux surtensions s'applique à tous les états d'exploitation, cas d'erreur et opérations de commutation. L'exigence relative à la rigidité diélectrique est déterminée au moyen des conditions suivantes :

- avant la sous-tension ou la surtension, la tension au point de raccordement du ssec se trouve dans la norme ;
- avant la perturbation de la tension, le ssec n'injecte pas de puissance réactive au point de raccordement et ne prélève pas de puissance réactive au point de raccordement ;
- avant la perturbation de la tension, le régulateur de tension automatique (AVR) du ssec est en service ;
- on part du principe que la puissance de court-circuit du point de raccordement avant et après une élimination de la perturbation se situe à l'extrémité inférieure de la bande possible.

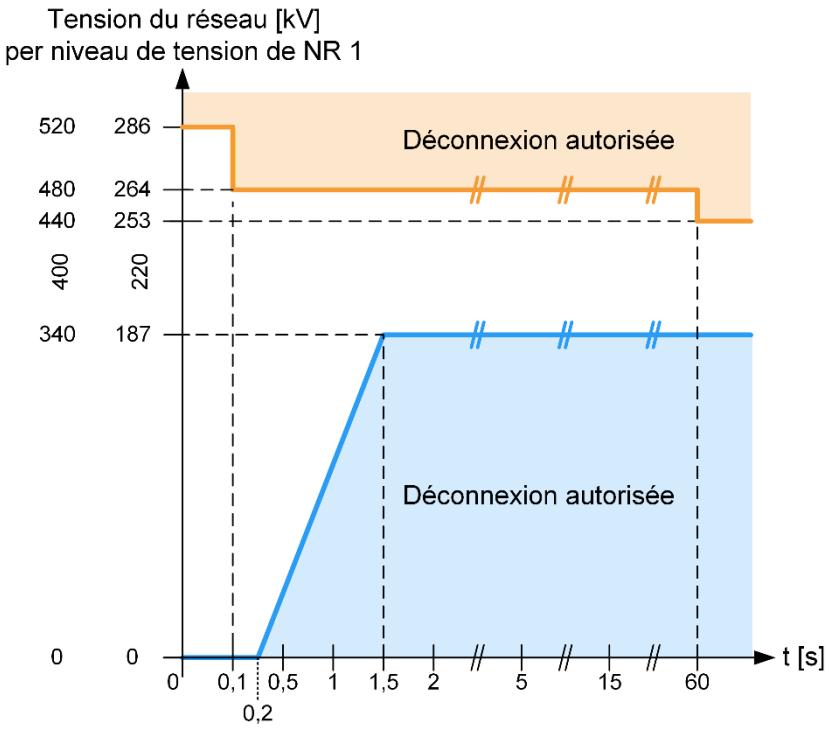

Figure 4: Comportement de neutralisation des erreurs en cas de surtension ou de sous-tension de courte durée

3.2.5 Rétablissement de la puissance active après une perturbation de la tension

Après une perturbation de la tension de courte durée, le ssec doit rétablir la puissance active injectée ou soutirée avant la perturbation dans un délai de trois secondes, si le ssec fonctionne en mode « grid-following ». La puissance active est considérée comme rétablie lorsqu'elle atteint, au point de raccordement au réseau, le niveau précédent avec une tolérance de ±5% de la valeur de consigne. Des écarts ou des variations de puissance permanents résultant de la perturbation ne sont pas autorisés.

Si le rétablissement de la puissance active dépend de la tension, cette dépendance doit être transmise à Swissgrid de manière transparente et documentée, y compris une description technique des effets sur le rétablissement. En mode « grid-following », cette exigence ne s'applique pas, car l'injection de puissance active après une perturbation dépend de la fréquence du réseau résultante.

3.2.6 Réglage de la tension

Le ssec doit pouvoir être exploité de manière à ce que le plan de tension de Swissgrid puisse être suivi à temps.

La valeur de consigne pour le réglage de la tension doit être réglable par incréments de 0,1 kV au maximum, dans les limites de tension admissibles du point de raccordement. Les modifications de la valeur de consigne, locales ou à distance, doivent être effectuées via une fonction échelonnée qui limite le taux moyen de variation de la tension à 0,1 kV/s maximum - sauf si le ssec fonctionne en mode de formation du réseau.

En cas de sauts de tension au point de raccordement inférieurs à ±0,02 p.u., le ssec doit réagir comme suit :

1. le réglage formant le réseau selon le chapitre 3.5 Propriétés de formation du réseau commande la réaction initiale rapide de la puissance réactive ;
2. le temps de montée de la réaction de la puissance réactive de 0% à 80% de la variation totale ne doit pas dépasser 1 seconde ;
3. la suroscillation ne doit pas dépasser 15% de la variation totale ;
4. la réponse de la puissance réactive doit se stabiliser à la valeur cible en moins de 5 secondes ;
5. l'écart en état stable ne doit pas dépasser ±5% de la variation ;
6. le début pour les données temporelles est le moment de la modification de la valeur de consigne.

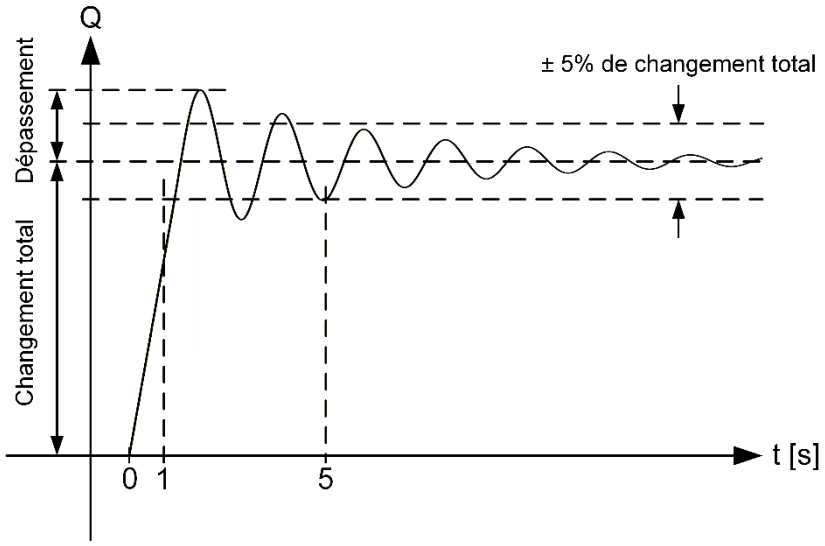

Figure 5:Réglage de la puissance réactive en cas de sauts de tension

En cas de modifications sur des installations existantes ayant une influence sur le réglage de la tension, Swissgrid fixe les exigences au cas par cas.

3.3 Conditions préalables à la (re)mise en service

Le prélèvement ou la production de puissance active du ssec après une absence de tension du réseau de transport d'au moins 5 minutes ne peut reprendre qu'après avoir été autorisé verbalement par Swissgrid, un centre de commande de centrale électrique (KAS) ou un centre de commande des installations du réseau de distribution (VAS).

En cas de décalage vectoriel permanent (saut de phase) de la tension du réseau jusqu'à ±30 degrés pendant une perturbation de la tension, le ssec ne doit pas se déconnecter. Il en va de même en cas de plusieurs perturbations de tension successives.

3.4 Résonances et interactions du régulateur

Dans aucun état d'exploitation, le convertisseur ne doit provoquer des vibrations harmoniques dépassant les valeurs limites autorisées - CEI 61000-3-6 [6] dans le réseau de Swissgrid. Le convertisseur ne doit pas exciter activement les résonances électriques du réseau Swissgrid, c'est-à-dire qu'il ne doit pas utiliser de réglage par rétroaction.

3.5 Propriétés de formation du réseau

Les ssec doivent utiliser des convertisseurs capables de fonctionner en mode de formation de réseau (grid-forming). La section suivante précise les exigences générales auxquelles le ssec doit répondre en mode de formation de réseau.

Le réglage de formation de réseau d'un ssec doit répondre aux exigences suivantes :

- Le ssec doit être actif et en état de service à tout moment, dès que le ssec est connecté au réseau. Les modifications ou les perturbations du réseau ne doivent pas influencer le mode de fonctionnement ;
- Le passage du mode «formation du réseau» au mode «suivi du réseau» et inversement doit se faire sans interruption de l'exploitation ;
- Le système de réglage doit également être en état de service lorsque le ssec fonctionne à tout moment dans les limites de sa capacité nominale, tant en mode de production qu'en mode de demande, y compris la capacité de puissance réactive requise ;
- L'état de service doit être garanti indépendamment de l'état de charge actuel du ssec ;
- Le réglage doit fonctionner sans restriction dans tous les modes d'exploitation du réglage de la puissance active (p. ex. réglage à puissance constante, réglage de fréquence) ;
- De même, le réglage de la puissance réactive selon le chapitre 3.2 doit être en état de service ;
- Coordination avec des limitations de courant : Si le convertisseur atteint la limite de courant, la régulation en mode formation de réseau ne peut plus être assurée. Par conséquent, cette exigence ne s'applique que tant que le convertisseur fonctionne en-dessous de cette limite de courant. Une limitation nécessaire du courant ne doit pas interrompre le fonctionnement du réglage formant le réseau ni mettre en danger l'exploitation sûre du ssec. Les limitations de courant fixées doivent correspondre à l'efficacité réelle de l'installation et tenir compte de la capacité de surcharge de courte durée des composants utilisés. Il faut s'assurer que le réglage fonctionne de manière coordonnée avec d'autres commandes dans ces limites, afin de garantir une mise à disposition continue des propriétés de formation du réseau – le ssec doit fonctionner de manière coordonnée avec les limitations du courant des convertisseurs aussi en cas de perturbations du réseau ou de variations dynamiques de la charge. Une limitation du courant ne doit pas entraîner une interruption de la fonction de régulateur formant le réseau. Les limitations du courant fixées pour le réglage doivent correspondre à la puissance réelle de l'installation et exploiter la capacité de surcharge de courte durée des appareils ;
- Le réglage formant le réseau doit être coordonné avec d'autres commandes, tant au niveau local qu'au niveau de l'installation, afin de garantir une exploitation stable et d'éviter des interactions indésirables.

Il n'est pas nécessaire de surdimensionner la capacité du ssec en raison des fonctions de réglage formant le réseau. Les limitations qui en découlent doivent être communiquées à Swissgrid.

Les exigences fonctionnelles suivantes s'appliquent à la commande formant le réseau :

1) **Soutien autonome et rapide de la fréquence et de la tension :**
   Le ssec doit fournir sur le réseau un support de fréquence et de tension autonome et quasiment instantané :

   a) en cas de décalage vectoriel progressif (saut de phase) de la tension du réseau, le ssec doit contrecarrer ce décalage en fournissant de la puissance active et réactive ;

   b) en cas de variation d'amplitude de la tension du réseau, le ssec doit augmenter localement la rigidité de la tension en injectant de la puissance réactive, voir chapitre 3.2.3 ;

   c) la réaction aux deux exigences a) et b) doit avoir lieu dans les 10 ms suivant un changement dans le réseau (le courant doit s'adapter en fonction du réglage). L'objectif est de maintenir le vecteur de tension de la source de tension interne constante dans le cadre temporel sous-transitoire avec toute la capacité de courant disponible.

2) **Atténuer les oscillations du réseau et assurer la stabilité des petits signaux :**
Selon le TC, chapitre 6.5.6, la réaction du ssec aux variations de fréquence et de tension du réseau électrique ne doit pas les amplifier, mais les atténuer :

   a) le ssec doit fonctionner de manière stable en petits signaux ;

   b) l'amortissement des vibrations dans les plages de fréquences suivantes est particulièrement important :

      i) 0,1–1 Hz : oscillations de puissance (Inter-Area Oscillations) ;

      ii) 1–2 Hz : oscillations locales ;

      iii) 2–15 Hz : oscillations de tension et interactions de commande ;

      iv) 15–45 Hz : oscillations subsynchrones et résonantes.

   c) Si le ssec ne répond pas naturellement à ces exigences, il convient de mettre en œuvre un réglage d'atténuation approprié.

3.5.1 Stabilité

Le ssec et sa commande doivent être conçus de manière à garantir une exploitation stable, même dans un réseau comportant une part importante d'installations ssec. Dans ce contexte, stable signifie que le ssec reste en permanence synchrone avec le réseau dans les limites de tension et de fréquence précisées au chapitre 4.1 et qu'il fonctionne de manière stationnaire et sans oscillations à chaque point d'exploitation admissible.

En cas de perturbations du réseau, telles que des oscillations de tension ou des sauts de phase, le ssec doit activement contre-réguler afin d'amortir les écarts et de soutenir la stabilité du réseau. En cas de dépassements durables de la tension admissible au point de raccordement, le ssec peut se déconnecter automatiquement, voir Figure 6 au chapitre 4.1. Le ssec doit rester connecté au réseau même en cas d'auto-déconnexion monophasée ou triphasée sur des lignes maillées, à condition que sa propre section de réseau ne soit pas déconnectée. En cas de sauts de phase soudains de la tension du réseau jusqu'à ±30 degrés ainsi que dans une large plage de puissance de court-circuit définie individuellement par Swissgrid pour chaque raccordement, le ssec doit continuer à fonctionner de manière stable et rester synchrone, voir Figure 4 en chapitre 3.2.4.

3.5.2 Inertie synthétique (Virtual Inertia)

Les ssec doivent être capables de fournir une inertie synthétique afin de soutenir la stabilité en fréquence du RT immédiatement après des déséquilibres de puissance soudains. Les ssec ne possédant pas d'inertie physique, contrairement aux machines synchrones, cette fonction doit être émulée au moyen de stratégies de régulation appropriées, telles que, par exemple, une Virtual Synchronous Machine (VSM).

La mise à disposition d'inertie synthétique doit commencer au plus tard dans les 10 ms suivant une perturbation de fréquence et avoir un effet stabilisateur sur le réseau. La réaction s'effectue par l'injection ou le soutirage ciblé de puissance active proportionnellement au taux de variation de fréquence (RoCoF).

Cette fonction doit être active quel que soit le mode d'exploitation (production ou demande), être coordonnée avec d'autres réglages (p. ex. réglage de la fréquence et de la puissance active) et tenir compte des limitations de courant des convertisseurs. La représentation et la justification de ce réglage dans les modèles de simulation (RMS et EMT) s'effectuent conformément au chapitre 6.2.

3.6 Répercussions sur le réseau

3.6.1 Généralités

Le ssec doit être planifié, construit et exploité de manière à ce que les répercussions sur le RT et les installations d'autres clientes et clients soient limitées à un niveau admissible.

Les amplitudes maximales autorisées pour les courants d'harmoniques des ssec sont fixées par Swissgrid en fonction du projet et dépendent de l'emplacement du ssec et de la nature du réseau environnant.

Les bases pour cela sont notamment :

- les Règles techniques pour l'évaluation des perturbations de réseau DACHCZ [7] ;
- les niveaux de planification selon la norme CEI/TR 61000-3-6 [6] et la norme NS NE 50160 [8].

Swissgrid assume la responsabilité de la coordination des grandeurs perturbatrices à tous les niveaux de réseau. L'apport de perturbations admissible d'un ssec dans le RT ne représente donc qu'une partie du niveau de compatibilité.

Si Swissgrid utilise des méthodes plus détaillées pour déterminer les valeurs limites en fonction du projet, il convient de privilégier leur application. En cas de nécessité de renforcement, Swissgrid transmet à la cliente ou au client la justification technique (p. ex. données du réseau, calculs). Les écarts sont convenus par écrit.

3.6.2 Évaluation des répercussions sur le réseau

Swissgrid procède à une mesure de la qualité du réseau au niveau du nœud de raccordement prévu de l'installation ssec afin de déterminer le niveau en arrière-plan. La mesure est répétée dans des conditions comparables (notamment la puissance de court-circuit au point de raccordement) pendant l'exploitation de l'installation ssec. Les états d'exploitation des ssec pendant la mesure doivent être convenus avec Swissgrid. Une évaluation des répercussions sur le réseau est effectuée sur la base des résultats des mesures.

Pour les mesures, il convient de manière générale d'appliquer les méthodes de mesure selon la norme NS NE 61000-4-30 (classe A) [6].

3.6.3 Mesures

Si des répercussions inadmissibles se produisent, la partie prenante raccordée au réseau est tenue de prendre des mesures appropriées pour les limiter. Ces mesures doivent être coordonnées avec Swissgrid.

Toutes les mesures visant à réduire les répercussions sur le réseau doivent être examinées et approuvées par Swissgrid.

Après la mise en œuvre de mesures visant à réduire les répercussions sur le réseau, une mesure de la qualité du réseau est effectuée, sur la base de laquelle l'efficacité des mesures est évaluée.

4 Comportement opérationnel

4.1 Limites d'exploitation

Le chapitre 6 du TC [1] formule des conditions de base pour le raccordement au RT. Comme le chapitre 6.5 du TC, ce chapitre décrit des exigences précisées et supplémentaires pour les propriétaires de ssec raccordés au RT, qui ne sont pas décrites dans le TC. Dans les autres cas, le TC s'applique.

Les ssec doivent pouvoir être exploités dans les limites des valeurs de tension et de fréquence de réseau indiquées sur la Figure 6, c'est-à-dire qu'ils ne doivent pas être coupés automatiquement du réseau par des appareils dépendant de la tension ou de la fréquence dans ces plages. En outre, aucun ssec ne doit se déconnecter du réseau dans la zone représentée «permanente» et, dans les zones marquées par des temps, le ssec doit rester connecté au réseau pendant la valeur temporelle correspondante, dans la mesure où cela est techniquement possible, p. ex. avec un transformateur équipé d'un régulateur d'insérateur automatique. Si l'écart de tension ou de fréquence est encore plus important (zone grise), la déconnexion immédiate du réseau est autorisée. Les valeurs de tension sont valables pour le point de raccordement. Le ssec doit être en mesure de se connecter au RT entre 49 Hz et 51 Hz.

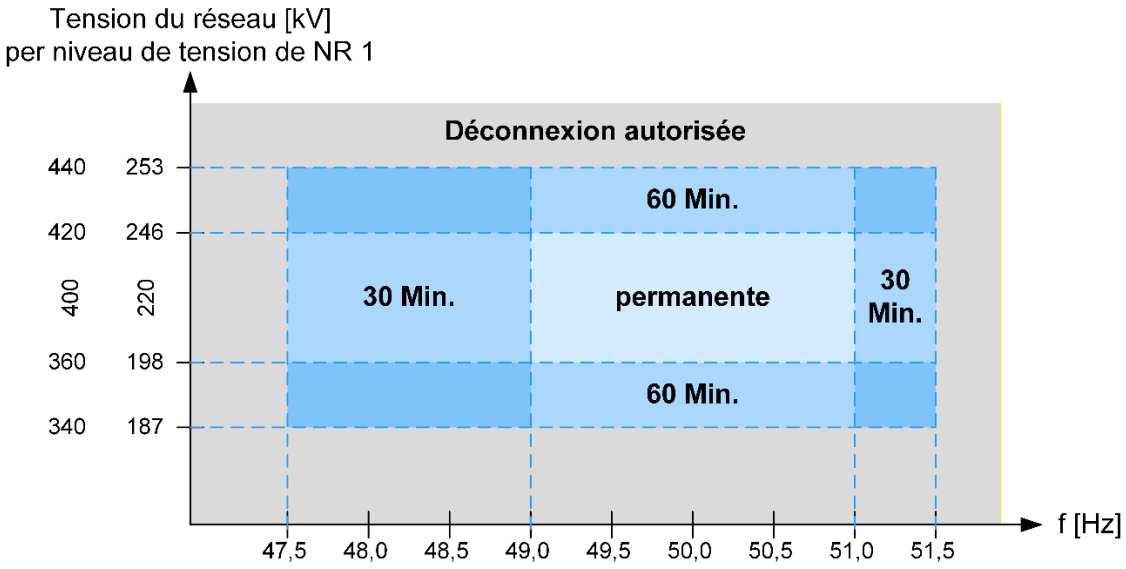

Figure 6: Plage de fréquence et de tension dans laquelle les ssec ne doivent pas se déconnecter

4.2 Tension d'exploitation et plage de fréquence

En exploitation normale, le ssec doit être capable de fonctionner en continu dans la plage de tension et de fréquence définie au chapitre 4.1.

4.3 Taux de variation de fréquence (RoCoF)

Le ssec doit être capable de poursuivre son exploitation normale tant que le taux moyen de variation de fréquence de ±2,0 Hz/s, déterminé sur une période glissante de 500 ms, n'est pas dépassé.

La mesure du taux de variation de fréquence ne doit pas être sensible aux modifications soudaines de la forme d'onde de la tension dues aux perturbations du système. Afin de mesurer le RoCoF et la fréquence correspondante, les normes applicables, telles que la norme IEC-IEEE 60255-118-1 doivent être respectés.

4.4 Réenclenchement après une séparation du réseau

Une séparation du réseau du ssec en raison d'une perturbation ou d'une défaillance planifiée ne doit pas entraîner de modifications de l'exploitation conforme du ssec après le rétablissement des connexions au réseau (p. ex. réinitialisation des configurations des appareils sur les paramètres d'usine). De plus, une reconnexion après une séparation du réseau ainsi que le mode d'exploitation paramétré doivent être effectués conformément au chapitre 3.3.

4.5 Point de contact de l'exploitant du ssec

L'exploitant du ssec doit être informé à tout moment (24h/24 et 7j/7, tous les jours de l'année) par un centre de commande de centrale électrique (KAS) conformément à la CE [4] de l'état du ssec et pouvoir gérer son exploitation en temps réel, sur place ou à distance.

Le KAS doit:

- pouvoir modifier l'état d'exploitation et le mode de réglage ;
- approuver ou limiter les ordres de commande externes ;
- pouvoir réagir sans délai en cas d'intervention directe dans l'engagement des centrales (DEKWE) ;
- en cas de commande à distance, disposer des données de mesure pertinentes et d'une technique de commande appropriée.

Sur demande de Swissgrid, la conduite de l'exploitation du KAS doit pouvoir modifier l'état d'exploitation ou les valeurs de consigne du ssec. La demande peut être faite par voie électronique ou téléphonique.

4.6 Réglage de fréquence

Le réglage de fréquence doit alors être capable de fonctionner en continu lors des transitions entre les plages de fréquences et entre les modes de production et de soutirage. Il convient de noter que la statique est définie comme suit :

$$Statique = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_N}} = -\frac{\frac{f - f_0}{f_n}}{\frac{P_{p,d} - P_0}{P_N}}$$

- f: fréquence [Hz]
- f_n: fréquence nominale [50 Hz]
- f_0: fréquence de consigne [Hz]
- P_p: puissance active du ssec en mode de production
- P_d: puissance active du ssec en mode de demande
- $P_{p,d}$: P_p ou P_d, selon que la formule s'applique au mode de production ou au mode de demande
- P_0: valeur de consigne de la puissance active du ssec
- P_N: puissance nominale du ssec en mode de production

4.6.1 Surfréquence

La commande de surfréquence doit toujours être activée. Pour les fréquences de réseau supérieures à 50,2 Hz, le ssec doit :

- réduire sa puissance active de manière linéaire en mode de production ;
- augmenter de manière linéaire sa consommation de puissance active en mode de demande.

Tous les ssec raccordés au RT doivent réduire la puissance active de manière linéaire à partir d'une fréquence de 50,2 Hz avec une statique comprise entre 2% et 12%. La valeur par défaut doit être de 5%.

La réaction de puissance doit intervenir dans la seconde qui suit le dépassement de 50,2 Hz afin d'éviter le dépassement de la fréquence critique de 51,5 Hz. Les mesures décrites ci-dessus s'appliquent en particulier lorsque le RT se trouve dans une situation critique selon le chapitre 2 du TC. Dans ce cas, les instructions susmentionnées doivent être remplies en plus des mesures conformément au chapitre 5.3 du TC et s'ajoutent à l'énergie de réglage déjà fournie.

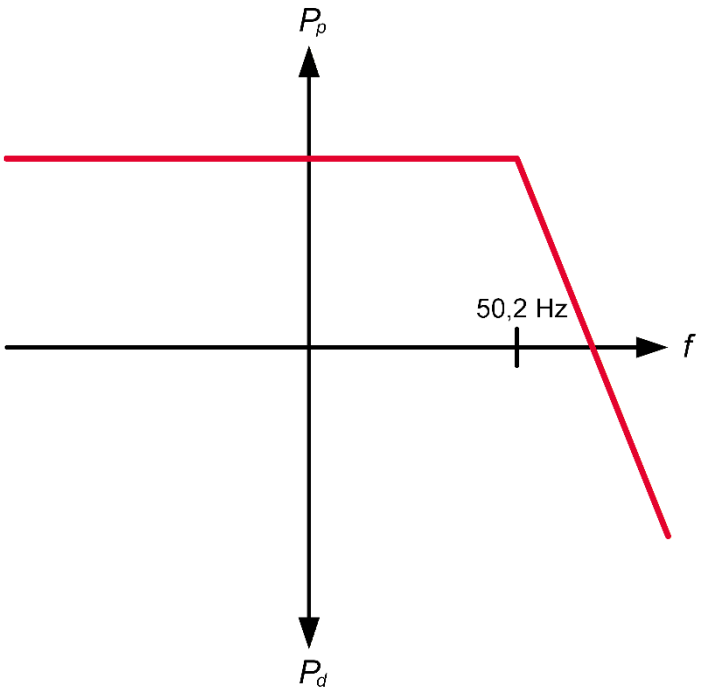

Figure 7: Dépendance de la fréquence dans une situation extraordinaire – surfréquence

4.6.2 Sous-fréquence

Pour les fréquences inférieures à 49,8 Hz, le ssec doit, en mode de demande :

- réduire linéairement l'absorption de puissance active à 0 MW ;
- si cela est techniquement possible, augmenter la puissance active fournie pour stabiliser le réseau ;
- rester en état de service à 0 MW afin d'injecter de la puissance réactive au service du réseau dans la mesure de ses capacités.

Tous les ssec raccordés au RT doivent réduire l'absorption de puissance active de manière linéaire à partir d'une fréquence de 49,8 Hz avec une statique comprise entre 0,2% et 5%. La valeur par défaut doit être paramétrée à 1,6%.

La réaction de puissance doit intervenir dans la seconde qui suit le passage sous 49,8 Hz afin d'éviter le passage sous la fréquence critique de 48,5 Hz. Les mesures décrites ci-dessus s'appliquent en particulier lorsque le RT se trouve dans une situation critique selon le chapitre 2 du TC. Dans ce cas, les instructions

susmentionnées doivent être remplies en plus des mesures conformément au chapitre 5.3 du TC et s'ajoutent à l'énergie de réglage déjà fournie.

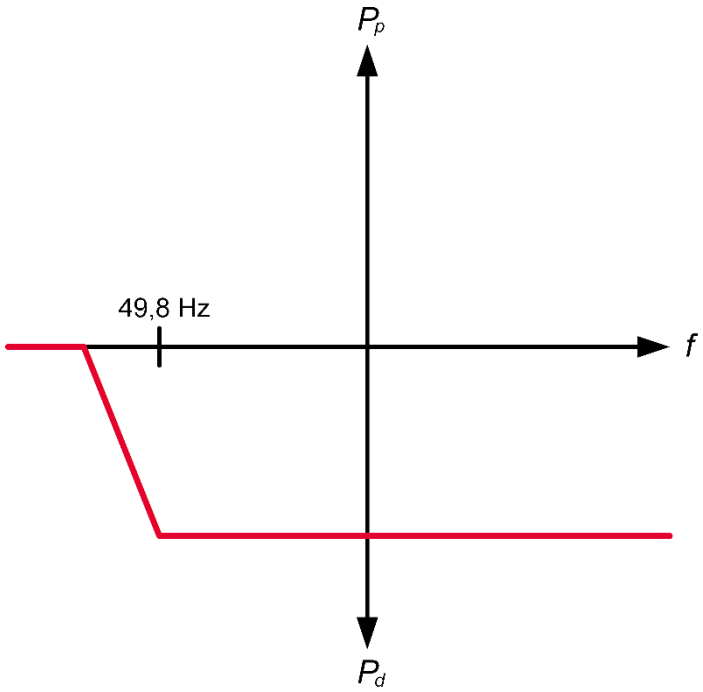

Figure 8: Dépendance de la fréquence dans une situation extraordinaire – sous-fréquence

4.7 Comportement en cas de reconstruction du réseau

Après une défaillance du réseau, les ssec ne doivent pas effectuer d'opérations de charge ou d'injection lorsque la tension est rétablie. Le prélèvement et la fourniture de puissance active et réactive doivent être coordonnés en toutes circonstances avec Swissgrid. Un rétablissement contrôlé et stable du réseau en amont doit toujours être traité en priorité. Les ssec qui se trouvent en marche en îlotage pendant ou après la défaillance de réseau se manifestent de manière proactive auprès de Swissgrid.

5 Exécution du raccordement au réseau

5.1 Technique des circuits primaires au point de raccordement

Les normes Swissgrid s'appliquent à toutes les installations et composants de la technique des circuits primaires. Ce chapitre décrit en complément les exigences spécifiques et les particularités du raccordement d'un ssec.

5.1.1 Généralités

Swissgrid indique les valeurs caractéristiques requises pour le dimensionnement du point de raccordement au réseau pour le ssec. Celles-ci incluent entre autres :

- la puissance apparente maximale pouvant être raccordée ;
- la tension nominale ;
- la tension assignée pour les moyens d'exploitation ;
- la plage d'exploitation Tension ;
- la plage d'exploitation Fréquence ;
- le courant d'exploitation maximal ;
- les courants maximaux de mise à la terre et de court-circuit ;
- le niveau d'isolation.

Par ailleurs, Swissgrid met à la disposition du ssec les données suivantes pour le dimensionnement des dispositifs de protection propres aux parties prenantes raccordées au réseau et pour les considérations relatives aux répercussions sur le réseau :

- le courant alternatif de court-circuit initial minimal probable et l'angle d'impédance provenant du réseau de Swissgrid au point de raccordement au réseau ;
- le temps total de coupure en cas d'erreur de la protection principale provenant du réseau de Swissgrid au point de raccordement au réseau.

Lors de la mesure des moyens d'exploitation, il faut tenir compte des courants de court-circuit provenant aussi bien du réseau de Swissgrid que de celui du ssec.

La partie prenante raccordée au réseau doit concevoir les installations électriques dont elle est propriétaire pour des courants de court-circuit au moins dans le cadre de la résistance aux courts-circuits des installations de Swissgrid sur le raccordement au réseau. En cas d'importants courants de court-circuit plus élevés en perspective, Swissgrid indique à la partie prenante raccordée au réseau la résistance aux courts-circuits requise du ssec. Si, en raison d'une augmentation de la puissance de court-circuit au-delà de la résistance aux courts-circuits actuelle des installations du gestionnaire de réseau au niveau du raccordement au réseau, il est nécessaire d'augmenter la tenue aux courts-circuits du ssec existant, la mesure est coordonnée avec Swissgrid.

5.1.2 Installation de raccordement des ssec

Le raccordement des ssec s'effectue dans le poste de couplage de Swissgrid via un champ de raccordement conformément à Figure 9 ou, si la puissance de raccordement ou des exigences spécifiques en matière de disponibilité le nécessitent par exemple, via plusieurs champs de raccordement ou un propre poste de couplage.

Le raccordement des ssec s'effectue via une installation de raccordement côté client au point de raccordement.

L’ensemble de l’installation de raccordement doit être réalisé conformément aux normes en vigueur et selon les règles techniques reconnues. Les sections subdivisables par des dispositifs sectionneurs doivent pouvoir être contrôlées quant à l’absence de tension et mises à la terre (points fixes de mise à la terre ou sectionneurs de mise à la terre à commande manuelle pour les grandes distances de raccordement, pour un raccordement de transformateur dans une AIS, voir Figure 9).

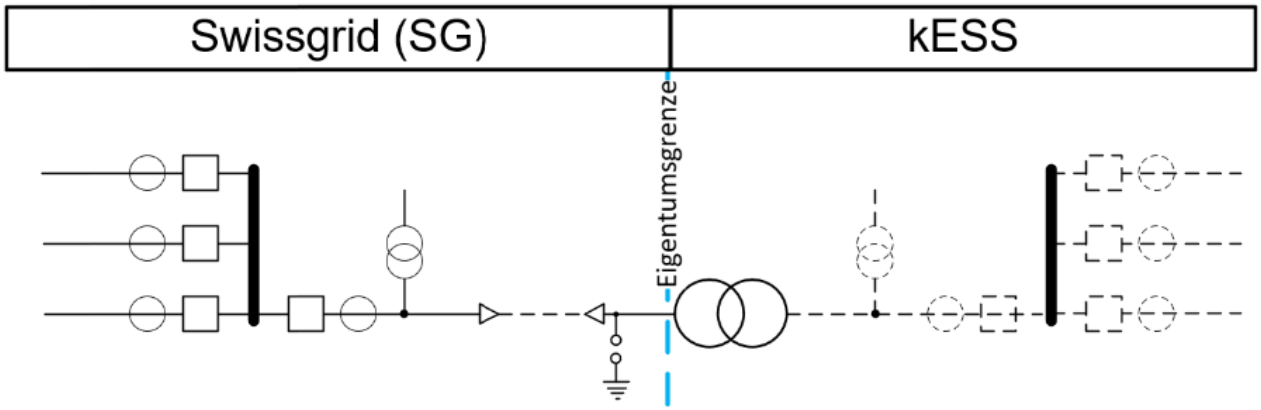

Figure 9: Raccordement schématique d’un ssec

5.1.3 Traitement du point neutre,

Le traitement du point neutre pour le RT est défini par Swissgrid. Pour tous les moyens d’exploitation de la partie prenante raccordée au réseau qui sont reliés galvaniquement au RT de Swissgrid, Swissgrid prescrit également le type de traitement du point neutre.

Le point neutre côté haute tension des transformateurs entre le RT et le réseau de la cliente ou du client doit être sorti et réalisé et câblé selon les prescriptions de Swissgrid (ceci est également valable pour d’autres moyens d’exploitation formant le point neutre).

La coordination de l’isolation et la capacité de charge du point neutre doivent être convenues entre Swissgrid et la partie prenante raccordée au réseau. Dans ce cas, le traitement du point neutre côté très haute tension ne doit pas être affecté par le ssec.

Les répercussions de défauts asymétriques provenant du ssec doivent être minimisées (en particulier, aucun composant du système homopolaire ne doit être transmis depuis le réseau de la partie prenante raccordée au réseau). La mise à la terre simultanée du point neutre (rigide ou à limitation de courant) de plus d’un côté d’un transformateur n’est donc pas autorisée. En cas de besoin d’utilisation simultanée de plusieurs points neutres sur un transformateur, un concept correspondant doit être convenu avec Swissgrid et faire l’objet d’un accord.

Swissgrid définit le traitement du point neutre sur le plan technique, mais aussi sur le plan opérationnel, c’est-à-dire qu’elle détermine comment les points neutres doivent être traités et surveillés en cours d’exploitation.

La partie prenante raccordée au réseau doit s’assurer que l’exploitation du ssec n’entraîne pas l’injection de courants DC non autorisés dans les points neutres des enroulements côté haute tension.

5.1.4 Disjoncteurs

Les disjoncteurs côté très haute tension doivent être conçus pour la coupure en toute sécurité de tous les courants de court-circuit possibles, aussi bien en cas d'erreurs côté ssec que côté réseau.

Les disjoncteurs doivent pouvoir effectuer toutes les tâches de manœuvre requises sans générer de surtensions transitoires susceptibles d'endommager des éléments de l'installation de Swissgrid.

Les exigences spécifiques en matière de manœuvre doivent être convenues avec Swissgrid.

5.1.5 Transformateurs

Le choix et le raccordement des transformateurs doivent être convenus entre Swissgrid et l'exploitant du ssec.

5.1.6 Parafoudres

Les besoins et les spécifications des parafoudres pour la protection du ssec doivent être convenus avec Swissgrid.

5.1.7 Installations câblées

Le traitement du blindage et la mise à la terre des installations câblées servant au raccordement du ssec doivent être convenus avec Swissgrid.

5.1.8 Dispositif de mise à la terre

Le concept de mise à la terre du ssec doit être convenu avec Swissgrid.

Le dispositif de mise à la terre du ssec doit être dimensionné et construit conformément aux données du réseau de Swissgrid pour les courants de court-circuit et de défaut à la terre maximaux. Le respect des tensions de contact admissibles doit être justifié par des techniques de mesure. Les protocoles de mesure de la mise à la terre, y compris le plan de mise à la terre, doivent être remis à Swissgrid en temps utile avant la première mise sous tension.

La mise à la terre du ssec est reliée par défaut à la mise à la terre de l'installation Swissgrid. Les interconnexions doivent être suffisamment dimensionnées pour conduire en toute sécurité les courants de défaut et minimiser les différences de potentiel entre les réseaux de mise à la terre des installations.

5.2 Technique des circuits secondaires

5.2.1 Généralités

Les éléments de réseau du côté du RT doivent être surveillés et, le cas échéant, pilotés conformément aux exigences du Manuel de conduite et de gestion du réseau suisse ou de la CE/CER [4], [9]. Pour cela, un échange de signaux coordonné entre le ssec et Swissgrid est nécessaire.

L'échange de signaux à l'interface entre le RT et le ssec doit en principe suivre les exigences du manuel de l'AES « Spécifications techniques relatives aux interfaces de protection et de contrôle-commande des transformateurs avec le réseau de transport » et doit faire l'objet d'une concertation entre les partenaires.

Si des éléments pouvant être commandés à distance sont présents dans le champ de raccordement du côté du ssec (par exemple des sectionneurs télécommandés dans le cas de plusieurs transformateurs fonctionnant en parallèle du côté du ssec ou dans le cas d'installations séparées physiquement (valeur indicative >

300 m)), l'exploitant du ssec doit mettre à disposition des locaux séparés pour les dispositifs de commande, de mesure et de protection. Ces locaux doivent être équipés d'un approvisionnement en électricité approprié, être accessibles à tout moment à Swissgrid et être protégés contre tout accès non autorisé.

5.2.2 Synchronisation

La partie prenante raccordée au réseau doit permettre une mise en parallèle synchrone sûre de ses installations au RT (avec ses propres appareils de couplage).

L'exploitant des ssec est responsable des dispositifs de commande et de synchronisation de son installation. La synchronisation des ssec doit être effectuée par des composants primaires appartenant à l'exploitant du ssec.

5.2.3 Autorité de commande

L'autorité de commande au point de raccordement doit être réglée entre Swissgrid et l'exploitant du ssec avant la mise en service du ssec et doit respecter les exigences du Manuel de conduite et de gestion du réseau suisse et de la CE/CER.

5.2.4 Interface entre la commande de la puissance active et réactive

La commande des ssec doit disposer d'une interface appropriée (entrées analogiques, binaires ou une interface système) par laquelle Swissgrid pourrait influencer le point de travail des ssec (puissance active et réactive) (p. ex. pour éviter un effondrement du réseau). Cela n'est pas prévu actuellement et sera précisé en détail dans le concept d'exploitation du ssec. Par ailleurs, les spécifications relatives au réglage de la puissance réactive décrites au chapitre 3.2 doivent être remplies.

5.3 Protection

5.3.1 Généralités

Les systèmes de protection du ssec sont entièrement garantis par l'exploitant du ssec et doivent respecter les exigences au point de raccordement ainsi qu'être techniquement adaptés et compatibles avec les concepts de protection définis dans les normes Swissgrid. La protection de l'installation du ssec doit être assurée par l'exploitant du ssec.

Les systèmes de protection doivent être en mesure de détecter de manière fiable les erreurs électriques du côté du ssec et de le désactiver de manière sélective et sans répercussion. Les prescriptions du manuel de l'AES «Guide protection Suisse» [10] ainsi que les définitions selon le chapitre 6.3.7 du TC doivent être respectées. Dans les plages de tension et de fréquence autorisées, les systèmes de protection ne doivent pas réagir aux fluctuations normales du réseau (voir chapitre 4).

Pour garantir un concept de protection sélectif, il convient de prévoir des transformateurs de courant appropriés.

Les systèmes de protection ne doivent pas compromettre les exigences relatives au balayage des erreurs de réseau et doivent être conçus de manière à être compatibles avec les exigences relatives au réglage de l'installation en fonction de la fréquence et à ne pas entraver sa réaction définie aux variations rapides de fréquence afin de soutenir la stabilité du système.

Les erreurs au point de raccordement doivent également être détectées afin que le ssec puisse se déconnecter du réseau après un temps défini. La partie prenante raccordée au réseau doit prévoir des mesures de protection appropriées à cet effet. Ceci s'applique également à la marche en îlotage si le ssec est apte à fonctionner en îlotage. En outre, une protection contre les défaillances des disjoncteurs doit être intégrée afin de prendre en compte la défaillance des disjoncteurs dans le concept de protection.

Si une séparation du réseau du ssec a lieu suite à un déclenchement de protection, un réenclenchement ne peut avoir lieu qu'après clarification de la cause de la perturbation et après autorisation de Swissgrid (aucun réenclenchement automatique).

La structure et la conception des transformateurs nécessaires, notamment leur utilisation commune, doivent être convenues entre les partenaires contractuels.

5.3.2 Délestage automatique de fréquence

L'exploitant du ssec est responsable de la conformité du ssec aux exigences selon la recommandation de la branche de l'AES «Spécifications techniques relatives au délestage automatique sur seuil de fréquence». [11] Il convient de noter que les exigences varient en fonction de l'état d'exploitation et que les chapitres 4.6.1 et 4.6.2 sont pris en compte et respectés.

5.3.3 Détection de réseau en îlotage et marche en îlotage

Les ssec peuvent, en cas de perturbations sur le réseau en amont, se mettre en marche en îlotage afin de couvrir leurs propres besoins en énergie, sans liaison avec le RT. Toutes les dispositions relatives à la maîtrise de l'îlotage et à la sécurité de l'exploitation pendant la marche en îlotage incombent à l'exploitant des ssec.

Les dispositions prises pour la synchronisation (technique et organisationnelle) de l'îlotage avec le RT doivent être coordonnées avec Swissgrid, la synchronisation ne devant pas se faire via la technique des circuits primaires du RT.

L'aptitude au démarrage autonome n'est pas obligatoire pour les ssec. Les ssec aptes au démarrage autonome peuvent participer à l'appel d'offres PSS Démarrage autonome et Aptitude à la marche en îlotage s'ils remplissent les exigences de Swissgrid.

5.3.4 Analyse des perturbations

Swissgrid procède à une analyse systématique des perturbations dans le RT et, sur la base des résultats, élabore avec les exploitants des ssec affectés des solutions appropriées en vue d'améliorer les processus existants. Les informations nécessaires (p. ex. données de mesure, réactions de protection et enregistrements relatifs au comportement du ssec pendant le déroulement de la perturbation) pour l'éclaircissement de défauts sont échangées sur demande entre Swissgrid et les exploitants de ssec sur le RT. Les parties se concertent au préalable sur les communications qu'elles font au public en ce qui concerne les analyses des perturbations.

5.4 Besoin propre et énergie auxiliaire

Le système de besoin propre du ssec doit disposer d'un système de courant triphasé pour l'alimentation en besoin propre et d'au moins une alimentation en énergie de secours indépendante du réseau. Il est interdit d'exploiter le ssec sans une alimentation d'énergie de secours en bon état de fonctionnement.

L'exploitant de l'installation du ssec est responsable de la surveillance et de la maintenance du besoin propre et de l'alimentation en énergie auxiliaire.

Le fonctionnement des dispositifs de protection ou le déclenchement des appareils de couplage nécessitent deux alimentations en énergie auxiliaire indépendantes de la tension du réseau (p. ex. batterie, condensateur, courant de transformateur). Il en va de même lors de l'utilisation d'appareils de commande pour la commande à distance des composants primaires.

Si l'alimentation en énergie auxiliaire est nécessaire pendant une durée prolongée, sa capacité doit être calculée de manière à ce que le ssec puisse être exploité avec tous les dispositifs de protection, d'exploitation secondaire et d'urgence conformément aux exigences du ssec en l'absence de tension du réseau. Il convient de noter que les éventuelles exigences des PSS peuvent prolonger le temps de transition nécessaire.

5.5 Communication et sécurité informatique

L'exploitant garantit, par des mesures techniques et organisationnelles appropriées, l'exploitation sûre du ssec et empêche tout accès non autorisé, notamment par des liaisons d'accès à distance. Cette obligation s'applique également aux prestataires de services externes ayant accès aux installations ou aux systèmes informatiques du ssec. Sur demande, l'exploitant remet régulièrement à Swissgrid des rapports sur la sécurité de l'information et la connexion de télécommunication. Leur forme et leur étendue sont convenues entre les parties.

En cas de perturbation majeure, l'exploitant veille à ce que les données pertinentes en temps réel restent disponibles et accessibles pendant au moins 72 heures afin de permettre une analyse complète. Les mesures de sécurité doivent être adaptées en permanence à l'état de la technique et doivent garantir une protection contre les menaces pour la sécurité de l'information adaptée à l'importance opérationnelle du ssec. Les risques liés à la sécurité de l'information doivent être activement identifiés en permanence, évalués et traités de manière appropriée.

5.6 Accès à l'infrastructure physique

Pour l'installation et l'agrandissement d'installations et de moyens d'exploitation nécessaires à la réalisation et à l'entretien du raccordement au réseau, l'exploitant du ssec et Swissgrid se mettent mutuellement à disposition des surfaces et/ou des locaux appropriés après accord (par exemple pour la technique des circuits secondaires).

L'exploitant du ssec et Swissgrid s'accordent mutuellement et gratuitement, ainsi qu'à des mandataires, l'accès aux surfaces et/ou aux locaux utilisés réciproquement.

Les détails concernant la construction des surfaces et/ou des locaux utilisés réciproquement sont régis par contrat entre Swissgrid et l'exploitant du ssec.

6 Études et justifications

Un rapport sur les études réalisées au sujet du ssec et les modèles de simulation utilisés à cet effet avec Swissgrid dans le cadre de la procédure de raccordement au réseau doit être présenté six mois avant la première injection ou le premier soutirage.

6.1 Exigences relatives aux études dynamiques

La partie prenante raccordée au réseau du ssec est tenue d'initier, de réaliser et de coordonner elle-même toutes les études spécifiques nécessaires dans le cadre de la planification préliminaire. Swissgrid assume alors uniquement un rôle de vérification et de surveillance afin d'évaluer la conformité de l'installation prévue avec les exigences du raccordement au réseau.

Swissgrid recommande à la partie prenante raccordée au réseau du ssec d'attendre l'évaluation des exigences d'une étude spécifique avant de signer un contrat d'acquisition contraignant pour les principaux composants du ssec. En effet, des études spécifiques peuvent influencer le choix et le dimensionnement des équipements de production d'électricité ainsi que le calendrier du projet.

Les études suivantes sont a minima nécessaires pour évaluer correctement l'impact du ssec sur le réseau :

- stabilité transitoire ;
- étude «Subsynchronous Oscillations» ;
- étude de la stabilité d'harmoniques.

La description précise de la portée de chaque étude se trouve en annexe, voir le chapitre 8.3.

Si les analyses spécifiques nécessitent des mesures particulières pour le raccordement au réseau du réservoir d'énergie, ces mesures sont considérées comme des prescriptions contraignantes et la partie prenante raccordée au réseau du ssec est responsable de la mise en œuvre.

6.2 Exigences de modélisation

Dans le cadre de la planification préliminaire, la partie prenante raccordée au réseau du ssec est tenue de mettre à la disposition de Swissgrid un modèle de simulation complet et validé du ssec. Ce modèle doit représenter de manière réaliste et compréhensible les principales fonctions et caractéristiques du ssec, y compris son comportement dynamique en cas de perturbations du réseau.

Swissgrid utilise ce modèle pour ses propres études de réseau afin d'évaluer l'influence potentielle du ssec sur la stabilité du réseau, la dynamique du système et le respect du présent document. La mise à disposition du modèle est une condition préalable à la réalisation de ces études et doit être effectuée à temps pour que les résultats puissent être pris en compte dans l'évaluation du raccordement au réseau.

Les modèles de simulation doivent inclure tous les principaux composants du ssec, y compris les installations de compensation et les régulateurs, limiteurs et dispositifs de protection qui influencent l'exploitation du ssec sur le réseau. Il doit être possible de paramétrer les modèles de simulation en ce qui concerne les caractéristiques dans le cadre des spécifications. Les modèles de simulation doivent être accompagnés d'une documentation complète permettant d'utiliser et de paramétrer le modèle pour différentes études de situations d'exploitation et de perturbation. Les modèles doivent être fournis au format Root Mean Square (RMS) à l'aide du logiciel Siemens PSSE et au format Electromagnetic Transient (EMT) à l'aide du logiciel EMTP. Le pas de temps d'intégration numérique utilisé dans le modèle EMT ne doit pas dépasser 5 µs. Swissgrid tient à jour des instructions de modélisation détaillées qui décrivent les versions de logiciels actuellement utilisées et les propriétés requises des modèles créés avec ces logiciels. Celles-ci sont mises à la disposition de la partie prenante raccordée au réseau en tant qu'aide à la réalisation et doivent être respectées. Les

limitations du domaine d'application, les conditions d'exploitation ainsi que les hypothèses simplificatrices doivent être documentées.

6.2.1 Modèles d'harmoniques

6.2.1.1 Généralités

- La partie prenante raccordée au réseau doit fournir des modèles d'harmoniques représentant chaque convertisseur ainsi que tous les systèmes auxiliaires pertinents connectés au point de raccordement au réseau ;
- Les modèles doivent être fournis dans un format lisible à la machine (p. ex. texte, CSV ou Excel) ou dans un autre format exigé par Swissgrid ;
- Les modèles doivent se baser sur des mesures et/ou des calculs vérifiés ;
- S'il existe des asymétries, des modèles de séquences positives et négatives doivent être fournis ;
- L'analyse du système homopolaire est nécessaire uniquement sur demande de Swissgrid.

6.2.1.2 Modèle d'harmoniques stationnaire

Le convertisseur doit être représenté comme un équivalent de Norton ou de Thevenin dépendant de la fréquence et doit contenir les éléments suivants :

6.2.1.2.1 Source d'émission harmonique

- Les émissions harmoniques de tension ou de courant doivent être déclarées pour des multiples entiers de 50 Hz dans la gamme de 100 Hz à 2500 Hz avec une résolution de fréquence de 50 Hz ;
- Les émissions interharmoniques et à haute fréquence doivent être documentées jusqu'à 9 kHz dans des bandes de 200 Hz ;
- Pour chaque point d'exploitation, le montant et la phase des émissions doivent être fournis.

6.2.1.2.2 Impédance dépendant de la fréquence

- L'impédance du convertisseur (parties réelle et imaginaire) doit être indiquée en fonction de la fréquence, en tenant compte des effets du réglage ;
- L'impédance doit être indiquée par échelon de 1 Hz de 100 Hz à 2500 Hz et par échelon de 10 Hz de 2500 Hz à 9 kHz ;
- Les données d'impédance doivent être fournies pour des états d'exploitation représentatifs (p. ex. 0%, 50% et 100% de puissance active ainsi que les états de puissance réactive correspondants) ;
- En cas d'écarts avec la puissance, la tension ou le mode de réglage inférieurs à 10% ou 5 Ω, cela doit être justifié par écrit.

6.2.1.2.3 Moyens d'exploitation associés

Les impédances dépendant de la fréquence des composants primaires, p. ex. les transformateurs, les filtres, les câbles et les bobines de convertisseur, doivent également être fournies sur la base de données du fabricant ou de données mesurées.

6.2.1.3 Modèle de stabilité harmonique

Un modèle de stabilité harmonique doit être fourni, qui utilise la même structure et la même plage de fréquence que le modèle stationnaire.

Si des valeurs d'impédance diffèrent entre les deux modèles, ces différences et leur justification doivent être documentées.

6.2.1.4 Modèle avec amortissement actif (si disponible)

Si le convertisseur dispose d'une fonction d'amortissement active, il faut également fournir un modèle harmonique avec amortissement activé.

Le modèle doit contenir les informations suivantes :

a) la cible et la largeur de bande de l'amortissement ainsi que ;
b) les paramètres utilisés (p. ex. la résistance virtuelle).

6.2.1.5 Validation

La précision du modèle harmonique doit être démontrée par une validation selon les points suivants.

6.2.1.5.1 Sources de validation

Au moins deux des sources suivantes doivent être utilisées pour la vérification (à l'exception du type de modèle utilisé pour créer le modèle) :

a) Electromagnetic Transient (EMT) ;
b) contrôle d'usine ;
c) modèle analytique ;
d) mesure de mise en service ou de champ.

6.2.1.5.2 Validation de l'impédance

a) La validation doit être effectuée sur toute la plage de fréquences de 100 Hz à 9 kHz ;
b) Incrément de fréquence : ≤ 1 Hz à 2500 Hz, et ≤ 10 Hz au-dessus de 2500 Hz ;
c) Le modèle est considéré comme valide si les parties réelle et imaginaire de l'impédance diffèrent de moins de 10% ou de 5 Ω des données validées.

6.2.1.5.3 Validation de l'émission harmonique

a) Les émissions harmoniques doivent être validées pour tous les points d'exploitation spécifiés ;
b) Au moins une source de validation indépendante doit être utilisée ;
c) Les écarts ne doivent pas dépasser 10% en valeur absolue et 10° en phase.

6.2.1.6 Documentation

Un rapport sur le modèle et un manuel d'utilisation doivent être fournis avec le modèle et doivent comprendre les éléments suivants :

a) Résumé du modèle : description de la structure du modèle, du circuit équivalent (Norton/Thevenin) et du format du logiciel ;
b) Sources des données : indiquer si les données ont été mesurées, simulées ou fournies par des fabricants ;
c) Méthodologie : description des procédures de détermination des données d'impédance et d'émission, y compris le filtrage éventuel ou le calcul de la valeur moyenne ;
d) Résumé de la validation : description des méthodes de validation utilisées, avec des diagrammes comparatifs et des écarts quantitatifs ;
e) Contraintes : champ d'application, états d'exploitation et hypothèses simplificatrices ;
f) Rapports de mesure : si des mesures ont été utilisées, des rapports d'essai complets avec des données d'étalonnage doivent être joints.

7 Tests de conformité

7.1 Procédure d'essai

Il est de la responsabilité de la partie prenante raccordée au réseau du ssec de vérifier que l'exploitation du ssec répond aux exigences du présent document. La partie prenante raccordée au réseau du ssec est responsable des coûts du processus de conformité. La conformité aux spécifications doit être prouvée en premier lieu par des essais pendant la mise en service du ssec. Pour être autorisé à fournir des services système, il faut en outre remplir les conditions actuelles de préqualification.

7.1.1 Mise en service

La mise en service est réalisée en collaboration entre la partie prenante raccordée au réseau du ssec et Swissgrid. Les représentant(e)s de Swissgrid ont le droit de participer à tous les essais de mise en service et de les accompagner.

La partie prenante raccordée au réseau du ssec doit établir un plan de contrôle de mise en service du ssec. Les documents doivent être soumis à Swissgrid au préalable et au moins trois mois avant la mise en service. La partie prenante raccordée au réseau du ssec y propose des procédures d'essai appropriées pour démontrer que les exigences nécessaires sont remplies. Les justifications peuvent être, entre autres, des documents de conception, des études, des simulations, des essais pendant la mise en service ou des essais en cours d'exploitation. Dans la mesure où cela est techniquement possible, les justifications doivent être fournies en temps réel. Swissgrid est en droit d'annuler ou de modifier le calendrier des essais de mise en service si la situation d'exploitation du réseau ne permet pas d'effectuer les tests à la date prévue.

Conformément au chapitre 6.4. du TC, les dates des essais de conformité doivent être convenues suffisamment tôt avec Swissgrid. La réalisation réussie de tous les essais de conformité, confirmée par Swissgrid, constitue la condition préalable au raccordement définitif au RT.

Lors de tous les essais de mise en service, les variables suivantes doivent a minima être mesurées et enregistrées :

- puissance active du ssec ;
- puissance réactive du ssec ;
- tension au raccordement ;
- fréquence au point de raccordement.

Lors de l'essai de mise en service, les fonctions suivantes doivent être vérifiées :

1) Taux de variation de la puissance active :
   a) l'objectif de l'essai est de démontrer la capacité à modéliser la puissance active conformément à la plage d'exploitation définie au chapitre 3.1 et au taux de variation qui y est défini. L'essai est effectué avec deux puissances actives : 0,1 x P_{max}/min et le taux de variation maximal, tant en mode d'injection qu'en mode de soutirage ;
   b) l'essai est considéré comme concluant si les paramètres définis au chapitre 3.1 sont respectés et s'il n'y a pas d'oscillations de puissance non amorties.

2) Commande de la tension constante :
   a) l'essai permet de démontrer la capacité technique du ssec à réguler la tension et à fonctionner conformément aux exigences définies au chapitre 3.2 ;
   b) l'essai consiste en des tests de réglage de la tension et de réponse à un saut de tension. Les essais visent à démontrer la puissance du réglage de la tension et la capacité à régler la valeur de consigne et la pente requises ;

c) l'essai est considéré comme concluant si les exigences définies au chapitre 3.2 sont remplies et si le ssec peut atteindre, après la réponse à un saut de tension, un point d'exploitation stable sans oscillations de puissance réactive ou active mal amorties.

3) Réglage constant de la puissance réactive :
   a) l'essai doit démontrer la capacité technique du ssec à réguler la puissance réactive et à fonctionner conformément aux exigences définies dans le chapitre 3.2 lorsque le ssec est raccordé au réseau ;
   b) l'essai doit comprendre une modification progressive de la puissance réactive et doit permettre de vérifier si les valeurs de consigne prédéfinies peuvent être respectées ;
   c) l'essai est considéré comme concluant si les exigences du chapitre 3.2 sont remplies et si le ssec peut atteindre un point d'exploitation stable avec des oscillations amorties après la modification progressive de la puissance réactive.

4) Réglage du facteur de puissance constant :
   a) l'essai doit justifier la capacité technique du ssec à réguler le facteur de puissance mesuré au point de raccordement conformément aux exigences du chapitre 3.2.2 ;
   b) l'essai consiste en une modification progressive de la puissance réactive à l'aide du facteur de puissance. Les essais visent à justifier la puissance du réglage du facteur de puissance et la capacité à régler la valeur de consigne requise ;
   c) l'essai est considéré comme concluant si le ssec peut atteindre un point d'exploitation stable avec des vibrations amorties après une modification progressive du facteur de puissance.

5) Essai de la capacité de puissance réactive et limitation de la puissance active :
   a) lors de l'essai, il convient de justifier que le ssec est en mesure d'injecter et de prélever de la puissance réactive. Il faut en outre vérifier que la limitation de la puissance active fonctionne ;
   b) l'essai doit être effectué à la puissance réactive inductive maximale et à la puissance réactive capacitive maximale du ssec, et ce pour cinq points d'exploitation différents.

6) Essai de la fréquence au point de raccordement :
   a) les mesures doivent être effectuées à une fréquence d'échantillonnage d'au moins 1 kHz et la fréquence d'enregistrement doit être d'au moins 50 Hz ;
   b) L'essai de mise en service du réglage de la tension constante ainsi que les mesures de la tension et du courant sur un module convertisseur, qui doivent être enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage et d'enregistrement d'au moins 2 kHz, constituent une exception.

7) Démarrage et arrêt :
   • l'essai doit justifier que la mise en marche et l'arrêt du ssec ne provoquent pas de variations de qualité de la tension et de la fréquence selon IEC 61000-3-6 dans le réseau.

8) Comportement en cas de perturbation du réglage de la tension :
   • l'essai doit justifier que le réglage de la tension du ssec change correctement de mode en cas de perturbation.

9) Commande à distance :
   a) l'essai doit montrer que la commande à distance nécessaire à l'exploitation fonctionne parfaitement pour le ssec ;
   b) l'essai doit porter sur tous les points de commande, y compris le raccordement électronique de commande de Swissgrid. Il est en outre vérifié que la hiérarchisation des droits de commande entre les points de commande fonctionne correctement ;
   c) il est également vérifié si le signal de commande émis par la partie disposant de l'autorisation de commande primaire est prioritaire.

10) Resynchronisation après une perte de réseau :
    - l'exploitant de ssec doit s'assurer que ses processus internes de resynchronisation après la perte de réseau sont mis en place conformément au chapitre 3.3.

11) Stabilité des petits signaux et amortissement :
    le ssec doit justifier que lui et son réglage ne provoquent pas d'oscillations non amorties en cas de petites perturbations du réseau et qu'ils contribuent activement à leur amortissement.

12) Obligations de documentation :
    les obligations générales en matière de documentation sont régies aux chapitres 7 et 9 du contrat de raccordement au réseau [2] et du CGRR [3].

Les enregistrements des essais de mise en service servent de justification de l'exactitude et de la validité des résultats de simulation spécifiés au chapitre 6. La partie prenante raccordée au réseau du ssec est tenue de résumer ces justifications dans un rapport de validation formel, qui :

- atteste de la concordance entre les données de mise en service mesurées et les simulations effectuées au chapitre 6 ;
- atteste du respect de toutes les exigences conformément au chapitre 6 et au présent document ;
- doit être soumis à Swissgrid pour examen et approbation avant la validation définitive du raccordement.

8 Annexe

8.1 Tableaux et formules

Tableau 1: Liste des abréviations 8
Tableau 2: Aperçu de la convention relative aux signes 8

8.2 Figures

Figure 1: La puissance réactive doit être fournie en tenant compte de la capability curve 10
Figure 2: Diagramme de capacité de puissance réactive 380 kV 11
Figure 3: Diagramme de capacité de puissance réactive 220 kV 11
Figure 4: Comportement de neutralisation des erreurs en cas de surtension ou de sous-tension de courte durée 12
Figure 5:Réglage de la puissance réactive en cas de sauts de tension 13
Figure 6: Plage de fréquence et de tension dans laquelle les ssec ne doivent pas se déconnecter 17
Figure 7: Dépendance de la fréquence dans une situation extraordinaire – surfréquence 19
Figure 8: Dépendance de la fréquence dans une situation extraordinaire – sous-fréquence 20
Figure 9: Raccordement schématique d'un ssec 22

8.3 Études

Cette annexe décrit les études nécessaires pour le raccordement des ssec au réseau de Swissgrid. Ces exigences doivent être considérées comme des orientations. Swissgrid se réserve le droit d'adapter les études requises ou d'imposer des exigences supplémentaires en fonction du cas spécifique.

8.3.1 Stabilité transitoire

L'objectif de l'étude de stabilité est de vérifier l'interopérabilité du ssec avec le RT dans des conditions transitoires. Cela se fait à l'aide de simulations RMS. En outre, la conformité des fonctions de soutien du réseau du paysage contractuel de Swissgrid doit être démontrée et leur conception validée.

La partie prenante raccordée au réseau doit établir une matrice de test qui énumère tous les cas de simulation de l'étude de stabilité à prendre en compte. La matrice de test est développée conjointement par la partie prenante raccordée au réseau et Swissgrid et doit être approuvée par Swissgrid avant le début de l'étude. Si, au cours de l'étude ou lors de l'évaluation des résultats, des scénarios ou des cas d'erreur supplémentaires critiques ou pertinents sont identifiés, la partie prenante raccordée au réseau doit les étudier et les ajouter à la matrice de test initiale.

8.3.1.1 Étude sur les courts-circuits

La partie prenante raccordée au réseau doit simuler différents lieux de court-circuit dans le modèle de réseau AC réduit en tenant compte des paramètres suivants :

- court-circuit au point de raccordement au réseau ;
- courts-circuits sur toutes les lignes AC partant du système de stockage sur batterie, y compris la défaillance des lignes affectées (lignes simples et doubles) ;
- autres lieux d'erreur dans le réseau AC, y compris les lignes et les jeux barres.

Il s'agit de simuler des courts-circuits avec différentes tensions résiduelles et durées d'erreur.

Au point de raccordement au réseau, il convient de tenir compte a minima des points et conditions d'exploitation suivants :

- Puissance active : 100%, 50%, 0% de P_{max} – injection comme consommation ;
- Puissance réactive : capacitive maximale, inductive maximale, homopolaire ;
- Différents niveaux de tension dans le réseau AC au point de raccordement au réseau ;
- Différentes puissances de court-circuit au point de raccordement au réseau.

8.3.1.2 Analyse des modes de réglage de la puissance réactive

La partie prenante raccordée au réseau doit prouver la dynamique du réglage de la puissance réactive.

La partie prenante raccordée au réseau doit justifier le comportement du ssec lorsque les limites de puissance réactive sont atteintes pour tous les modes de réglage à l'aide d'un modèle simplifié du système AC. L'étendue et l'agrandissement du modèle AC simplifié sont définies d'un commun accord entre la partie prenante raccordée au réseau et Swissgrid. En outre, une transition de maximum inductif à maximum capacitif doit être simulée en mode de réglage « Q = constant », également en utilisant le modèle AC simplifié.

La partie prenante raccordée au réseau doit justifier comment le réglage de la puissance réactive contribue à stabiliser le niveau de tension du réseau AC. Il s'agit d'analyser comment les modes de réglage et leurs paramétrages influencent le comportement en cas de perturbations du réseau (FRT) ainsi que la stabilité en tension pendant et après de tels événements.

En outre, il s'agit d'étudier comment le mode de réglage de la tension avec statique de puissance réactive contribue à la stabilisation de la tension selon FRT. De même, il convient d'analyser comment ce mode de réglage favorise la stabilité en tension en lors d'événements survenant sur le réseau et entraînant des variations de tension.

8.3.2 Étude de la stabilité harmonique

8.3.2.1 Généralités

- L'étude de la stabilité harmonique vise à justifier que les ssec ont un comportement stable dans la plage de fréquence prévue quelles que soient les conditions d'exploitation et de réseau ;
- L'objectif est d'identifier et d'éviter les interactions indésirables entre les réglages des convertisseurs, les résonances du réseau et les autres installations couplées au réseau ;
- L'étude se divise en une étude de dépistage dans le domaine des fréquences et une étude EMT détaillée dans la période. L'étude doit être réalisée en séquence positive et négative ; une considération de système homopolaire est requise uniquement sur demande de Swissgrid ;
- La plage de fréquence pertinente s'étend de à 2500 Hz ;
- Swissgrid met à la disposition de la partie prenante raccordée au réseau les données nécessaires à la réalisation des études ; l'étendue exacte de ces données est définie lors de concertations bilatérales.

8.3.2.2 Étude de dépistage

- L'étude de dépistage est une étude basée sur la plage de fréquence pour évaluer les réserves de stabilité (réserve de phase et d'amplitude) au point de raccordement au réseau ;
- La méthode est basée sur le critère d'impédance de J. Sun: « Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters » [12]) ;
- L'étude doit être réalisée dans la mesure où il n'est pas prouvé que l'installation présente un comportement amorti positif pour tous les états de couplage internes ;
- Pour justifier un comportement d'amortissement positif, il faut fournir des réponses en fréquence de l'installation basées sur le modèle harmonique. La partie prenante raccordée au réseau doit tenir compte de toutes les courbes de fréquence du réseau (états de couplage) mises à disposition par Swissgrid ;

- La réserve de phase et d'amplitude au point de raccordement au réseau doit être calculée et documentée. Les valeurs inférieures à 15° de réserve de phase ou 15 dB de réserve d'amplitude sont considérées comme critiques ;
- L'étude doit être effectuée pour tous les états d'exploitation pertinents (variations de la puissance active et réactive, niveaux de tension, types de réglage, configurations de couplage, états de vieillissement, états de charge), pour autant que l'impédance de sortie varie de plus de 10% ou 5 Ω dans la partie réelle ou imaginaire ;
- Les configurations de couplage pertinentes de l'installation doivent être indiquées dans le concept d'étude et convenues avec Swissgrid.

8.3.2.3 Étude EMT détaillée

- Pour tous les scénarios avec une réserve de phase < 15° ou une réserve d'amplitude < 15 dB, une étude EMT détaillée doit être réalisée dans la période ;
- Les impédances de réseau dépendant de la fréquence, qui conduisent à un dépassement vers le bas des réserves de stabilité, doivent être intégrées dans le modèle EMT ;
- La stabilité de l'ensemble du système doit être vérifiée en l'absence de perturbation externe. Si le système reste stable, il convient de tester sa robustesse face aux petites et grandes excitations de signaux (p. ex. sauts de tension) ;
- Une injection à fréquence unique aux fréquences critiques identifiées lors du dépistage doit être effectuée afin de vérifier le comportement d'amortissement par rapport aux oscillations forcées ;
- Si des contre-mesures sont nécessaires, tous les calculs doivent être refaits avec les contre-mesures mises en œuvre et les résultats doivent être comparés aux calculs initiaux ;
- La partie prenante raccordée au réseau doit justifier que les contre-mesures proposées garantissent un mode d'exploitation stable ;
- L'ensemble des contre-mesures doivent être coordonnées avec Swissgrid.

8.3.2.4 Critères d'évaluation

- Swissgrid évalue les réponses en fréquence fournies, dans la mesure où un comportement amorti positif est supposé ;
- Les résultats de l'étude de dépistage sont vérifiés à l'aide des réserves de stabilité définies ;
- Si nécessaire, l'approche de modélisation et les résultats de simulation de l'étude EMT détaillée sont évalués ;
- Le cas échéant, les contre-mesures proposées sont évaluées en termes d'efficacité et de faisabilité.

8.3.2.5 Documentation

- Un concept d'étude doit être soumis et approuvé par Swissgrid avant le début de l'étude ;
- Le concept doit décrire la méthode, les hypothèses, les points d'exploitation considérés et les scénarios de réseau ;
- À l'issue de l'étude de dépistage, un rapport contenant toutes les fréquences (états d'exploitation et configurations de couplage) doit être mis à disposition ;
- Toutes les courbes d'impédance doivent être fournies sous une forme lisible à la machine (p. ex. CSV) ;
- Les rapports des études de dépistage et d'EMT doivent contenir au moins les éléments suivants :
  1) aperçu du modèle et de la méthode ;
  2) description des paramètres de simulation et des cas d'exploitation ;
  3) représentation des réserves de stabilité (réserve de phase et d'amplitude) ;
  4) présentation des contre-mesures appliquées (le cas échéant) ;
  5) évaluation des résultats en matière de stabilité et conclusions.
- Le modèle de simulation doit être mis à disposition à chaque révision de l'étude.

9 Bibliographie

[1] Swissgrid, «Transmission Code 2019,» Aarau, 2019.

[2] Swissgrid, *Contrat de raccordement au réseau (CRR),* Laufenburg, 2017.

[3] Swissgrid AG, *CRR Annexe 2: Conditions générales pour le raccordement au réseau de transport suisse (CGRR),* Laufenburg: Swissgrid AG, 2017.

[4] Swissgrid, *Convention d'exploitation avec l'EC pour centrales directement raccordées au réseau de transport,* Aarau: Swissgrid AG, 2010.

[5] Swissgrid, *Concept de maintien de la tension - Concept de maintien de la tension dans le réseau de transport suisse à parir de 2020,* Aarau, 2019.

[6] IEC, «Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessmet of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV, and EHV power systems,» IEC, 2008.

[7] VDE FNN, VSE, Oesterreichs Energie, CSRES, «Technische Regeln für die Beurteilung von Netzrückwirkungen. Teil A: Grundlagen,» VDE FNN, VSE, Oesterreichs Energie, CSRES, Aarau/ Berlin/ Prag/ Wien, 2021.

[8] Electrosuisse, *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen,* Fehraltdorf: Electrosuisse, 2020.

[9] Swissgrid AG, *Anschlussbetriebsvereinbarung,* Aarau: Swissgrid, 2025.

[10] VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, *Guide suisse de protection (SLF – CH),* Aarau: VSE, 2020.

[11] VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, *Exigences techniques relatives au délestage automatique de fréquence,* Aarau: VSE, 2025.

[12] J. Sun, «Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters,» *IEEE Transactions on Power Electronics,* vol. 26, n° %111, pp. 3075-3078, 2011.

[13] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Infromationstechnik, *Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Höchstspannung),* VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Infromationstechnik, 2018.

[14] VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, *Exigences techniques relatives aux interfaces de protection et de commande des transformateurs raccordés au réseau de transport,* Aarau: VSE, 2023.