Spécifications Grid Forming
Conditions générales
(En supplément de l'Article 8.3.4 - Unité de stockage non synchrone)

concertation

1. PREAMBULE 3
2. COMPORTEMENT SOURCE DE TENSION DANS LES LIMITES CONSTRUCTIVES 5
2.1 Réponse aux sauts de phase: 5
2.2 Réponse aux sauts d'amplitude: 6
2.3 Réponse à une variation de Short Circuit Ratio: 7
3. COMPORTEMENT INERTIEL DANS LES LIMITES CONSTRUCTIVES 9
4. STRATÉGIE DE LIMITATION DE COURANT 10
5. REFERENCES 10

concertation

1. PREAMBULE

Ce document décrit les exigences Grid-Forming pour les unités de stockage non synchrones de Type C et D qui se raccordent au réseau public de transport.

Ces exigences ont été établies selon la proposition de modifications du code RfG *(Requirements for Generators)* publiée par l'ACER en décembre 2023 [1] (code RfG 2.0) - en particulier les Articles Y(7) et 21(4) - et du rapport technique sur le sujet publié par l'ENTSO-E [2]. Elles se traduisent par :

- **Des exigences sur la stratégie de limitation de courant, et**
- **Des exigences sur les performances dynamiques des équipements,** décrivant le comportement attendu de l'unité dans les conditions suivantes :
    1. Saut d'angle et d'amplitude de la tension, et variations du paramètre SCR (Short Circuit Ratio)
    2. Variations de fréquence

Les performances dynamiques seront caractérisées par:

- La valeur attendue du courant actif et réactif ou de la puissance
- Le temps de réponse nécessaire pour atteindre la valeur attendue du courant actif/réactif ou de la puissance
- Le taux de décroissance ou le dépassement potentiel lors d'une excursion de courant/puissance (le cas échéant)
- La valeur de l'amortissement des oscillations de courant actif/réactif ou de puissance

Les remarques suivantes s'appliquent dans le cadre règlementaire français :

1. **L'ensemble des performances dynamiques est exigé uniquement lorsque l'unité n'atteint pas de limite en courant, ou n'est pas complètement chargée ou déchargée.** Dans ces situations (limite de courant, unité de stockage complètement chargée/déchargée), les exigences seront adaptées autant que possible, et ces déviations feront l'objet de discussions et d'un accord entre RTE et le propriétaire de l'unité. La fourniture des capacités maximales en courant par le stockeur à RTE est un prérequis à cette discussion.
2. **L'utilisation d'une impédance virtuelle dans la stratégie de contrôle n'est ni exigée ni interdite,** tant que les performances dynamiques souhaitées sont atteintes, en conformité avec l'article Y(7)(b) du projet de code RfG 2.0.
3. **Par souci de simplicité, le comportement Grid Forming sera évalué au niveau du convertisseur individuel (Power Generating Unit).**
4. Si la séquence positive des courants actif/réactif est calculée à partir de mesures réelles ou d'une simulation EMT, un délai supplémentaire de 20 ms par rapport aux valeurs indiquées dans ce document pour les différentes exigences dynamiques doit être considéré.
5. Les convertisseurs ayant les mêmes caractéristiques peuvent être validés une seule fois, tandis que chaque convertisseur différent devra faire l'objet d'un processus de validation.

L'ajout de l'exigence Grid Forming amène des modifications sur d'autres parties existantes de la Documentation Technique de Référence de RTE. En particulier :

- Des exigences de fournitures de données spécifiques dans la fiche E1
- L'injection de courant réactif sur défaut ne sera pas exigée pour les unités concernée par l'exigence Grid Forming

Concertation

- Les exigences sur les modèles RMS, EMT et fréquentiel seront adaptées

Le reste de ce document présente plus en détails les exigences attendues pour le comportement Grid Forming et constitue une version préliminaire de l'article qui sera ajouté dans la trame de Cahier des Charges des capacités constructives pour les stockeurs.

concertation

2. COMPORTEMENT SOURCE DE TENSION DANS LES LIMITES CONSTRUCTIVES

Cette partie reprend et précise les exigences de l'article Y, Sections 7(a) à (c) de la version préliminaire du propjet code RfG 2.0. Celui indique que "*la tension interne du convertisseur (en amplitude, phase et fréquence) doit rester constante lors d'une perturbation sur le réseau ayant lieu au point de connexion. Cependant, si les capacités du module de parc de production et les limites de courant sont dépassées, une réaction instantanée de l'unité de production est autorisée afin de maintenir les limites de courant*."[1]

Le comportement attendu, comme précisé dans l'extrait ci-dessus, est celui d'une source de tension derrière une impédance x_{eff}, et peut être complétement défini à partir des réponses attendues sur le système de test suivant (Figure 1)

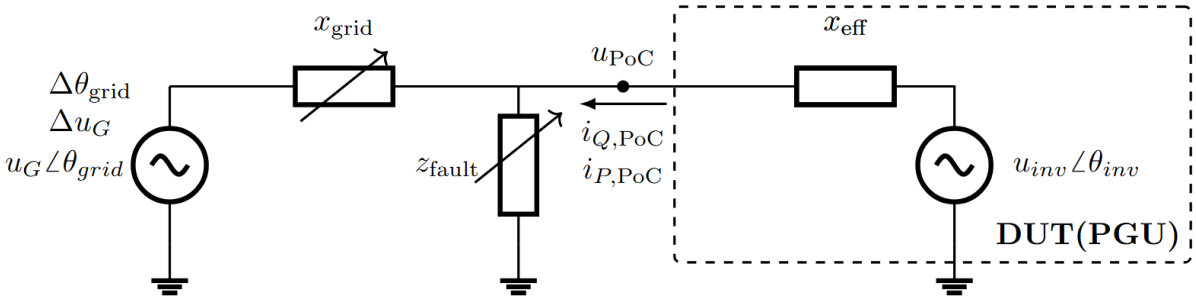


Figure 1 - Système de test avec le convertisseur unitaire remplacé par une source de tension derrière une impédance permettant de définir le comportement attendu du Grid Forming

L'évaluation se faisant au niveau du convertisseur individuel, la valeur de x_{eff}à utiliser est de 0.27 pu.

2.1 Réponse aux sauts de phase

En cas de saut de phase sur le réseau, l'unité doit exhiber une réponse en puissance active s'opposant à ce saut de phase.

Le système de test présenté sur la Figure 1 et dans [2], où le convertisseur est représenté par une source de tension derrière une impédance, est utilisé pour définir le comportement idéal attendu de la part du convertisseur.
En utilisant cette approche, un pic de variation de courant actif théorique peut être analytiquement calculé. Pour un saut de phase $\Delta\theta_{grid}$ le pic obtenu est :

$$\Delta i_{P,PGU,Peak} \approx -\frac{1}{x_{eff} + x_{grid}} \left(\sin\left(\Delta\theta_{grid} + \delta'\right) - \sin(\delta')\right)$$

Avec:

[1] Extrait traduit par RTE

– $\Delta i_{\mathrm{P,PGU,Peak}}$ représentant le pic de courant actif calculé analytiquement.

– δ' étant la différence de phase entre l'angle du convertisseur θ_{inv} et l'angle du réseau θ_{grid} , avant l'évènement

– $\Delta\theta_{grid}$ étant le saut de phase appliqué sur l'angle du noeud infini. Ce saut doit être suffisant pour observer une variation d'au moins 30% de puissance active pour le convertisseur.

Le comportement du convertisseur peut s'apparenter à celui d'une source de tension et être considéré Grid Forming si les critères suivants sont respectés :

– **Réponse instantanée :** un courant actif, a minima égal à 50% de $\Delta i_{p,\,PGU,\,Peak}$, est atteint en 10 ms

– **Bande de tolérance:** le courant actif doit se stabiliser autour de la valeur finale dans une bande de tolérance égale à la plus grande des deux valeurs suivantes : ±2 % du courant nominal et $\pm$ 5% of $\Delta i_{P,PGU,Peak}$.

– **Coefficient d'amortissement:** les courants actif et réactif doivent présenter un amortissement d'au moins 50%. Cet amortissement sera calculé en utilisant la méthode classique du "pencil matrix". Une implémentation de cette méthode est disponible ici[2] et sera utilisée pour assurer la conformité du convertisseur.

De plus, la réponse en courant doit être instantanée et ne doit pas comporter de retard. Une réponse physique est exigée, des retards liés au contrôle ou aux mesures sont interdits.

Les limitations en courant du convertisseur peuvent venir limiter la réponse en courant à la valeur maximale admissible du courant : l'existence de ces limitations est acceptée.

2.2 Réponse aux sauts d'amplitude

En cas de saut d'amplitude sur le réseau, l'unité doit exhiber une réponse en puissance réactive s'opposant à ce saut de phase.

Le système de test présenté sur la Figure 1 et dans [2], où le convertisseur est représenté par une source de tension derrière une impédance, est utilisé pour définir le comportement idéal attendu de la part du convertisseur.
En utilisant cette approche, un pic de variation de courant réactif théorique peut être analytiquement calculé. Pour un saut d'amplitude Δu_g le pic obtenu est :

$$\Delta i_{Q,\,PGU} \approx \frac{\Delta u_G}{x_{eff} + x_{grid}}$$

[2] Test_damping_python_app_RTE - Colab

concertation

Avec:

– $\Delta i_{\mathrm{Q,PGU}}$ représentant le pic de courant réactif calculé analytiquement.

– Δu_G étant le saut d'amplitude du noeud infini. Ce saut doit être suffisamment important pour générer une variation d'au moins 15% $\Delta i_{Q,PGU}$.

Le comportement du convertisseur peut s'apparenter à celui d'une source de tension et être considéré Grid Forming si les critères suivants sont respectés :

– **Réponse instantanée :** un courant réactif, a minima égal à 90% de $\Delta i_{Q,\,PGU}$, est atteint en 10 ms

– **Bande de tolérance:** le courant réactif doit se stabiliser autour de la valeur finale dans une bande de tolérance égale à la plus grande des deux valeurs suivantes : ±2 % du courant nominal et $\Delta i_{Q,\,PGU}$

– **Temps de réponse:** le courant réactif doit s'établir dans la bande de tolérance autour de sa valeur finale en 80 ms après l'évènement

– **Coefficient d'amortissement:** les courants actif et réactif doivent présenter un amortissement d'au moins 50%. Cet amortissement sera calculé en utilisant la méthode classique du "pencil matrix"[3]. Une implémentation de cette méthode est disponible ici[3] et sera utilisée pour assurer la conformité du convertisseur.

De plus, la réponse en courant doit être instantanée et ne doit pas comporter de retard. Une réponse physique est exigée, des retards liés au contrôle ou aux mesures sont interdits.

Les limitations en courant du convertisseur peuvent venir limiter la réponse en courant à la valeur maximale admissible du courant : l'existence de ces limitations est acceptée.

2.3 Réponse à une variation du SCR (Short Circuit Ratio)

En cas de variation du Short Circuit Ratio sur le réseau, l'unité doit exhiber une réponse en puissance active s'opposant à cette variation.

Le système de test présenté sur la Figure 1 et dans [2], où le convertisseur est représenté par une source de tension derrière une impédance, est utilisé pour définir le comportement idéal attendu de la part du convertisseur.
En utilisant cette approche, un pic de variation de courant actif théorique peut être analytiquement calculé. Pour un changement d'impédance de $x_{grid,1}$ à $x_{grid,2}$ et en considérant une puissance active initiale P_0, ce pic vaut :

$$\Delta i_{P,PGU,Peak} \approx -\frac{\left(x_{grid,2} - x_{grid,1}\right) P_0}{x_{eff} + x_{grid,2}}$$

Avec:

[3] Test_damping_python_app_RTE - Colab

concertation

– $\Delta i_{P,\,PGU,\,Peak}$ représentant le pic de courant réactif calculé analytiquement.

– P_0 est la puissance active initiale

Le comportement du convertisseur peut s'apparenter à celui d'une source de tension et être considéré Grid Forming si les critères suivants sont respectés :

– **Réponse instantanée :** un courant actif, a minima égal à 50% de $\Delta i_{P,\,PGU,\,Peak}$, est atteint en 10 ms

– **Bande de tolérance:** le courant actif doit se stabiliser autour de la valeur finale dans une bande de tolérance égale à la plus grande des deux valeurs suivantes : ±2 % du courant nominal et $\Delta i_{P,\,PGU,\,Peak}$

– **Coefficient d'amortissement:** les courants actif et réactif doivent présenter un amortissement d'au moins 50%. Cet amortissement sera calculé en utilisant la méthode classique du "pencil matrix"[3]. Une implémentation de cette méthode est disponible ici[4] et sera utilisée pour assurer la conformité du convertisseur.

De plus, la réponse en courant doit être instantanée et ne doit pas comporter de retard. Une réponse physique est exigée, des retards liés au contrôle ou aux mesures sont interdits.

Les limitations en courant du convertisseur peuvent venir limiter la réponse en courant à la valeur maximale admissible du courant : l'existence de ces limitations est acceptée.

concertation

[4] Test_damping_python_app_RTE - Colab

3. COMPORTEMENT INERTIEL DANS LES LIMITES CONSTRUCTIVES

Cette partie reprend et précise les exigences de l'article 21, Section 4 de la version préliminaire du projet de code RfG 2.0. Celui-ci indique :

« L'unité de stockage non synchrone doit être capable de contribuer à limiter la déviation transitoire en fréquence à la fois pour les variations à la hausse et à la baisse:

(a) Le GRT compétent, en coordination avec le gestionnaire de réseau compétent, doit spécifier la contribution en inertie synthétique attendue de la part de l'unité.»

Le système de test introduit dans la Figure 1 est utilisé pour caractériser la réponse attendue du convertisseur. Lorsque la fréquence change, le convertisseur doit fournir une puissance active supplémentaire prenant la forme suivante

$$\Delta P = T_{R,PPM} \cdot \frac{df/f_{Rated}}{dt} \cdot P_{Rated}$$

Avec $T_{R,PPM} = 5\ s$

Le comportement du convertisseur peut être considéré Grid Forming si les critères suivants sont respectés :

- **Réponse instantanée :** un courant actif, a minima égal à 90% de ΔP , est atteint en 100 ms
- **Bande de tolérance:** le courant actif doit se stabiliser autour de la valeur finale dans une bande de tolérance égale à ±2 % du courant nominal en 100 ms après la fin de la variation de fréquence
- **Coefficient d'amortissement:** les courants actif et réactif doivent présenter un amortissement d'au moins 50%. Cet amortissement sera calculé en utilisant la méthode classique du "pencil matrix"[3]. Une implémentation de cette méthode est disponible ici[5] et sera utilisée pour assurer la conformité du convertisseur.

De plus, la réponse en courant doit être instantanée et ne doit pas comporter de retard. Une réponse physique est exigée, des retards liés au contrôle ou aux mesures sont interdits.

Les limitations en courant du convertisseur peuvent venir limiter la réponse en courant à la valeur maximale admissible du courant : l'existence de ces limitations est acceptée.

concertation

5 Test_damping_python_app_RTE - Colab

4. STRATÉGIE DE LIMITATION DE COURANT

Il n'est pas exigé que les convertisseurs soient capables de délivrer un courant supérieur à leur capacité maximale transitoire en réponse à un évènement. De fait, il est donc nécessaire d'avoir une stratégie de limitation de courant pour protéger l'unité, ce qui peut entraîner une perte temporaire du comportement source de tension.

La stratégie de limitation de courant retenue par le constructeur ne devra pas modifier la phase du courant, mais seulement affecter son amplitude comme illustré sur la Figure 2.

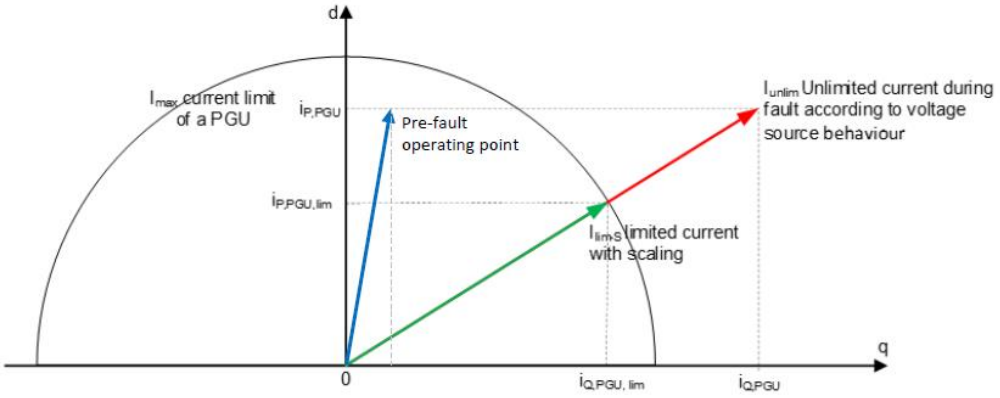


Figure 2 - Stratégie de limitation de courant telle que proposée dans [2]

5. REFERENCES

[1] ACER, Recommendation on the amendments to the network codes on requirements for grid connection of generators – projet de code RfG 2.0 dans ce document, https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Recommendations_annex/ACER_Recommendation_03-2023_Annex_1a_NC_RfG_TC_to_original.pdf

[2] ENTSO-E, Technical Report on Grid Forming Capabilities, https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/SOC/20240503_First_interim_report_in_technical_requirements.pdf

[3]Pencil Matrix : Open Access article Fernández Rodríguez, A., de Santiago Rodrigo, L., López Guillén, E. et al., "Coding Prony's method in MATLAB and applying it to biomedical signal filtering", BMC Bioinformatics 19, 451 (2018), ***https://doi.org/10.1186/s12859-018-2473-y***

confidentiel