

FICHE I18 : GRID FORMING

Conditions d'application : Type C et D

FICHE I18 : GRID FORMING

Simulation

Objectifs

Pour différents points de fonctionnement dans les limites en énergie et en courant, et différentes conditions d'exploitation du réseau, **l'unité de stockage non synchrone** doit démontrer sa capacité à se comporter comme une unité Grid Forming. Ce comportement sera évalué à l'aide de différents événements et critères de conformité associés.

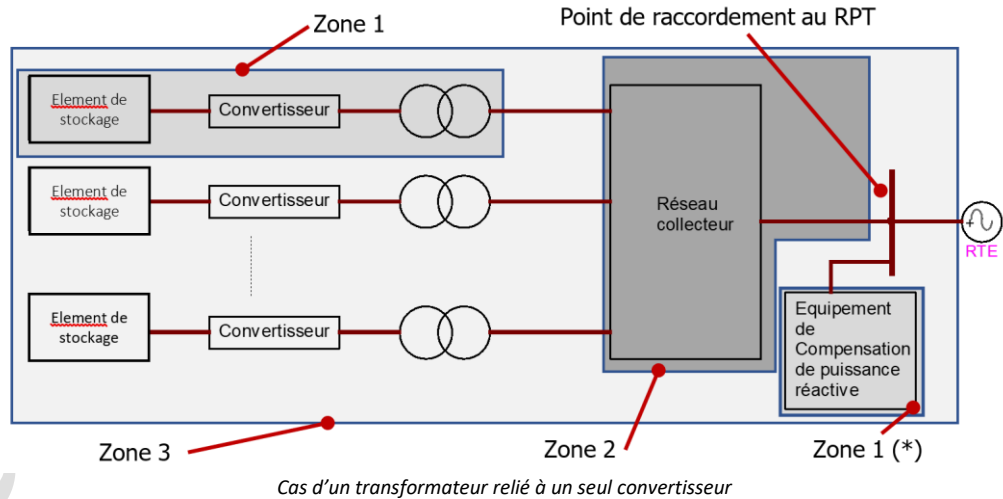
Cette fiche fournit les détails techniques nécessaires pour réaliser la simulation visant à valider le comportement en Grid Forming.

Les performances dynamiques seront caractérisées par 5 types d'essais :

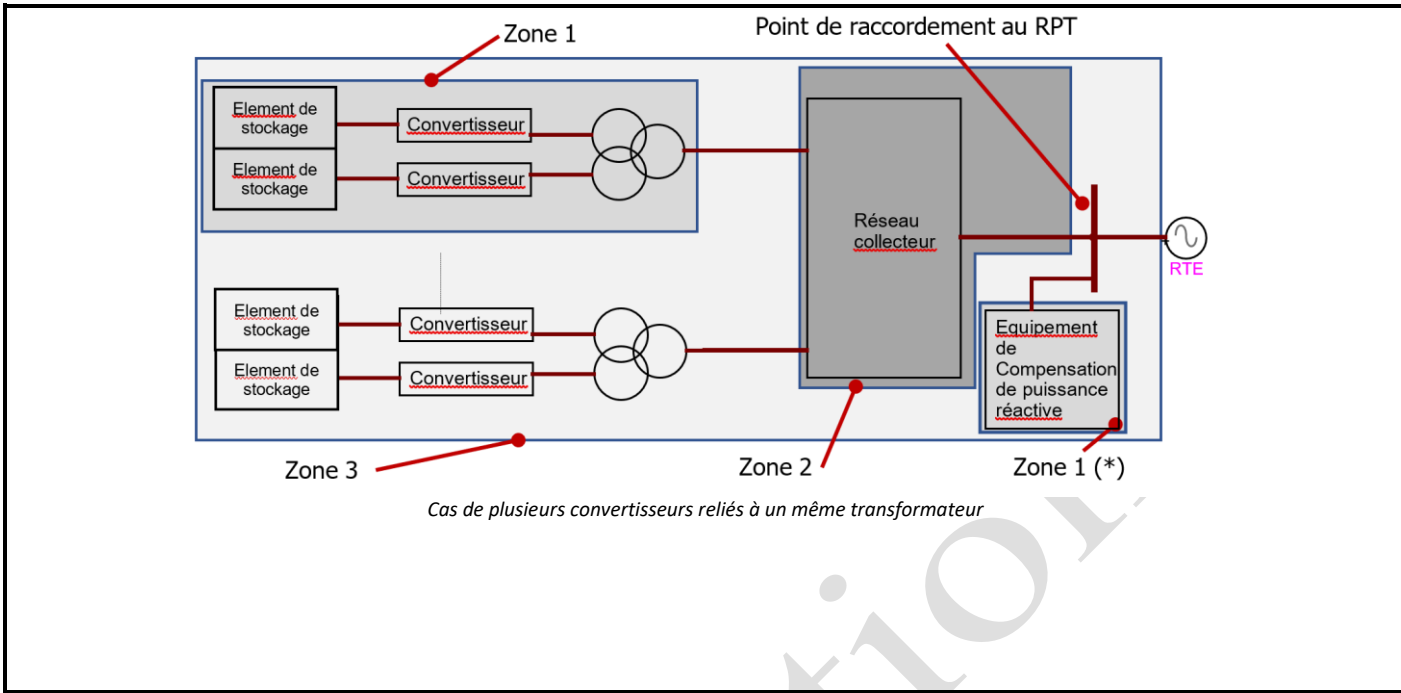
- Test 1 : Saut de phase de la tension au nœud infini
- Test 2 : Saut d'amplitude de la tension au nœud infini
- Test 3 : Saut de Short Circuit Ratio
- Test 4 : Variation de fréquence
- Test 5 : Défauts

Ces tests sont réalisés à l'échelle d'un convertisseur individuel ou d'un groupe de convertisseurs indivisible (Zone 1 ci-dessous).

Si le raccordement interne se fait avec un transformateur par onduleur, alors le test sera réalisé sur la zone 1 décrite sur ce schéma qui se veut générique.



Dans le cas où plusieurs onduleurs peuvent être connectés sur un même transformateur, alors le test se fera sur la zone 1 de ce second schéma.



Description

1. Modélisation

Le modèle à utiliser pour exécuter les simulations des essais présentés dans ce document est le suivant : un convertisseur individuel (**Power Generating Unit-PGU**) est raccordé à un réseau $x_{grid}^{(Obj)}$. Ce convertisseur doit être représenté conformément aux données fournies dans la fiche E1 relative à la description technique du **PGU**. Les modèles peuvent être au format EMT ou Phaseur. L'exploitant du **PGU** doit préciser, pour chaque simulation, le type de modèle utilisé, car des filtres — par exemple le filtre de séquence positive dans une simulation EMT — introduisent un retard dans les réponses mesurées.) Si l'état de charge de l'unité de stockage a un impact sur les performances de l'onduleur vues côté AC, cela doit donc être inclus dans le modèle.

Le comportement en source de tension doit être évalué au niveau du **PGU** en comparant sa réponse à celle d'une source de tension derrière une impédance, comme défini plus loin dans ce document. Le modèle du PGU comprend un convertisseur, un filtre série et un transformateur, assurant le raccordement au point de connexion HTA de l'unité, comme illustré à la Figure 1 .

Les PGU présentant des caractéristiques identiques (paramètres de réglage, impédances du filtre et impédances du transformateur) ne seront testés qu'une seule fois. Les PGU ayant des caractéristiques différentes devront, elles, être testés séparément.

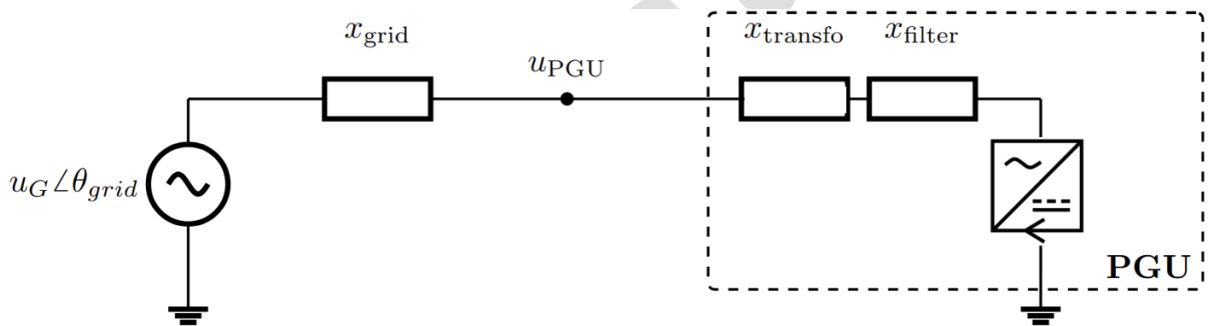


Figure 1 - Représentation du convertisseur Power Generating Unit (PGU)

Dans cet essai, le comportement idéal d'un convertisseur Grid Forming est modélisé comme une source de tension idéale avec une impédance série. L'impédance effective x_{eff} permet de représenter la combinaison de l'impédance interne du convertisseur ainsi que les impédances du filtre et du transformateur jusqu'aux bornes de l'unité de stockage. Ainsi, x_{eff} représente l'impédance de la source idéale et sert de référence de comportement (voir Figure 2 -).

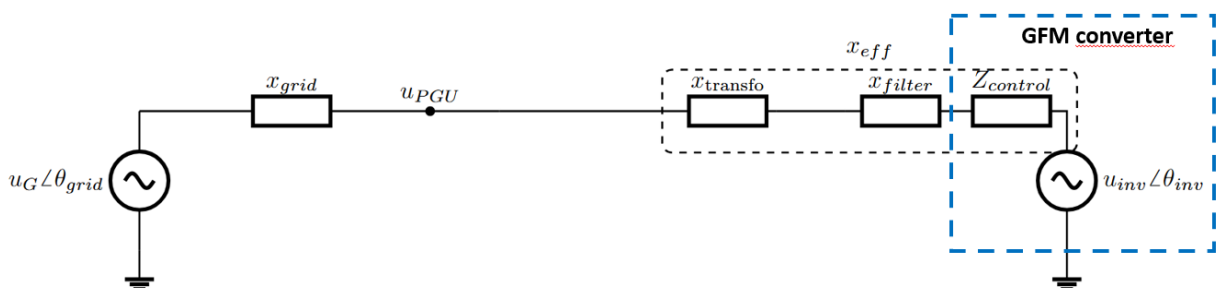


Figure 2 - Représentation de l'impédance effective au sein d'une unité (PGU)

Dans le cas où deux PGU seraient connectés via un seul transformateur (à trois enroulement) au réseau interne de l'installation, il est possible de tester la combinaison des deux PGU. La source de tension sera alors configurée afin de représenter l'agrégation des deux PGU (voir illustration en annexe de cette fiche)

Même si cela n'est pas explicitement mentionné dans l'exigence, tous les comportements de l'onduleur sont limités par son courant maximal et par la capacité d'énergie disponible dans l'unité de stockage. Le courant maximal de courte durée devra être défini par le fabricant et utilisé pour les critères de conformité. Toutes les enveloppes utilisées pour les essais de conformité seront bornées par le courant maximal de courte durée.

Les différentes enveloppes pour une unités typique¹, sont disponibles ici :

[dyn-grid-compliance-verification/docs/GFM_envelopes_curves/Envelopes at GFM-changes · dynawo/dyn-grid-compliance-verification · GitHub](#)

2. Système de test

Modèle de réseau connecté au PGU	
	<ul style="list-style-type: none"> • DUT (Device Under Test), représente le PGU testé • x_{grid}, doit être ajustable afin d'émuler des réseaux faibles et forts. (On considère $r_{grid} = x_{grid}/10$) • u_G, désigne la tension côté réseau (source de tension) et doit être modulée en amplitude pour les besoins des essais. • θ_{grid}, désigne l'angle de phase de la tension du réseau et doit être modifié conformément à la procédure d'essai. • x_{fault}, doit être paramétrable pour représenter différents types de défauts.

Ce modèle doit être utilisé par le propriétaire de l'unité de stockage pour l'ensemble des tests requis dans cette fiche.

3. Critères de conformité

	Description	Critères de conformité
Réponse en puissance active pour un saut de phase de la tension	Saut de phase de la tension au nœud infini	Enveloppe du courant actif Amortissement des courants actif/réactif et de la tension
Réponse en puissance réactive pour un saut d'amplitude de la tension	Saut d'amplitude de la tension au nœud infini	Enveloppe du courant réactif Amortissement des courants actif/réactif et de la tension
Réponse en puissance active pour une variation de fréquence (essai RoCoF)	Variation de fréquence au nœud infini	Enveloppe du courant actif Amortissement des courants actif/réactif et de la tension

¹ Les paramètres de l'unité utilisés sont donnés dans le Readme du projet, et sont rappelés ici pour information : SNom = 100 MVA, UNom = 225 kV, PMin/Max = +/- 120 MW, QMin/Max = +/- 30 MVar

Réponse en puissance active pour une modification de topologie (SCR)	Variation de la topologie du réseau (saut de Short Circuit Ratio)	Enveloppe du courant actif Amortissement des courants actif/réactif et de la tension
Comportement sur défaut.	Comportement sur défaut dans différentes conditions	Pour information.

4. Unité réduite

Les tests définis dans les fiches suivantes sont décrits en utilisant des valeurs en per unit (p.u.), en considérant la puissance apparente du convertisseur individuel comme base pour les paramètres suivants :

S_{base} : Puissance apparente du convertisseur individuel

U_{base} : Tension RMS phase à phase du convertisseur individuel

$x_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}}$: impédance de base

5. Points de fonctionnement

Dans ce document, tous les tests seront réalisés aux bornes du PGU

$SCR_{min}=2$

$SCR_{med}=10$

$SCR_{max}=20$

$x_{eff} = 0.27$ pu

$T_{R, PPM}=10$ s (correspondant à une Valeur de H = 5 s)

Rappel (en per unit) : $x_{grid} = \frac{1}{SCR}$

Point de fonctionnement	Puissance Active	Puissance Réactive	Energie Disponible (State of Charge)	Tension
OC1	0	0	50%	1
OC2	0.5 Pn	0	50%	1
OC3	-0.5 Pn	0	50%	1
OC4	0.95 Pn	0	50%	1
OC5	-0.95 Pn	0	50%	1
OC6	0	-Qmax = -0.3 Pn	50%	1
OC7	0	Qmax = 0.3 Pn	50%	1

Les exigences de RTE en termes de réactif étant au point de raccordement, le stockeur devra fournir ici la valeur de Qmax et -Qmax du système qui sera modélisé, zone 1 illustrée dans la figure en annexe de cette fiche. Les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessus représentent donc seulement un ordre de grandeur.

6. Désactivation des services système

Tous les services système doivent être désactivés pendant l'évaluation des performances Grid Forming de l'unité, étant donné que l'objectif est de valider le comportement source de tension de l'unité sur les premiers instants après les variations qui surviennent, et pour éviter toute interaction avec les autres boucles de régulation.

Pour rappel, les contrôles qui doivent être désactivés sont :

- Contrôle de tension
- Réglage de fréquence
- Limited frequency sensitivity mode (LFSM-U et LFSM-O)

Pour un système Grid Forming, désactiver le contrôle de tension consiste à conserver une référence de tension constante, et désactiver le réglage de fréquence ou le LFSM-U/O consiste à conserver une référence de fréquence constante.

TEST 1 : Saut de phase de la tension au nœud infini

Simulation :

Un saut d'angle de la tension au niveau du nœud infini (équivalent de Thévenin) de $\Delta\theta_{grid}$ doit être réalisé. Pour chaque test, la simulation doit durer jusqu'à l'atteinte du régime permanent.

Conditions particulières :

Les tests seront faits avec trois valeurs différentes de x_{grid} correspondant à un $SCR_{min}(x_{grid,min})$, $SCR_{med}(x_{grid,med})$ et un $SCR_{max}(x_{grid,max})$ et pour les quatre sauts de phase correspondant à $\pm 0.3 \cdot (x_{eff} + x_{grid})$ and $0.6 \cdot (x_{eff} + x_{grid})$.

Scénario	Saut de phase $\Delta\theta_{grid}$	SCR
S_VolAngStep1	6.36°	SCR_{med}
S_VolAngStep2	-6.36°	SCR_{med}
S_VolAngStep3	13.24°	SCR_{min}
S_VolAngStep4	-13.24°	SCR_{min}
S_VolAngStep5	12.72°	SCR_{med}
S_VolAngStep6	-12.72°	SCR_{med}
S_VolAngStep7	26.47°	SCR_{min}
S_VolAngStep8	-26.47°	SCR_{min}
S_VolAngStep9	5.5°	SCR_{max}
S_VolAngStep10	-5.5°	SCR_{max}
S_VolAngStep11	11°	SCR_{max}
S_VolAngStep12	11°	SCR_{max}

Matrice de tests :

Les tests doivent être réalisés pour les scénarios et les points de fonctionnement suivants.

Test	Scénario	Point de fonctionnement
S_VolAngStep1OC[i]	S_VolAngStep1	OC[i]
S_VolAngStep2OC[i]	S_VolAngStep2	OC[i]
S_VolAngStep3OC[i]	S_VolAngStep3	OC[i]
S_VolAngStep4OC[i]	S_VolAngStep4	OC[i]
S_VolAngStep5OC[i]	S_VolAngStep5	OC[i]
S_VolAngStep6OC[i]	S_VolAngStep6	OC[i]
S_VolAngStep7OC[i]	S_VolAngStep7	OC[i]

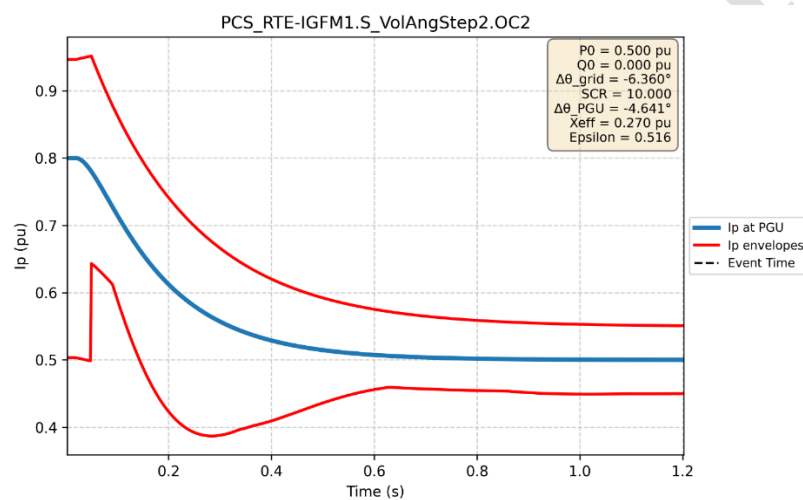
S_VolAngStep8OC[i]	S_VolAngStep8	OC[i]
S_VolAngStep9OC[i]	S_VolAngStep9	OC[i]
S_VolAngStep10OC[i]	S_VolAngStep10	OC[i]
S_VolAngStep11OC[i]	S_VolAngStep11	OC[i]
S_VolAngStep12OC[i]	S_VolAngStep12	OC[i]

Pour des valeurs de « i » égales à 1,2,3,4,5

A titre d'information, la situation S_VolAngStep5OC2 sera utilisée dans la fiche I11 : VALIDATION DU MODELE EMT pour valider le modèle EMTP de l'installation.

La conformité sera validée à l'aide d'enveloppes.

A titre d'illustration, l'enveloppe obtenue pour le test S_VolAngStep2OC2 pour une unité type est la suivante :



TEST 2 : Saut d'amplitude de la tension au nœud infini :

Simulation :

Un saut d'amplitude Δu_G est appliqué sur le nœud infini. La simulation doit durer jusqu'à l'atteinte du régime permanent.

Conditions particulières :

Les tests doivent être réalisés avec deux valeurs différentes de x_{grid} correspondant à $x_{grid,min}(SCR_{min})$, $x_{grid,med}(SCR_{med})$ et $x_{grid,max}(SCR_{max})$, et pour quatre amplitudes différentes $\pm 0.15(x_{eff} + x_{grid})$

Scénario	Saut d'amplitude (Δu_G)	SCR
S_VolAmpStep1	0.116 pu	SCR_{min}
S_VolAmpStep2	-0.116 pu	SCR_{min}
S_VolAmpStep3	0.056 pu	SCR_{med}
S_VolAmpStep4	-0.056 pu	SCR_{med}
S_VolAmpStep5	0.048 pu	SCR_{max}

S_VolAmpStep6

-0.048 pu

 SCR_{max} **Matrice de tests :**

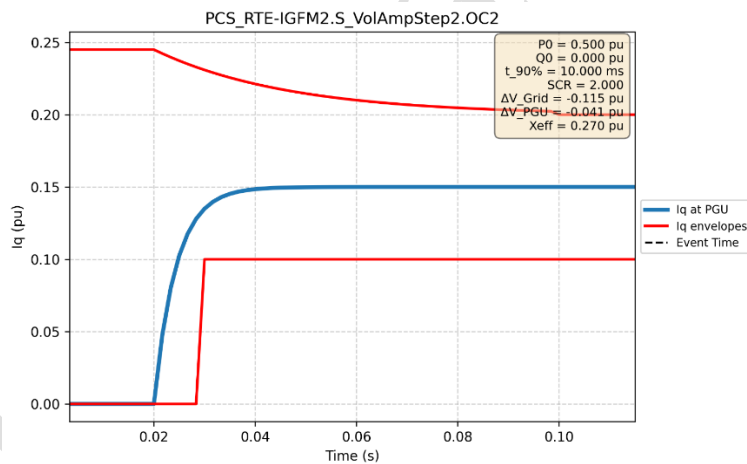
Les tests doivent être réalisés pour les scénarios et les points de fonctionnement suivants.

Test	Scénario	Point de fonctionnement
S_VolAmpStep1_OC[i]	S_VolAmpStep1	OC[i]
S_VolAmpStep2_OC[i]	S_VolAmpStep2	OC[i]
S_VolAmpStep3_OC[i]	S_VolAmpStep3	OC[i]
S_VolAmpStep4_OC[i]	S_VolAmpStep4	OC[i]
S_VolAmpStep5_OC[i]	S_VolAmpStep5	OC[i]
S_VolAmpStep6_OC[i]	S_VolAmpStep6	OC[i]

Pour des valeurs de « i » égales à 1,2,3,4,5,6,7

La conformité sera validée à l'aide d'enveloppes.

A titre d'illustration, l'enveloppe obtenue pour le test **S_VolAmpStep2_OC2** pour une unité type est présentée ci-dessous :

**TEST 3 : Saut de Short Circuit Ratio****Simulation :**

Un saut de Short Circuit Ratio est appliqué dans le réseau par le biais d'une variation d'impédance de x_{grid} entre les valeurs $x_{grid, initial} = \frac{1}{SCR_{initial}}$ et $x_{grid, final} = \frac{1}{SCR_{final}}$. Les simulations doivent durer jusqu'à l'atteinte du régime permanent.

Conditions spécifiques

Deux scénarios différents doivent être considérés :

Scénario	$SCR_{initial}$	SCR_{final}
S_SCRup1	2	20
S_SCRdown1	20	2

Matrice de tests:

Les tests doivent être réalisés pour les scénarios et les points de fonctionnement suivants.

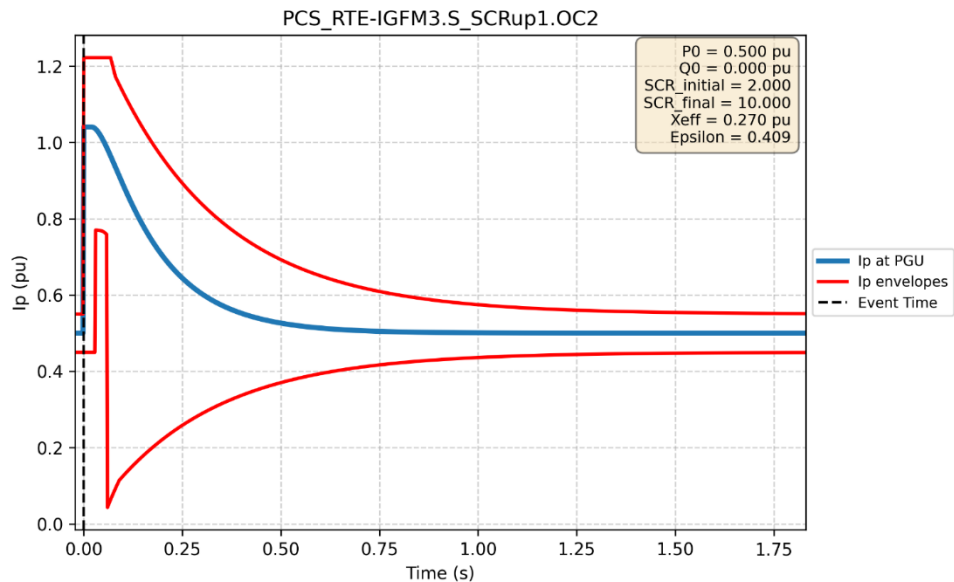
Test	Scénario	Point de fonctionnement
S_SCRup1_OC[i]	S_SCRup1	OC[i]
S_SCRdown1_OC[i]	S_SCRdown1	OC[i]

Pour des valeurs de « i » égales à 1,2,3,4,5

A titre d'information, la situation S_SCRup1_OC5 sera utilisée dans la fiche I11 : VALIDATION DU MODELE EMT pour valider le modèle EMTP.

La conformité sera validée à l'aide d'enveloppes.

A titre d'illustration, l'enveloppe obtenue pour le test S_SCRup1_OC2 pour une unité type sera :



TEST 4 : Variation de fréquence :

Simulation :

La fréquence du nœud infini est modifiée, et la simulation doit durer jusqu'à l'atteinte du régime permanent.

Conditions particulières :

Les tests doivent être réalisés pour deux valeurs différentes de x_{grid} correspondant à $SCR_{max}(x_{grid,max})$, $SCR_{med}(x_{grid,med})$ et $SCR_{min}(x_{grid,min})$, et pour les quatre profils de variations de fréquence suivants :

1. Profil 1 - Valeur initiale 49.5 Hz / Variation: +0.5Hz/sec pendant 3 s (Rate of Change of Frequency)
2. Profil 2 - Valeur initiale 50.5 Hz / Variation: - 0.5Hz/sec pendant 3 s (Rate of Change of Frequency)
3. Profil 3 – Valeur initiale 49.5 Hz / Variation: + 2 Hz/sec pendant 500 ms (Rate of Change of Frequency)
4. Profil 4 – Valeur initiale 50.5 Hz / Variation: - 2 Hz/sec pendant 500 ms (Rate of Change of Frequency)

Zone d'exclusion : dans le cas d'un état de charge supérieur à 95 % (ou inférieur à 5%), la fourniture d'inertie à la hausse (respectivement à la baisse) n'est pas exigée.

Scenario	Profil de fréquence	SCR
S_Rocof1	Profil 1	SCR_{min}
S_Rocof2	Profil 2	SCR_{min}
S_Rocof3	Profil 3	SCR_{min}
S_Rocof4	Profil 4	SCR_{min}
S_Rocof5	Profil 1	SCR_{med}
S_Rocof6	Profil 2	SCR_{med}
S_Rocof7	Profil 3	SCR_{med}
S_Rocof8	Profil 4	SCR_{med}
S_Rocof9	Profil 1	SCR_{max}
S_Rocof10	Profil 2	SCR_{max}
S_Rocof11	Profil 3	SCR_{max}
S_Rocof12	Profil 4	SCR_{max}

Matrice de tests :

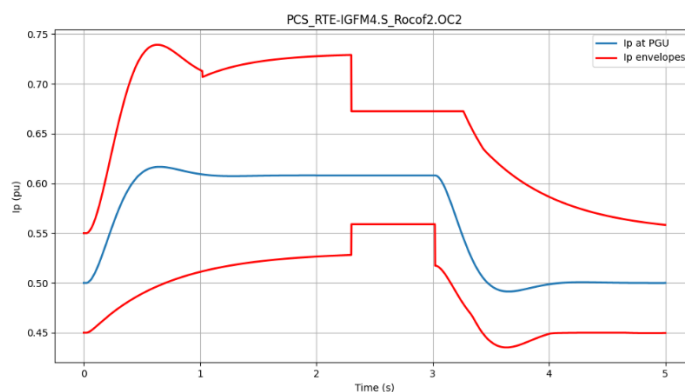
Les tests doivent être réalisés pour les scénarios et les points de fonctionnement suivants.

Test	Scénario	Point de fonctionnement
S_Rocof1_OC[i]	S_Rocof1	OC[i]
S_Rocof2_OC[i]	S_Rocof2	OC[i]
S_Rocof3_OC[i]	S_Rocof3	OC[i]
S_Rocof4_OC[i]	S_Rocof4	OC[i]
S_Rocof5_OC[i]	S_Rocof5	OC[i]
S_Rocof6_OC[i]	S_Rocof6	OC[i]
S_Rocof7_OC[i]	S_Rocof7	OC[i]
S_Rocof8_OC[i]	S_Rocof8	OC[i]
S_Rocof9_OC[i]	S_Rocof9	OC[i]
S_Rocof10_OC[i]	S_Rocof10	OC[i]
S_Rocof11_OC[i]	S_Rocof11	OC[i]
S_Rocof12_OC[i]	S_Rocof12	OC[i]

Pour des valeurs de « i » égales à 1,2,3,4,5

La conformité sera validée à l'aide d'enveloppes.

A titre d'illustration, l'enveloppe obtenue pour le test S_Rocof2_OC2 pour une unité type est:



TEST 5 : Défauts

Simulation :

Différents défauts seront simulés. Pour chacun, la simulation doit durer jusqu'à l'atteinte du régime permanent.

Conditions particulières :

Les tests seront faits avec trois valeurs différentes de x_{grid} correspondant à un $SCR_{min}(x_{grid,min})$, à un $SCR_{med}(x_{grid,med})$ et un $SCR_{max}(x_{grid,max})$ et pour les différents défauts décrits ci-dessous :

Scénario	Profil du défaut	Défaut notation
S_Fault1	Défaut phase-terre 0Ω (150ms)	Défaut 1
S_Fault2	Défaut phase-phase-terre 0Ω (150ms)	Défaut 2
S_Fault3	Défaut phase-phase 0Ω (150ms)	Défaut 3
S_Fault4	Défaut triphasé 0Ω (150ms)	Défaut 4
S_Fault5	Défaut triphasé, creux de tension de 0.5 p.u. (600ms)	Défaut 5
S_Fault6	Défaut triphasé, creux de tension de 0.7 p.u. (0.3 résiduel) (300ms)	Défaut 6

Définition des creux de tension associés aux défauts fugitifs impédants (cf. Fiche I11 – VALIDATION DU MODELE EMT :

Dans le tableau de définition des courts circuits sont demandés de simuler des défauts fugitifs impédants associés à une valeur de creux de tension spécifiée. Pour simuler un tel défaut, l'impédance de défaut devra être modélisée de la façon suivante :

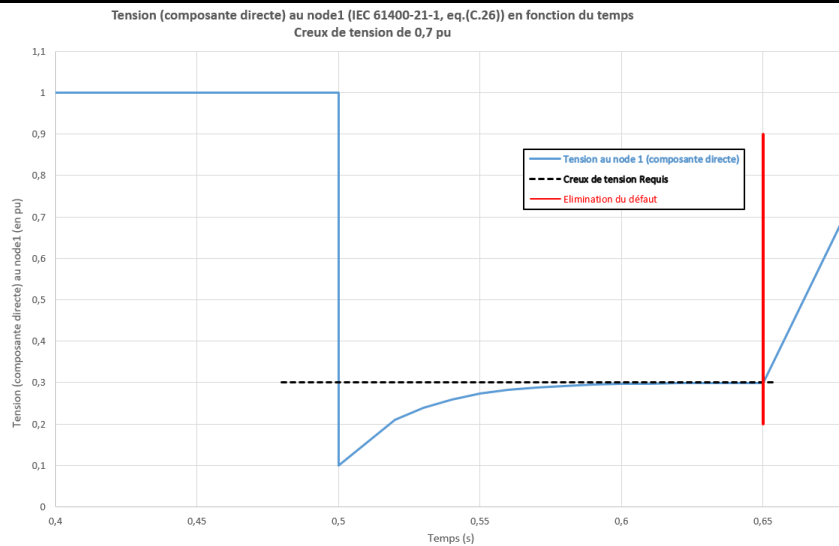
$$Z_{\text{fault}} = R_{\text{fault}} + j \cdot X_{\text{fault}}, \text{ en considérant } R_{\text{fault}} = X_{\text{fault}}/10$$

La tension retenue pour évaluer la valeur du creux de tension est la composante directe de la tension, et telle que définie dans la formule (C.26) de la norme IEC 61400-21-1 (juillet 2019).

Les valeurs numériques indiquées dans le tableau précisent l'amplitude du creux de tension à partir de sa valeur initiale également indiquée dans le même tableau. La valeur du creux de tension définie doit être atteinte avant l'élimination du défaut.

Les valeurs d'impédances de défaut utilisées pour les différentes simulations seront à fournir par le client consommateur.

La figure suivante donne un exemple d'un creux de tension requis de 0.7 Un d'une durée de 150 ms et à partir d'une tension Un. La perturbation est appliquée ici à $t = 500$ ms :



Matrice de tests :

Les tests doivent être réalisés pour les scénarios et les points de fonctionnement suivants. [i] allant de 1 à 5.

Test	Scénario	Point de fonctionnement
S_Fault1_OC[i]	S_Fault1	OC[i]
S_Fault2_OC[i]	S_Fault2	OC[i]
S_Fault3_OC[i]	S_Fault3	OC[i]
S_Fault4_OC[i]	S_Fault4	OC[i]
S_Fault5_OC[i]	S_Fault5	OC[i]
S_Fault6_OC[i]	S_Fault6	OC[i]
S_Fault7_OC[i]	S_Fault7	OC[i]

Données : RTE au stockeur

Enveloppes pour le courant actif pour les gammes de tests 1, 3 et 4, et pour chaque sous-test correspondant à un scénario et un point de fonctionnement.

Enveloppes pour le courant réactif pour la gamme de test 2, et pour chaque sous-test correspondant à un scénario et un point de fonctionnement.

Elles seront transmises sous la forme d'un fichier CSV.

Résultats : Stockeur à RTE

Les courbes des valeurs RMS des courant actif et réactif ainsi que de la tension aux bornes du PGU (U_{DUT}) doivent être fournies pour l'ensemble des simulations et pour les différents points de fonctionnement.

Elles doivent être exportées au format CSV ou COMTRADE, en utilisant un intervalle maximal de 1 ms entre deux points pour l'ensemble de la simulation, et doivent contenir a minima la période entre l'évènement et l'atteinte du régime permanent.

Ces courbes doivent également être incluses dans un graphique avec les enveloppes lorsque cela est nécessaire à la vérification de la conformité.

Critères de conformité

Les critères de conformité suivants sont applicables à l'ensemble des tests, à l'exception du Test 5 sur les défauts :

- Les courants actif et réactif doivent être compris à l'intérieur des enveloppes pour l'ensemble des tests.
- Les courants actifs et réactifs doivent présenter un amortissement supérieur à 50 %. Cet amortissement sera déterminé en utilisant la méthode classique dit "matrix pencil". Une implémentation de cette méthode est disponible [ici](#)², elle sera utilisée pour vérifier la conformité de l'installation.
- Le convertisseur doit rester connecté et stable pour l'ensemble des cas tests.

² [Test damping python app RTE - Colab](#)