

Conception et réalisation d'un banc de tests pour micro-onduleurs sur un simulateur temps réel

Mémoire présenté par
Tanguy SNAPS
en vue de l'obtention du grade de Master
ingénieur civil électromécanicien avec finalité en énergie

Promoteur(s)
Emmanuel DE JAEGER

Lecteur(s)
Yann PANKOW, Marc BEKEMANS

Année académique 2016-2017

Remerciements

Ce travail de fin d'études a été réalisé en collaboration avec Laborelec - Engie-Lab, une filiale d'Engie un des plus grands acteurs mondiaux de l'énergie.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé et soutenu lors de cette dernière année et qui m'ont ainsi permis de présenter ce travail sous cette forme.

Tout d'abord, je voudrais remercier mon promoteur monsieur Emmanuel De Jaeger qui m'a aidé pour les démarches de recherche de mémoire, ainsi que pour le temps qu'il m'a consacré et son assistance lors des divers problèmes rencontrés.

Je tiens particulièrement à remercier monsieur Yann Pankow pour toute l'aide et le soutien qu'il m'a apportés depuis juillet 2016, début de mon stage. Je le remercie aussi pour avoir mis à ma disposition ses contacts pour me permettre d'aller plus loin dans mon mémoire.

Ensuite, je voudrais remercier monsieur David Martinez Lopez pour toute l'aide, le soutien et le temps qu'il m'a accordé. Ainsi que pour la patience dont il a fait preuve et les retours qu'il m'a donnés sur ma façon de travailler.

Je remercie aussi monsieur Christ Scheldeman et monsieur Denis Herbert de m'avoir aidé et conseillé lors de la réalisation du banc d'essai. Tout comme monsieur Nathanaël Wybou et monsieur Pieter Bauwens d'un autre service de laborelec - Engie-Lab pour l'assistance qu'ils m'ont apportée lors de l'intégration de l'émulateur de panneaux photovoltaïques dans l'installation.

Je remercie toutes les autres personnes qui m'ont aidé à Laborelec - Engie-Lab, de même que la société pour m'avoir permis de travailler dans ses locaux et avoir mis à ma disposition le matériel nécessaire pour la réalisation de ce travail.

De plus, un tout grand merci à École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM) de Lille, et plus particulièrement à monsieur Frédérique Colas, pour m'avoir permis d'utiliser leurs matériels ainsi que pour le temps qu'il m'a octroyé.

Pour terminer, je voudrais remercier ma famille et mes proches pour le soutien et l'aide qu'ils m'ont apportés tout au long de cette année ainsi que durant mon cursus.

Abstract

The energy transition, one of the greatest challenges of this century, led to the development of new energy sources. One of the most used is the photovoltaic energy. The principle is the conversion of the energy contained in the illumination from the sun into electrical energy in the form of direct current. This energy can then be stored in batteries or converted by AC inverters to be injected into the electrical grid.

In the last few years, the number of micro-inverters available on the market has considerably increased. That is why Laborelec - Engie-Lab has developed a testing bench as well as unique tests for micro-inverters for real conditions, in which the AC voltage contains harmonics, voltage dips, frequency variations and so on.

The main objectives of these tests for Laborelec - Engie-Lab are :

- To improve their knowledge of the product “micro-inverter” to answer the questions of other group entities.
- To give accurate recommendations on the capacity of the different available micro-inverters.

The aim of this master thesis is to realise the testing bench as well as its automation.

In this document, we will see the advantages and the disadvantages of the different families of solar inverters. Next, we will present some tests in order to observe and to have a deeper understanding of the inverter’s behaviour on the grid. These tests will be accompanied by examples of results and their analyses.

The second part will be devoted to the design of a testing bench to allow the automation of the aforementioned tests. In this part, I will present the various elements that I used to develop the installation and the utility that I have given them. Then, we will talk about the automation of the installation to finish by its validation.

I will conclude this report with a series of perspectives that I think are interesting to improve the testing bench and the algorithms developed for automation.

Résumé

La transition énergétique, sûrement l'un des plus grands défis de ce siècle, a permis de voir se développer de nouvelles sources d'énergie. L'une des plus utilisées est l'énergie photovoltaïque. Le principe est la conversion de l'énergie contenue dans l'éclairement provenant du soleil en une énergie électrique sous la forme de courant continu. Cette énergie peut ensuite être stockée dans une batterie, ou transformée par des onduleurs en courant alternatif pour pouvoir être injectée sur le réseau.

Ces dernières années, le nombre d'onduleurs disponibles sur le marché a considérablement augmenté. C'est la raison pour laquelle Laborelec - Engie-Lab a développé un banc de tests ainsi que des tests uniques pour micro-onduleurs soumis à des conditions réelles, dans lesquelles la tension AC contient des harmoniques, des creux de tension, des variations de fréquence, etc.

Les principaux objectifs de ces tests pour Laborelec - Engie-Lab sont :

- D'améliorer leurs connaissances sur les différents micro-onduleurs pour pouvoir répondre aux questions des autres entités du groupe.
- De donner des recommandations précises sur la capacité des différents micro-onduleurs disponibles.

L'objectif de ce travail de fin d'études est de réaliser le banc d'essai ainsi que son automatisation.

Dans ce document, nous verrons les avantages et inconvénients des différentes familles d'onduleurs solaires. Ensuite, des tests seront présentés, qui ont pour but d'observer et de mieux appréhender le comportement des onduleurs sur des réseaux. Ces tests seront accompagnés d'exemples de résultats et de leurs analyses.

La seconde partie sera consacrée à la conception d'un banc d'essai pour permettre l'automatisation des tests précités. Dans cette partie, je présenterai les différents éléments que j'ai utilisés pour mettre au point l'installation et l'utilité que je leur aie donnée. Ensuite, nous parlerons de l'automatisation de l'installation pour finir par sa validation.

Je conclurai ce rapport par une suite de perspectives qui me paraissent intéressantes pour améliorer le banc d'essai et les algorithmes développés pour l'automatisation.

Table des matières

Introduction générale	1
I Contextes technique et technologique	4
Introduction de la première partie	5
1 Concepts de base	6
2 Familles d'onduleurs solaire	9
1 Onduleur "chaîne" (onduleur central)	9
2 Optimiseur DC	12
3 Micro-onduleur	13
4 Le futur	15
3 Tests de micro-onduleurs	17
1 Tests en fonctionnement normal	17
2 Tests des systèmes de protection	19
3 Tests en fonctionnement sur un réseau dégradé	20
II Automatisation des tests	22
Introduction de la deuxième partie	23
1 L'installation	24
1 Schéma général de l'installation	24
2 Émulateur de panneaux photovoltaïques	25
3 Micro-onduleurs	27
4 Armoire de protection	29
5 Émulateur de réseaux	30
6 Python	34
2 Automatisation des tests	36
1 Reproduction des tests	36
2 Le programme	36

3	Validation	40
1	Procédure de validation de l'installation	40
2	Problèmes rencontrés et solutions apportées	42
3	État de la validation	43
	Conclusions et Perspectives	44
	Bibliographie	45
III	Annexes	47
A	Fiche technique des onduleurs SMA Sunny Boy 3000TL	48
B	Fiche technique du micro-onduleur SMA SUNNY BOY 240	53
C	Fiche technique du micro-onduleur Letrika	56
D	Fiche technique du micro-onduleur Clipsol	59
E	Fiche technique du micro-onduleur Enphase M250	61
F	Fiche technique des optimiseurs DC SolarEdge	64
G	Fiche technique du pont IGBT	67
H	Fiche technique du simulateur Opal-RT	85
I	Fiche technique de l'amplificateur de puissance 4 quadrant de 3X7000VA	105
J	Fiche technique de la resistance	120
K	L'interface graphique du programme Python	126
L	Tests de micro-onduleurs	130
1	Tests en fonctionnement normal	130
2	Tests des systèmes de protection	136
3	Tests en fonctionnement sur un réseau dégradé	137

Acronymes

AC	Courant Alternatif	2
C-RIO	Compact-RIO	25
DC	Courant Continu	2
ENSAM	École Nationale Supérieure des Arts et Métiers	17
FFT	Fast Fourier Transform (transformation de Fourier rapide)	138
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée)	26
MLI	Modulation de la Largeur d'Impulsion	27
MPP	Maximum Power Point (point de puissance maximum)	6
MPPT	Maximum Power Point Tracking (suivi du point de puissance maximum)	6
PHIL	Power Hardware In the Loop	30
PV	Panneau Photovoltaïque	6
THD	Total Harmonic Distortion (taux distorsion harmonique total)	20

Introduction générale

À l'heure actuelle, la consommation énergétique mondiale augmente sans cesse. Comme on peut l'observer sur la Figure 1¹, plus de 80% de l'énergie primaire est produite à partir de combustibles fossiles. Les problèmes de ces combustibles sont les suivants :

1. Ils sont présents en quantité limitée sur terre et leurs réserves s'épuisent très vite.
2. Ces réserves sont situées seulement dans certaines régions, ce qui procure à ces régions un pouvoir sur les autres.²
3. Ils émettent lors de leurs combustions des gaz à effet de serre qui ont pour conséquence le réchauffement climatique.

World¹ total primary energy supply (TPES) from 1971 to 2014 by fuel (Mtoe)

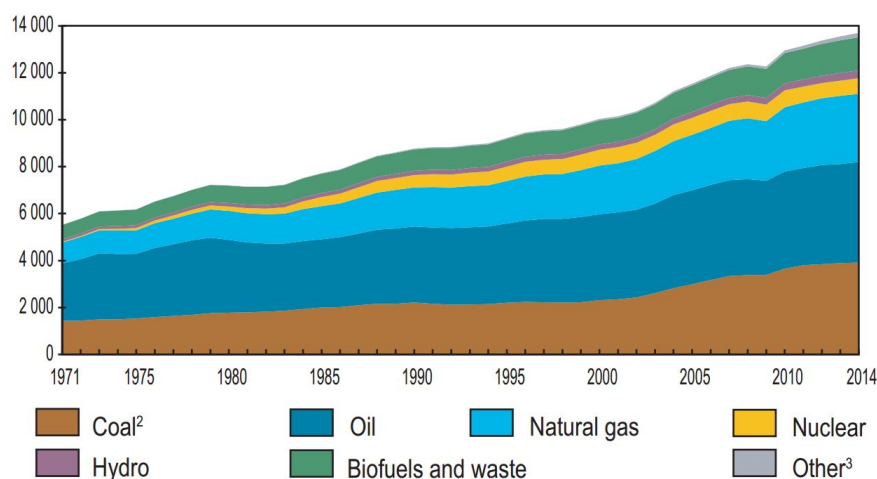


FIGURE 1 – Approvisionnement total en énergie primaire en mégatonnes équivalent pétrole (Mtoe)

L'Europe s'est engagée via la stratégie « Europe 2020 » à limiter son impact sur le changement climatique et à augmenter sa production en énergies durables, pour cela elle s'est fixée comme objectifs :

1. La réduction de ses émissions de gaz à effet de serre de 20 % (voire de 30 %, si les conditions le permettent) par rapport à 1990.
2. L'utilisation d'énergies provenant de sources renouvelables à hauteur de 20 %.
3. L'augmentation de 20 % de l'efficacité énergétique.[1]

1. Pour plus d'informations <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>

2. Dans ce document, nous ne discuterons pas des aspects politiques et économiques que cela engendre.

Pour suivre cette stratégie, les pays se lancent dans une transition énergétique en promouvant les énergies renouvelables. Celles-ci ont pour avantages :

1. D'être disponible de manière illimitée comme le vent, le soleil, ...
2. D'être disponibles partout sur terre.
3. De ne pas émettre de CO_2 lors de la production de l'énergie, ou tout au plus, d'avoir un bilan nul.³

Cependant ces énergies possèdent aussi quelques désavantages :

1. Elles sont intermittentes et ne sont pas forcément disponibles quand on en a besoin.
2. Certaines régions sont privilégiées pour certains types d'énergies renouvelables, par exemple, l'énergie photovoltaïque est privilégiée dans les pays ensoleillés tels que l'Espagne comparé à la Belgique.

Lors de la conception de nos réseaux de distribution, ceux-ci se comportaient comme des éléments passifs. Le flux de puissance s'écoulait dans une seule direction, de la production, la centrale, vers le consommateur final. Du fait de l'insertion des énergies renouvelables, de plus faible puissance, on a des productions décentralisées avec l'apparition de prosommateurs (en anglais, prosumers). Ce sont des personnes qui sont à la fois des PROducteurs et des conSOMMATEURS, par exemple, le ménage résidentiel qui possède des panneaux photovoltaïques et qui est toujours branché sur le réseau. Ces productions décentralisées amènent à des flux de puissances et de tensions qui ne sont plus impactés uniquement par les charges, mais aussi par les sources de production.^[2]

Engie, un acteur mondial de l'énergie, le troisième plus grand groupe du secteur (hors pétrole) en 2015, est expert dans trois métiers : l'électricité, le gaz naturel et les services à l'énergie. Le groupe se veut être un leader de la transition énergétique pour une économie sobre en carbone grâce à,

- l'accès à une énergie durable,
- l'atténuation et l'adaptation au changement, climatique
- la sécurité d'approvisionnement et
- l'utilisation raisonnée des ressources.^[3]

Dans ce document, nous allons nous attarder sur le domaine des installations photovoltaïques. Plus particulièrement sur les micro-onduleurs qui sont des convertisseurs de puissances de Courant Continu (DC) vers du Courant Alternatif (AC).

Ces dernières années, le nombre d'onduleurs disponibles sur le marché a considérablement augmenté suite aux différentes aides octroyées par les états lors de leurs achats.^[4] C'est la raison pour laquelle Laborelec - Engie-Lab a développé un banc de tests ainsi que des tests uniques pour micro-onduleurs soumis à des conditions réelles, dans lesquelles la tension AC contient des harmoniques, des creux de tension, des variations de fréquence, etc .

Les principaux objectifs de ces tests pour Laborelec - Engie-Lab sont :

- D'améliorer leurs connaissances sur les différents micro-onduleurs pour pouvoir répondre aux questions des autres entités du groupe.
- De donner des recommandations précises sur la capacité des différents micro-onduleurs disponibles.

3. Pour la biomasse, les émissions sont neutres car celles qui sont émises sont égales à celles capturées lors de sa formation.

L'objectif de ce travail de fin d'études est de réaliser le banc d'essai ainsi que son automatisation.

Dans la première partie, les contextes techniques et technologiques seront posés pour donner les bases nécessaires au lecteur. Nous poursuivrons avec un état de l'art sur les onduleurs solaires. Pour finalement analyser quelques tests que l'on peut réaliser sur ceux-ci en vue de comprendre leur comportement dans des situations particulières et d'aider à leur intégration sur le réseau électrique.

Nous aborderons ensuite la deuxième partie qui est axée sur l'automatisation des tests. Nous la débuterons par la description de l'installation que j'ai réalisée permettant cette automatisation. Nous examinerons ensuite la façon dont l'automatisation a été réalisée. Pour terminer cette partie par la validation de cette installation et son automatisation ainsi que l'état de cette validation.

Nous clôturerons ce mémoire par une petite conclusion ainsi que par les perspectives qui font suite à ce travail.

Première partie

Contextes technique et technologique

Introduction de la première partie

Cette partie est se compose de trois chapitres orientés théorie. Le premier chapitre intitulé "Concepts de base" donne une série de concepts basiques qui permettent de mieux aborder la suite du document, on y présentera les onduleurs mais aussi certaines caractéristiques spécifiques au panneaux photovoltaïques ainsi que le fonctionnement du Maximum Power Point Tracking des onduleurs.

Le deuxième chapitre intitulé "Familles de onduleurs solaire" présente l'état de l'art des différentes familles d'onduleurs solaire. Dans ce chapitre, nous passerons aussi en revue les différents avantages et inconvénients de chacune de ces familles.

Le quatrième chapitre intitulé "Tests de micro-onduleurs" présente différents tests que l'on peut réaliser sur les différentes Familles d'onduleurs solaire en vue de voir leur impacte sur le réseau et inversement.

Chapitre 1

Concepts de base

Dans cette partie, nous aborderons quelques concepts de base sur les onduleurs et les panneaux photovoltaïques pour mieux appréhender la suite du document.

La plupart de nos appareils électriques actuels fonctionnent en courant alternatif. Malheureusement, les panneaux photovoltaïques utilisant l'énergie contenue dans l'éclairement provenant du soleil convertissant cette énergie en électricité sous forme de courant continu. Il est donc nécessaire si l'on veut utiliser ou réinjecter cette énergie sur le réseau de faire appel à un appareil permettant d'effectuer la transformation, l'onduleur.[5]

Le premier rôle de l'onduleur va donc être d'exécuter cette transformation DC vers AC. Mais ce n'est pas le seul rôle de cet "onduleur", il doit être capable de se synchroniser avec le réseau pour permettre de réinjecter le courant généré. Pour cela, il doit adapter sa tension, fréquence et impédance tout au long de son fonctionnement. Il doit aussi respecter certaines normes de découplage en cas de chute de tension sur le réseau. De plus, il doit également permettre de faire le Maximum Power Point Tracking (suivi du point de puissance maximum) (MPPT) d'un générateur électrique non linéaire (pour obtenir le meilleur rendement de celui-ci). En effet, comme le montre la Figure 1.1, les modules photovoltaïques ont une caractéristique I-V (courant-tension) non linéaire. De plus, on peut observer sur cette même Figure que la courbe P-V (puissance-tension) possède un point où la puissance extraite du Panneau Photovoltaïque (PV) est maximale, le Maximum Power Point (point de puissance maximum) (MPP). C'est aussi le point où le système de panneaux photovoltaïques fonctionne à rendement maximal.[6]

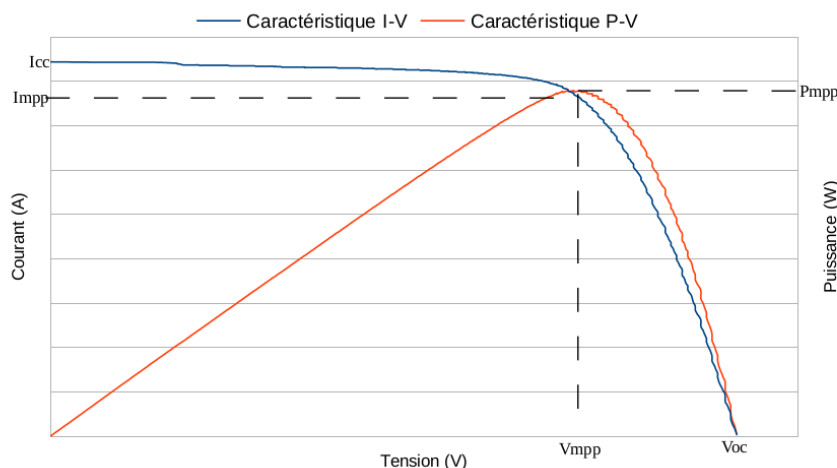


FIGURE 1.1 – Courbes I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque

Lorsqu'on connecte directement une charge à un panneau photovoltaïque, le point de fonctionnement de celui-ci est rarement à la puissance maximale. Ce point de fonctionnement est déterminé par l'impédance vue par le panneau, on peut donc faire varier ce point en variant l'impédance. Étant donné que ces panneaux sont des dispositifs à courant continu, on doit utiliser des convertisseurs DC-DC, convertisseurs qui ont pour but de transférer la puissance venant du ou des panneaux vers la charge. On peut faire varier le point de fonctionnement en faisant varier le rapport de fonctionnement (duty cycle).

En outre les courbes de la Figure 1.1 varient suivant l'éclairement et la température comme le montrent les Figures 1.2 et 1.3¹, ce qui empêche un réglage en usine du point de fonctionnement et nécessite un système qui fonctionne non-stop.[7]

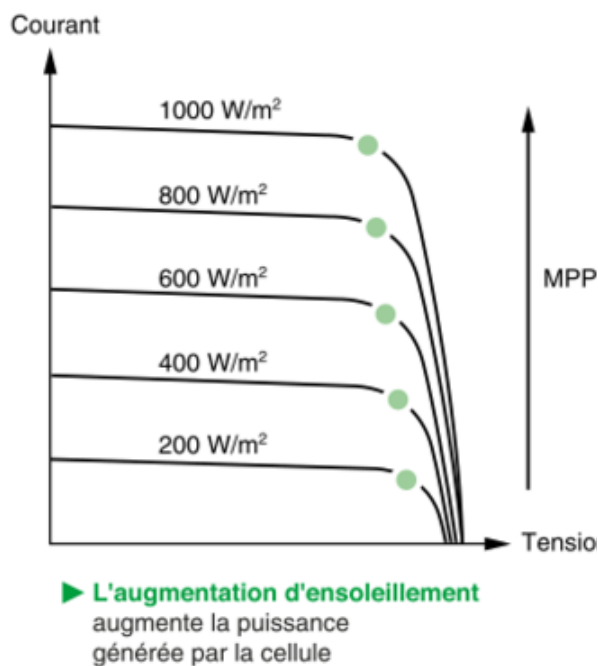


FIGURE 1.2 – Effet de l'éclairement sur la courbe IV d'un panneau photovoltaïque

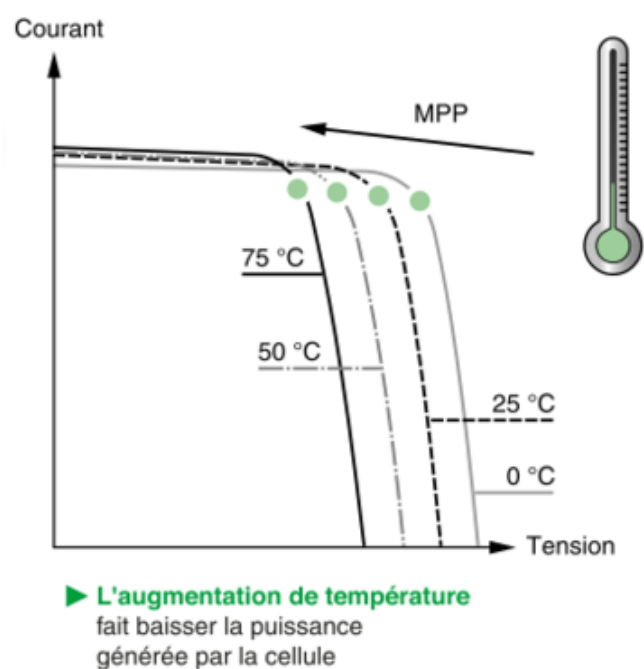


FIGURE 1.3 – Effet de la température sur la courbe IV et PV d'un panneau photovoltaïque

Par conséquent, les algorithmes MPPT échantillonnent fréquemment les tensions et les courants venant du réseau photovoltaïque et ajuste le rapport de fonctionnement.

À l'heure actuelle, le marché compte de nombreux algorithmes MPPT différents, mais nous n'en verrons que deux pour observer le principe de fonctionnement de ces algorithmes :

- La méthode de la perturbation et de l'observation (P & O), qui est la plus largement utilisée en raison de sa structure à simple rétroaction et du fait que seuls quelques paramètres sont mesurés. Ce dispositif fonctionne par incrément ou décrement périodique de la tension aux bornes du réseau de panneaux photovoltaïques. Si cette perturbation conduit à une augmentation ou à une diminution de la puissance du réseau, la perturbation suivante est effectuée respectivement dans la même direction ou dans la direction opposée. De cette manière, le dispositif de poursuite de puissance maximale recherche constamment les conditions de celle-ci sans jamais l'atteindre.
- La méthode de la conductance incrémentale, qui requiert que le contrôleur mesure les changements incrémentiels dans le courant et la tension du réseau photovoltaïque pour

1. Les Figures 1.2 et 1.3 sont issues du site http://fr.electrical-installation.org/frwiki/Principe_et_technologie_photovoltaique

prédire l'effet d'un changement de tension. Malheureusement, cette méthode nécessite plus de calculs dans le contrôleur, mais elle peut suivre les conditions changeantes plus rapidement que la méthode P & O. Et comme l'algorithme P & O, cette méthode peut également produire des oscillations dans la sortie de puissance. Cette méthode utilise la conductance incrémentale (dI / dV) du réseau photovoltaïque pour calculer le signe du changement de puissance par rapport à la tension (dP / dV). La méthode de conductance incrémentale calcule le point de puissance maximum par comparaison de la conductance incrémentale ($I\Delta/V\Delta$) à la conductance du réseau (I / V). Lorsque ces deux valeurs sont identiques ($I\Delta/V\Delta = I / V$), la tension de sortie est la tension MPP [8][9].

Il faut savoir qu'il y a un système MPPT par onduleur, donc si on a 10 panneaux photovoltaïques avec un onduleur "chaîne", on a un seul MPPT. Si on utilise des micro-onduleurs, on a 10 micro-onduleurs et de ce fait 10 MPPT indépendants. Cela peut se révéler important dans l'éventualité où des panneaux seraient ombragés. Dans le cas où l'on utilise un onduleur "chaîne", non seulement on a une diminution de la puissance produite par les panneaux car ceux-ci s'alignent sur celui qui a la production la plus faible, mais l'algorithme MPPT peut ne pas retrouver le point de puissance maximum global, comme le montre la Figure 1.4. Dans cette Figure, la courbe noire représente la puissance fournie par le réseau photovoltaïque en fonction de la tension à ses bornes, sous des conditions d'ensoleillement uniforme. La courbe bleue représente le même réseau photovoltaïque, mais sous des conditions d'ensoleillement des panneaux non uniforme. La flèche rouge montre la perte de puissance due aux conditions non uniformes. Nous n'irons pas plus loin dans l'analyse de ce défaut, pour de plus amples informations l'article [10] est très bien fait.

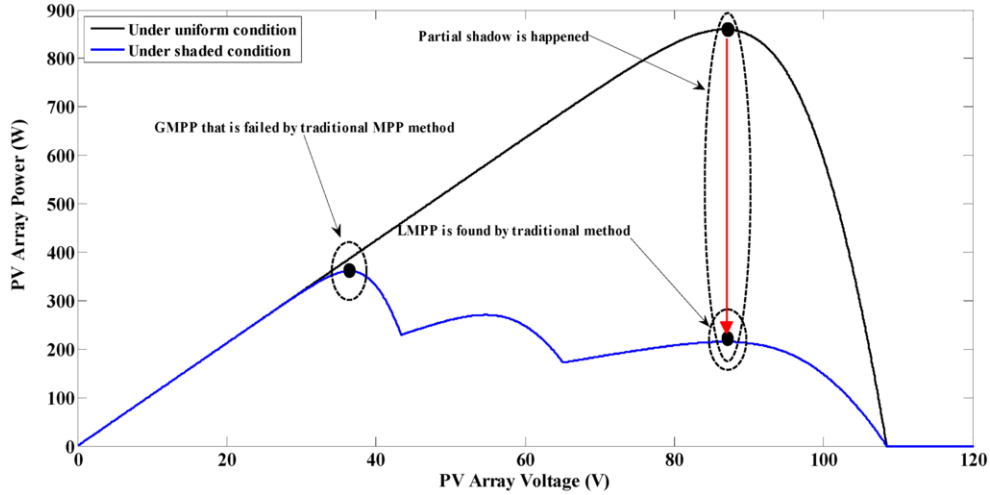


FIGURE 1.4 – Défaut de l'algorithme de MPPT pour trouver le point de puissance maximum global (GMPP) [10]

Chapitre 2

Familles d'onduleurs solaire

Dans cette partie, nous allons présenter les grandes familles d'onduleurs et citerons les principaux avantages et inconvénients de celles-ci.

Il existe 3 grandes familles d'onduleurs utilisées avec les panneaux photovoltaïques :

- Onduleur "chaîne"
- Micro-onduleur
- Optimiseur DC avec onduleur "chaîne" [11]

Et nous terminerons par un aperçu des technologies futures.

1 Onduleur "chaîne" (onduleur central)

Les onduleurs "chaîne" (centraux) sont les onduleurs qui sont traditionnellement utilisés dans les installations photovoltaïques. On les appelle ainsi car les panneaux photovoltaïques sont connectés en série pour former une "chaîne" qui est ensuite connectée à l'onduleur. On a donc plusieurs panneaux pour un seul onduleur. La tension nominale d'entrée pour ces onduleurs est de $300V_{DC}$ à $600V_{DC}$, pour une tension de sortie de $100V_{AC}$ à $127 V_{AC}$ en Amérique du Nord ou de $220V_{AC}$ à $240V_{AC}$ en Europe.¹

Avantages de cette technologie :

- Pour une installation bien dimensionnée, cette technologie est moins chère.
- Le rendement de l'onduleur est supérieur à 96-97%[12].

Désavantages de cette technologie :

- Avec ce style d'arrangement, les panneaux sont connectés en série, comme le montre la Figure 2.2, ce qui implique que leurs puissances de sortie maximales sont fixées par le panneau ayant le plus mauvais rendement, donc la plus faible puissance. Par exemple, si on connecte en série 10 panneaux et que l'un est en partie recouvert, chaque panneau verra sa puissance de sortie diminuer, comme le montre la Figure 2.1.

1. Pour plus d'informations sur les raisons de ces niveaux de tensions, tout est bien expliqué sur le site <http://www.worldstandards.eu/electricite.htm>.

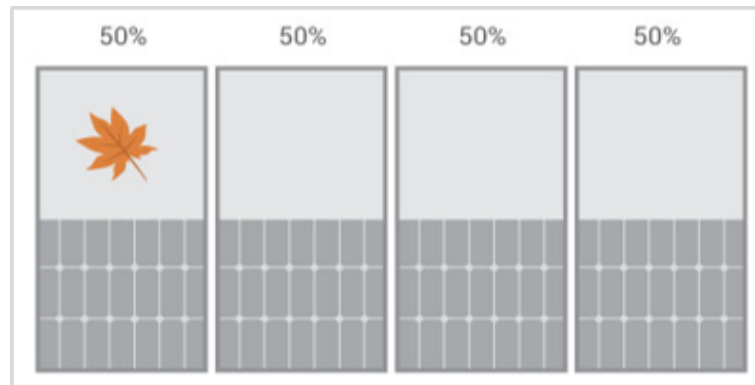


FIGURE 2.1 – Puissance des panneaux d’une installation photovoltaïque utilisant un onduleur "chaîne" en cas d’ombrage partiel sur un de ceux-ci.

- L’onduleur a une puissance nominale. Il faudra donc mettre un certain nombre de panneaux en série pour pouvoir profiter au maximum de l’investissement, ce qui met une contrainte sur le nombre de panneaux et limite l’expansion ultérieure du réseau photovoltaïque.
- Suite à la puissance fournie par les onduleurs "chaîne", ceux-ci ont besoin d’être refroidis (ce qui génère du bruit et une perte d’énergie).
- À cause de la tension de $300V_{DC}$ à $600V_{DC}$ entre les panneaux et l’onduleur, cette partie de l’installation est dangereuse, surtout en cas d’îlotage (perte du réseau) car les panneaux photovoltaïques maintiennent cette tension élevée aux bornes de l’onduleur. Cela constitue un danger pour toute personne étant en contact avec l’installation, que ce soit le technicien qui va réparer l’installation ou bien les pompiers qui voudraient éteindre un feu.
- Pas de surveillance des panneaux pour observer leur production ou leurs problèmes de fonctionnement.
- Perte totale de la production d’énergie si perte de l’onduleur "chaîne".

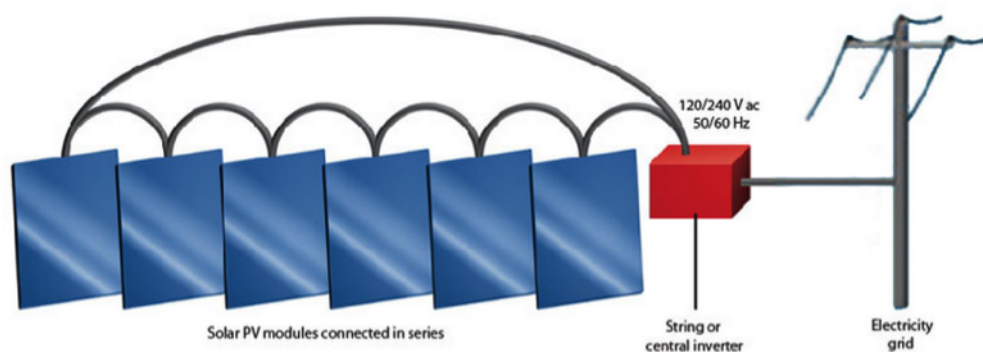


FIGURE 2.2 – Représentation d’un système avec des onduleurs photovoltaïques "chaîne"

On utilisera donc ce genre d’onduleurs dans des applications avec des ombrages limités et une orientation uniforme du soleil sur les modules. La Figure 2.3 montre un exemple de ces onduleurs. La fiche technique de cet onduleur est fournie dans l’annexe A pour donner une idée de leurs limites et obligations.



FIGURE 2.3 – Onduleur SMA Sunny Boy 3000TL

Les technologies suivantes ont pour objectif de remédier à certains de ces désavantages, mais surtout, à la baisse de puissance due à un ombrage, comme montré sur la Figure 2.4 ou à des orientations de panneaux différentes, comme présentée sur la Figure 2.5.

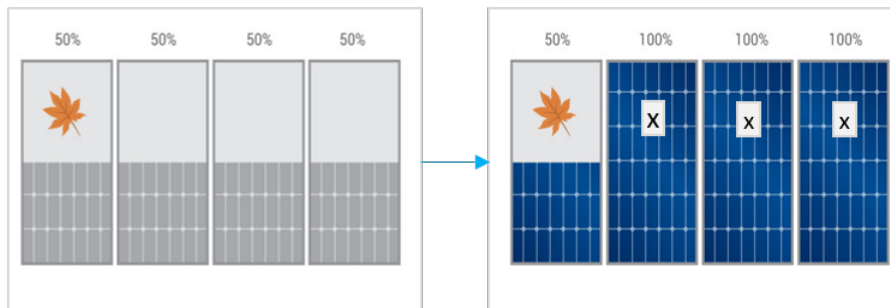


FIGURE 2.4 – Comparaison de l'impact d'un ombrage partiel d'un panneau d'une installation photovoltaïque utilisant un onduleur "chaîne" et utilisant un optimiseur DC ou micro-onduleur.



FIGURE 2.5 – Exemple de toit avec des panneaux possédants des orientations différentes

2 Optimiseur DC

L'optimiseur DC est une nouvelle technologie dont le but est de résoudre certains désavantages des onduleurs "chaîne" sans demander de grands changements dans l'installation. La sortie de chaque panneau est optimisée indépendamment pour obtenir le meilleur rendement possible. La sortie des optimiseurs DC est en DC, on doit donc utiliser un onduleur "chaîne" pour faire la conversion DC vers AC.

Avantages de cette technologie :

- Avec cette technologie, si l'un des panneaux est recouvert ou a une baisse de rendement, les autres panneaux ne sont pas impactés, car chaque panneau photovoltaïque est optimisé séparément. Ceux-ci sont connectés en série sur le réseau comme le montre la Figure 2.6.
- Les anciennes installations peuvent être mises à jour à moindres coûts.
- L'intégration d'une batterie dans le système est très facile, car jusqu'à l'onduleur le système se trouve en DC.²
- Si l'onduleur "chaîne" est adapté, en cas d'îlotage, l'onduleur envoie l'information aux optimiseurs DC qui baissent la tension de sortie pour protéger contre de possibles électrocutions.
- Possibilité de surveillance des panneaux pour observer leur production ou leurs problèmes de fonctionnement.[13]

Désavantages de cette technologie :

- Le rendement de l'optimiseur DC est supérieur à 98%, mais celui-ci se voit pénaliser par le fait qu'il faut lui adjoindre le rendement de l'onduleur "chaîne" pour obtenir un courant alternatif.
- Elle nécessite un onduleur "chaîne" en plus des optimiseurs DC.
- La modularité du système est limitée à cause de la présence d'un onduleur "chaîne"[14].
- Perte totale de la production d'énergie si perte de l'onduleur "chaîne".

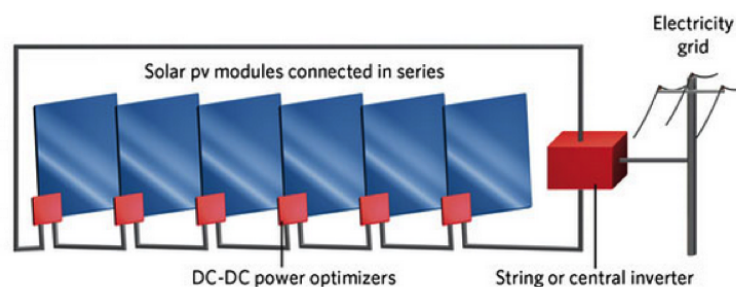


FIGURE 2.6 – Représentation d'un système composé d'optimiseurs DC et d'un onduleur "chaîne"

On utilisera donc des optimiseurs DC pour mettre à jour des installations disposant déjà d'un onduleur "chaîne" (celui-ci devant être changé pour un onduleur plus simple, ne disposant pas d'un système MPPT) ou ayant des batteries, ainsi que dans des applications avec des ombrages variables et une orientation variable du soleil sur les modules. La Figure 2.7 montre un exemple d'optimiseur DC. Sa fiche technique est fournie dans l'annexe F, ce qui nous donne un exemple de leurs limites.

2. Il existe aussi une batterie AC qui est vendue par Enphase mais cette batterie redresse le courant en entrée pour en faire du DC et l'ondule en sortie pour faire du AC. On a donc des pertes au niveau du redresseur et de l'onduleur.

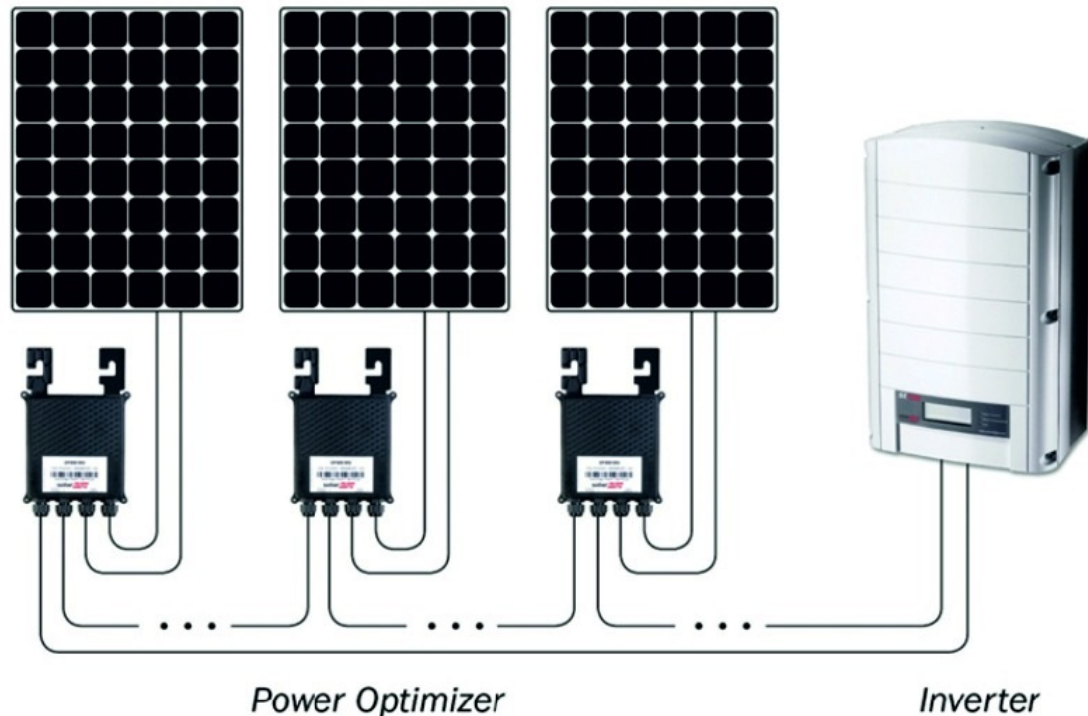


FIGURE 2.7 – Système d'optimiseur DC avec onduleur "chaîne" SolarEdge

3 Micro-onduleur

La technologie des micro-onduleurs est la plus jeune des technologies d'onduleurs solaires, elle se veut remédier aux désavantages des onduleurs "chaîne".

Les micro-onduleurs ont une puissance nominale proche de 250W qui correspond en général à la puissance d'un panneau photovoltaïque, ce qui permet d'avoir une tension aux bornes du micro-onduleur plus faible, de l'ordre de $40V_{DC}$ à $80V_{DC}$ en entrée. Cela assure une meilleure sécurité de l'installation. les micro-onduleurs sont aussi disposés juste derrière les panneaux, ce qui permet de diminuer la taille de l'installation à risques. De plus, les micro-onduleurs ont l'avantage de convertir le courant en sortie ce qui leurs permet de ne pas avoir besoin d'un onduleur "chaîne" comme les optimiseur DC.

Avantages de cette technologie :

- Avec cette technologie, si l'un des panneaux est recouvert ou a une baisse de rendement, les autres panneaux ne sont pas impactés, car chaque panneau photovoltaïque est optimisé séparément par son micro-onduleur. Ceux-ci sont connectés en parallèle sur le réseau comme le montre la Figure 2.8.
- Les micro-onduleurs permettent plus de flexibilité au sein de l'installation, car si l'on veut ajouter un panneau photovoltaïque, il suffit d'ajouter un micro-onduleur.
- Suite à leur plus faible puissance, les micro-onduleurs ne requièrent pas de refroidissement spécifique.

- Du fait que les tensions entre le panneau et l'onduleur sont de $40V_{DC}$ à $80V_{DC}$, l'installation est moins dangereuse [14].
- Possibilité de surveillance des panneaux pour observer leur production ou leurs problèmes de fonctionnement.
- Pas de perte totale de la production d'énergie si perte d'un micro-onduleur.

Désavantages de cette technologie :

- Le coût d'achat initial de l'installation est supérieur à celle avec des onduleurs "chaîne".
- Le rendement est légèrement plus faible que les onduleurs "chaîne", il est supérieur à 95%. [15]

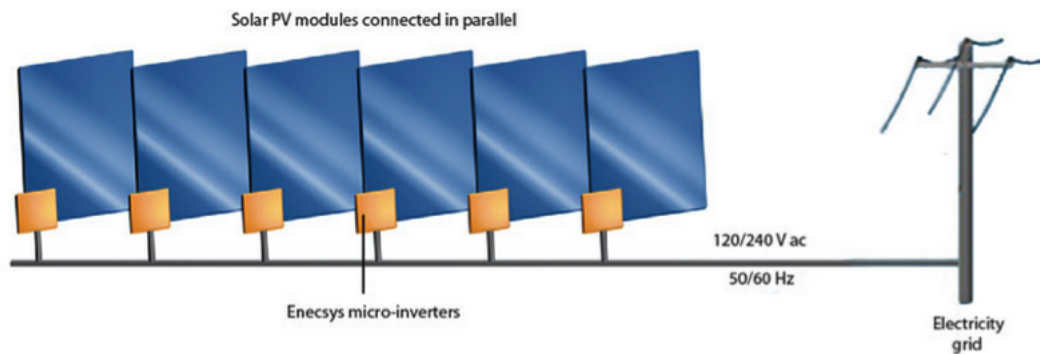


FIGURE 2.8 – Représentation d'un système avec des micro-onduleurs photovoltaïques

On utilisera donc ce genre de micro-onduleurs dans des applications avec des ombrages variables et une orientation variable du soleil sur les modules. Les Figures 2.9, 2.10, 2.11 et 2.12 montrent des exemples de ces micro-onduleurs. Leurs fiches techniques respectives sont fournies dans les annexes B, C, D et E pour souligner que dans ce cas il faudra faire attention au choix du couple micro-onduleur/panneau photovoltaïque, car la tension du bus DC des micro-onduleurs est différente et adaptée à un type de panneau bien précis.



FIGURE 2.9 – Micro-onduleur SMA SUNNY BOY 240



FIGURE 2.10 – Micro-onduleur Letrika SMI 260



FIGURE 2.11 – Micro-onduleur Clipsol BDM-250



FIGURE 2.12 – Micro-onduleur Enphase M250

La Table 2.1 présente une brève comparaison entre les micro-onduleurs et les optimiseurs DC avec onduleur "chaîne".

	Micro-onduleur	Optimiseur DC + onduleur "chaîne"
Coût	le plus haut	plus haut que seulement l'onduleur "chaîne"
Rendement	>95%	global <93%
Garantie	25 ans	25 ans optimiseur DC 10-12 ans onduleur "chaîne"
Flexibilité du design	aucune limite	limite du à l'onduleur "chaîne" (max et min)
Productivité	plus haute bonne performance si ombrage	moyenne bonne performance si ombrage
Sécurité	faible tension DC ($40\text{-}60V_{DC}$)	$\pm 600V_{DC}$ sauf si communication onduleur "chaîne"

TABLE 2.1 – Comparaison entre micro-onduleur et optimiseur DC avec onduleur "Chaîne"

4 Le futur

Dans cette section, nous allons explorer des technologies qui sont proche de la vente ou dont la commercialisation en petite quantité a déjà commencé.

Parmi ces technologies, deux sortent du lot. Elles reposent sur l'intégration d'un micro-onduleur ou d'un optimiseur DC directement dans le module photovoltaïque :

- Optimiseurs DC intégré. L'optimiseur DC est directement greffé sur le module photovoltaïque. Il n'y a pas besoin de "boîtiers" supplémentaires entre les modules et l'onduleur.³
- Micro-onduleur intégré. Le convertisseur DC / AC est intégré sur le fond du panneau

3. Intégration d'optimiseur DC de SolarEdge dans des panneaux photovoltaïques <http://www.canadiansolar.com/au/solar-panels/smartdc.html>.

solaire. Il permet de fournir un module AC. ⁴

Les modules PV conventionnels sont équipés de diodes de dérivation, de sorte que si une cellule est ombragée, la chaîne de cellules affaiblie est contournée pour éviter de limiter le courant de l'ensemble du panneau, voir les 2 panneaux de gauche sur la Figure 2.13.

Les optimiseurs DC intégrés aux "chaînes" de cellules sont des convertisseurs DC-DC qui remplacent les diodes de dérivation traditionnelles, effectuant ainsi le MPPT à l'intérieur de chaque module PV.

Contrairement aux diodes de dérivation conventionnelles, les optimiseurs de cellules solaires ne contournent pas les "chaînes" de cellules faibles, mais ils fonctionnent comme des dispositifs MPPT ce qui permet de ne pas arrêter la production de ces "chaînes" de cellules, comme montré sur le panneau droit de la Figure 2.13. Chaque "chaîne" de cellules contribue à sa puissance maximale sans interférer avec la capacité de production d'énergie des autres.

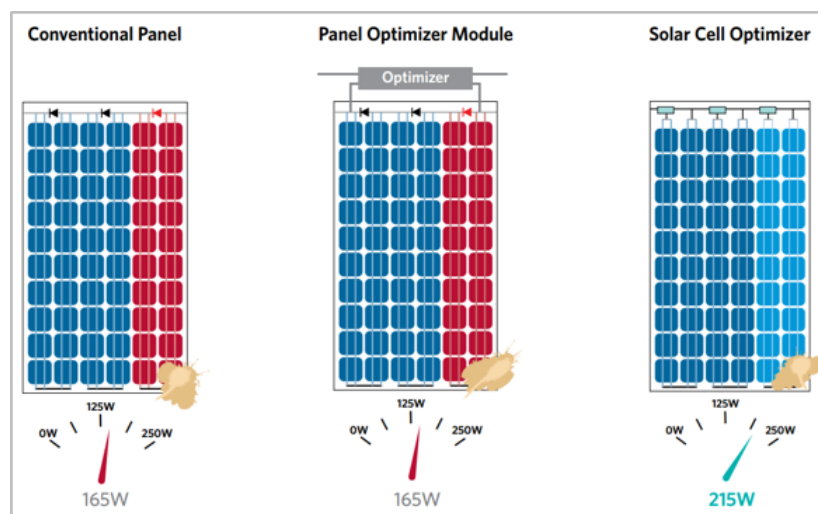


FIGURE 2.13 – Puissance de sortie suivant l'évolution des technologies

La deuxième technologie a pour principal objectif une mise en place plus rapide et facile de l'installation photovoltaïque. Pour ce faire, il suffit de connecter les câbles ensemble.

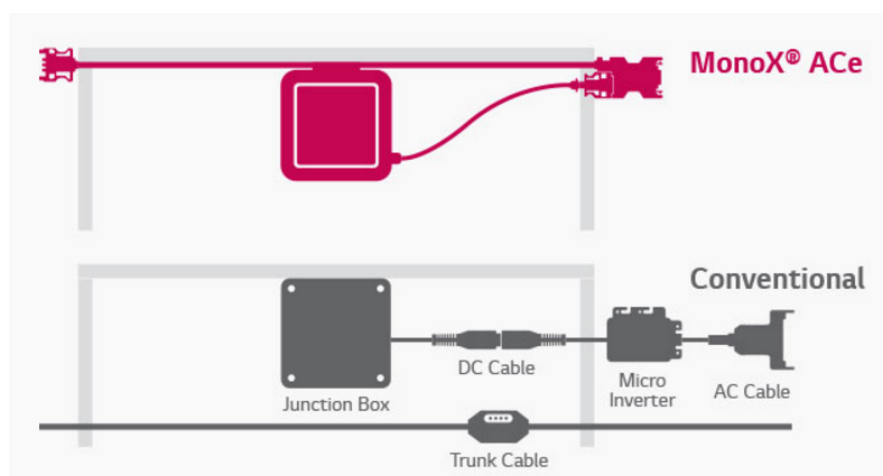


FIGURE 2.14 – Panneau photovoltaïque Lg Mono X ACe avec micro-onduleur intégré

4. Intégration de micro-onduleur Enphase sur les panneaux photovoltaïques <http://www.lg.com/us/commercial/MonoXACe/index.jsp>.

Chapitre 3

Tests de micro-onduleurs

Ces dernières années, le nombre d'onduleurs disponibles sur le marché a considérablement augmenté. C'est la raison pour laquelle Laborelec - Engie-Lab a développé des tests uniques pour micro-onduleurs soumis à des conditions réelles, dans lesquelles la tension AC contient des harmoniques, des creux de tension, des variations de fréquence, etc .

Les principaux objectifs de ces tests pour Laborelec - Engie-Lab sont :

- D'améliorer leurs connaissances sur les différents micro-onduleurs pour pouvoir répondre aux questions des autres entités du groupe.
- De donner des recommandations précises sur la capacité des différents micro-onduleurs disponibles.

Le but de ce chapitre est donc de présenter des tests que l'on peut faire sur les micro-onduleurs et d'expliquer leurs intérêts. Des exemples de résultat sont fournis et analysés dans l'annexe [L](#). Les résultats cités dans cette annexe sont anonymisés pour respecter l'accord de confidentialité qui a été signé pour ce mémoire. Les résultats ont été obtenus dans le cadre d'un partenariat entre Laborelec - Engie-Lab et l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM) de Lille. Mon travail de fin d'étude s'intègre donc dans ce chapitre avec pour objectif de pouvoir reproduire et automatiser les différents tests que l'on va présenter.

Durant ce chapitre, nous aborderons différents tests pour vérifier et analyser les micro-onduleurs :

1. Le fonctionnement normal
 - mesure de puissance à 10%, 20%, 30%, 50% et 100%
 - calcul des rendements et du rendement européen
2. Les systèmes de protection
 - tension AC maximum et minimum
 - fréquence maximum et minimum
 - impossibilité de fonctionner en mode isolé avec une charge RLC
3. Le fonctionnement sur un réseau dégradé
 - avec injection de 10% d'harmonique 5 ou 9 ou 15
 - avec injection de plusieurs harmoniques
 - avec un creux de tension

1 Tests en fonctionnement normal

Ces tests ont pour but de valider les rendements donnés par les fabricants dans des situations réelles ainsi que d'analyser le rendement de l'ondeur en fonction de sa plage de fonctionnement.

Le rendement est le rapport entre la puissance de sortie sur la puissance d'entrée. Ce rapport est toujours inférieur à 100% car on a toujours des pertes lors de la conversion de l'énergie DC vers AC. De plus, le rendement maximal fourni par le fabricant est la plus grande valeur atteinte sur la courbe de rendement, par exemple sur la Figure 3.1, le rendement maximal est de 97%. On observe aussi sur cette Figure que le rendement est fonction de la puissance nominale de l'onduleur. Dans ce cas-ci, on a un onduleur "chaîne" de 4200W de puissance nominale pour le 4000TL et de 5200W pour le 5000TL, mais les micro-onduleurs ont des courbes de rendement similaires pour des tensions plus faibles.

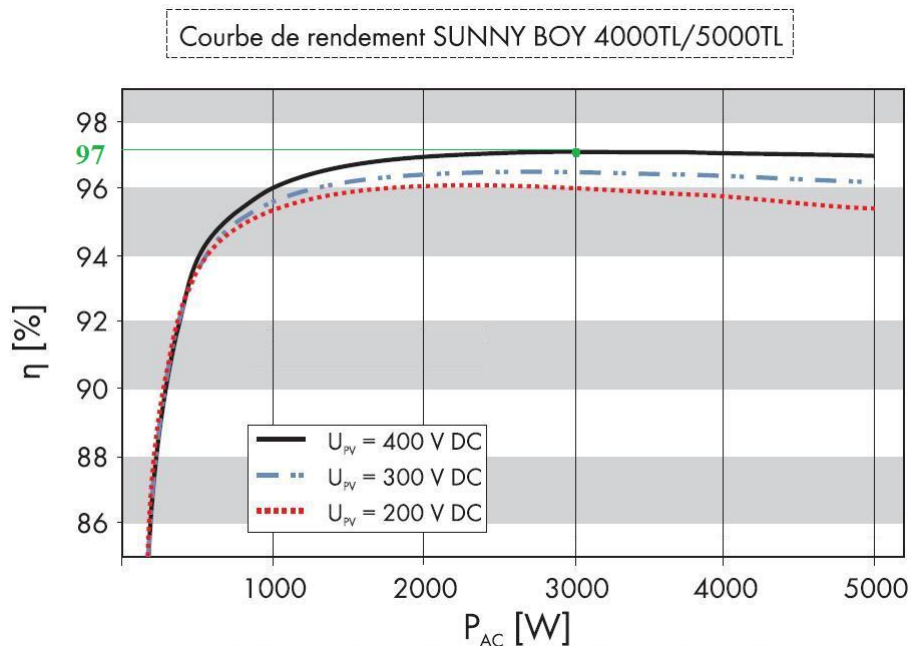


FIGURE 3.1 – Courbe de rendement d'un onduleur "chaîne" SMA Sunny Boy 4000TL/5000TL

Sur la Figure 3.1, on observe que les rendements les plus faibles sont lorsque la puissance de sortie de l'onduleur est loin de la puissance nominale. Nous réaliserons donc des tests à 10%, 20%, 30%, 50% et 100% de la puissance nominale sur les micro-onduleurs, pour pouvoir définir leurs courbes de rendement et ainsi observer leurs plages de fonctionnement optimales.

Le dimensionnement des installations est fait de telle manière que la puissance nominale de l'onduleur corresponde plus ou moins à la puissance nominale du ou des panneaux photovoltaïques. Étant donné que l'ensoleillement et la température varient et que ceux-ci ont une influence sur la puissance produite par le panneau solaire, voir les Figures 1.2 et 1.3, la puissance produite par l'onduleur varie tout comme son rendement. D'où l'intérêt de définir un rendement qui tiendrait compte de cela. Ce rendement est le rendement européen qui permet de calculer le rendement global de l'onduleur sur sa plage de fonctionnement. La méthode de calcul est la suivante, on estime que

- l'onduleur fonctionne 3% du temps à 5% de sa puissance nominale
- l'onduleur fonctionne 6% du temps à 10% de sa puissance nominale
- l'onduleur fonctionne 13% du temps à 20% de sa puissance nominale
- l'onduleur fonctionne 10% du temps à 30% de sa puissance nominale
- l'onduleur fonctionne 48% du temps à 50% de sa puissance nominale
- l'onduleur fonctionne 20% du temps à 100% de sa puissance nominale

Grâce à cette approche, on estime que l'onduleur ne fonctionne pas à sa puissance nominale la plus grande partie du temps. Ce qui fait que ce rendement est plus proche de la réalité. On calcule le rendement européen en utilisant la formule suivante :

$$\eta_{euro} = 0.03 \cdot \eta_{5\%} + 0.06 \cdot \eta_{10\%} + 0.13 \cdot \eta_{20\%} + 0.10 \cdot \eta_{30\%} + 0.48 \cdot \eta_{50\%} + 0.20 \cdot \eta_{100\%}$$

2 Tests des systèmes de protection

Ces tests ont pour but de vérifier que les micro-onduleurs se déconnectent bien lorsqu'ils sont censés le faire. Pour cela, il existe des normes plus ou moins contraignantes suivant les pays. La plupart des onduleurs photovoltaïques vendus en Europe sont conçus et réalisés pour respecter les normes de protection allemandes, aussi bien à la connexion qu'à la déconnexion. On utilise ces normes, car ce sont les plus drastiques. La norme la plus importante de ce point de vue est la norme DIN VDE 0126-1-1/A1 qui traite du dispositif de déconnexion automatique entre un système et le réseau public à basse tension. C'est dans cette norme que l'on trouve les caractéristiques que doivent respecter les onduleurs pour pouvoir assurer la fonction de protection de découplage. Exemples de découplages du réseau de l'onduleur demandés par la norme :

- Si la tension efficace s'éloigne trop de la valeur nominale du réseau de 230V, plus précisément si elle n'est plus comprise entre 184V et 264,5V, cela nécessite une déconnexion rapide, inférieure à 0,2s.
- Si la tension efficace dépasse de 10% sa valeur nominale durant plus de dix minutes au point d'utilisation, l'appareil doit se déconnecter du réseau.
- Si la fréquence ne se trouve plus dans l'intervalle définie. À partir du premier mai 2014, la norme à respecter en France est DIN VDE 0126-1-1/A1 VFR 2014 qui donne le seuil de fréquence supérieure à 50.6Hz, tandis que le seuil de fréquence inférieur est à 47.5Hz. ¹

Mais les normes ne couvrent pas seulement les limites en tensions et en fréquences. Des normes sont aussi disponibles sur la déconnexion en mode isolé (îlotage). La déconnexion en mode isolé a pour but la déconnexion de l'appareil en cas de perte de réseau pour protéger les appareils qui y sont connectés.

On réalise ces tests comme sur la Figure 3.2. On déconnecte l'émulateur de réseau grâce à des interrupteurs. Les micro-onduleurs sont alors juste connectés à des charges RLC. Les paramètres de la charge RLC sont déterminés par,

- la fréquence de résonance qui est prise égale à 50Hz,
- le facteur de puissance de la charge est pris égal à 1 et
- la résistance doit consommer la puissance nominale à 230V.

1. <http://www.photovoltaique.info/DIN-VDE-0126-1-1-A1.html>

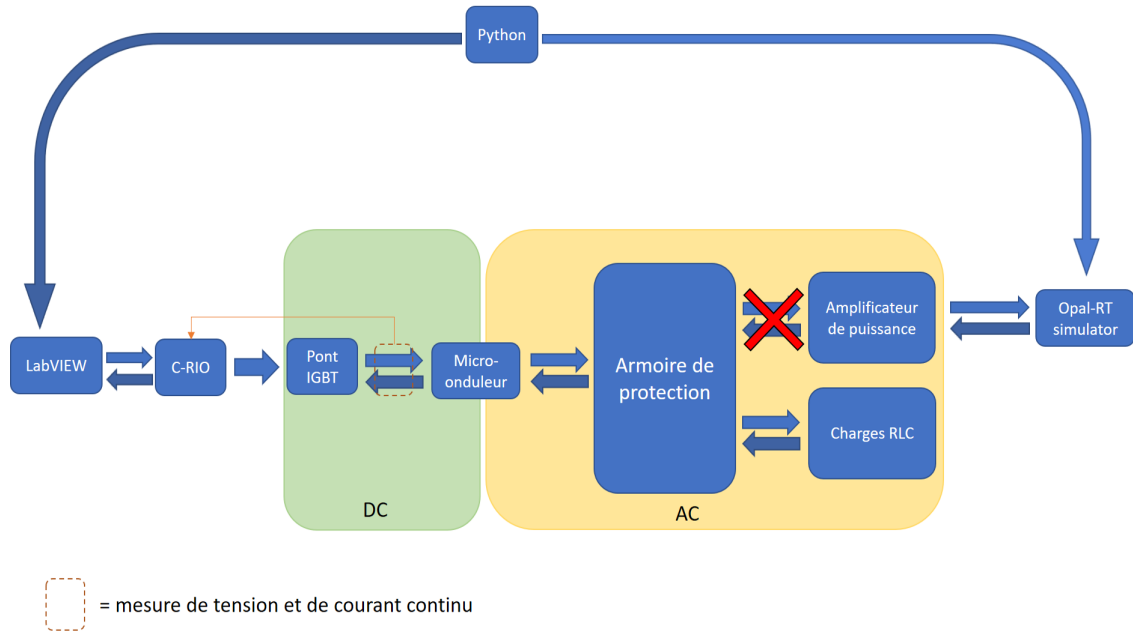


FIGURE 3.2 – Configuration du banc d'essai en mode isolé

3 Tests en fonctionnement sur un réseau dégradé

Ces tests ont pour but de soumettre les micro-onduleurs à des réseaux dégradés pour observer leurs réactions ainsi que la forme du courant qui en découle. On calculera aussi le Total Harmonic Distortion (taux distorsion harmonique total) (THD) du réseau pour savoir si les micro-onduleurs ont un effet atténuateur ou amplificateur. On calculera le THD pour les 15 premières harmoniques comme suit,

$$THD_1 = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{15} v_h^2}}{v_1}$$

Avec v_h l'amplitude de la tension de l'harmonique h et avec v_1 l'amplitude de la tension de la fondamentale.

Ces tests sont réalisés à 100% de la puissance nominale des micro-onduleurs. Ceux-ci sont soumis à un réseau de 230V d'amplitude avec une fréquence de 50Hz (représentant la fondamentale). À cette sinusoïde, on superpose une sinusoïde à 250Hz, 450Hz ou 750Hz dont l'amplitude est 10% de la fondamentale, soit 23V, représentant respectivement l'harmonique 5, 9 et 15. On obtient un réseau avec un $THD_1 = 10\%$. On peut aussi injecter plusieurs harmoniques en même temps. Dans ces tests-là, les micro-onduleurs sont connectés sur un réseau très dégradé. On générera un réseau dans les pires conditions d'harmoniques relevées par Laborelec - Engie-Lab. Le rang des harmoniques ainsi que leurs amplitudes respectives sont donnés dans la Table 3.1.

Rang de l'harmonique	Amplitude en % de la fondamentale
2	8
3	22
4	4
5	10
7	6
9	4
11	3
13	2.5
15	2

TABLE 3.1 – Rang des harmoniques associées à leur amplitude pour le pire cas relevé par Laborelec - Engie-Lab

On peut observer le courant que cela représente sur le réseau sur la Figure 3.3.

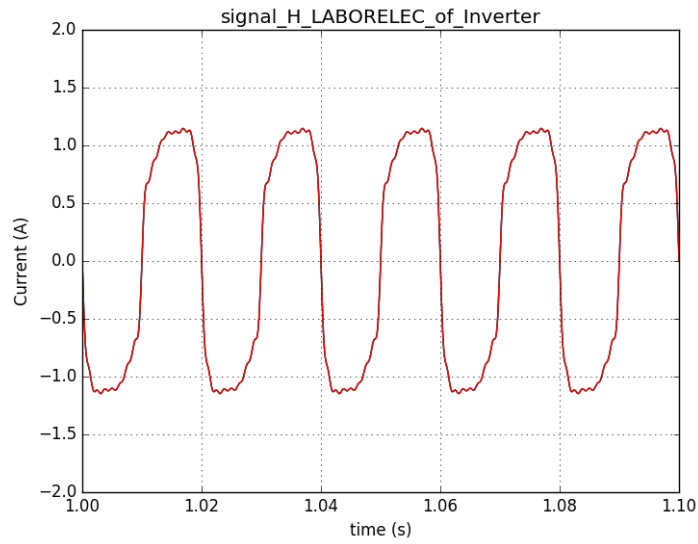


FIGURE 3.3 – Courant AC de référence avec les harmoniques de la Table 3.1

L'injection d'harmoniques n'est pas le seul type de dégradations que l'on retrouve sur les réseaux. Dans ce travail nous allons aussi analyser la réaction du micro-onduleur face à un creux de tension qui vient d'une situation observée sur le réseau. La Figure 3.4 donne un aperçu de ce creux de tension.

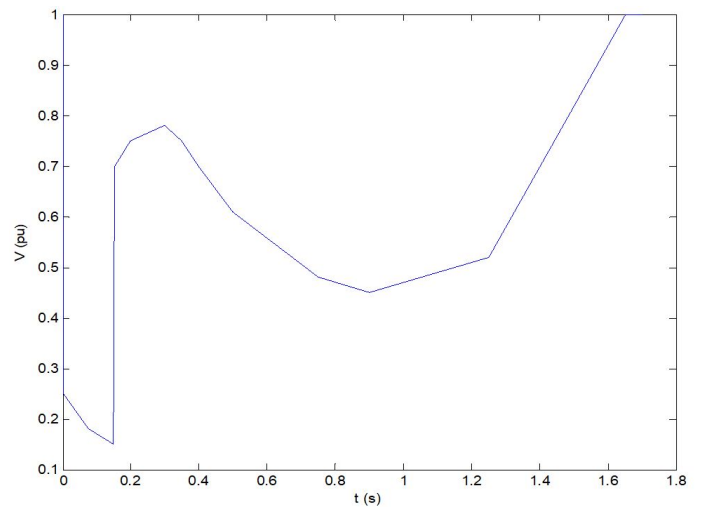


FIGURE 3.4 – Profil du creux de tension

Deuxième partie

Automatisation des tests

Introduction de la deuxième partie

Cette partie est composée de trois chapitres orientés sur la conception et la réalisation de l'automatisation des tests sur micro-onduleurs. Le premier chapitre intitulé "L'installation" présente les différentes parties de l'installation, avec leur utilité et leurs interactions.

Le deuxième chapitre intitulé "Automatisation des tests" présente l'intérêt d'exécuter une automatisation des tests ainsi que la façon dont elle a été effectuée. De plus, nous aborderons la structure du programme d'automatisation.

Le troisième et dernier chapitre de cette partie intitulé "Validation" explique comment l'on a réalisé la validation de l'installation ainsi que certains problèmes que nous avons rencontrés lors de celle-ci, et se clôture sur son état actuel.

Chapitre 1

L'installation

Dans ce chapitre, nous allons présenter le schéma de l'installation en expliquant le but de chaque élément. Nous expliquerons aussi comment il a été intégré dans le système, ainsi que les précautions à prendre et les diverses sécurités qui ont été installées dans le but de protéger l'homme ainsi que le matériel.

1 Schéma général de l'installation

Comme le montre la Figure 1.1, l'installation est composée de plusieurs parties :

- L'émulateur de panneaux photovoltaïques qui a pour but de reproduire le comportement d'un panneau photovoltaïque.
- Les micro-onduleurs qui ont pour but la conversion du courant continu vers l'alternatif.
- L'armoire de protection qui a pour but de protéger la personnes qui fait les tests et le matériel.
- L'émulateur de réseaux qui a pour but de modéliser différents types de réseaux pour observer le comportement des micro-onduleurs.
- Python, en haut du schéma, qui est le langage de programmation qui permet de commander l'émulateur de réseaux et l'émulateur de panneaux photovoltaïques, pour rendre possible l'automatisation des tests, et pour disposer d'une interface homme-machine.

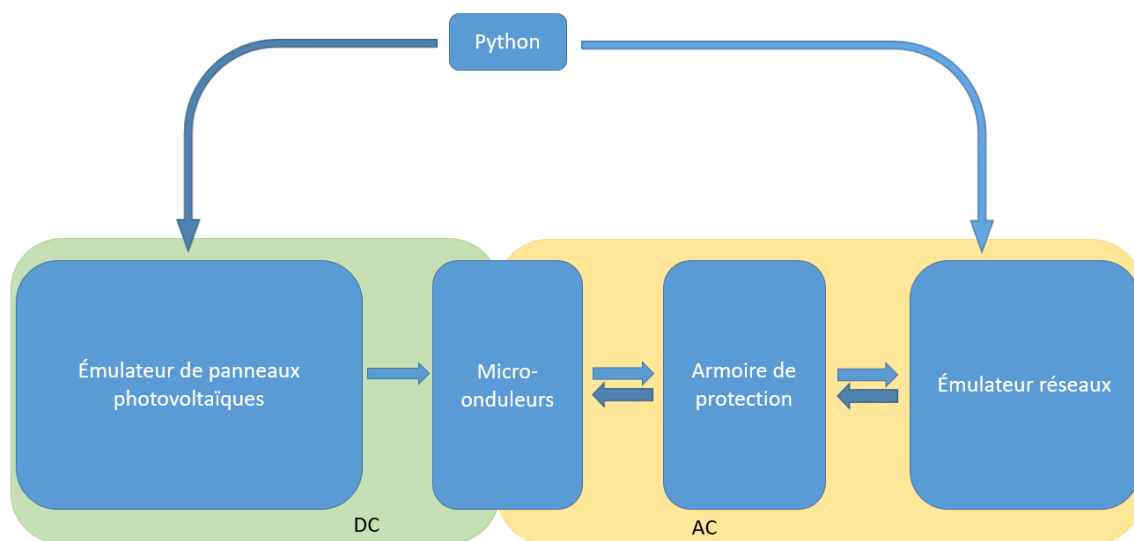


FIGURE 1.1 – Schéma général simplifié de l'installation

2 Émulateur de panneaux photovoltaïques

L'émulateur de panneaux photovoltaïques est la partie de l'installation qui a pour but de reproduire le comportement d'un panneau photovoltaïque.

Dans le commerce, on peut trouver des émulateurs de panneaux photovoltaïques tout fait, mais ceux-ci ne fonctionnent que pour les onduleurs "chaîne". La raison en est simple. Les onduleurs "chaîne" ont un système MPPT plus lent que les micro-onduleurs, ce qui fait que dans ce cas-ci l'émulateur n'arrive pas à fournir une réponse adaptée dans un temps adéquat au micro-onduleur, ce qui empêche le bon fonctionnement de ce dernier.

Nous avons donc dû réaliser notre propre émulateur, qui est composé, comme le montre la Figure 1.2, d'un logiciel tournant sous LabVIEW ainsi que d'un Compact-RIO (C-RIO) qui forme la partie commande de l'installation et d'un pont IGBT qui forme quant à lui la partie puissance de l'installation avec ses alimentations.

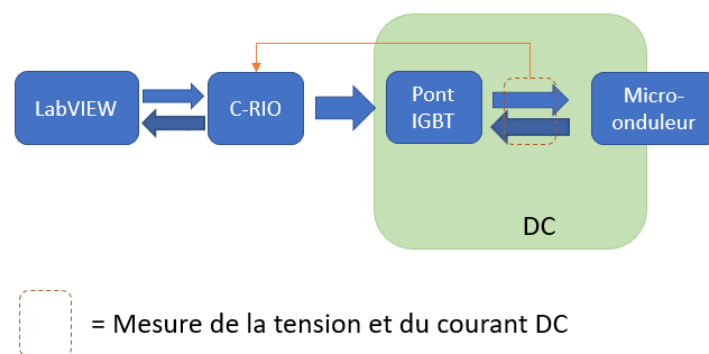


FIGURE 1.2 – Schéma de l'émulateur de panneaux photovoltaïques

2.1 Logiciel tournant sous LabVIEW

LabVIEW est un environnement de développement intégré spécifiquement conçu pour les ingénieurs et les scientifiques. Ce langage de programmation est un langage dit graphique, car il utilise un modèle de flux de données au lieu de lignes séquentielles de code textuel, ce qui permet d'écrire du code fonctionnel en suivant des informations visuelles qui reflètent la démarche intellectuelle.¹ Ce langage permet d'interagir avec du matériel tel que le Compact-RIO (C-RIO) de National Instrument, voir Figure 1.3. Le programme conçu à l'aide de ce langage a été réalisé par le service d'"Automation and Control" de Laborelec - Engie-Lab. Ce programme communique au C-RIO la courbe de I-V (exemple Figure 1.2 de la partie I) qu'il doit suivre à l'aide de sa boucle de régulation PI. C'est aussi grâce à ce langage que l'on peut compiler des programmes dans le C-RIO. Dans notre cas, la régulation a été compilée dans la mémoire du FPGA. Ce programme possède une interface graphique qui permet de modifier différents paramètres tels que la courbe I-V et les paramètres du régulateur PI.

2.2 Compact-RIO

Le Compact-RIO est un contrôleur hautes performances combinant un processeur multi-cœur Atom d'Intel, un FPGA et jusqu'à huit emplacements pour modules d'Entrées et Sorties (I/O) de la Série C, un exemple avec 4 emplacements est illustré à la Figure 1.3. Le processeur permet les communications et le traitement des signaux en temps réel, tandis que le FPGA programmable par l'utilisateur permet de mettre en oeuvre un contrôle/commande haute vitesse (fréquence),

1. <http://www.ni.com/labview/f/>

c'est donc lui qui gère la boucle de régulation.² Dans le cas présent, nous utilisons un FPGA pour la régulation car un Arduino, beaucoup moins cher, est trop lent.

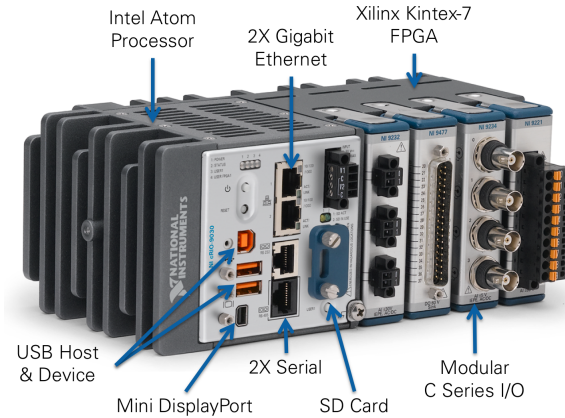


FIGURE 1.3 – Exemple de contrôleur Compact-RIO

La régulation est possible grâce à des cartes d'acquisitions analogiques (voir Modular C Serie I/O sur la Figure 1.3), qui permettent dans notre cas de mesurer des tensions de -10V à +10V. La régulation a pour but de minimiser la différence entre le courant mesuré et le courant voulu, celui qui correspond à la tension sur la courbe d'un panneau photovoltaïque. Pour cela, on doit mesurer la tension et le courant aux bornes du micro-onduleur, comme le montre la Figure 1.4. À l'aide de la tension, on va observer sur la courbe envoyée par le logiciel LabVIEW, le courant qui doit être appliqué, que l'on va soustraire au courant mesuré et on appliquera le régulateur PI sur cette valeur. Le régulateur se base sur une réponse proportionnelle k_p et une réponse intégrale k_i dont l'équation est

$$y = (k_p + k_i s)U$$

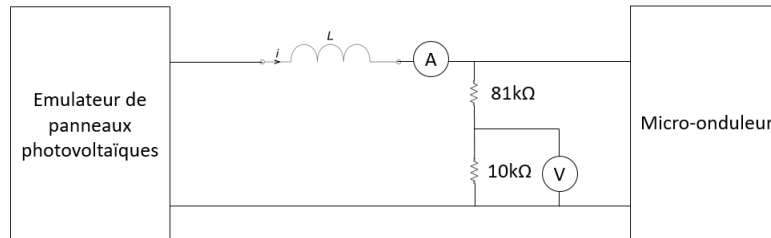


FIGURE 1.4 – Connexions entre le pont IGBT et le micro-onduleur

J'ai eu l'aide de monsieur Nathanaël Wybou et monsieur Pieter Bauwens d'une autre équipe pour tout ce qui concerne cette section. J'ai néanmoins fait au préalable la régulation sous Matlab Simulink pour me familiariser avec ce type de commande.

2.3 Pont IGBT

Le pont Insulated-Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée) (IGBT), représenté sur la Figure 1.5 expliquée dans l'annexe G, et ses alimentations forment la partie puissance de l'émulateur de panneaux photovoltaïques, car comme il est mentionné dans la section précédente, les cartes I/O du C-RIO sont limitées à des tensions de -10V à +10V alors que les panneaux photovoltaïques peuvent produire des tensions de plus de 45V. On utilise donc

2. <http://www.ni.com/white-paper/52251/fr/>

des sources de tensions connectées au pont IGBT pour générer jusqu'à trois sources de tensions DC indépendantes, voir la Figure 1.6 qui représente le schéma du circuit des IGBT. Sur ce schéma, à gauche on a un redresseur à diode et à droite on a la partie qui nous intéresse avec les IGBT qui sont contrôlés par le C-RIO en vue de fournir une réponse similaire à celle délivrée par un panneau photovoltaïque. Le C-RIO va générer un signal à Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI)³ qui va commander l'ouverture et la fermeture des différents IGBT de ce pont, de sorte à recréer ce signal à puissance plus élevée (car dans ce cas-ci nous utilisons la puissance d'une alimentation prévue pour cela comparée au C-RIO qui n'est pas prévu pour fournir de la puissance). Les sorties du pont IGBT sont connectées à des inductances pour lisser le signal et ensuite aux micro-onduleurs comme le montre la Figure 1.4.

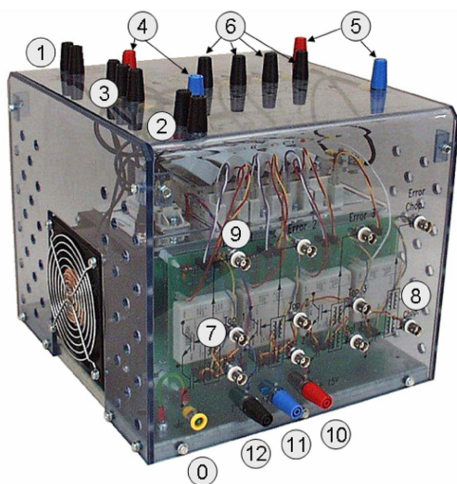


FIGURE 1.5 – Pont IGBT

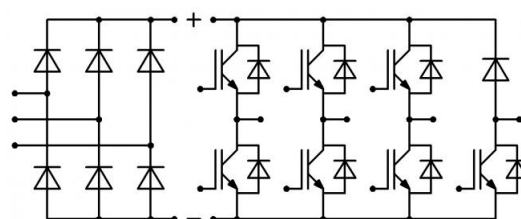


FIGURE 1.6 – Circuit des IGBT

3 Micro-onduleurs

L'état de l'art de la technologie des micro-onduleurs est présenté dans la partie I chapitre 2 section 3, mais pour l'installation, il faut insister sur l'importance des connexions entre celle-ci et les micro-onduleurs. Lorsque l'on analyse les quatre micro-onduleurs présentés dans l'état de l'art, on observe que ceux-ci sont connectés en continu pour le côté émulateur de panneaux photovoltaïques par des connecteurs MC4, ils utilisent donc tous un standard, voir cercle vert sur les Figures 1.7, 1.8 et 1.9. Dans la Figure 1.10, on voit un port différent, mais un adaptateur est fourni de base avec l'appareil pour donner des prises MC4. Quant aux connexions du côté alternatif pour l'émulateur de réseau, on observe que chaque micro-onduleur utilise un connecteur différent, voir cercle bleu sur les précédentes Figures.

3. La MLI pour "modulation de la largeur d'impulsion" ou PWM en anglais, est une technique qui permet de synthétiser des signaux continus avec seulement deux signaux, un à valeur nulle et l'autre avec une valeur qui représente le maximum que pourra atteindre le signal de sortie. Le principe est qu'en appliquant une succession de ces signaux pendant une durée déterminée, on peut obtenir, en moyenne sur une plus grande durée, une valeur intermédiaire aux signaux de la MLI qui est le signal vu par le micro-onduleur côté DC [16]

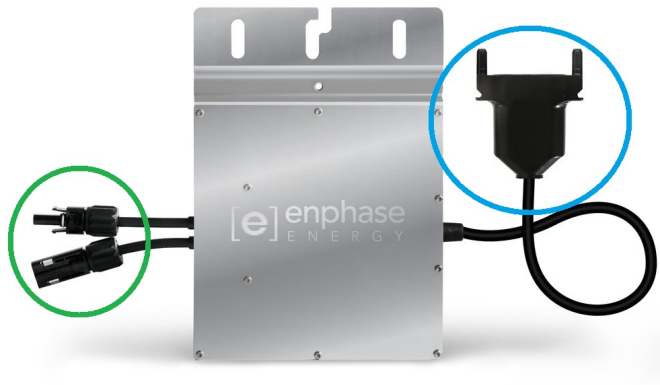


FIGURE 1.7 – Micro-onduleur Enphase M250

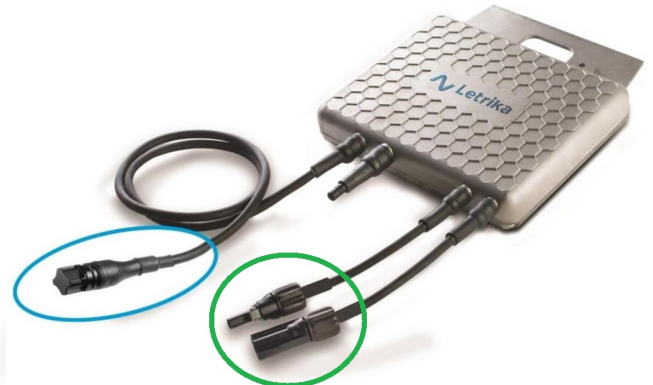


FIGURE 1.8 – Micro-onduleur Letrika SMI 260



FIGURE 1.9 – Micro-onduleur Clipsol BDM-250

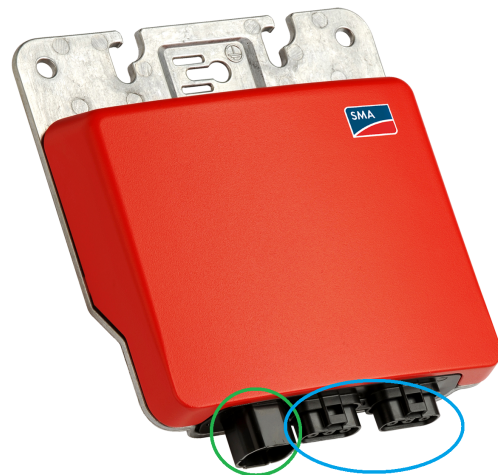


FIGURE 1.10 – Micro-onduleur SMA SUNNY BOY 240

Pour fabriquer le banc d'essai, il nous faut un connecteur standard pour la partie alternatif. Nous avons donc décidé de retirer tous ces connecteurs non standards et de les remplacer par une prise domestique comme sur la Figure 1.11 étant donné que le câble ne contient que 3 fils, un pour la phase, un pour le neutre et le dernier pour la terre.



FIGURE 1.11 – Micro-onduleur Letrika équipé de la prise standard pour le côté AC

4 Armoire de protection

L'armoire de protection a pour principale vocation de protéger aussi bien les hommes que le matériel qui y est connecté. Pour cela, l'armoire a été conçue avec l'aide de deux spécialistes ; un spécialiste protection, Didier Empain, et un technicien pour le côté opérationnalité ainsi que pour la sécurité, Denis Herbert, tous deux du service Power System and EMC à Laborelec - Engie-Lab. Comme on peut l'observer sur la Figure 1.12, une grande barre en cuivre permet d'attacher les micro-onduleurs et ainsi de connecter la terre des boîtiers des micro-onduleurs à la terre de l'armoire de protection.



FIGURE 1.12 – Photo de l'armoire de protection

On peut remarquer sur la Figure 1.13 que la protection est exclusivement axée sur des disjoncteurs, car l'amplificateur auquel elle est reliée, dispose déjà d'un différentiel de 500mA, ainsi que d'un disjoncteur de 64A. Cela étant, l'armoire de protection ne supporte pas de tels courants, des disjoncteurs plus faibles y sont donc installés, un disjoncteur de 16A pour les câbles et un disjoncteur de 6A pour protéger les micro-onduleurs.

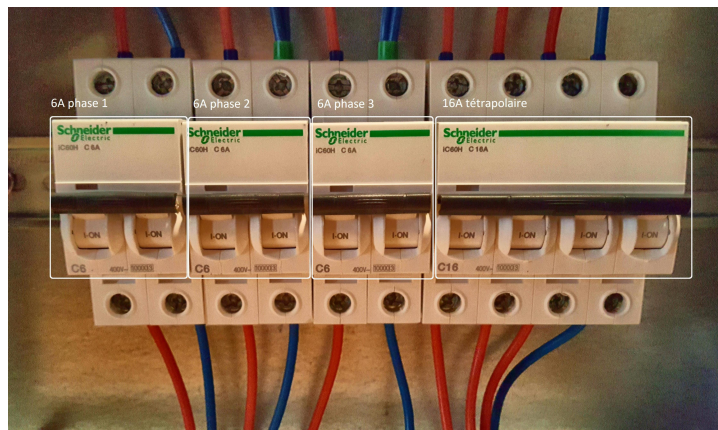


FIGURE 1.13 – Disjoncteurs de l'armoire de protection

Mais ce n'est pas le seul but de l'armoire de protection. Elle permet aussi de tester jusqu'à trois micro-onduleurs de manière sécurisée. De plus, étant donné que l'émulateur de réseaux génère des tensions triphasées, l'armoire de protection permet également de choisir ou non si l'on teste les micro-onduleurs sur des phases différentes comme le montre la Figure 1.15 dont le schéma est à la Figure 1.14. Le but étant d'analyser l'impacte d'un micro-onduleur sur le réseau,

ou alors de tester jusqu'à trois micro-onduleurs sur la même phase pour analyser leurs interactions.

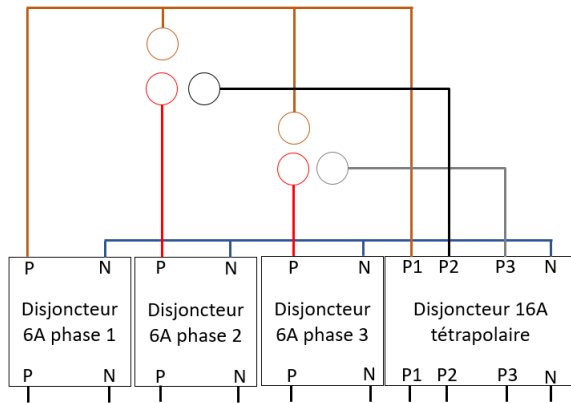


FIGURE 1.14 – Schéma du sélectionneur de phases

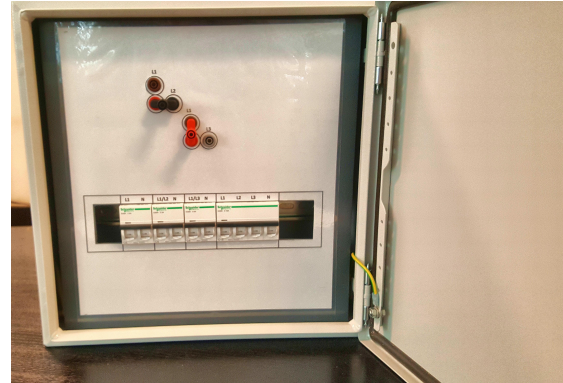


FIGURE 1.15 – Photo du sélectionneur de phases

5 Émulateur de réseaux

L'émulateur de réseaux est la partie de l'installation destinée à la modélisation d'un réseau électrique, par exemple un réseau d'amplitude nominale de 230V et de fréquence nominale de 50Hz. Dans le cadre de ce projet, nous modéliserons uniquement des réseaux monophasés, car les micro-onduleurs sont des appareils monophasés. L'émulateur est composé, comme le montre la Figure 1.16, d'un amplificateur de puissance et d'un simulateur temps réel qui forme le Power Hardware In the Loop (PHIL).

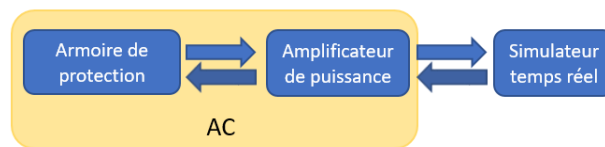


FIGURE 1.16 – Schéma de l'émulateur de réseaux

5.1 Simulateur temps réel

Le simulateur temps réel utilisé est un simulateur HIL (Hardware In the Loop) (voir Figure 1.17) construit par Opal-RT. Ces simulateurs permettent le test de matériels en temps réel (le temps dans la simulation correspondant donc au temps réel) en soumettant ceux-ci à de faibles tensions de maximum -16V à +16V en analogique et de 0 ou 15V (tension fournie par une source extérieure) en digital, ainsi qu'à de faibles courants de l'ordre de quelques mA.



FIGURE 1.17 – Simulateur temps réel Opal-RT

La partie simulation se passe sur Simulink avec certaines règles à respecter pour que la simulation puisse être compilée sur le simulateur HIL via RT-Lab. La simulation est décomposée en trois blocs comme le montre la Figure 1.18, la source, le circuit et le GUI. J'ai réalisé l'ensemble de ces blocs avec le logiciel RT-Lab qui m'a demandé un certain temps d'apprentissage.

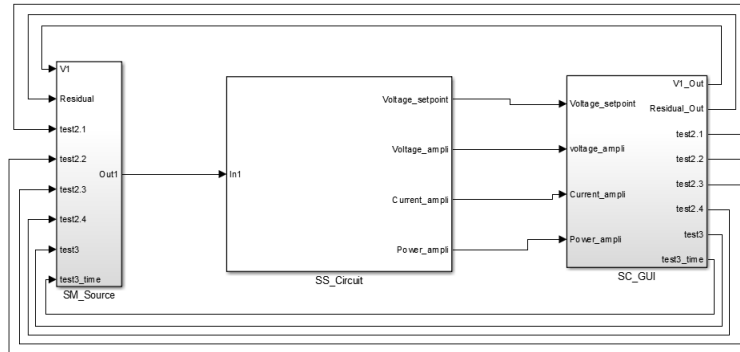


FIGURE 1.18 – Vue générale du Simulink

5.1.1 Le bloc source

Le bloc source est appelé SM_Source, SM car c'est le bloc Master (maître), c'est dans ce bloc que l'on retrouve l'horloge. Son but est de générer un signal qui sera envoyé à un générateur de tension. C'est donc dans ce bloc que l'on va déterminer l'amplitude et la fréquence de la tension du réseau, par exemple le réseau européen à tension nominale de 230V et à fréquence nominale de 50Hz. On va ensuite au sein de ce bloc pouvoir modifier ce signal suivant le test voulu. La Figure 1.19 montre une fraction de l'implémentation de ce bloc. On peut voir qu'il est, par exemple, possible de multiplier par un nombre le signal pour l'amplifier ou non. On pourra aussi lui superposer une autre sinusoïde pour modéliser l'injection d'harmonique.

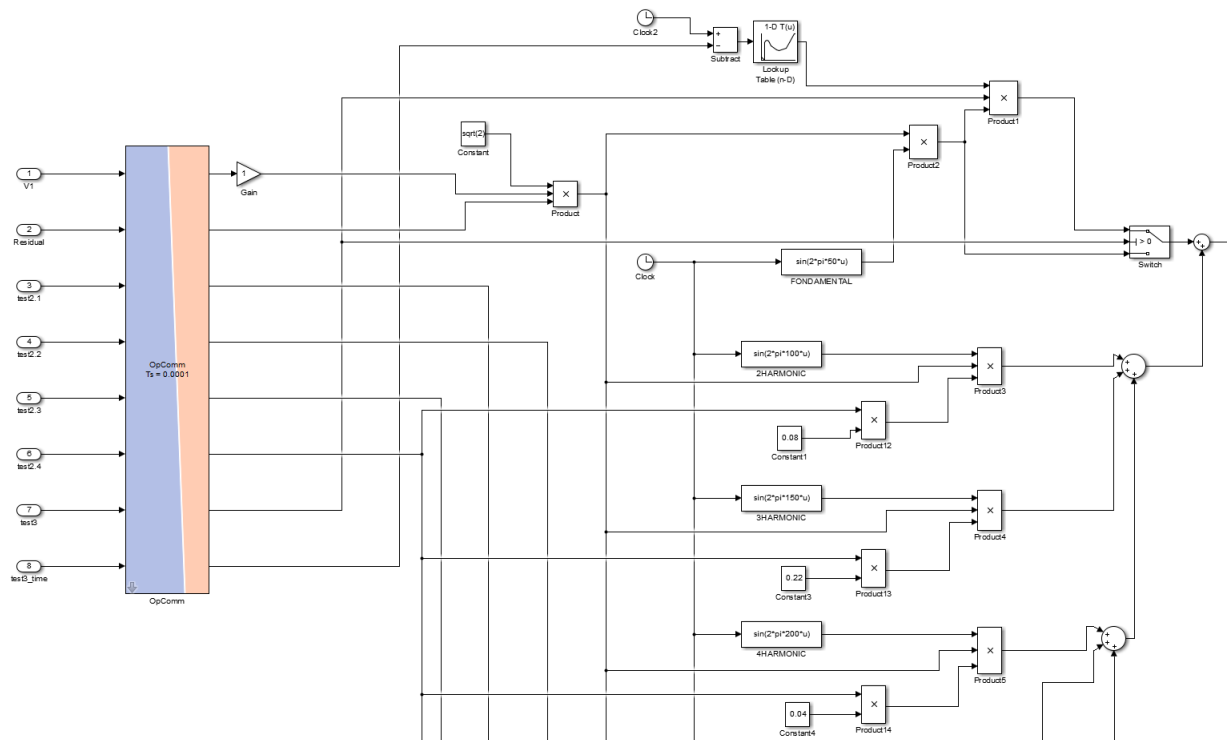


FIGURE 1.19 – Implémentation du bloc source

5.1.2 Le bloc circuit

Le bloc circuit est appelé SS_Circuit, SS car c'est un bloc Slave (esclave), il suit donc le bloc maître. Son but est de gérer toutes les connexions. La Figure 1.20 montre une implémentation de ce bloc pour un micro-onduleur. Le bloc simulation_software est utilisé lorsque l'on fait les simulations en mode logiciel, donc sans utiliser les entrées et sorties du simulateur. Les blocs Gain sont nécessaires pour permettre une mise à l'échelle du signal entrée et sortie, car le simulateur est limité de -16V à +16V. Les valeurs utilisées correspondent à l'inverse du gain de l'amplificateur de puissance pour le signal d'entrée et à la valeur du gain pour les valeurs renvoyées par les cartes de mesures de l'amplificateur. On a finalement un bloc OpWriteFile qui permet d'écrire ces valeurs dans un fichier.

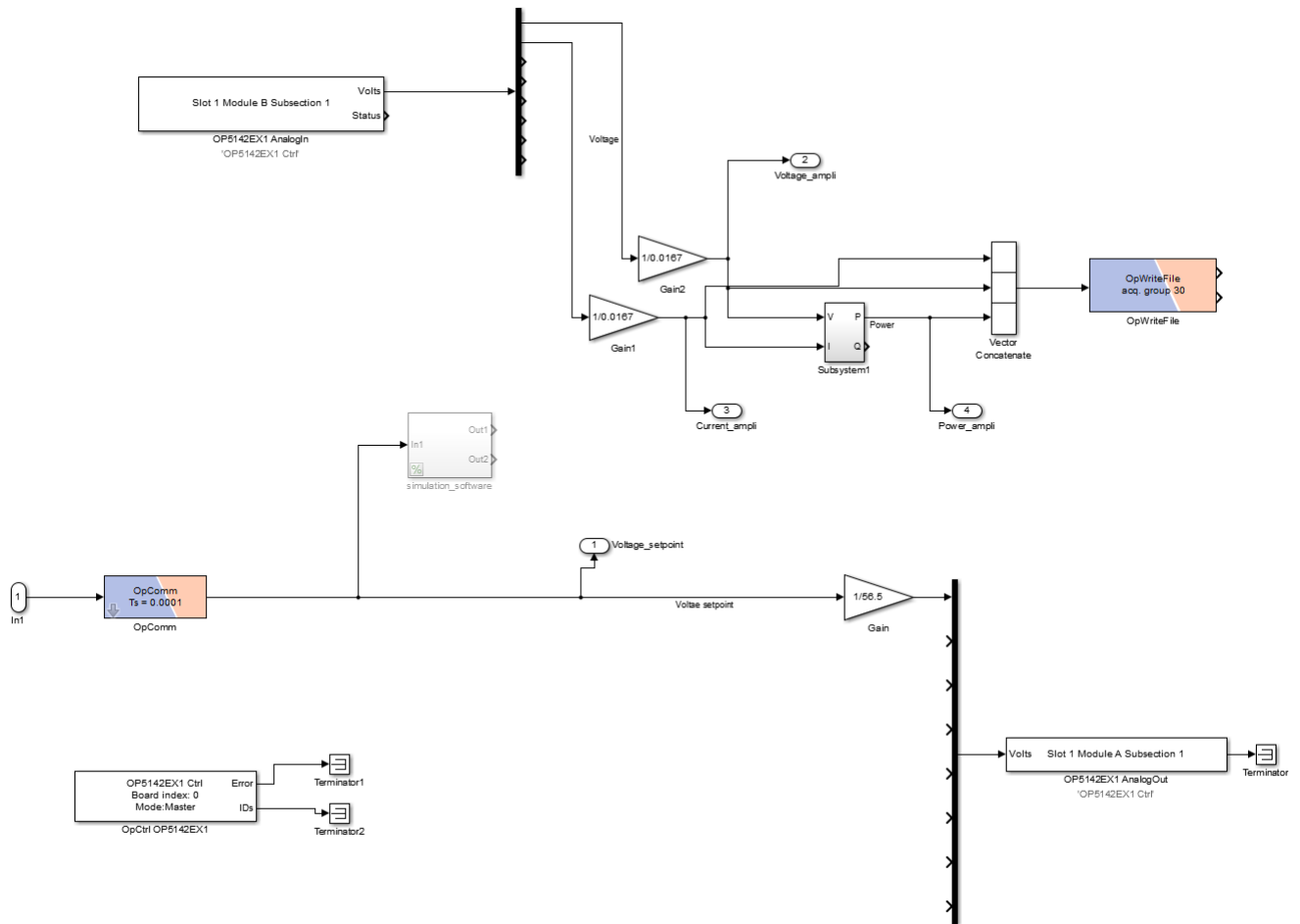


FIGURE 1.20 – Implémentation du bloc circuit

5.1.3 Le bloc GUI

Le bloc GUI est appelé SC_GUI, GUI (Graphical User Interface) car c'est l'interface qui permet de contrôler le simulateur temps réel en cours d'utilisation, donc toutes les variables qui y sont associées peuvent être changées en cours de fonctionnement. Attention, on ne peut pas y mettre toutes les valeurs, par exemple, il est impossible de changer la valeur d'un composant, telle qu'une résistance, une inductance, La Figure 1.21 montre une implémentation de ce bloc avec la possibilité de choisir le test voulu ainsi que la présence d'un oscilloscope pour observer les valeurs des tensions et courants du réseau. Ce bloc comparé aux deux autres ne fonctionne pas en mode synchronisé, il reçoit ses données par paquets. S'il n'est pas possible d'envoyer les données à la fin du paquet, certaines données sont perdues.

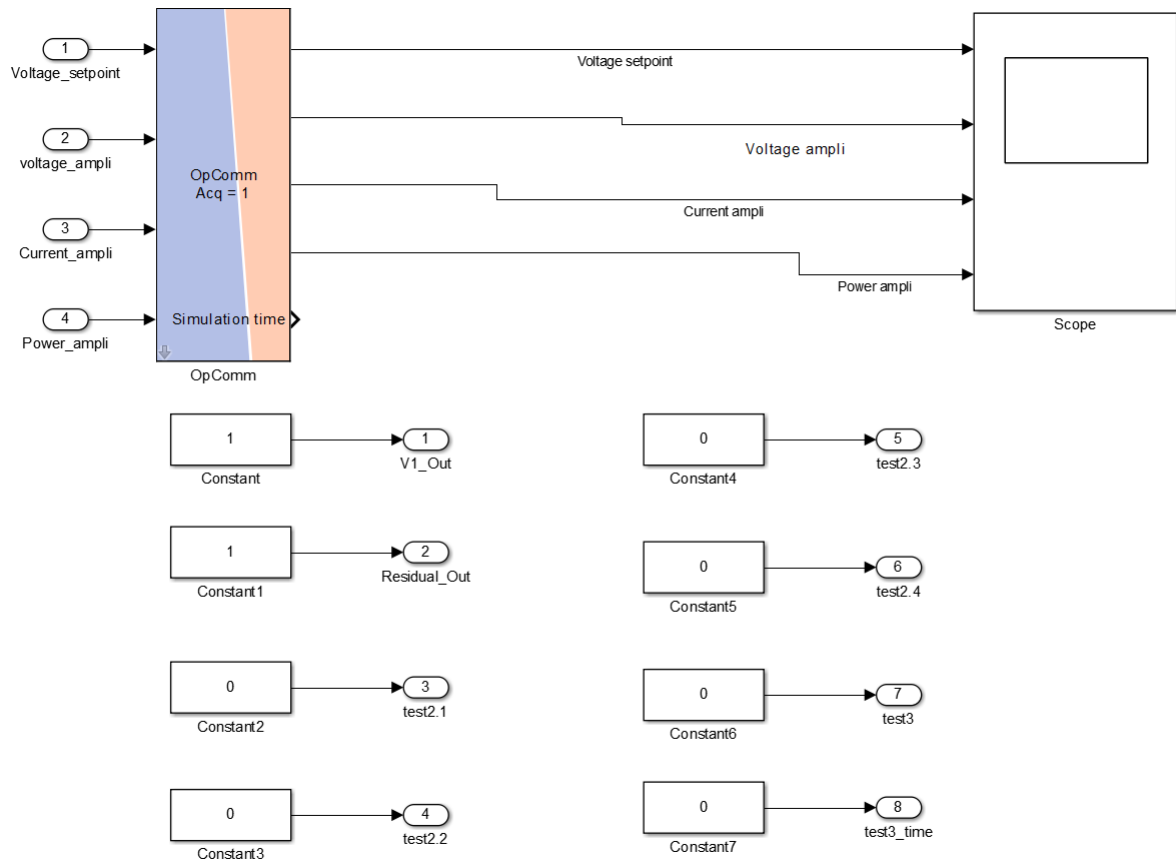


FIGURE 1.21 – Implémentation du bloc GUI

5.2 Amplificateur de puissance

L'amplificateur de puissance (voir Figure 1.22) est l'élément qui permet au simulateur d'accroître sa puissance et ainsi ses possibilités. C'est la partie power du PHIL. On peut donc passer de la limitation de -16V à +16V à celle de -400V à +400V sur chacune des trois phases en alternatif et celles-ci sont gérées de manière séparée. La puissance de sortie nominale de chaque phase est de 7000VA. Le gain de cet amplificateur est fixé pour une gamme de tension donnée. On retrouve ce gain dans le bloc circuit du Simulink du simulateur temps réel. Pour la gamme -400V à +400V, le gain est de 56,5. La fiche technique de l'amplificateur de puissance est disponible à l'annexe I.



FIGURE 1.22 – Amplificateur de puissance 4 quadrants de 3X7000VA

6 Python

Le langage Python est utilisé pour pouvoir commander le programme LabVIEW et le simulateur temps réel comme le montre la Figure 1.23, mais aussi pour pouvoir réaliser l'automatisation des tests dont nous discuterons dans le chapitre 2, la Figure 1.24 représente une image de cette interface. La communication entre Python et LabVIEW (qui est installé sur un autre ordinateur) se fait via UDP (User Datagram Protocol), tandis que la communication entre Python et le simulateur d'Opal-RT se fait via une librairie Python fournie avec le simulateur Opal-RT. Pour réaliser cette dernière commande, j'ai pris contact avec Opal-RT et avec l'expert Python de l'équipe IT de Laborelec - Engie-Lab.

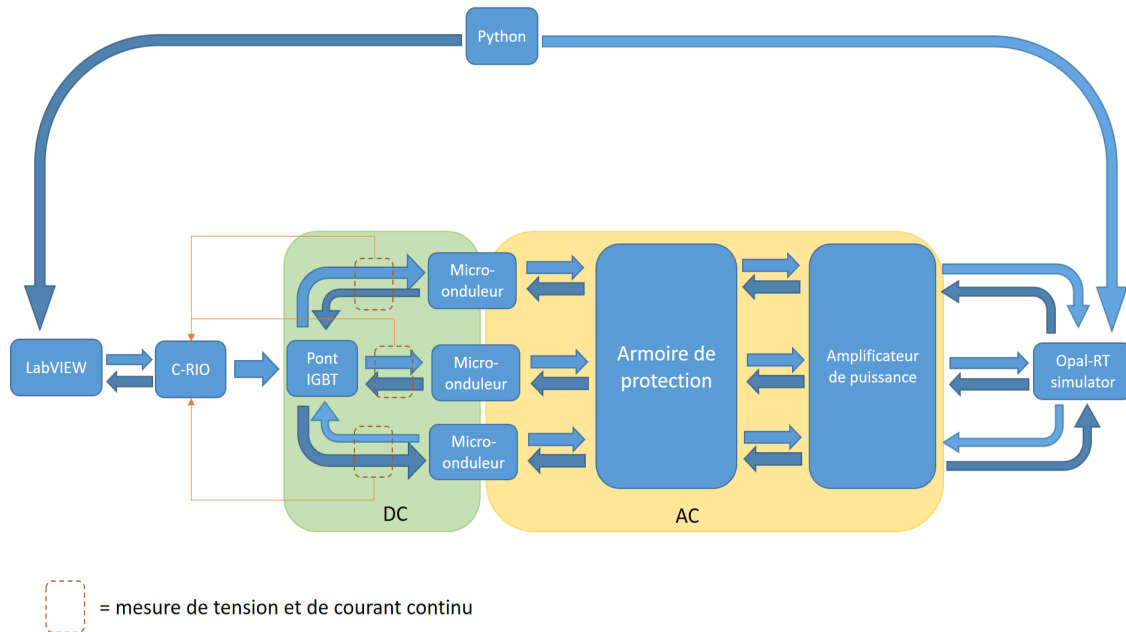


FIGURE 1.23 – Schéma général de l'installation pour 3 micro-onduleurs

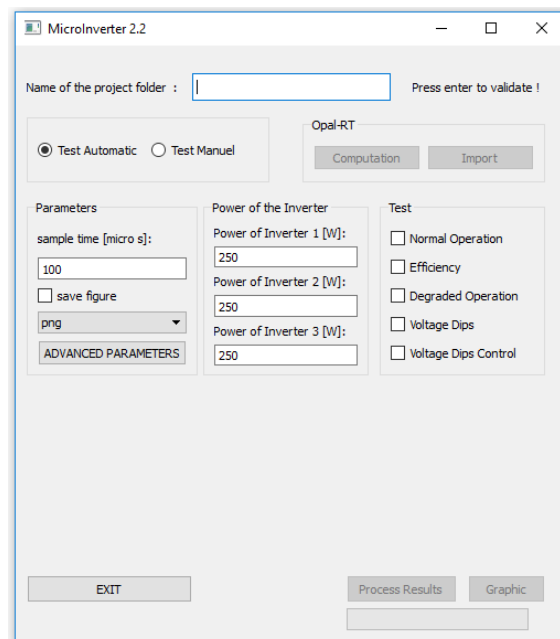


FIGURE 1.24 – Fenêtre principale de l'interface graphique

La Figure 1.25 représente le bloc émulateur de panneaux photovoltaïques. Avec de gauche à droite, le C-RIO (1), le pont IGBT (2) pour finir par l'alimentation de celui-ci (3). À l'étage inférieur, on a les inductances (4), le diviseur de tension (5) et le shunt (6).

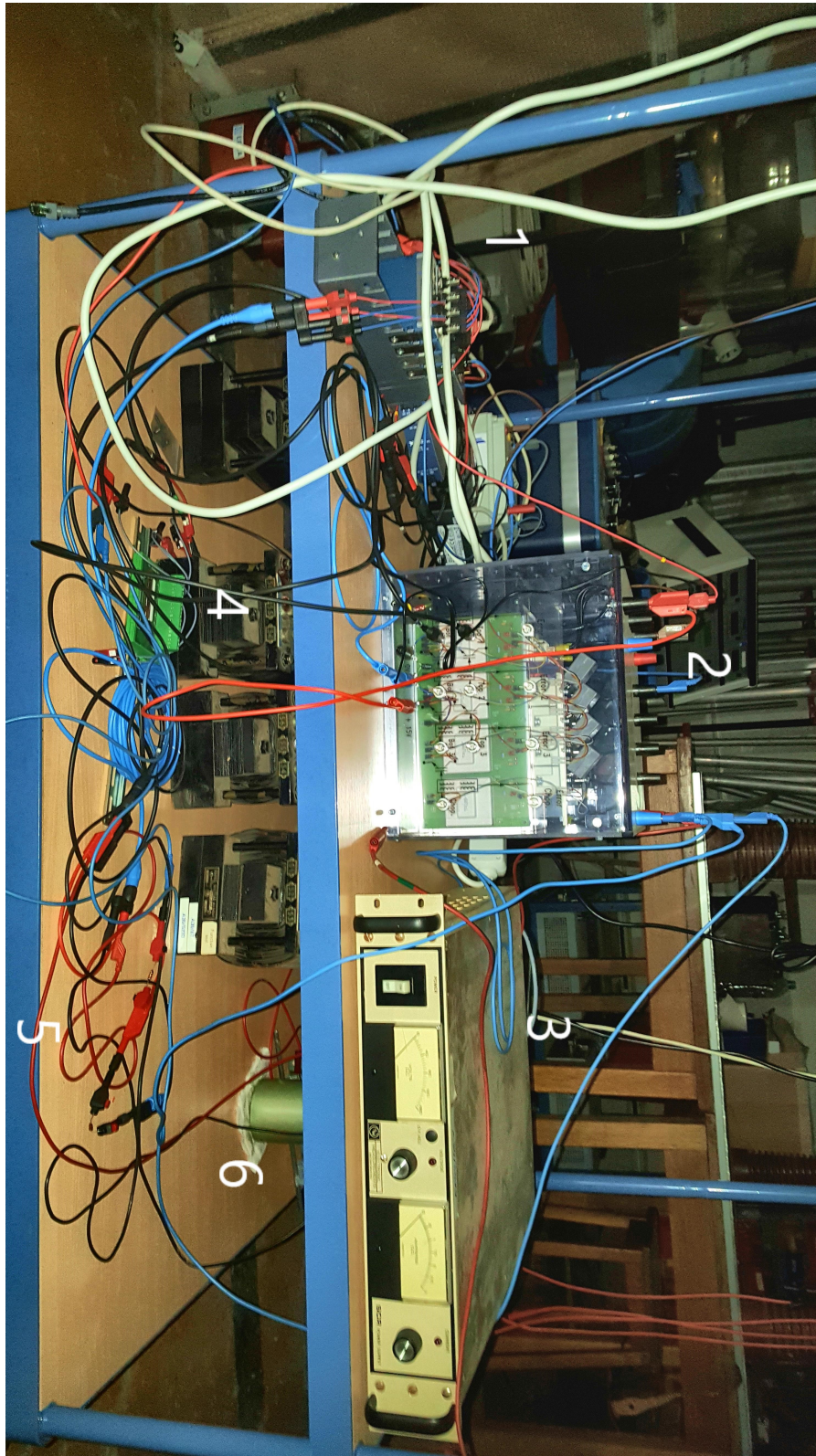


FIGURE 1.25 – Photo de l'implémentation de l'émulateur de panneaux photovoltaïques

Chapitre 2

Automatisation des tests

L'installation décrite dans le chapitre 1 a pour but de tester des micro-onduleurs dans différentes situations de manière sécurisée. À l'heure actuelle, une dizaine de tests sont prévus pour analyser le comportement des micro-onduleurs, ces tests sont expliqués dans le chapitre 3 de la partie I. L'automatisation a trois buts principaux, La reproduction des tests dans les mêmes condition, de simplifier et de faire gagner du temps sur la réalisation de tests répétitifs. C'est deux derniers objectif passe par la réalisation d'un programme d'automatisation.

1 Reproduction des tests

Dans un premier temps, la reproduction des tests a pour but de permettre à Laborelec - Engie-Lab de fournir aux différentes entités du groupe Engie une expertise impartiale et détaillée sur les micro-onduleurs. Dans un deuxième temps de procurer ce même service à ses divers clients, mais cette seconde phase nécessite des certifications.

Pour obtenir un test impartial, il faut pouvoir tester chaque micro-onduleur dans les mêmes conditions. Le fait que la reproduction du même test dans les mêmes conditions donne les mêmes résultats est nécessaire pour fournir un gage de la qualité de l'installation. C'est aussi un élément indispensable pour l'obtention d'une certification.

Pour pouvoir reproduire les mêmes conditions pour chaque test, on utilise un émulateur de réseaux qui nous donne la possibilité de nous affranchir des perturbations que pourrait induire le réseau. De plus, on utilise un émulateur de panneaux photovoltaïques pour nous permettre cette fois-ci de nous affranchir des conditions climatiques qui sont différentes à chaque moment.

C'est donc nous qui déterminerons dans les tests les différentes perturbations qui affecteront les micro-onduleurs. Celles-ci ont été définies par Laborelec - Engie-Lab grâce à leurs grandes connaissances des réseaux électriques et des pires situations auxquelles ils soumettent les appareils qui y sont connectés.

2 Le programme

Le programme est écrit avec le langage Python, comme montré dans le chapitre 1. Il a pour objectif de simplifier et de faire gagner du temps sur la réalisation de tests répétitifs. Pour réaliser cela, le programme est axé sur trois points :

1. L'interface graphique qui permet de faire le lien entre le langage humain et le langage machine. Des images et de plus amples explications des différentes parties de l'interface graphique sont disponibles dans l'annexe K.

2. L'automatisation des tests, grâce à la commande des émulateurs.
3. Le traitement des données se fait aussi via Python, car c'est un langage libre, ce qui évite des surcoûts de licence qu'aurait engendrés l'utilisation d'un logiciel tel que MatLab.

La structure du programme quant à elle est représentée sur la Figure 2.1. Il se compose de sept fichiers, dont le principal est MicroInverter, c'est aussi l'exécutable sous Python. Les autres fichiers sont formé de fonctions qui sont nécessaires à l'exécution du programme ¹.

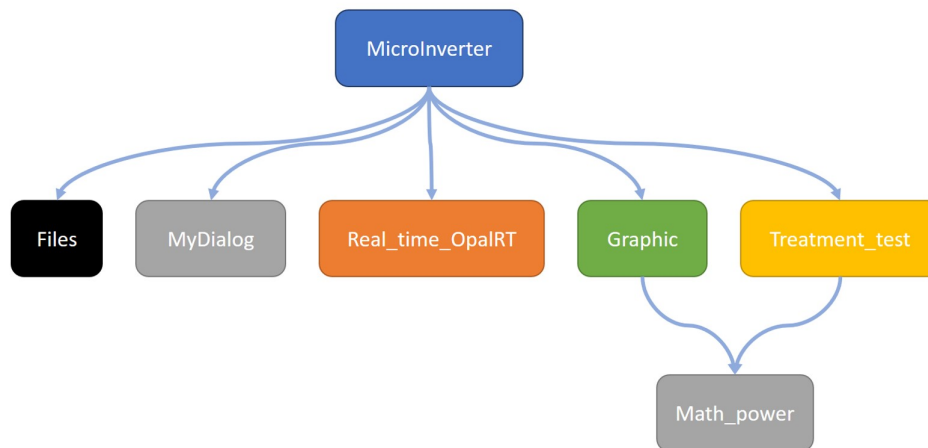


FIGURE 2.1 – Fichiers qui composent le programme, sous forme hiérarchique

Le fonctionnement du programme est illustré dans la Figure 2.3 et va être explicité ci-dessous. Les couleurs utilisées dans cette Figure permettent de lier l'action aux fichiers de la Figure 2.1.

L'initialisation des variables et le lancement de l'interface graphique sont exécutés lors du démarrage du programme. Il est ensuite nécessaire de choisir le nom du dossier où vont être stockés les résultats.

Ensuite, l'utilisateur à trois options,

1. choisir le mode manuel,
2. choisir le mode automatique avec simulation,
3. choisir le mode automatique sans simulation.

Si l'utilisateur choisit le mode manuel, Python va ouvrir une fenêtre du logiciel RT-Lab. Dans celle-ci, l'utilisateur va avoir accès à tous les paramètres modifiables de la simulation ainsi qu'à des oscilloscopes qui lui permettront d'observer les signaux de ces simulations ². Dans ce mode, l'utilisateur ne peut faire qu'un seul test à la fois, mais le programme est prévu pour lui permettre de faire autant de tests qu'il le désire. C'est à lui à mettre fin au mode manuel. Une fois les tests terminés, l'utilisateur se retrouve au point de départ. Il est à noter que les tests faits dans ce mode ne sont pas enregistrés, ils ne peuvent donc pas être traités par la suite.

Si l'utilisateur choisit le mode automatique avec simulation, il devra sélectionner les tests qui seront exécutés ainsi que l'amplitude de la tension du réseau. Lorsque les tests sont terminés,

1. La flèche pointe vers le fichier contenant les fonctions nécessaires à l'exécution du fichier.

2. Attention, les processeurs du simulateur ont une bande passante pour le traitement des données limitées et les calculs du simulateur sont privilégiés. Les données pour les oscilloscopes de la fenêtre RT-Lab doivent donc passer entre les calculs et il se peut qu'il y ait des pertes de données dues à une taille limitée du buffer (la mémoire tampon).

des fichiers sont générés dans le dossier désigné au lancement du programme. Ces fichiers sont ensuite chargés dans Python et pourront être traités si l'utilisateur le désire. Après traitement des données, l'utilisateur peut choisir d'en générer les graphiques.

Si l'utilisateur choisit le mode automatique sans simulation, il peut charger ses données précédemment obtenues pour ensuite les traiter et en obtenir des graphiques.

Il est à noter que le programme peut être éteint après toute opération, sauf en mode automatique avec simulation, entre l'exécution des tests et le chargement des fichiers.

Le contrôle-commande des tests nécessaire à l'automatisation de ceux-ci se déroule dans le fichier MicroInverter. Il faut savoir que cette partie du programme est la plus critique, elle dispose donc d'un système "try except" pour les éléments critiques. Ce système a pour but d'essayer de faire ce qu'il y a dans le "try" et si une erreur apparaît, elle est attrapée par le "except" et renvoyée à l'utilisateur. Après le "try except", une action est exécutée même en cas d'erreur. Elle a pour but de protéger le matériel ainsi que le personnel qui l'utilise.

Les éléments critiques sont tous en lien avec le simulateur temps réel. La partie contrôle-commande prend le contrôle du simulateur pour y charger la simulation. En cas d'échec, cela n'a que peu d'impact, le programme ne pourra tout simplement pas donner de résultats. Mais si elle se charge et qu'une ligne de code qui suit, avant le reset du simulateur³ génère une erreur, et qu'il n'y a pas de "try", le programme python s'arrête. Cela a pour conséquence que la simulation est toujours chargée sur le simulateur, qui est possiblement en exécution et donc envoie des informations aux différentes cartes de contrôle. Ce qui veut dire qu'on a une tension aux bornes de celles-ci, ce qui est dangereux, d'autant plus si un amplificateur de puissance y est couplé. Dans ce cas, il y a trois techniques pour résoudre le problème :

1. La plus dangereuse. Si on a précisé une durée de simulation, on attend la fin sans rien faire. Dans ce cas-là, l'installation est dangereuse jusqu'à la fin de la simulation.
2. La plus correcte. Lancer RT-Lab et lui demander de redémarrer le simulateur. Par cette action, le simulateur va nettoyer sa mémoire. L'installation est dangereuse jusqu'au redémarrage du simulateur.
3. La barbare. En dernier recours, si la méthode précédente n'a pas fonctionné, débrancher l'alimentation du simulateur et attendre un peu avant de le reconnecter pour être sûr que le simulateur soit totalement éteint.

D'où l'intérêt du "try", car en cas d'erreur dans la partie protégée par le "try", le reste de l'exécution n'est pas empêché et permet donc de faire un reset de la machine à chaque fois.

Un fichier log est créé lors de l'exécution des tests automatiques avec simulation pour que, si une erreur apparaît, elle puisse rapidement être trouvée et corrigée. Le fichier log, voir Figure 2.2, donne

- la tension du réseau,
- le moment auquel a commencé le test (temps qui est à mettre en correspondance avec les données sauvegardées) et
- le test qui a été réalisé.

```
RMS voltage of the network : 1.0V
0 test normal operation 20% of rated power
7 test normal operation 50% of rated power
14 test degraded operation 10% of harmonic 9
21 test voltage dips Laborelec
```

FIGURE 2.2 – Exemple de fichier log généré durant l'exécution du programme

3. Le reset du simulateur permet de stopper la simulation et de vider la mémoire du simulateur.

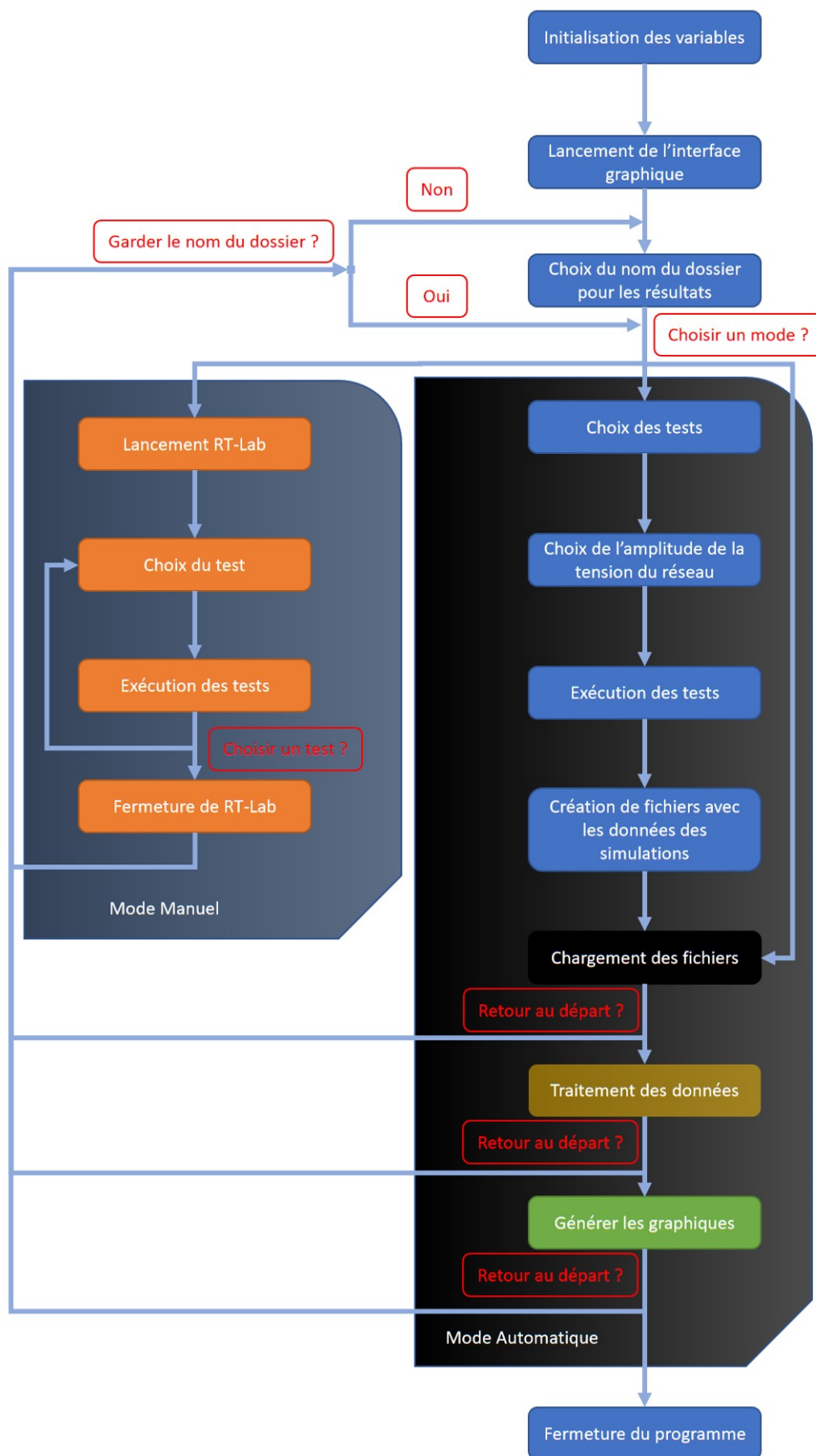


FIGURE 2.3 – Schéma d'exécution du programme

Chapitre 3

Validation

Une fois l'installation et le programme d'automatisation réalisés, il est nécessaire de les valider avant de commencer à les utiliser. Dans ce chapitre, nous présentons le processus suivi pour la validation, ainsi que les différents obstacles rencontrés et les solutions qui y ont été apportées. Nous terminerons ce chapitre par l'état actuel de la validation suite aux différents problèmes qui sont survenus.

1 Procédure de validation de l'installation

Passer de la théorie à la pratique en laboratoire a souvent été source de problèmes, parce que le matériel amène des non-idéalités qui n'ont pas toujours été prises en compte lors de la conception ou alors qui sont difficiles à modéliser. Pour permettre de trouver plus rapidement d'éventuels problèmes dans l'une ou l'autre partie de l'installation, la validation s'effectue par bloc. Chaque bloc de la Figure 1.1 a été testé séparément.

1.1 Validation du bloc émulateur de panneaux photovoltaïques

La validation de cette partie a été effectuée avec le service d'"Automation and Control" de Laborelec - Engie-Lab qui a réalisé le programme d'émulation des panneaux solaires sur LabVIEW. Pour valider ce bloc, nous avons suivi les étapes ci-après :

1. Validation sur une résistance, des capteurs (tension et courant) et du circuit à faible puissance. On a utilisé le circuit de la Figure 3.1 qui est le circuit final à l'exception du micro-onduleur qui a été remplacé par une grosse résistance. Celle-ci nous permet de dissiper la puissance fournie par l'émulateur entre 20W et 60W. Cette résistance peut dissiper jusqu'à 200W, voir annexe J.

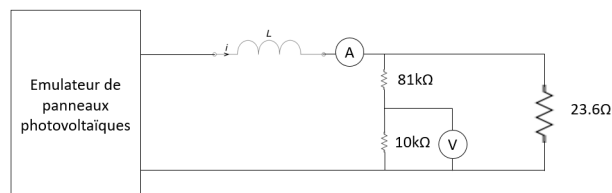


FIGURE 3.1 – Circuit de l'émulateur de panneaux photovoltaïques connecté à une résistance

2. Validation du régulateur PI à faible puissance. Pour cela, on a utilisé le circuit de la Figure 3.2 qui est le même circuit que lors de la première étape de validation, sauf que cette fois-ci, on a le micro-onduleur à la place de la résistance. Le micro-onduleur est aussi connecté au réseau pour lui permettre de le "démarrer", donc lui permettre d'injecter de la puissance sur le réseau ce qui est nécessaire pour que le système MPPT "démarré" et que l'on puisse tester le régulateur PI.

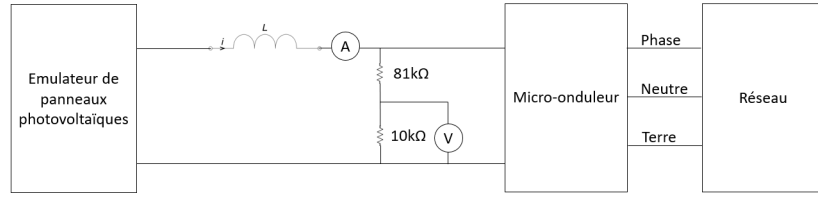


FIGURE 3.2 – Circuit de l'émulateur de panneaux photovoltaïques connecté au réseau par le micro-onduleur

1.2 Validation du bloc émulateur de réseaux

Le bloc émulateur de réseaux a aussi été validé en plusieurs étapes :

1. Validation des simulations en mode de synchronisation "logiciel". Ce mode permet la validation des simulations sans connexion aux matériels, tout se passe sur le logiciel de simulation RT-Lab. Le circuit utilisé pour ces tests est celui de la Figure 3.3. Le micro-onduleur est modélisé par deux résistances, une pour modéliser la puissance qu'il transfère et l'autre pour modéliser les pertes.

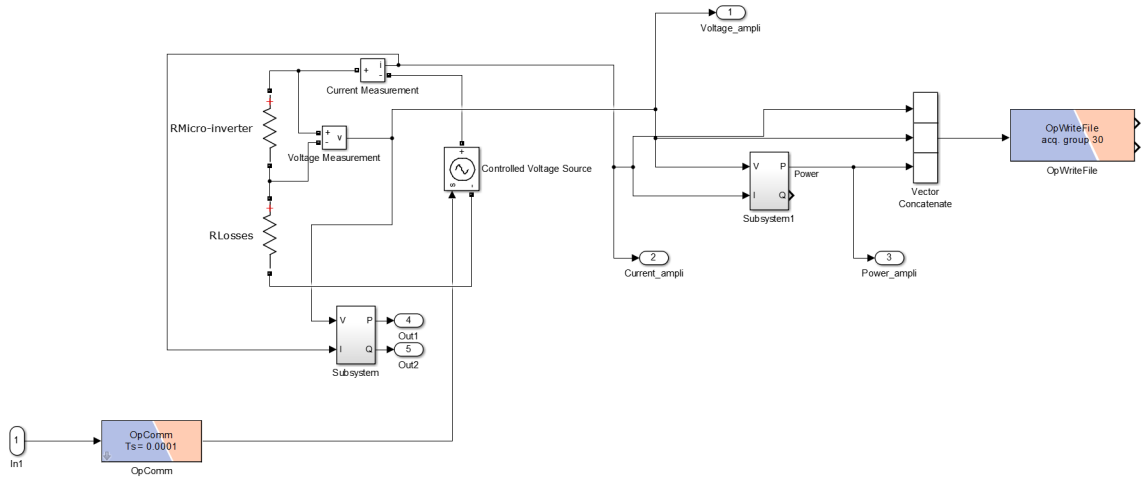


FIGURE 3.3 – Circuit de test des simulations en mode de synchronisation "logiciel"

2. Validation des signaux en mode de synchronisation "matériel". Dans ce mode, le simulateur génère des sorties entre -16V et +16V et permet l'acquisition de ces mêmes valeurs. Le test est simple, on connecte les sorties du simulateur aux cartes d'acquisition de celui-ci et on demande au générateur de générer les signaux.
3. Validation des simulations en mode de synchronisation "matériel" sur un circuit à plus faible tension. Le circuit utilisé est celui de la Figure 3.4 et la simulation utilisée est celle de la Figure 1.20. On a dans ce premier circuit le micro-onduleur qui est représenté par une seule résistance et on travaille à plus faible tension pour permettre à la résistance de dissiper la puissance. La résistance utilisée est de 23.4Ω et a une capacité de dissipation de 200W.

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$U = \sqrt{PR}$$

$$U = \sqrt{200 \cdot 23.4}$$

$$U = 68.4V$$

On a donc appliqué des amplitudes de tension progressive jusqu'à atteindre 65V.

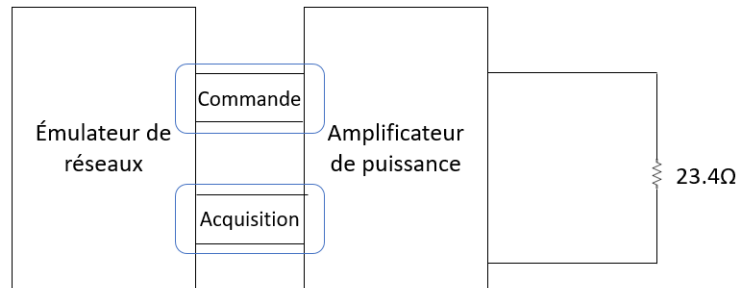


FIGURE 3.4 – Circuit de l'émulateur de réseaux connecté à une résistance via un amplificateur de puissance

1.3 Validation du bloc armoire de protection

La validation de ce bloc a été réalisée par un technicien. Le technicien qui se servira du matériel, il a donc pris grand soin de vérifier que sa sécurité n'était pas mise en péril.

1.4 Validation du bloc Python

Le bloc python a été validé suivant ces étapes :

1. Validation de chaque fonction de manière indépendante pour vérifier son fonctionnement.
2. Validation du contrôle du simulateur de panneaux photovoltaïques en refaisant les tests de validation de ce bloc.
3. Validation du contrôle du simulateur de réseaux en refaisant les tests de validation de ce bloc.

1.5 Validation de l'installation

Une fois que chaque bloc de l'installation fonctionne, on passe au test de toute l'installation en même temps. Cela se fait en deux étapes :

1. Validation de l'installation en contrôle manuel. Grâce à l'interface graphique du simulateur (le bloc SC_GUI), on va procéder manuellement au choix des valeurs de tension. On exécutera ce test avec une courbe de panneaux photovoltaïques de 40W, pour permettre à l'onduleur de "démarrer" et limiter les risques en cas de problème. De plus, on commencera avec un réseau dont l'amplitude de la tension est de 40V pour s'assurer que tous les câblages ont été réalisés correctement. Il ne doit en principe rien se passer, car le micro-onduleur doit voir le réseau comme étant défaillant, car inférieur à $230V - 10\%$, soit inférieur à 207 V. On passe ensuite à une amplitude de tension de 230V. On finira par faire varier la courbe du panneau pour voir si tout se passe bien.
2. Validation de l'installation pilotée par le programme Python. On reproduit les mêmes tests que précédemment, mais de manière autonome.

Si tout se passe bien, le banc d'essai est donc validé une fois ces étapes terminées.

2 Problèmes rencontrés et solutions apportées

Malheureusement, comme il est dit dans l'introduction de la section 1 de ce chapitre, passer de la théorie à la pratique peut parfois être laborieux. Ce projet n'y a pas fait exception, mais nombre de problèmes ont pu rapidement être résolus. Par exemple, la carte d'acquisition utilisée au départ pour l'émulateur de panneaux photovoltaïques nécessitait une référence commune au sein du circuit, ce qui nous a obligé à trouver une nouvelle carte d'acquisition avec une isolation

des mesures pour limiter les frais de modification du programme et garder une bonne précision.

Cependant un problème nous a occasionné beaucoup d'ennuis. Lors du premier test de validation de l'installation de la section 1.5, alors que tous les autres tests au préalable s'étaient bien déroulés, un court-circuit au sein de l'amplificateur puissance s'est produit lors de la connexion entre le réseau émulé et le micro-onduleur.

Pour rappel, le dernier test de la section 1.1 s'effectue dans les mêmes conditions, mais avec le réseau électrique de Laborelec à la place du réseau émulé, qui lui n'avait posé aucun problème. De plus, il nous a fallu constater qu'aucune sécurité n'avait détecté le défaut, c'est un de mes responsable monsieur David Martinez Lopez qui a dû éteindre manuellement l'amplificateur de puissance via le bouton d'arrêt d'urgence. Des disjoncteurs 6A, 16A, 24A et 64A ne se sont pas déclenchés, tout comme le différentiel de 500mA.

Nous avons donc tout déconnecté et relancé l'amplificateur pour voir si un message d'erreur apparaissait. Nous avons reçu des messages d'erreur pour un défaut thermique sur la phase trois alors que nous travaillions sur la phase une. Nous avons aussi une tension de 10V sur cette même phase alors qu'une consigne de 0V lui était donnée.

Suite à ce problème, les tests ont été entièrement arrêtés pour permettre de faire une enquête et trouver l'origine du défaut. Les premiers résultats de l'enquête laissaient supposer que l'incident était dû à un défaut interne de l'amplificateur de puissance (celui-ci n'avait encore que très peu été utilisé). Laborelec a donc pris contact avec la société qui a fabriqué l'amplificateur pour procéder aux réparations et un délai de minimum six semaines nous a été donné. Sachant que mi-mai l'amplificateur était toujours à Laborelec pour les besoins de l'enquête interne, il était impossible de le récupérer avant la fin du mémoire.

Mais grâce à mon responsable monsieur Yann Pankow nous avons pu obtenir un jour de test à l'ENSAM de Lille qui dispose d'un amplificateur de puissance commandable avec un simulateur temps réel, pour me permettre de faire une partie de la validation de l'installation.

3 État de la validation

Le but de notre journée de test à l'ENSAM était de valider les simulations ainsi que le programme d'automatisation des tests, mais avec leurs matériels.

Malheureusement quand nous sommes arrivés, nous avons constaté que leur émulateur de panneaux photovoltaïques n'était plus opérationnel suite à une mise à jour du logiciel et à un composant cassé. Avec l'aide de monsieur Frédéric Colas, un ingénieur de recherche de l'ENSAM, nous avons pu le remettre en fonctionnement.

Une fois remis en état, nous avons procédé à quelques tests pour observer comment se comportait le matériel. Nous avons alors remarqué que leur émulateur de panneaux photovoltaïques n'était pas assez rapide car le micro-onduleur faisait des décrochages intempestifs.

De plus, certains éléments n'avaient pas été pris en compte dans le programme d'automatisation que j'avais réalisé tels que les cinq à dix minutes nécessaires à la synchronisation du micro-onduleur avec le réseau, ce qui a empêché la vérification de l'automatisation des tests. Nous avons quand même pu vérifier grâce au mode manuel, que sur l'écran les simulations se comportaient comme nous l'avions espéré. Malheureusement, les données non pu être enregistrées suite au temps de synchronisation lent et non pris en compte, la taille allouée au fichier étant dépassée. Au vu des résultats que nous avons pu observer (monsieur Yann Pankow et moi), les simulations sont validées.

Il ne reste plus qu'à valider l'automatisation en opérant les changements nécessaires à la prise en compte du temps de synchronisation des micro-onduleurs.

Conclusions et Perspectives

Pour conclure, suite à une considérable augmentation du nombre d'onduleurs disponibles sur le marché, Laborelec - Engie-Lab décide de développer un banc de tests, ainsi que des tests uniques pour micro-onduleurs soumis à des conditions réelles. Ceux-ci ont pour principal objectif :

- D'améliorer leurs connaissances sur les différents micro-onduleurs pour pouvoir répondre aux questions des autres entités du groupe.
- De donner des recommandations précises sur la capacité des différents micro-onduleurs disponibles.

Durant ce travail, j'ai réalisé un banc d'essai pour micro-onduleurs et une automatisation des tests spécifiques et uniques pour les études qu'Engie-Lab - Laborelec réalise en collaboration avec l'ENSAM.

Le banc d'essai comporte le choix de puissance basée principalement sur le PHIL, ainsi que sur l'émulateur PV, et la possibilité de les commander pour simuler les défauts réseau et autres tests.

L'automatisation des tests intègre une interface homme-machine qui permet une utilisation facile et modulaire des différents tests. Le but étant de simplifier et de faire gagner du temps sur la réalisation de tests répétitifs.

Mon travail a permis de faire avancer les projets concernant les études relatives aux onduleurs au sein du groupe Engie. Cependant, j'ai remarqué durant la phase de validation que certains points étaient à améliorer et d'autres à développer pour les applications futures :

- La détection des synchronisations et désynchronisations des micro-onduleurs avec l'émulateur de réseau.
- Le démarrage et l'arrêt des fichiers de stockage des données lors de la simulation.
- Une mise à jour du programme est nécessaire suite à une mise à jour de la librairie de l'interface graphique PyQt4 vers PyQt5, cette dernière n'étant pas rétrocompatible.
- Les simulations ont été prévues pour un micro-onduleur et doivent être modifiées pour permettre le test simultané de trois micro-onduleurs.
- Il faut rendre l'installation certifiable ISO 17025, qui est une norme internationale qui spécifie les "exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais". On peut trouver un exemple d'exigences pour la certification rédigé par la Cofrac à l'adresse suivante <http://www.cofrac.fr/documentation/LAB-REF-02>.
- Il faudra intégrer les tests de la future norme pour les onduleurs.
- On peut aussi avec très peu de changements utiliser ce banc de tests pour les onduleurs "chaîne" et les onduleurs intelligents (smart PV inverters).

Bibliographie

- [1] “Europe 2020 – les grands objectifs de l’UE en matière de croissance économique - commission européenne.” http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_fr.htm. (Accessed on 04/27/2017).
- [2] T. M. C. Le, *Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2012.
- [3] “Innovation et transition énergétique.” <http://www.engie.com/innovation-transition-energetique/>. (Accessed on 04/27/2017).
- [4] P. Grana and M. Shiao, “The microinverter and dc optimizer landscape 2014 : The evolution from market niche to market success | greentech media.” <https://www.greentechmedia.com/research/report/the-microinverter-and-dc-optimizer-landscape-2014>. (Accessed on 05/08/2017).
- [5] R. Mokni and N. AMAIMIA, “Mod-2-3-onduleurs.” <http://www.ntc.com.tn/Web/upload/PV-Mod-2-3-Onduleurs.pdf>, 2011. (Accessed on 05/08/2017).
- [6] V. Didier, “Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques.” http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/Synthese_Onduleur_version_lite.pdf, Aug. 2007. (Accessed on 04/27/2017).
- [7] D. F. Butay and M. T. Miller, *Maximum peak power tracker : a solar application*. PhD thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2008.
- [8] C. Hua and C. Shen, “Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC’98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual*, vol. 2, pp. 679–685, IEEE, 1998.
- [9] R. Faranda and S. Leva, “Energy comparison of MPPT techniques for pv systems,” *WSEAS transactions on power systems*, vol. 3, no. 6, pp. 446–455, 2008.
- [10] S. Hajighorbani, M. A. M. Radzi, M. Z. A. A. Kadir, and S. Shafie, “Dual search maximum power point (dsmpp) algorithm based on mathematical analysis under shaded conditions,” *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 12116–12146, 2015.
- [11] Y. Pankow, “Micro-inverter for pv application.” many other authors, june 2015.
- [12] D. Green, “Micro-inverters vs. string inverters - which is better?.” <http://www.renewablegreenenergypower.com/micro-inverters-vs-string-inverters-which-is-better/>, Mar. 2013. (Accessed on 04/27/2017).
- [13] “Optimiseur de puissance | solaredge.” <https://www.solaredge.com/fr/products/power-optimizer#/>. (Accessed on 04/27/2017).
- [14] F. Peacock, “Microinverters vs. dc optimisers : Which option is best? - solar quotes blog.” <https://www.solarquotes.com.au/blog/microinverters-vs-dc-optimisers-which-option-is-best/>, June 2015. (Accessed on 04/27/2017).
- [15] “Les onduleurs.” <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16683>. (Accessed on 05/11/2017).

- [16] M. Barr, “Introduction to pulse width modulation (pwm) | barr group.” <https://barrgroup.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation>, Sept. 2001. (Accessed on 04/27/2017).

Troisième partie

Annexes

Annexe A

Fiche technique des onduleurs SMA Sunny Boy 3000TL



Économique

- Rendement maximal de 97 %
- Technologie Multistring dans toutes les classes de puissance
- Réduction des coûts en raison du nombre réduit de strings parallèles
- Gestion de l'ombrage grâce à OptiTrac Global Peak

Souple

- Tension d'entrée DC maximale de 750 volts
- Fonctions de gestion de réseau intégrées grâce à la mise à disposition de la puissance réactive

Simple

- Sans ventilateur
- Montage mural simplifié
- Système de connexion DC SUNCLIX
- Raccordement rapide sans outil

Communicatif

- Facilité de réglage des paramètres régionaux
- Technologie Bluetooth® et Speedwire/Webconnect de série

SUNNY BOY 3000TL / 3600TL / 4000TL / 5000TL avec Reactive Power Control

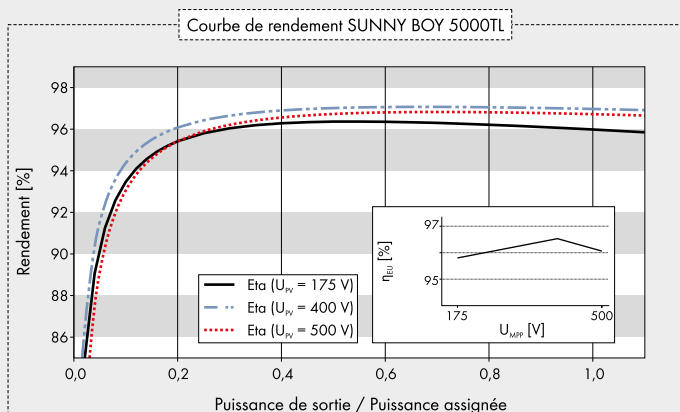
Le même en mieux. Sunny Boy, l'onduleur universel.

Et ce n'est pas tout : le nouveau Sunny Boy constitue la solution idéale pour les générateurs photovoltaïques exigeants et les installations partiellement ombragées. Successeur de la version 20 du Sunny Boy, il offre toute une série d'avantages supplémentaires : des usages plus flexibles, un rendement plus élevé et une manipulation plus ergonomique. Grâce à sa tension DC élevée de 750 V, le nombre de strings parallèles requis est moindre et les coûts sont réduits. De plus, ces onduleurs permettent une utilisation universelle en raison de gestion de réseau intégrée et ils contribuent fortement au support du réseau.

SUNNY BOY 3000TL / 3600TL / 4000TL / 5000TL

avec Reactive Power Control

Caractéristiques techniques	Sunny Boy 3000TL	Sunny Boy 3600TL
Entrée (DC)		
Puissance en courant continu max. (à cos φ = 1)	3200 W	3880 W
Tension d'entrée max.	750 V	750 V
Plage de tension MPP/tension d'entrée assignée	175 V à 500 V / 400 V	175 V à 500 V / 400 V
Tension d'entrée min./tension d'entrée de démarrage	125 V / 150 V	125 V / 150 V
Courant d'entrée max. entrée A/entrée B	15 A / 15 A	15 A / 15 A
Courant d'entrée max. par string entrée A / entrée B	15 A / 15 A	15 A / 15 A
Nombre d'entrées MPP indépendantes/strings par entrée MPP	2 / A:2; B:2	2 / A:2; B:2
Sortie (AC)		
Puissance assignée (à 230 V, 50 Hz)	3000 W	3680 W
Puissance apparente AC max.	3000 VA	3680 VA
Tension nominale AC / plage	220 V, 230 V, 240 V / 180 V à 280 V	220 V, 230 V, 240 V / 180 V à 280 V
Fréquence du réseau AC/plage	50 Hz, 60 Hz / –5 Hz à +5 Hz	50 Hz, 60 Hz / –5 Hz à +5 Hz
Fréquence de réseau assignée/tension de réseau assignée	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V
Courant de sortie max.	16 A	16 A
Facteur de puissance pour la puissance assignée	1	1
Facteur de déphasage réglable	0,8 inductif à 0,8 capacitif	0,8 inductif à 0,8 capacitif
Phases d'injection/phases de raccordement	1 / 1	1 / 1
Rendement		
Rendement max. / rendement européen	97 % / 96 %	97 % / 96,4 %
Dispositifs de protection		
Dispositif de déconnexion côté entrée	●	●
Surveillance du défaut à la terre/Surveillance du réseau	● / ●	● / ●
Protection inversion de polarité DC / Résistance aux courts-circuits AC / Séparation galvanique	● / ● / –	● / ● / –
Unité de surveillance du courant de défaut, sensible à tous les courants	●	●
Classe de protection (selon IEC 62103)/catégorie de surtension (selon IEC 60664-1)	I / III	I / III
Données générales		
Dimensions (L / H / P)	490 / 519 / 185 mm (19,3 / 20,4 / 7,3 pouces)	
Poids	26 kg (57,3 lb)	
Plage de température de fonctionnement	–25 °C à +60 °C (–13 °F à +140 °F)	
Émission sonore (typique)	25 dB(A)	25 dB(A)
Autoconsommation (nuit)	1 W	1 W
Topologie	Sans transformateur	Sans transformateur
Système de refroidissement	Convection	Convection
Indice de protection (selon IEC 60529)	IP65	IP65
Classe climatique (selon IEC 60721-3-4)	4K4H	4K4H
Valeur maximale admissible d'humidité relative de l'air (sans condensation)	100 %	100 %
Équipement		
Raccordement DC/raccordement AC	SUNCLIX/borne à ressort	SUNCLIX/borne à ressort
Écran	Graphique	Graphique
Interfaces : RS485 / Bluetooth® / Speedwire / Webconnect	○ / ● / ●	○ / ● / ●
Relais multifonction/SMA Power Control Module	○ / ○	○ / ○
Garantie : 5 / 10 / 15 / 20 / 25 ans	● / ○ / ○ / ○ / ○	● / ○ / ○ / ○ / ○
Certifications et homologations (autres sur demande)	AS 4777, C10/11, CE, CEI 0-21, EN 50438 ¹ , G59/3, G83/2, IEC 61727, MEA ⁴ , NEN-EN50438, NRS 097-2-1, PEA ⁴ , PPC, PPDS, RD 1699, RD 661, SI 4777, UTE C15-712, VDE-AR-N 4105, VDE0126-1-1, VFR 2013, VFR 2014	
Version : décembre 2015		
● équipement de série ○ équipement en option – non disponible, données en conditions nominales		
Désignation de type	SB 3000TL-21	SB 3600TL-21



Accessoires



Interface RS485
DM-485CB-10



Interface Speedwire/Web-
connect SWDM-10



Relais multifonction
MFR01-10



Kit de ventilateur supplé-
mentaire
FANKIT01-10



SMA Power Control
Module
PWCMOD-10

¹ N'est pas valable pour toutes les annexes nationales de la norme EN 50438

² 4600 VA pour VDE-AR-N 4105 ³ 4825 W pour VDE-AR-N 4105

⁴ Seulement SB 3600TL-21, SB 5000TL-21

Caractéristiques techniques

Entrée (DC)

Puissance en courant continu max. (à $\cos \varphi = 1$)

Tension d'entrée max.

Plage de tension MPP / tension d'entrée assignée

Tension d'entrée min. / tension d'entrée de démarrage

Courant d'entrée max. entrée A / entrée B

Courant d'entrée max. par string entrée A / entrée B

Nombre d'entrées MPP indépendantes/strings par entrée MPP

Sortie (AC)

Puissance assignée (à 230 V, 50 Hz)

Puissance apparente AC max.

Tension nominale AC / plage

Fréquence du réseau AC/plage

Fréquence de réseau assignée/tension de réseau assignée

Courant de sortie max.

Facteur de puissance pour la puissance assignée

Facteur de déphasage réglable

Phases d'injection/phases de raccordement

Rendement

Rendement max. / rendement européen

Dispositifs de protection

Dispositif de déconnexion côté entrée

Surveillance du défaut à la terre/Surveillance du réseau

Protection inversion de polarité DC / Résistance aux courts-circuits AC / Séparation galvanique

Unité de surveillance du courant de défaut, sensible à tous les courants

Classe de protection (selon IEC 62103)/catégorie de surtension (selon IEC 60664-1)

Données générales

Dimensions (L / H / P)

Poids

Plage de température de fonctionnement

Émission sonore (typique)

Autoconsommation (nuit)

Topologie

Système de refroidissement

Indice de protection (selon IEC 60529)

Classe climatique (selon IEC 60721-3-4)

Valeur maximale admissible d'humidité relative de l'air (sans condensation)

Équipement

Raccordement DC/raccordement AC

Écran

Interfaces : RS485 / Bluetooth® / Speedwire / Webconnect

Relais multifonction/SMA Power Control Module

Garantie : 5 / 10 / 15 / 20 / 25 ans

Certifications et homologations (autres sur demande)

Sunny Boy 4000TL

4200 W

750 V

175 V à 500 V / 400 V

125 V / 150 V

15 A / 15 A

15 A / 15 A

2 / A:2; B:2

4000 W

4000 VA

220 V, 230 V, 240 V / 180 V à 280 V

50 Hz, 60 Hz / -5 Hz à +5 Hz

50 Hz / 230 V

22 A

1

0,8 inductif à 0,8 capacitif

1 / 1

97 % / 96,4 %

●

● / ●

● / ● / -

●

I / III

490 / 519 / 185 mm (19,3 / 20,4 / 7,3 pouces)

26 kg (57,3 lb)

-25 °C à +60 °C (-13 °F à +140 °F)

25 dB(A)

1 W

Sans transformateur

Convection

IP65

4K4H

100 %

SUNCLIX/borne à ressort

Graphique

○ / ● / ●

○ / ○

● / ○ / ○ / ○ / ○

AS 4777, C10/11, CE, CEI 0-21, EN 50438¹, G59/3, G83/2, IEC 61727, MEA⁴, NEN-EN50438, NRS 097-2-1, PEA⁴, PPC, PPDS, RD 1699, RD 661, SI 4777, UTE C15-712, VDE-AR-N 4105, VDE0126-1-1, VFR 2013, VFR 2014

SB 4000TL-21

Sunny Boy 5000TL

5250 W³

750 V

175 V à 500 V / 400 V

125 V / 150 V

15 A / 15 A

15 A / 15 A

2 / A:2; B:2

4600 W

5000 VA²

220 V, 230 V, 240 V / 180 V à 280 V

50 Hz, 60 Hz / -5 Hz à +5 Hz

50 Hz / 230 V

22 A

1

0,8 inductif à 0,8 capacitif

1 / 1

97 % / 96,5 %

●

● / ●

● / ● / -

●

I / III

490 / 519 / 185 mm (19,3 / 20,4 / 7,3 pouces)

26 kg (57,3 lb)

-25 °C à +60 °C (-13 °F à +140 °F)

25 dB(A)

1 W

Sans transformateur

Convection

IP65

4K4H

100 %

SUNCLIX/borne à ressort

Graphique

○ / ● / ●

○ / ○

● / ○ / ○ / ○ / ○

● équipement de série ○ équipement en option — non disponible, données en conditions nominales

Désignation de type

SB 5000TL-21

www.SunnyPortal.com

Présentation, gestion et surveillance professionnelles des installations photovoltaïques



www.SMA-France.com

SMA Solar Technology

Annexe B

Fiche technique du micro-onduleur SMA SUNNY BOY 240



Illustration non contractuelle

Économique

- Exploitation optimale des modules par MPP tracking individuel
- Durée de vie maximale grâce à une conception électronique intelligente et un nombre de composants réduit au minimum

Sûr

- Séparation galvanique
- Point de coupure réseau intégré avec surveillance dans le Sunny Multigate
- Conforme à toutes les classes de protection et les normes

Interactif

- Fonctionnalité Webconnect intégrée vers le Sunny Portal via Ethernet
- Surveillance en temps réel à l'échelle du module
- Surveillance à distance via smartphone ou tablette
- Surveillance d'installation pratique et gratuite via le Sunny Portal

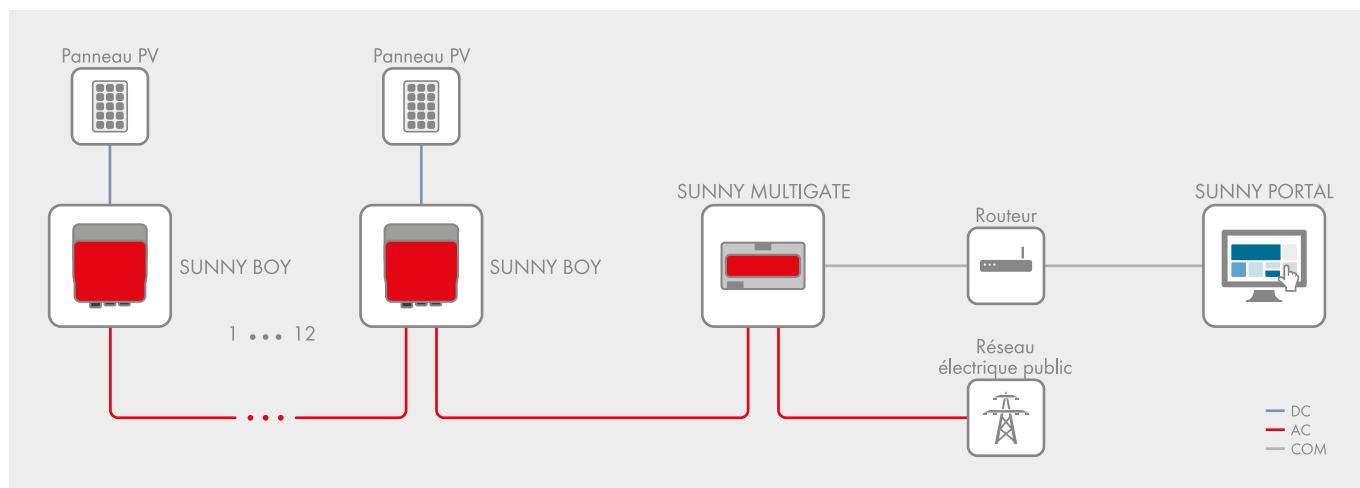
Facile d'utilisation

- Câbles AC pré-assemblés
- Adaptateur DC librement configurable pour le SB 240
- Installation simple

SUNNY BOY 240

Petit format, grandes performances

L'onduleur idéal adapté à chaque type de panneau : le Sunny Boy 240 combiné avec le Sunny Multigate constitue la solution idéale en cas d'inclinaisons multiples, ainsi que pour les installations photovoltaïques partiellement ombragées. Grâce à leur structure modulaire, les installations dotées du Sunny Boy 240 peuvent être réorganisées ou développées à tout moment, dans le cadre de modifications structurelles, pour étendre leurs capacités ou en fonction des moyens financiers. De plus, les concepts de micro-onduleur et d'onduleur string SMA peuvent être parfaitement combinés l'un avec l'autre.



Panneaux photovoltaïques recommandés

Puissance maximale dans les conditions d'essai normalisées de 300 W
Tension à une puissance maximale dans les conditions d'essai normalisées de 26 V à 32 V
Courant de court-circuit max. dans les conditions d'essai normalisées de 12 A

Caractéristiques techniques	Sunny Boy 240	Sunny Multigate
Entrée (DC)		
Tension DC max.	45 V	—
Plage de tension MPP / tension d'entrée assignée	23 V - 39 V / 29,5 V	—
Tension d'entrée min. / tension d'entrée de démarrage max.	23 V / 40 V	—
Courant d'entrée max.	8,5 A	—
Nombre max. de micro-onduleurs	—	12 x SB 240-10
Sortie (AC)		
Puissance assignée (à 230 V, 50 Hz)	230 W	2760 W
Puissance apparente AC max.	230 VA	2760 VA
Tension nominale AC / plage	230 V / 184 V - 270 V	230 V / 184 V - 270 V
Fréquence du réseau AC/plage	50 Hz / 45,5 Hz ... 63 Hz	50 Hz / 45,5 Hz - 63 Hz
Fréquence de réseau assignée / tension de réseau assignée	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V
Courant de sortie max.	1 A	12 A
Facteur de puissance pour la puissance assignée	1	1
Phases d'injection/phases de raccordement	1 / 1	1 / 1
Rendement		
Rendement max. / européen	95,8 % / 95,3 %	—
Dispositifs de protection		
Surveillance du défaut à la terre/surveillance du réseau	● / ●	— / ●
Protection inversion de polarité DC / résistance aux courts-circuits AC / séparation galvanique	● / ● / ●	— / ● / —
Caractéristiques générales		
Dimensions (L / H / P)	188 / 218 / 44 mm (7,4 / 8,6 / 1,7 pouces)	162 / 90 / 68 mm (6,4 / 3,5 / 2,5 pouces)
Poids	1,3 kg (2,9 lb)	0,75 kg (1,5 lb)
Plage de température de fonctionnement	-40°C à +65°C (-40°F à +149°F)	-40°C à +45°C (-40°F à +113°F)
Émission sonore	< 38db(A)	—
Autoconsommation (nuit)	< 0,03W	—
Topologie	Transformateur haute fréquence	—
Système de refroidissement	Convection	Convection
Indice de protection (selon CEI 60529)	IP65	IP20
Valeur maximale admissible d'humidité relative de l'air (sans condensation)	100 %	—
Communication		
Sunny Portal	—	SMA Webconnect via Ethernet
Équipement		
Raccordement DC	Connecteur	—
Raccordement AC	Connecteur	Borne à vis
Interface : Speedwire/Webconnect	—	●
Certificats et homologations 01/2014	VFR2014, PPC, EN 50438:2007(EU, CZ, NEN), C10/11:2012, VDE0126-1-1, VDE-AR-N 4105, TR-3.2.1, R.D.1699/R.D.413, CEI0-21, AS4777, TOR D4, G83/2, G59/3	
Version : 09/2014		
● Équipement de série ○ Équipement en option — Non disponible		
Remarque : données techniques provisoires, non garanties		
Désignation de type	SB 240-10	MULTIGATE-10

Annexe C

Fiche technique du micro-onduleur Letrika

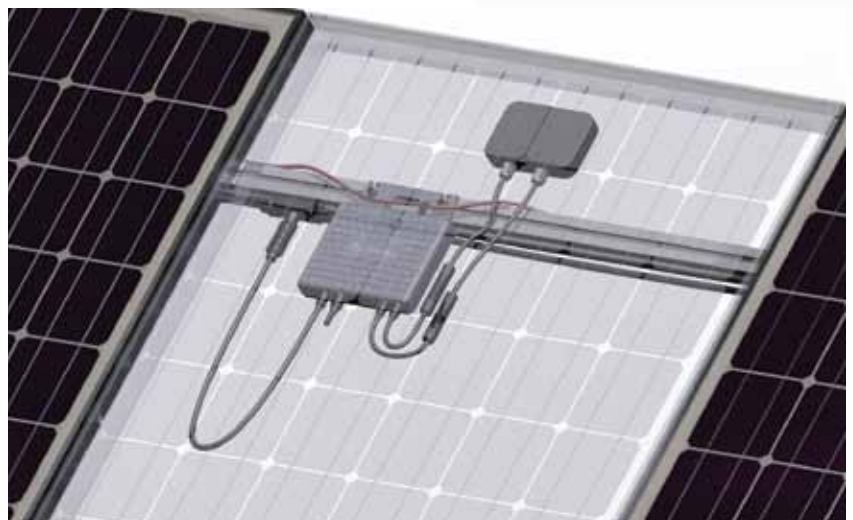


SOLAR MICRO INVERTER 260



FEATURES

- Reactive power control. Dynamic power factor regulation.
- Power factor options:
 - Unity (1),
 - Fixed down to 0.8, capacitive/ inductive,
 - Dynamic according to power or grid voltage.
- Very low power needed to start the inverter (< 2W).
- Foil capacitors are used, allowing very long lifetime (25 years) and high MTBF values (up to 600 years MTBF).
- Electronics is designed with automotive standard components, ensuring easy implementation of automated production with automotive quality and traceability.
- Compact waterproof design.
- Internet access to panel data through the communication gateway (WiFi, Ethernet gateway with embedded web server). The desired real power and power factor can also be set through the communication gateway allowing dynamic control of micro grid performances and adaptation to every grid quality.
- Extremely precise MPPT algorithm.
- Very low panel's DC ripple current (50 mA).
- High efficiency.
- Integrated IPS (Interface Protection System) /Anti-Islanding Protection.
- Optional: parallel connection of two solar panels each with peak power up to 140 W and max DC input voltage up to 60 V (Double DC connector).
- Suitable for 60 and 72-cell panels up to 310 Wp.





TECHNICAL CHARACTERISTICS

PARAMETERS	VALUE
Recommended rated input DC power	200 W - 275 W
Max PV panel power	up to 310 Wp
Max DC input voltage	60 V
MPPT range	21 V-55 V
Min start voltage	21 V
Max DC short circuit current	12 A
Max input current	10.5 A
Operating range	15 V- 60 V
Nominal apparent AC power	290 VA
Nominal real AC power	260 W
Nominal reactive AC power (at power factor 0.9)	125 VAR
Max reactive power	0 – 260 VAR (cap., ind.)
Nominal output current	1.15 A
Frequency range	50 Hz (47.5 Hz-55 Hz) According to standards
Voltage range 240 V systems	180 V – 270 V According to standards
Reactive power regulation	1 (Unity) 0.8 cap. ... 1 ... 0.8 ind. Dynamic regulation
THD odd harmonics	< 3 %
Efficiency max.	96.1 %
Efficiency CEC/EURO	95.5 % / 95.3 %
MPPT efficiency	99.9 %
Panel's ripple current	50 mA
Ambient temperature	-40 °C ... +65 °C
Cooling	Natural
Communication	WMBUS 868 Mhz (optional 915 Mhz)
Complies to	EN 50438, VDE 4105, CEI 0-21, G83/2, EN 62109-1, EN 62109-2, EN 61000-6-3, EN 61000-6-1, RoHS
Lifetime expectancy	25 years
Limited warranty	25 years
Housing	Die casted aluminum
IP protection	IP67, completely potted (waterproof)
Dimensions (without mounting brackets)	209 x 221 x 40 mm
Mounting brackets	M8x16, distance 130 mm
Weight	cca 2 kg
AC connection system	Amphenol LTW VTC/Wieland RST
DC connection system	Amphenol LTW H4
Standby consumption	0 W
Integrated Interface Protection System/Anti-islanding protection	as for VDE 4105

Annexe D

Fiche technique du micro-onduleur Clipsol

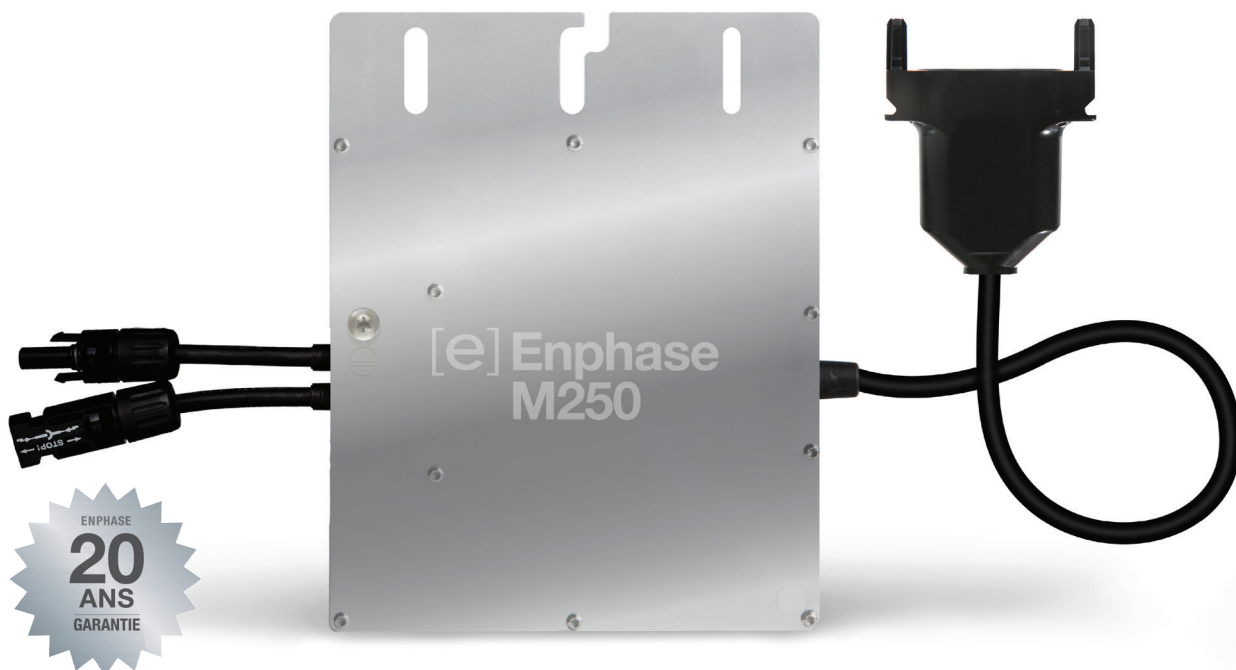
→ DONNEES TECHNIQUES

DONNEES TECHNIQUES DU MICRO-ONDULEUR BDM 250		
DONNÉES D'ENTRÉE (DC)	Puissance maximale admissible (Wp)	285
	Tension d'entrée DC max (Vdc)	60
	Plage de tension de fonctionnement (Vdc)	22-55
	Courant d'entrée max (A)	12
	Précision de suivi de la puissance MPPT	> 99.5%
	Courant de court-circuit Isc (A)	14
	Retour max de courant sur la ligne (A)	0
	Longueur (m) de câbles DC avec connecteurs MC4	0,4
DONNÉES DE SORTIE (AC)	Puissance de sortie nominale (W)	220
	Tension nominale (Vac)	230
	Courant de sortie nominal (A)	1,1
	Courant d'afflux (pointe et durée) (A ; us)	12 ; 15
	Fréquence nominale (Hz)	50
	Facteur de puissance	> 0.99
	Courant de défaut max (A)	2.2 (pointe)
	Protection de court-circuit sortie maximale (A)	6.3
	Nombre d'unités maximum par branche	15
	Longueur (m) de câbles AC mâle et femelle (norme VDE 0606-200) avec connecteurs MC4	0,2 (femelle) et 1,6 (mâle)
RENDEMENT	Rendement de pointe (%)	96.30
	Rendement CEC (%)	95.0
	Consommation d'électricité de nuit (W)	0.17
PROTECTIONS	Protection sur/sous tension	Oui
	Protection sur/sous fréquence	Oui
	Protection anti-ilôtage	Oui
	Protection surintensité	Oui
	Protection inversement de polarité DC	Oui
	Protection surcharge	Oui
	Classe de protection	I
	Classe IP	IP 67
AUTRES PARAMÈTRES	Plage de température ambiante de fonctionnement (°C)	- 40 ~ + 65
	Type d'environnement	Intérieur / Extérieur
	Environnement humide	OK
	Degré de pollution	PD 3
	Humidité (%)	100, condensation
	Altitude Maximum (m)	2000
	Catégorie de surtension	II(PV), III (AC) MAINS
	Affichage	Lumière LED
	Communications	Courant porteur
	Dimensions (L-H-P en mm) hors câbles	230 x 138 x 35
	Poids (kg)	2
	Conformité	VDE V0126-1-1/A1
		VDE-AR-N 4105 :2011-08
		VDE V0124-100 :2012-07
		IEC/EN 62109-1
		IEC/EN 62109-2
		EN50438-2012
		UL60950-1
		G83/2
		AS4777
		EN61000
	FCC Partie 15 Classe B	

Annexe E

Fiche technique du micro-onduleur Enphase M250

Enphase® M250



Le **système de micro-onduleurs Enphase Energy** permet d'augmenter la production d'énergie et la fiabilité tout en simplifiant au maximum la conception, l'installation et la gestion des systèmes photovoltaïques.

Le système Enphase comprend le micro-onduleur, la passerelle de communication Envoy et Enlighten®, le logiciel de surveillance et d'analyse d'Enphase.

PRODUCTIVITÉ

- Optimisé pour les modules à forte puissance
- Maximise la production d'énergie
- Minimise l'impact de l'ombrage, de la poussière et des débris

FIABILITÉ

- Produit de quatrième génération
- Plus d'un million d'heures de tests
- Disponibilité du système supérieure à 99,8 %

INTELLIGENCE

- Rapidité et simplicité de conception, d'installation et de gestion
- Surveillance et analyse en permanence

SÉCURITÉ

- Très basse tension DC qui réduit les risques d'incendie DC qui réduit les risques d'incendie
- Aucun point de défaillance unique
- Installation facilitée avec le câble Engage

DONNÉES D'ENTRÉE (DC)	Modèles : M250-60-230-S22, M250-60-230-S25	Modèles : M250-72-2LN-S2, M250-72-2LN-S5
Puissance module recommandée (STC)	210 - 310 W	210 - 310 W
Tension d'entrée DC max.	48 V	60 V
Tension de suivi de la puissance de crête	27 V - 39 V	27 V - 48 V
Plage de tension de fonctionnement	16 V - 48 V	16 V - 60V
Tension de départ min./max.	22 V / 48 V	22 V / 48 V
Courant de court-circuit DC max.	15 A	15 A
DONNÉES DE SORTIE (AC)		
Puissance de sortie maximale	258 W	258 W
Puissance de sortie nominale	250 W	250 W
Courant de sortie nominal	1.09 A	1,09 A
Tension nominale	230 V	230 V
Fréquence nominale	50.0 Hz	50,0 Hz
Facteur de puissance	>0.95	>0,95
Nombre maximum d'unités par branche de 20 A	14 (Ph + N), 42 (3Ph + N)	14 (Ph + N), 42 (3Ph + N)
Nombre maximum d'unités par câble	14 (Ph + N), 24 (3Ph + N)	14 (Ph + N), 24 (3Ph + N)
Courant de défaut maximal en sortie	850 mA (moyenne quadra- tique) pour 6 cycles	850 mA (moyenne quadratique) pour 6 cycles
Courant (appel)	0 A	0 A
Courant AC de retour vers le module	0 mA	0 mA
RENDEMENT		
Rendement EN 50530 (UE)	95,7 %	95,7 %
Rendement statique MPPT (pondéré, EN 50530)	99,6 %	99,5 %
Consommation d'électricité de nuit	0,055 W	0,065 W
DONNÉES MÉCANIQUES		
Plage de température de fonctionnement externe (ambiante)	-40 °C à +65 °C	
Plage des température de fonctionnement interne	-40 °C à +85 °C	
Classification environnementale du boîtier	Extérieur - IP67	
Type de connecteur, MC4	M250-60-230-S22 et M250-72-2LN-S2	
Type de connecteur, Amphenol H4	M250-60-230-S25 et M250-72-2LN-S5	
Dimensions (L x H x P)	179 mm x 217 mm x 28 mm (support inclus)	
Poids	1,66 kg	
Refroidissement	Convexion naturelle - aucun ventilateur	
CARACTÉRISTIQUES		
Compatibilité	Modules photovoltaïques à 60 cellules	Modules photovoltaïques à 60 et 72 cellules
Communication	Courant Porteur en Ligne (CPL)	
Surveillance	Options de surveillance avec Enlighten Manager et MyEnlighten	
Design du transformateur	Transformateurs haute fréquence isolés galvaniquement	
Conformité	AS4777, C10/11, CEI_0-21, EN50438, EN62109-1, EN62109-2, ERDF-NOI-RES_13E_V5, G59/2, G83/2, VDE-0126-1-1 + A1, VDE AR-N 4105 OVE/ÖNORM E 8001-4-712 (installations en Autriche limitées à 3.68 KVa.)	

Pour en savoir plus sur la technologie de micro-onduleurs
Enphase, visitez le site enphase.com/fr.

Annexe F

Fiche technique des optimiseurs DC SolarEdge



Optimiseur de Puissance SolarEdge

Solution Add-On de module avec la technologie IndOP™ P350I



OPTIMISEUR DE PUISSANCE

Optimisation de la puissance PV au niveau du module

- Technologie d'optimisation indépendante (IndOP™) – permet de travailler avec tous types d'onduleur et ne nécessite aucun matériel d'interface supplémentaire
- Jusqu'à 25% d'augmentation de la puissance de sortie
- Atténue tous les types de pertes dues à la disparité entre modules, de la tolérance de fabrication à l'ombrage partiel
- Rendement accru (99,5 %)
- Installation rapide avec une seule vis
- Idéal pour l'amélioration des installations existantes



Optimiseur de Puissance SolarEdge

Solution Add-On de module avec la technologie IndOP™

P350I

Avantages par solution	Optimiseur de puissance SolarEdge avec un onduleur SolarEdge	Optimiseur de puissance SolarEdge avec l'interface de sécurité et de supervision SolarEdge et onduleur non-SolarEdge	Optimiseur de puissance SolarEdge avec onduleur non-SolarEdge
Puissance supplémentaire	✓	✓	✓
Sécurité	✓	✓	-
Supervision	✓	✓	-
Conception en multi pentes	✓	✓	✓
Conception de chaînes longues	✓	-	-

		P350I (pour modules PV de 60 et 72 cellules)		
ENTRÉE				
Puissance nominale d'entrée DC ⁽¹⁾		350		W
Tension d'entrée maximum absolue (Voc à la température la plus basse)		60		Vdc
Plage de fonctionnement MPPT		8 - 60		Vdc
Courant continu d'entrée	Série Pxxx-2	10		Adc
maximum (Isc)	Série Pxxx-5	11		Adc
Rendement maximum		99,5		%
Rendement pondéré		98,6		%
Catégorie de surtension		II		
SORTIE DURANT LE FONCTIONNEMENT (OPTIMISEUR DE PUISSANCE RELIÉ À UN ONDULEUR EN FONCTIONNEMENT)		Optimiseur de puissance connecté à un onduleur SolarEdge	Optimiseur de puissance connecté à un onduleur non-SolarEdge ⁽²⁾	
Courant maximum de sortie		15	10	Adc
Tension maximum de sortie		60	Voc du module PV connecté	Vdc
TENSION DE SORTIE EN VEILLE (OPTIMISEUR DE PUISSANCE DÉCONNECTÉ DE L'ONDULEUR OU ONDULEUR ÉTEINT)				
Tension de sortie de sécurité par optimiseur de puissance		1	1 ⁽³⁾	Vdc
CONFORMITÉ AUX NORMES				
EMC		FCC Part15 Class B, IEC61000-6-2, IEC61000-6-3		
Sécurité		IEC62109-1 (sécurité de classe II), UL1741		
RoHS		Oui		
Sécurité incendie		VDE-AR-E 2100-712:2013-05		
SPÉCIFICATIONS D'INSTALLATION				
Tension maximum permise du système		1000		Vdc
Dimensions (L x P x H)	Série Pxxx-2	141 x 212 x 40,5		mm
	Série Pxxx-5	128 x 152 x 27,5		mm
Poids (câbles compris)	Série Pxxx-2	950		g
	Série Pxxx-5	655		g
Connecteur d'entrée		MC4 ⁽⁴⁾		
Connecteur de sortie		MC4		
Longueur de câble PV de sortie		1,2		m
Plage de température en fonctionnement		-40 - +85		°C
Caractéristiques nominales de protection	Série Pxxx-2	IP65		
	Série Pxxx-5	IP68		
Humidité relative		0 - 100		%

⁽¹⁾ Puissance nominale STC du module. Module jusqu'à 5% de tolérance de puissance permise.

⁽²⁾ Disponible seulement au cas où l'interface de sécurité et de supervision (SMI) est installée ou quand le mécanisme SafeDC™ est désactivé lors de l'installation en utilisant une seule fois la clé SolarEdge.

⁽³⁾ Lorsque l'interface de sécurité et de supervision SolarEdge (SMI) est éteinte.

⁽⁴⁾ Pour d'autres types de connecteurs veuillez contacter SolarEdge.

CONCEPTION DU SYSTÈME PV	HD-WAVE MONOPHASÉ SOLAREEDGE	ONDULEUR MONOPHASÉ SOLAREEDGE	ONDULEUR TRIPHASÉ SOLAREEDGE	ONDULEUR NON-SOLAREEDGE ⁽²⁾	
Longueur minimum de la chaîne (optimiseurs de puissance)		8	16	Selon les règles de conception de l'onduleur et la fiche technique du module PV, minimum 4 optimiseurs de puissance par chaîne	W
Longueur maximum de la chaîne (optimiseurs de puissance)		25	50		
Puissance maximum par chaîne	5700	5250	11250		
Chaînes en parallèle de différentes longueurs		Oui		Non	
Chaînes en parallèle de différentes orientations			Oui		



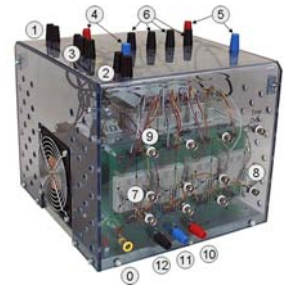
Annexe G

Fiche technique du pont IGBT

Application Note **AN-8005**

Revision:	00
Issue Date:	2008-09-24
Prepared by:	Frédéric Sargos

IGBT Power Electronics Teaching System Principle for sizing power converters



Inside the box	2
Very important safety recommendations	2
The interfaces / connectors	2
Preliminary remark	2
How to integrate the stack in the application	3
The components of the power electronics teaching system.....	3
The heat sink and the fan	3
The drivers	3
The rectifier SKD 51/14	5
The IGBT modules SKM 50 GB 123 D	5
The filtering capacitors	5
Why is the current limited in the capacitors ?	5
How to put capacitors in series?	5
The switching cell	6
The snubber capacitors.....	7
The bus bar	7
The thermal protection devices	8
The Normally-On thermal contact switch.....	8
The temperature sensor	8
The IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) module.....	8
Switching the IGBT.....	9
Snubber or snubberless	10
The IGBT in short-circuit.....	10
The calculations of losses.....	10
The origin of losses	10
Why are power losses a problem?	12
The conduction losses.....	12
Application example: Buck Chopper with DC output current	12
Application example: 3 phase PWM inverter	13
The switching losses	13
Application example: Buck Chopper with DC output current	14
Application example: 3 phase PWM inverter	14
From losses calculation to temperatures estimation.....	14
Modelling – thermal-electrical equivalence	16
References	16
Annex - SKHI 22 AR data-sheet.....	17

Inside the box

Before unpacking, please ensure that the following elements are inside the box.

- The stack itself
- A test certificate, which is a guarantee of safe working of the stack
- The technical description

Very important safety recommendations

To avoid damage to the converter and for the safety of the operator, it is strongly recommended to follow these instructions:

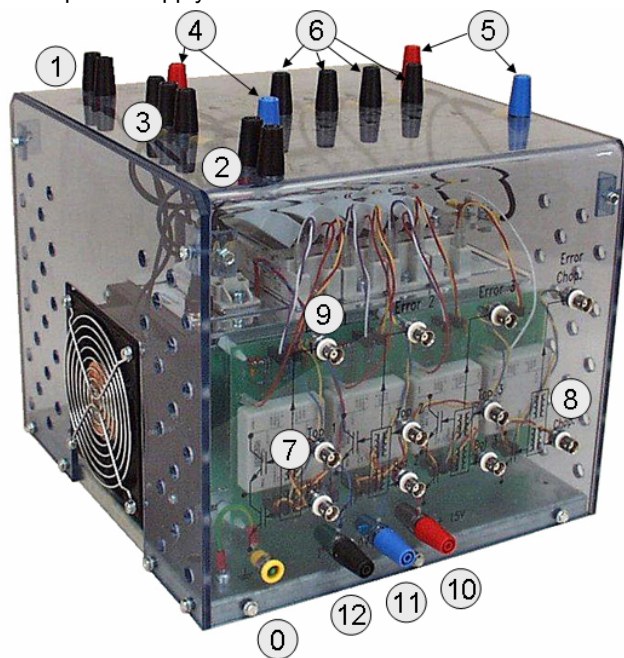
Always monitor the voltage at the capacitor bank. It must never exceed the maximum value of 750 Vdc, as there is no protection against DC over-voltage embedded in the Power Electronics Teaching Unit. After the tests, the capacitors may remain charged for a couple of minutes. One must anticipate that the DC voltage limit shall never be exceeded when designing a control unit board. When powering the unit, a pre-charging device (a choke or a resistance) should be inserted to prevent very high

charge currents. Never carry or move the device while it is electrically connected to anything. The error signal from the drivers must be taken into account in the control process. When connecting the command signals, it is preferable to use an anti-static protection bracelet. Never exceed the maximum allowed current (30 A). Connect a circuit breaker between the supply voltage and the converter. A thermal contact switch has been placed in the heat sink, close to the warmest point, to disconnect the circuit in case of abnormal heating of the heat sink. As a protection device, it should be connected in series with the driver power supply.

The interfaces / connectors

Preliminary remark

Even though this power electronics teaching system has been designed in order to avoid all risks of electrical contact, lethal high voltage can be present in the connectors. All connections should be made taking care that all security measures have been undertaken. In particular, the integrity of all cables should be checked prior to any exercise. For safety reasons, there is no direct access to the gate-emitter connections on the high-power level, which is the voltage triggering signal of the IGBT. If you intend to monitor this charge-discharge of the gate of the IGBT, please remove the side covers but **disconnect the power supply**. For safety reasons the covers should always be attached when power is applied. Please note, with the covers removed there is the risk of electrical shock. Only qualified people should work on the system with the covers removed.



N°	Type	Function	Voltage level	Max Current level
0	Grounding panel socket	Earth connection	0V	30 A
1	Banana connector 4mm	Fan power supply	230V/50Hz	1 A
2	Banana connector 4mm	Thermal trip	15V	5 A
3	Banana connector 4mm	Rectifier input	230 / 400V	30 A
4	Banana connector 4mm	DC rectifier outputs	600 VDC (Red is positive, Blue is negative)	30 A
5	Banana connector 4mm	DC IGBT inverter inputs	600 VDC (Red is positive, Blue is negative)	30 A
6	Banana connector 4mm	AC IGBT inverter + chopper outputs	400 VAC / 600 VDC	30 A
7	BNC coaxial insulated, 50 Ω	PWM input of inverter	C-MOS logic 0/15 V (shield is internally connected to driver's 0V), 0V =open IGBT, 15 V = closed IGBT	1 A

8	BNC coaxial insulated, 50 Ω	PWM input of brake chopper	C-MOS logic 0/15V (shield is internally connected to driver's 0V), 0V =open IGBT, 15 V = closed IGBT	1 A
9	BNC coaxial insulated, 50 Ω	Error output	C-MOS logic 0/15V (shield is internally connected to driver's 0V)	1 A
10	Banana connector 4mm	15V driver power supply	15V	5 A
11	Banana connector 4mm	0V driver power supply	15V	5 A
12	Banana connector 4mm	Temperature sensor	0-5V	1 A

How to integrate the stack in the application

The rectifier outputs are not directly connected to the capacitor bank, and it is not recommended to link them directly. To avoid high inrush current, which may be destructive for the capacitors, it is necessary to place a pre-charging resistor (that could be by-passed after charging the capacitors), or a choke between the rectifier and the capacitors. First, switch on the driver supply.

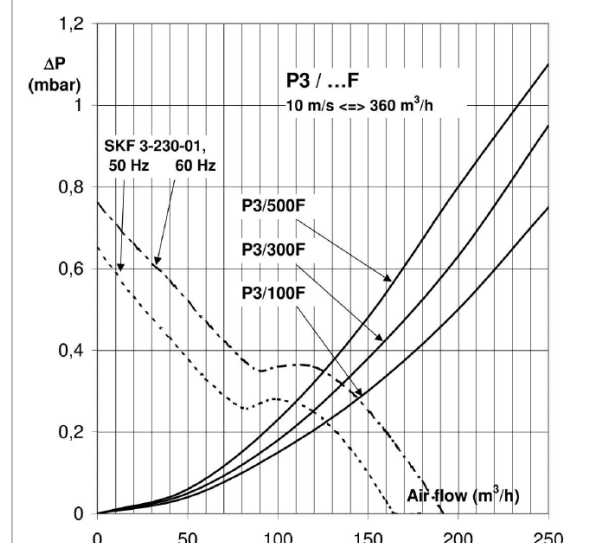
The error signal must indicate no error (i.e. +15 V). If this is not the case, there is a defect. Maybe the driver voltage is less than 13 V. Next, you should switch on the power. If possible, gradually increase the voltage using an auto-transformer. Otherwise, a passive element for charging should be placed between the rectifier and the capacitors bank.

The components of the power electronics teaching system

The heat sink and the fan

As explained later in more detail, it is of critical importance to dissipate the losses generated by the transfer of energy through the semiconductors. For this purpose, these are placed onto an aluminium heat sink (aluminium is a good trade-off of a thermally conductive metal, reasonable price, easy to industrialize), and the heat is dissipated from the power semiconductor to the aluminium by conduction. In most cases, for cost reasons, the heat sinks used in power electronics are of the extruded type. The heat sink used in this device is a P3/250, which means a profile of the extruded type P3, 250 mm long. The heat sink has one major thermal characteristic: its thermal resistance, defined as the level of elevation of temperature for a power dissipation of 1W. To dissipate the energy from the aluminium heat sink in the air, a fan creates air circulation on the fins for forced convection. The heat sink creates a pressure drop on the air flow, a function of the geometry of its profile and its length. The axial fan is defined by its pressure vs. flow curve characteristic. It can be supplied at 50 or 60 Hz, but its performance is slightly modified as can be seen from the curves. One can determine the approximate working point (air flow, working pressure) of the fan by crossing the pressure drop curve of the heat sink with the pressure vs. flow of the fan. The intersection gives an air flow estimation inside the fins of the heat sink. An additional safety margin should be

Figure 1 : Fan and heat sink characteristics



considered, for example if the air channel is obstructed by other elements which may add parasitic pressure drop, and reduce the fan output power.

The drivers

The driver is critical as it controls the IGBT, its protection, as well as the protection of the system and the user. Its purpose is:

- Amplifying the logic signal ON/OFF and delivering high peak current (some amps) at switching to the gate. Noise suppression of the input signal is necessary for reliable performance. This current is delivered through the gate resistors (R_{on} and R_{off}), fixed by the user, and which determine the dynamic response of the IGBT.

- Monitoring the errors: power supply under-voltage, short-circuit. A short-circuit is detected by monitoring V_{ce} , the voltage drop between collector and emitter of the IGBT. As the current increases, the $V_{ce(sat)}$ (= at passing state) becomes higher. The two parameters (R_{ce} , C_{ce}) define the values and time delays for the comparison of an internal reference with the monitored value of $V_{ce(sat)}$. After detection of the error, the driver should have the appropriate answer, which is switching off the IGBT.

- Interfacing and isolating the primary circuit from the secondary directly connected to the high power. It prevents the high potential of the secondary side from affecting the primary side, which would be dangerous, yet allows the control signal to be transmitted between both parts. It is a matter of safety and reliability.

Figure 2 : Driver output, triggering circuit principle of the IGBT

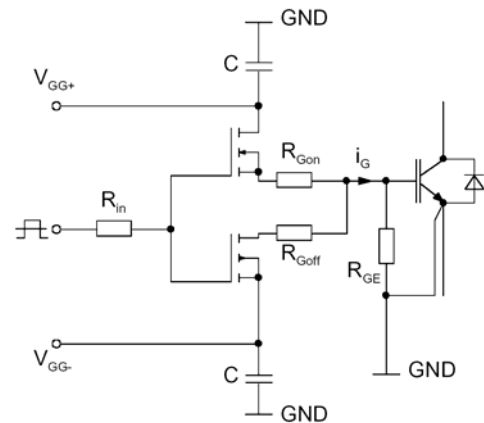
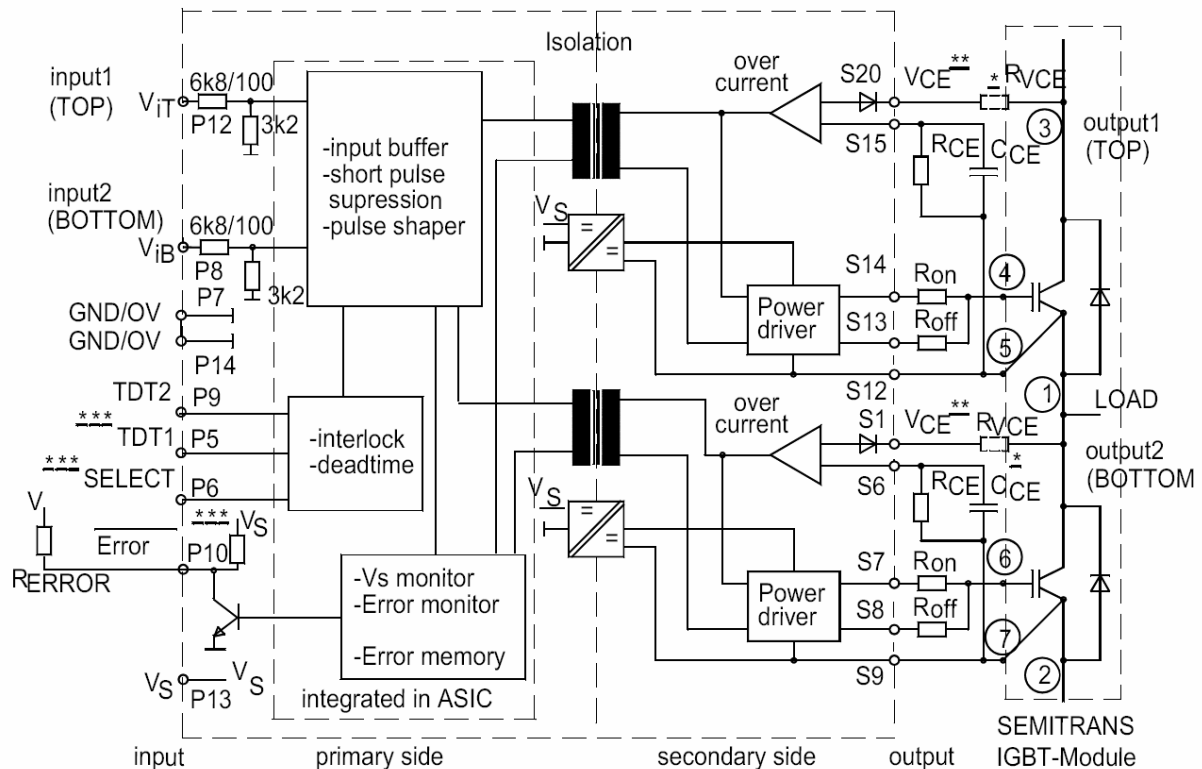


Figure 3 : Driver schematic principle of the SKHI 22A driver core



The drivers are based on 3 SKHI 22 A-R cores, each one controlling an inverter leg (both "Top" and "Bottom" IGBTs of one single module). One driver can control modules in parallel to increase the current capability, but that is not done in this application. The SKHI 22 A-R are described in detail at www.semikron.com. They must be powered with 0/15 V, and the power supply must be able to deliver a current above the drivers consumption (160 mA / driver max). The error signal is negative logic, i.e. it gives a +15 V signal when no error has occurred. You should integrate this monitoring in your command. If a fault condition is detected, the driver stops and the input

pulses are ignored. The error latch is reset by forcing both inputs to 0, and removing the error cause. After 9μs, the error signal returns to 15V. Please note that the drivers are independent from each other. All the necessary precautions should be taken to shut the system off when an error condition is sensed. The SKHI 22 A-R is equipped with an internal 10 kΩ pull-up resistor versus V_S. Input signals to the driver: 0 / + 15 V stabilised power supply (banana-type connectors), C-MOS signal (0/15 V) for command (BNC connectors).

The rectifier SKD 51/14

This is a 3 phase diode-rectifier, isolated power module. It should not be used for a network higher than 440V_{AC}. This rectifier can be used in single phase configuration also, by leaving one branch of the rectifier disconnected.

The IGBT modules SKM 50 GB 123 D

Each of these modules is an inverter leg, and is made of 2 IGBTs with an anti-parallel diode, connected in series, of which the middle point is at terminal 1. The top IGBT collector is at terminal 3 and the bottom IGBT emitter is at terminal 2. The IGBTs are forced closed by a 15V signal between the gate (terminals 4 -resp 6) and the associated emitter (gate 5 -resp 7) and forced open by a -15 V order on the same terminals. These control signal voltages are delivered by the SKHI 22 AR, driver core through an additional gate resistor whose value is 30 Ohms. These resistors are soldered on the printed circuit board of the drivers. The purpose for this resistor is to limit the charging current of the gate, and consequently, the collector-emitter over-voltages commensurate to the parasitic inductance. Conversely a higher gate resistance increases the switching losses. The chosen value is always a trade-off between protection of the IGBT and the admissible losses. Moreover, the choice of this value will have a significant influence on the dV/dt spectrum, which has a real influence on the EMC characteristics of the converter. The choice of a gate resistor is of critical importance.

The filtering capacitors

The filtering capacitors are electrolytic capacitors, their individual value is 2200 µF/400 V, 2 connected in series, 2 in parallel. The equivalent capacitor of the complete DC bus is 1100µF/800 V. Theoretically, this value is to be determined by the desired filtering quality (capacitance / voltage) . Practically, for electrolytic technology, the RMS current admissible in the capacitors is the main sizing parameter, and manufacturers often place more capacitors than required just because of current limitation on the capacitors. The value of the current depends on the application, and the maximum allowed value by the capacitors is 19,1 A at 40°C or 8,2 A at 85°C. Our experience shows that this sizing fulfils almost all applications in the range of power addressed by the Power Electronics Teaching System.

Why is the current limited in the capacitors

The equivalent model of a capacitor is given below. For a given current, the losses are approximately $R_s \cdot I^2$, and heat up the core of the capacitors. The LTE (Life Time Expectancy) is highly dependant on the hot spot temperature, according to a rule of the type,

$$K \cdot 2^{\frac{(T_{max} - T_{hs})}{10}}$$
 where T_{Max} is the maximum temperature allowed, and T_{hs} the Hot Spot Temperature (inside temperature). Reaching an internal value of more than 85-90°C may not only considerably reduce the lifetime of the product, but may also lead to explosion risks. There are different capacitor technologies, but today the electrolytic type is the best fitted to the range of power and voltage of most applications in power electronics (from 1 kW to 1 MW and 200 V_{DC} to 1000

Figure 4 : The SKD 51 rectifier module

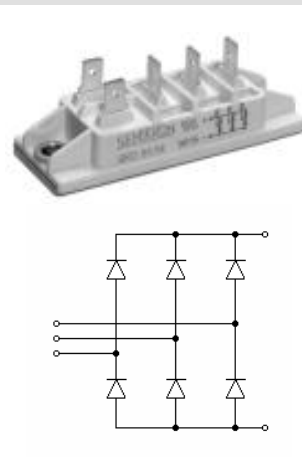


Figure 5 : SKM 50 GB 123 D, dual IGBT module

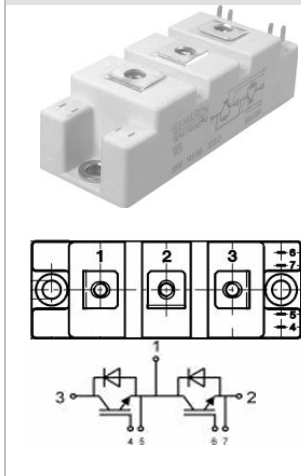
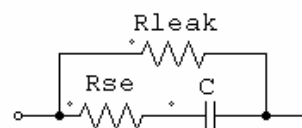


Figure 6 : 1st order equivalent electrical model of an electrolytic capacitor



V_{DC}). This is due to their high capacitance, high voltage and medium current. Their main limitations come from a relatively high internal resistance R_{se} , which limits the RMS current – which has a direct effect on the lifetime. Some mounting technologies propose to dissipate the heat from inside the capacitor to a heat sink, or by creating an air circulation around the capacitors.

How to put capacitors in series

When forcing a constant voltage to ideal capacitors put in series, the capacitor can be considered as an open circuit, and the voltage should be equally shared between the capacitors. However, a parasitic leakage resistor (R_{leak}) causes a leakage current inside the capacitors at no load. In the case of 2 capacitors in series (or more), the equivalent model will then be a dividing bridge whose voltages are defined by the ratio of the leakage resistances in series. As the values R_{leak} are highly variable, since they are a consequence of imperfections in the capacitor and the manufacturing process, the voltages may vary widely, leading to a dangerous steady state DC voltage on one capacitor. Attention: Applying a DC voltage higher than its rated voltage to an electrolytic capacitor may lead to its destruction by explosion. To avoid differences in the voltage across capacitors, each capacitor must be connected in parallel to a balancing resistor, whose value must be much smaller than R_{leak} (about $1/10^{th}$). This resistor value is more accurate and stable, hence the voltage balance is much better. The principle of no-load charging is shown here below, using a realistic 50% internal parasitic resistance difference.

Figure 7 : Voltage sharing without balancing resistors

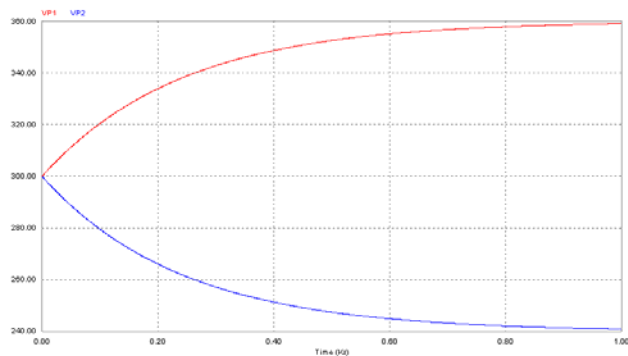
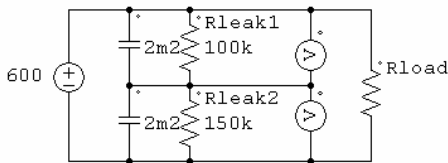
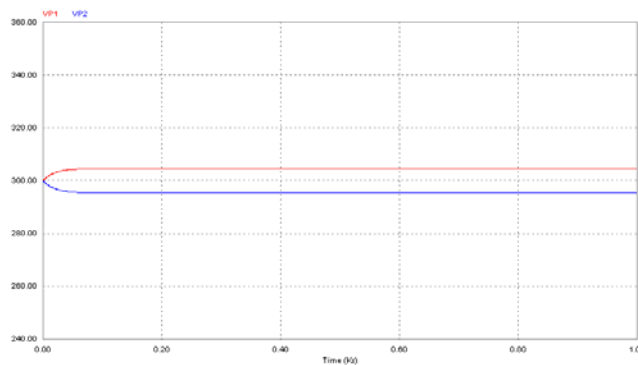
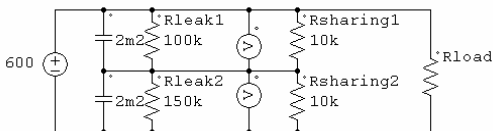


Figure 8 : With balancing resistors



Moreover, for safety purposes, these resistors discharge the capacitors when no energy is supplied to the capacitors from the network, or the load. However, it is highly recommended to have a discharging device, since the discharge time constant of the capacitor is $22 \text{ k}\Omega \times 2200 \text{ }\mu\text{F} = 46.2 \text{ s}$.

The switching cell

If high currents are switched fast then voltage overshoots occur which can destroy the switching power

semiconductor if these overshoots exceed the maximum rated voltage (here 1200V).

Figure 9 : Top IGBT ON

Energy is stored in the parasitic inductances

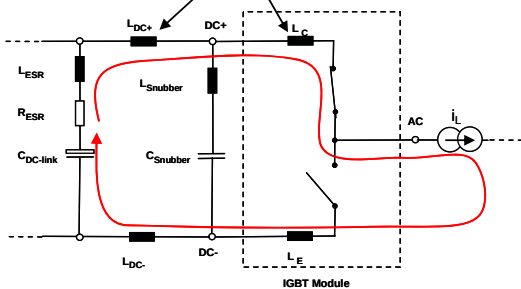
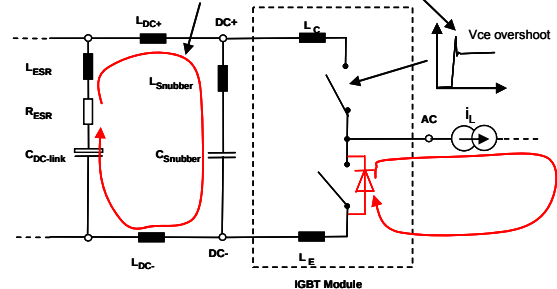


Figure 10 : Top IGBT turned OFF

Energy needs to be dissipated



This voltage overshoot is caused by the energy stored in the magnetic field of the current path (e.g. DC-link connections). It is linked by the value of the total parasitic inductance or stray inductance L_S ($E=0,5 \cdot L_S \cdot i^2$). L_S is the sum of all parasitic inductances. The voltage ($V=L_S \cdot di/dt$) may exceed the maximum blocking voltage of the power semiconductor (V_{CES} , V_{RRM} ...) because it is added to the DC link voltage. The first countermeasure is a good low inductive DC link design (the DC bus bar) to keep the

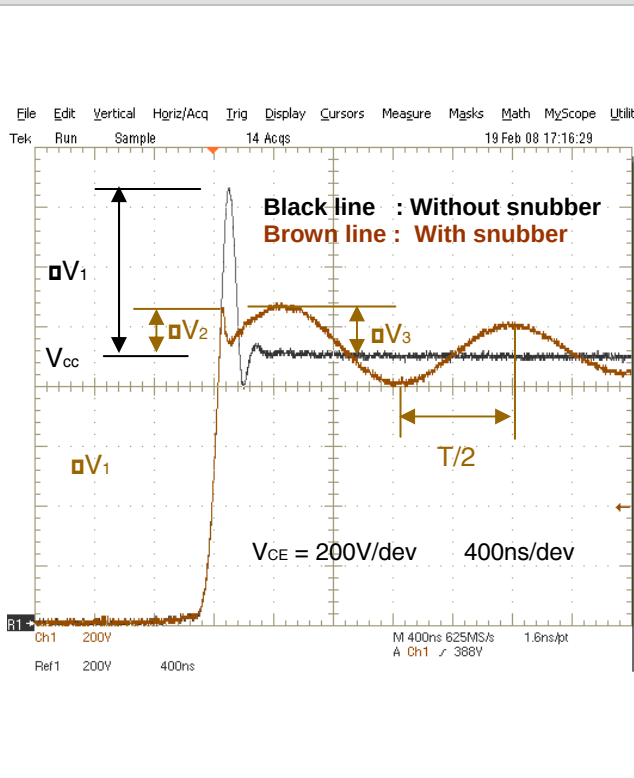
voltage applied on the semiconductor low. This is done by means of a laminated bus bar system (sandwich of +DC, -DC metal sheets and an insulation layer between) and short connections between the voltage source (DC-link capacitor) and power semiconductor. In addition, snubber capacitors are recommended, which should be mounted directly on the DC-link terminals of each IGBT module. This snubber works as a low-pass filter and "suppresses" the voltage overshoot.

The snubber capacitors

They are placed as close to the IGBT module as possible to minimize the inductance between the switches and the capacitor. The waveform below shows a comparison of the voltage across an IGBT at turn-off, with and without snubber capacitor. The effect of voltage spike reduction

can be clearly seen. The snubbers limit the over-voltages during commutations and as a consequence reduce the losses. They also protect the semiconductors against destructive overshoots during short-circuits cut-off.

Figure 11 : Typical waveform of VCE voltage on IGBT at switching off



$$\Delta V_1 = \Sigma L \cdot di_c / dt$$

$$\Delta V_2 = (L_C + L_E + L_{Snubber}) \cdot di_c / dt$$

$$\Delta V_3 \leq \sqrt{\frac{L_{DC-Link} \cdot i_c^2}{C_{Snubber}}}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{DC-Link} \cdot C_{Snubber}}}$$

$$\Sigma L = L_C + L_E + L_{DC+} + L_{DC-} + L_{ESR}$$

$$L_{DC-Link} = L_{DC+} + L_{DC-} + L_{ESR}$$

Figure 12 : Low inductance snubber capacitors for mounting on IGBT modules



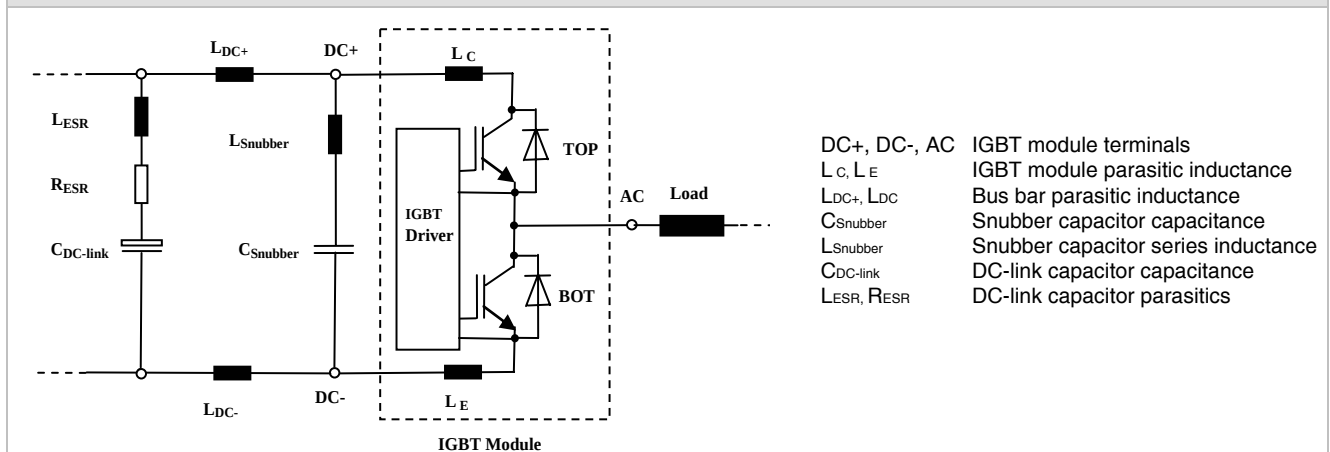
The bus bar

A low inductance laminated bus bar is used to connect the DC link capacitors to the inverter. The DC capacitors should be considered as a pure voltage source. Therefore the construction of the bus bar must have the minimum level of parasitic inductance. The laminated bus

bar is made of 2 conductive metal plates (DC+ and DC-), with a large surface facing each other, separated by a thin isolating film, their inductance is much smaller than a wire connection.

In practice, the inductance of the bus bar can be derived from the overshoot of V_{CE} at switch-off.

Figure 13 : Equivalent circuit diagram of IGBT module connected to DC-link and snubber capacitor



The thermal protection devices

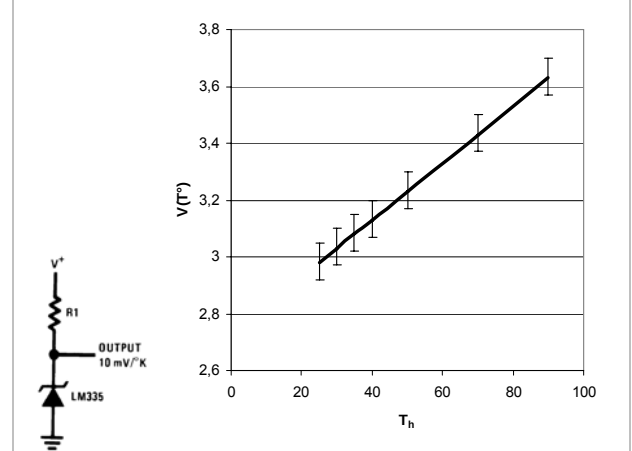
The Normally-On thermal contact switch

Playing the role of a re-usable thermal fuse, this is an electrical contact, mechanically closed when its temperature is below the threshold temperature (71°C), and open when beyond. Practically, it is recommended to connect it in series with the driver power supply to stop the application in case of overheating. Its purpose is generally to detect the defect of the fan or abnormal long term current overload. After cooling down, it comes back to an ON position 20°C under its threshold value.

The temperature sensor

The LM335Z from National Semiconductor (see data-sheet link <http://cache.national.com/ds/LM/LM335.pdf>) is an integrated circuit dedicated to precision temperature measurement. It is placed into the heat sink as close as possible to the heat source (the semiconductors). This measuring point serves as a reference point for heat sink temperature and it is referred to as T_h . One possible application is to make an estimation of the power losses P , thanks to the formula $P = \Delta T \cdot R_{th}$, where ΔT is the temperature difference between the heat sink and the ambient air, and R_{th} is the thermal resistance of the heat sink P3/265F (96,2 K/kW). The voltage rise

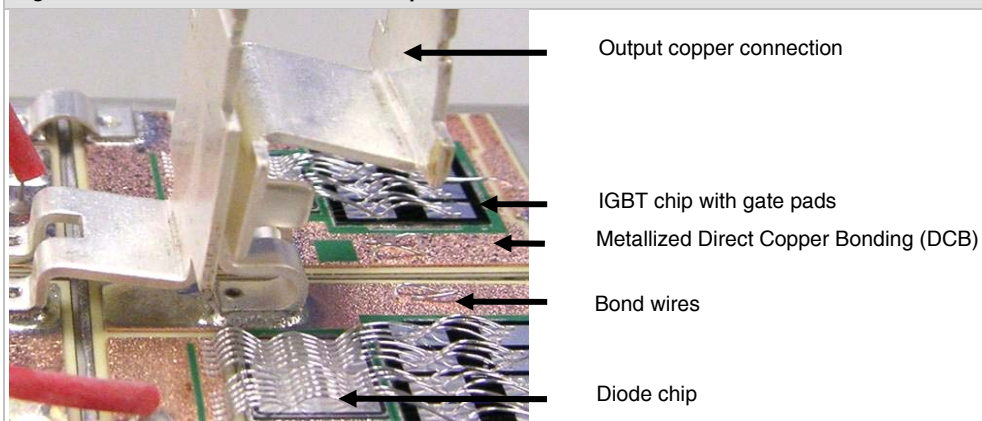
Figure 14 : Temperature sensing principle and characteristic



across the probe is proportional to the temperature, in the range of 10 mV/°C. The curve on **Figure** should be re-calibrated at 25°C for better accuracy. The test certificate gives the voltage value for a given temperature, so the temperature T_h can be identified at any instant.

The IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) module

Figure 15 : Internal construction of the power module



As time passes, the IGBT is becoming the “all-purpose” component and prevails over all other technologies. In particular, its capabilities in voltage, current and frequency make it ideal for motor drive applications. The increase of its voltage range makes it suitable to replace the GTO in many traction applications, and the progress made in the reduction of the losses and improving the

switching behaviour allows to replace the MOS – often used when high frequency is needed – e.g. in resonant inverters and Uninterruptible Power Supplies (UPS). They even tend to replace diodes and thyristors to realize controllable and low harmonics content rectifiers and motor-starters.

The reasons for its success come directly from its structure.

- It is relatively easy to drive. Similar to the MOSFET, the IGBT is controlled by a voltage, not a current, the drivers have become much simpler and cheaper compared with thyristors or BJTs for example.
- For a given voltage class (600 V for example) and a given current, the IGBT chip is smaller than the MOS's, as a consequence the internal gate capacitance is smaller, hence the driver power supply is cheaper. In addition, the saturation voltage (voltage drop between collector and emitter of the transistor) is lower than that of the MOS.
- The IGBT can be turned ON and OFF.
- Low firing current, average and instantaneous
- Good trade-off (High voltage, high current, high frequency)
- Short-circuit capability

Switching the IGBT

The IGBT is triggered by charging the gate, which is done by applying a voltage across the gate and the emitter (Figure). At first estimation, charging the IGBT can be approximated to charging an RC load, where R is roughly the gate resistor determined by the user and C is determined by the component structure. In power electronics, the IGBT transistor is used for switching, not for amplification, and especially for hard switching purposes. Therefore the IGBT works only in saturated mode. It is turned ON when the V_{GE} voltage becomes higher than a threshold value (typically 5.5 V for the SKM 50 GB 123D). These modules are optimized for a $-15/+15$ V control signal, which the SKH1 22 A (driver) is able to deliver, to ensure the best dynamic response from the IGBT.

Figure 16 : gate charge and discharge $V_{ge}(t)$, switching ON and OFF

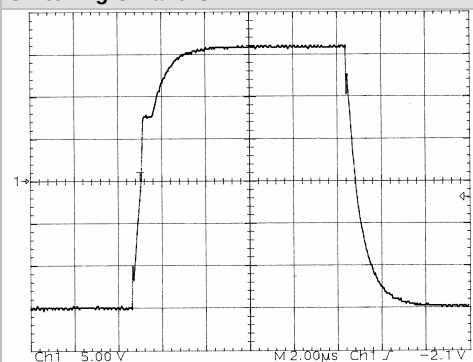
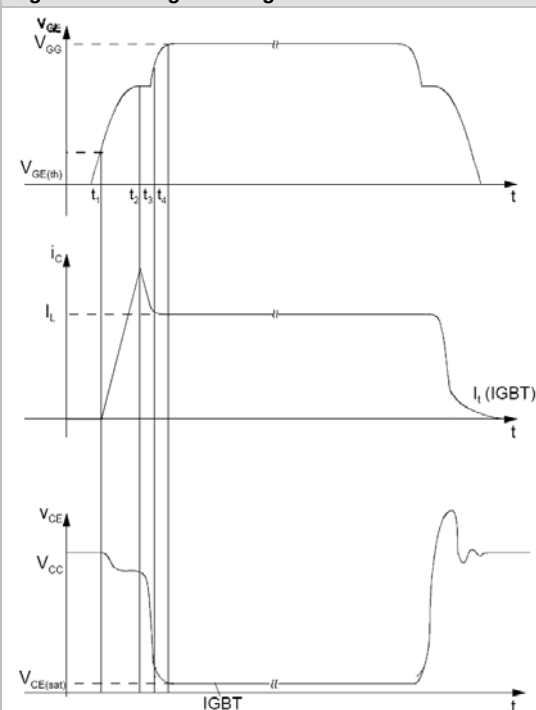


Figure 19 : The gate charge characteristic



Turn-on: 0...t₁ (blocked transistor)

Gate current will be triggered by applying a control voltage. Up to the charge quantity Q_{G1} the current i_G solely charges the gate capacitance C_{GE} . The gate voltage V_{GE} rises. As V_{GE} is still below the threshold voltage $V_{GE(th)}$, no gate current will flow during this period.

Turn-on: t₁...t₂ (rise of gate current)

As soon as V_{GE} has reached $V_{GE(th)}$ -level at t_1 , the transistor is turned on, first passing the active region. Gate current rises to I_L -level (ideal free-wheeling diode) or even exceeds I_L - as indicated in the switching pattern figure for a real free-wheeling diode. Similarly, V_{GE} , which is connected to the collector current in the active region by the transconductance g_{fc} with $I_D = g_{fc} * V_{GE}$, will increase up to the value $V_{GE1} = I_D / g_{fc}$ (time t_2). Since the free-wheeling diode can block the current only at t_2 , V_{CE} will not drop considerably up to t_2 . At $t = t_2$ charge Q_{G2} has flown into the gate.

Turn-on: switching interval t₂...t₃ (transistor during turn-on)

When the free-wheeling diode is turned off, V_{CE} will drop almost to on-state value $V_{CE(on)}$ by time t_3 . Between t_2 and t_3 drain current and gate-source voltage are still coupled by transconductance; therefore, V_{GE} remains constant. While V_{CE} is decreasing, the Miller capacitance C_{GC} is recharged by the gate current i_G with the charge quantity ($Q_{G3}-Q_{G2}$). By $t = t_3$ charge Q_{G3} has flown into the gate.

Turn-on: t₃...t₄ (saturation region)

At t_3 the transistor is turned on, its curve has passed the pinch-off area to enter the ohmic area. V_{GE} and I_C are no longer coupled by g_{fs} . The charge conducted to the gate ($Q_{Gtot}-Q_{G3}$) at this point affects a further increase of V_{GE} up to the gate control voltage V_{GG} . Since the collector-emitter on-resistance $R_{CE(on)}$ depends on I_C and V_{GE} , the on-state voltage $V_{CE(on)} = I_C * R_{CE(on)}$ may be adjusted to the physical minimum by the total charge quantity Q_{Gtot} conducted to the gate. The higher the collector-emitter voltage V_{CE} (or commutation voltage), the bigger the charge Q_{Gtot} required to reach a certain gate-emitter voltage, see $V_{GE}(Q_G)$ curve.

Turn-off

During turn-off the described processes are running in reverse direction; the charge Q_{Gtot} has to be conducted out of the gate by the control current. For approximations to determine the gate charge quantity required for turn-off, the gate charge characteristic in the $V_{GE}(Q_G)$ curve may be used.

Figure 17 : Equivalent commutation cell

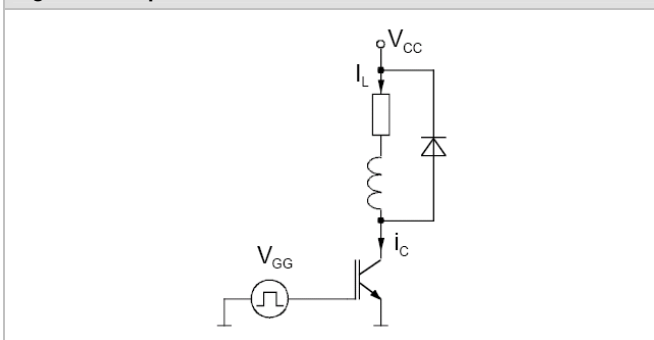
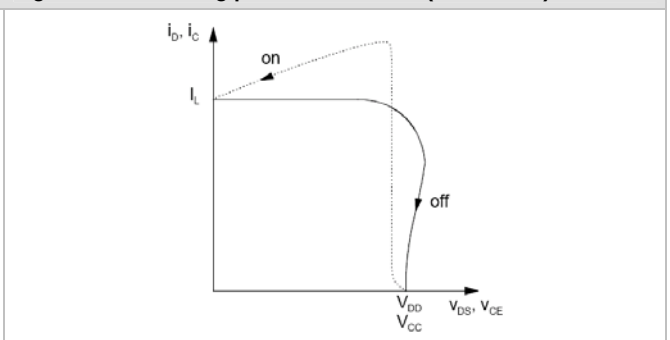


Figure 18 : Switching pattern of an IGBT (and a MOS)



Snubber or snubberless

As shown in Figure , the Safe Operating Area (SOA) of a switching IGBT is square, which means that there is no need to pull the voltage down to zero before reapplying the current or reverse voltage. This means that the IGBT can be switched at full current AND at full voltage. As far as switching characteristics of the IGBT alone are concerned, there is theoretically no need for a snubber, unless there is a drastic need for reducing the switching

losses. However, as explained in 0, a snubber is required for dealing with short-circuit and the parasitic inductances of the complete switching loop. External elements force us to use a snubber, and the snubber will be designed according to the converter mechanical design. The capacitor snubber is only used for reducing the over voltages.

The IGBT in short-circuit

Figure 20 : Safe Operating Area of the IGBT

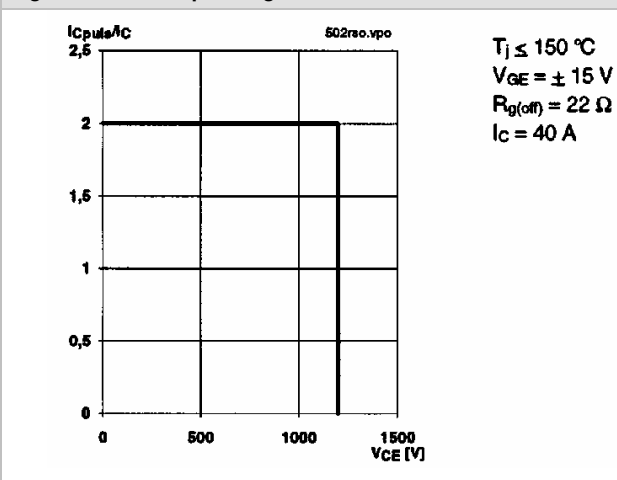


Figure 21 : Short-circuit SOA

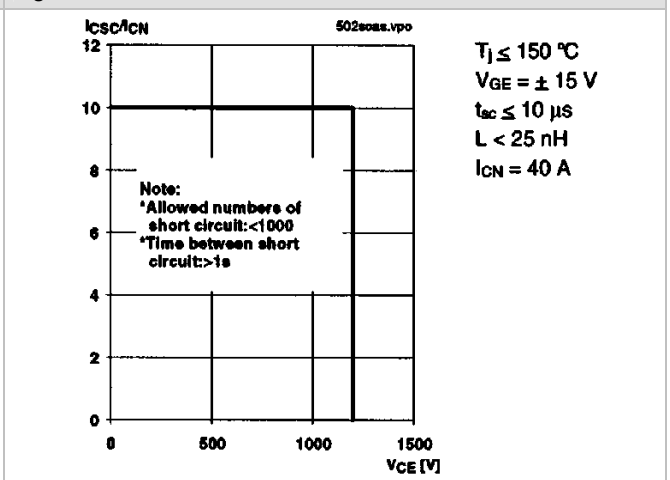


Figure 21 shows the capability of the IGBT in short-circuit. The IGBT is able to withstand 10 times the rated current (10 x 50A for the SKM 50 GB 123 D) at full DC voltage. However, this short-circuit must be detected by the driver and last for less than 10 μs. Over this duration, there is a risk of thermal breakdown. The driver SKHI 22 A is aimed to detect it and to open the IGBT; the short-circuit is detected and cut-off within about 5 μs. As a comparison, the reaction of fuses would be hundreds of times slower. The current is self-limited due to the intrinsic structure of the IGBT to about 10 times the

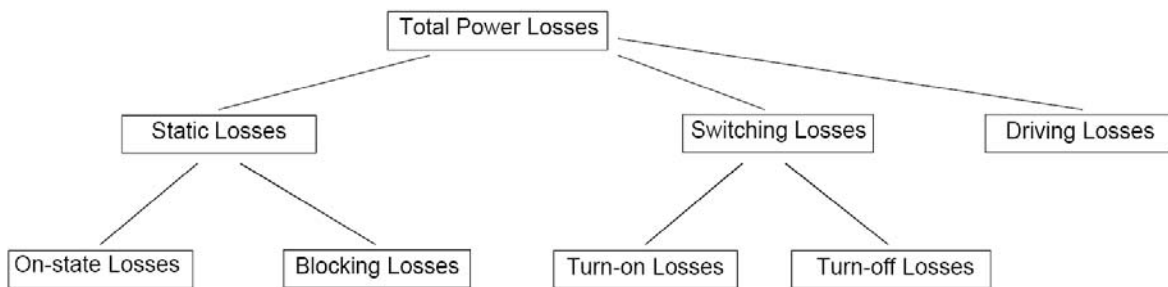
nominal current value. Once this current is reached, the IGBT starts to de-saturate, and the voltage across collector and emitter increases. The power absorbed by the IGBT can be calculated in such cases (some hundreds of Amps x some hundreds of Volts on a 30 mm² silicon chip). The very good short-circuit capabilities of the IGBT ensures good protection of the often very expensive connected equipment, in which the power converter price is small. The IGBT and its driver are very closely linked and the driver must be optimized.

The calculation of losses

The origin of losses

Losses are a heat power source generated by imperfections within the devices. We can identify different types of losses; dynamic and static, *switching and*

conduction losses (Blocking losses are always neglected).



The losses can always be expressed as : $P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T V_{CE}(t) \cdot i(t) dt$, where T is the period of the signal.

Figure 22 : Turn-On losses are the energy dissipated at each switching-on of the device

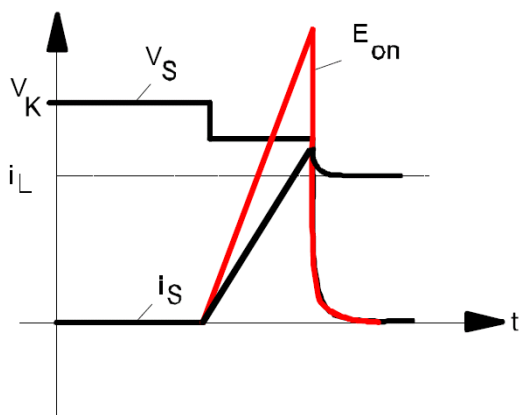


Figure 23 : Turn-Off losses are the energy dissipated at each switching-off of the device

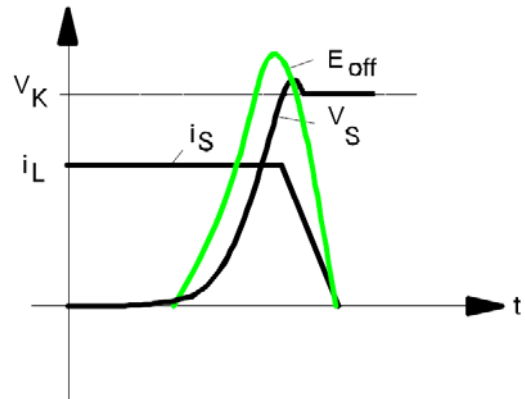
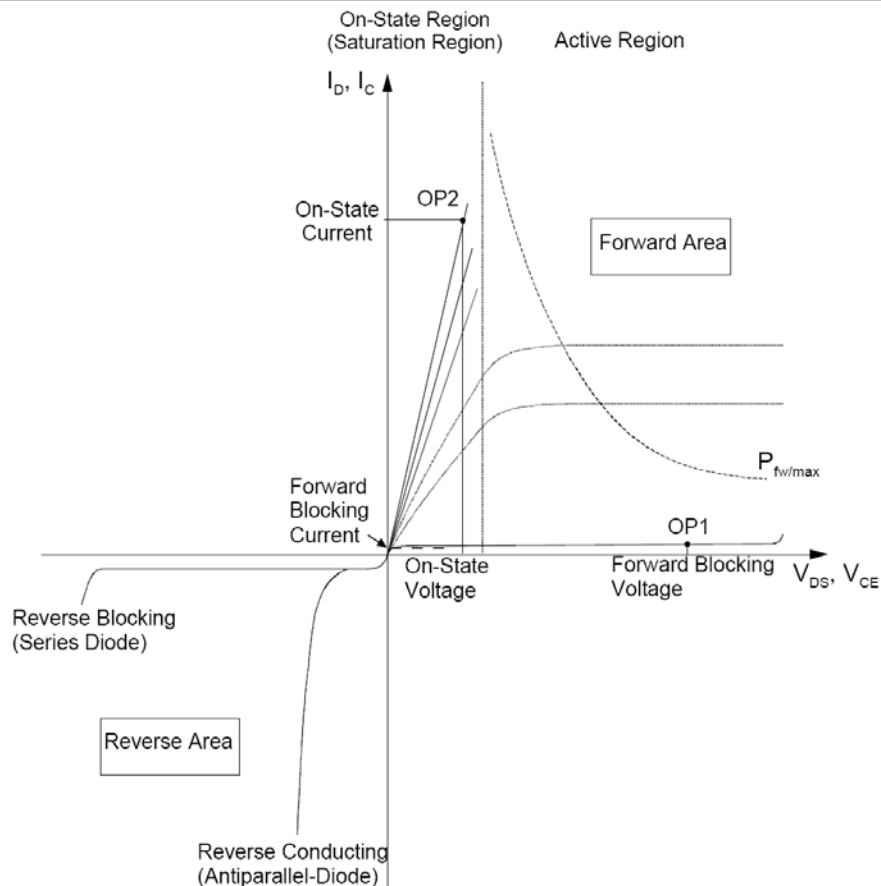


Figure 24 : Basic output characteristic of a power transistor module (diode + IGBT, blocked and conducting)



Why are power losses a problem

One of the main challenges for the power electronics designer is to deal with the thermal aspect. Due to semiconductor imperfections, a semiconductor can never be a pure switch (infinite resistance when OFF, zero when ON). When a device sees a voltage difference and a current circulates through it, power losses are generated which appear as heat, and must be removed as efficiently as possible. It is generally identified that the silicon temperature, called *junction temperature*, T_j , shall never reach or surpass the maximum allowed T_{jmax} . Beyond this T_{jmax} , there is a great risk of failure in the bond wire connections, also the electrical characteristics of the component can change (e.g. rise of the leakage

current in the open IGBT): there is also a risk of destruction. This T_{jmax} is typically 150°C . Taking into account the disparity of components (although the process has become more and more reliable and some devices can reach today higher temperatures), one should respect a safety margin. On the other hand, taking too much safety margin is detrimental to the economic margin since it would mean more silicon, therefore higher cost. For the IGBTs, it is safe and economically viable to respect a 125°C maximum junction temperature. In addition to that, losses reduce the overall efficiency. It is usual to reach 95% to 98% efficiency with IGBT converters.

The conduction losses

They are the result of the product of current and voltage (collector-emitter) during the conduction period. The component static characteristics can be extrapolated from the curve. In our case, $V_{GE}=+15\text{ V}$, and the curves can be approximated by 2 half-lines (dot-lines). The half-line $V_{CE} = V_{CE0} + R_{ce} \cdot I_C$ is equivalent to considering the power dissipation of a voltage source and a series resistance.

The expression for forward power losses become:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} V_{CE0} \cdot i(t) + R_{ce} \cdot i^2(t) dt$$

$$= \frac{1}{T} \left[V_{CE0} \int_0^T i(t) dt + R_{ce} \int_0^T i^2(t) dt \right]$$

$$= V_{CE0} \cdot I_{av} + R_{ce} \cdot I_{rms}^2$$

V_{CE0} and R_{ce} can be determined graphically from the curves, and the currents depend on the application.

Application example: Buck Chopper with DC output current

If the output inductor of a step-down converter is large enough, it can be considered that the output current is almost DC. Neglecting the ripple current ($i_{LH}-i_{LL}$), one can affirm $i(t)=i_{Lavg}$. Therefore only $V_{CE}(t)$ is variable.

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T V_{CE}(t) \cdot i(t) dt$$

$$I_{Tavg} = \alpha \cdot i_{Lavg}$$

$$I_{Trms} = \sqrt{\alpha} \cdot i_{Lavg}$$

$$\text{Where } \alpha = \frac{t_1}{T}$$

According to these results, we can conclude :

$$P_{Cond(igbt)} = R_{CE} \cdot \left(\sqrt{\alpha} \cdot i_{Lavg} \right)^2 + V_{CE0} \cdot \alpha \cdot i_{Lavg}$$

Figure 45 : Static characteristics

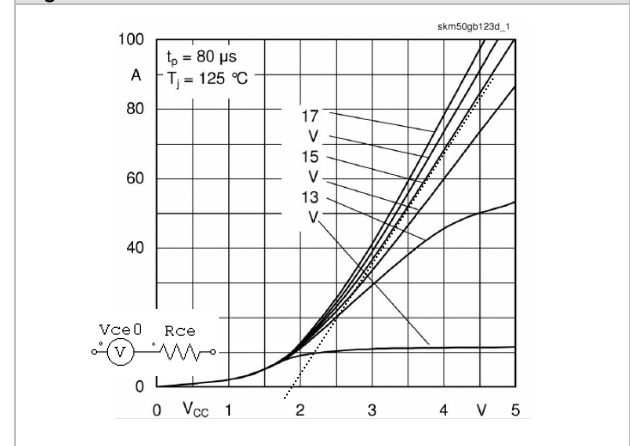


Figure 26 : Buck chopper principle

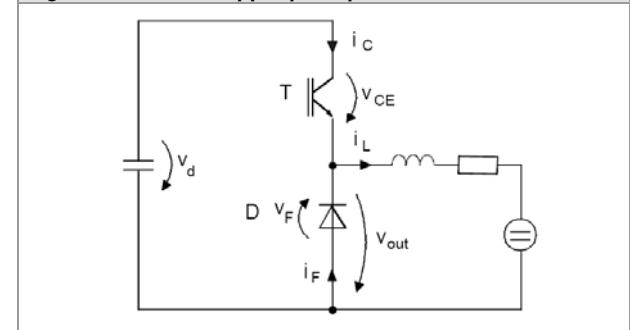
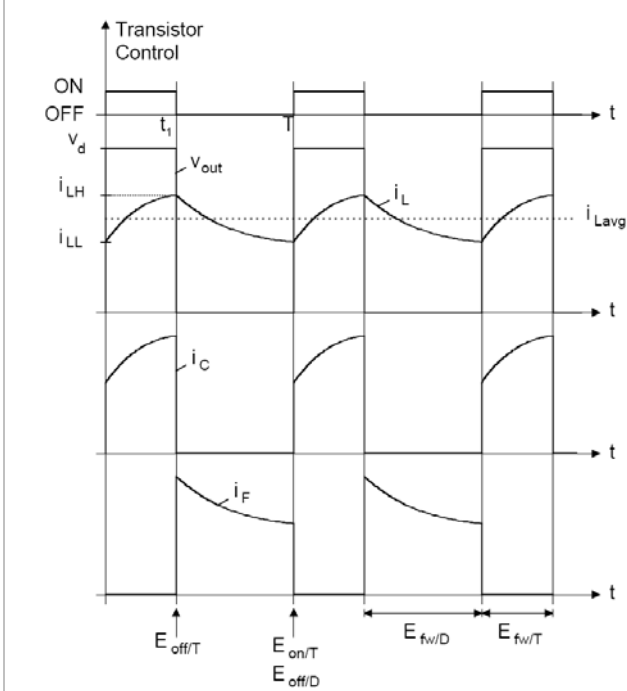


Figure 27 : Buck chopper electrical curves



Application example: 3 phase PWM inverter

Let's call m the degree of modulation, which can be understood as the voltage utilization of the converter.

$$m = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{U_{peak}}{U_d}$$

In case of a pure sinusoidal reference voltage, the degree of linear modulation will be $0 \leq m \leq 1$

Under the following assumptions,

- transistor and diode switching times are neglected;
- Thermally constant junction temperatures (valid for $f = 50$ Hz);
- Linear modulation of the converter;
- Switching frequency ripple of the AC current is negligible;
- Forward characteristics of semiconductors are linear $V_{CE} = V_{CE0} + rI$,

one can prove that for a 3 phase inverter the conduction losses are expressed by

$$P_{cond}(IGBT) = \frac{1}{2} \left(V_{ce0} \cdot \frac{I}{\pi} + r \cdot \frac{I^2}{4} \right) + m \cdot \cos \varphi \cdot \left(V_{ce0} \cdot \frac{I}{8} + \frac{rI^2}{3\pi} \right)$$

And

$$P_{cond}(Diode) = \frac{1}{2} \left(V_{d0} \cdot \frac{I}{\pi} + r \cdot \frac{I^2}{4} \right) - m \cdot \cos \varphi \cdot \left(V_{d0} \cdot \frac{I}{8} + \frac{rI^2}{3\pi} \right)$$

The switching losses

During the commutations, losses appear due to the switching pattern, as explained on Figure . Please note the overvoltage when turning the IGBT OFF, which must be kept under the maximum value of the component class (1200 V). Measurements performed in the SEMIKRON laboratory to evaluate these losses resulted in the curves of Figure , showing the energy dissipated during the commutations ON and OFF in the semiconductor (IGBT in this case). This figure shows the energy involved when switching ON (E_{ON}) and OFF (E_{OFF}), at a given voltage (600 V), and gate resistor (22 Ohms), as a function of the current. In our case, the measures of current dependence show that the switching energy can be approximated as a linear (even proportional) function of the current, which means for a first approach that these energies are proportional to the current. The expression of the switching energies can be expressed :

$$(E_{on} + E_{off})_{(U, R_g)}(I) = k \cdot I$$

Using the same principle, it has been measured and we can approximate that, for this chip technology:

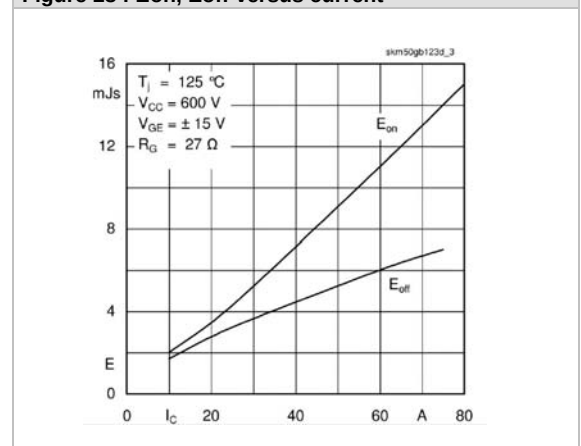
$$(E_{on} + E_{off})_{(I, R_g)}(U) = k' \cdot U$$

Therefore for a constant current,

$$P = f_{sw} \cdot (E_{on} + E_{off}) \text{ where the reference K is given by } K = \frac{(E_{on} + E_{off})(50A, 600V)}{50A \cdot 600V} \text{ for our semiconductors}$$

$$= f_{sw} \cdot I \cdot U \cdot K$$

Figure 28 : Eon, Eoff versus current



Application example: Buck Chopper with DC output current

As expressed earlier, if we consider I_{Lavg} as constant,

$$P = f_{sw} \cdot (E_{on} + E_{off})$$

$$= f_{sw} \cdot I_{Lavg} \cdot U \cdot K$$

Application example: 3 phase PWM inverter

Based on the same principle, only the current varies in the previous expressions, replaced by the averaged commutated

value : $P_{ON+OFF(IGBT)} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{rms}}{\pi} \cdot f_{sw} \cdot U \cdot K$

From losses calculation to temperature estimation

The losses must be dissipated to keep the component at a safe temperature. This is why a cooling device, or *heat sink*, is used. When a material is submitted to a heat transfer, we can define the *thermal resistance* between 2 points of this material as the ratio of the temperature rise between these 2 points and the heat power. This property can be seen as the equivalent of electrical resistance to the current. In thermal/electrical equivalence,

- Temperature (K) $\Leftrightarrow$ voltage (V)
- Power losses (W) $\Leftrightarrow$ current (A)
- Thermal resistance (K/W) $\Leftrightarrow$ resistance (Ω)

As for the electrical voltages, we will evaluate the temperature drops

- ambient to heat sink, ΔT_{ha}
- heat sink to case, ΔT_{ch}
- case to junction, ΔT_{jc}

All the internal construction materials have a thermal resistance, and all interfaces between them add another thermal resistance. In order for it to be as small as possible, and therefore to improve the heat transfer from the chip to the heat sink and to the ambient, the following principles are used:

- From the thermal perspective, all material interfaces should be as thin as possible as the thermal resistance is proportional to the thickness of the material. The new SkiiP and MiniSKiiP products from SEMIKRON have addressed this problem by removing the 3 mm copper base plate and pressing the ceramic directly onto the heat sink.
- Thermal grease reduces the contact thermal resistance between the module and the heat sink, by filling the irregularities between both surfaces.
- The heat sink must be optimized: a large exchange surface with the ambient will improve the exchange coefficient with air. A bigger mass will have a greater capacitance for storing the heat, reducing the temperature ripples, but will have a higher gradient of temperature.

Figure 29 : internal construction of a power module

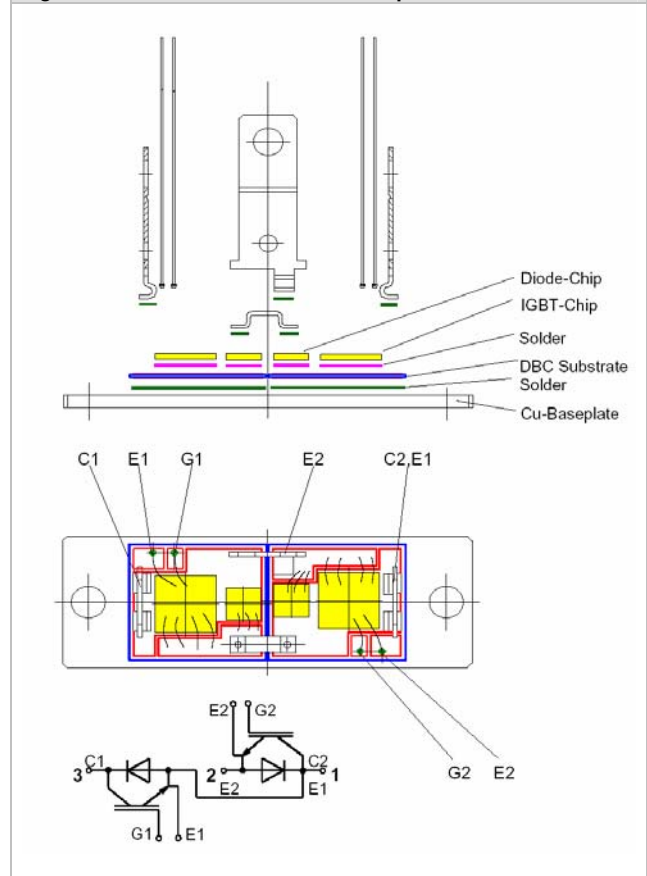
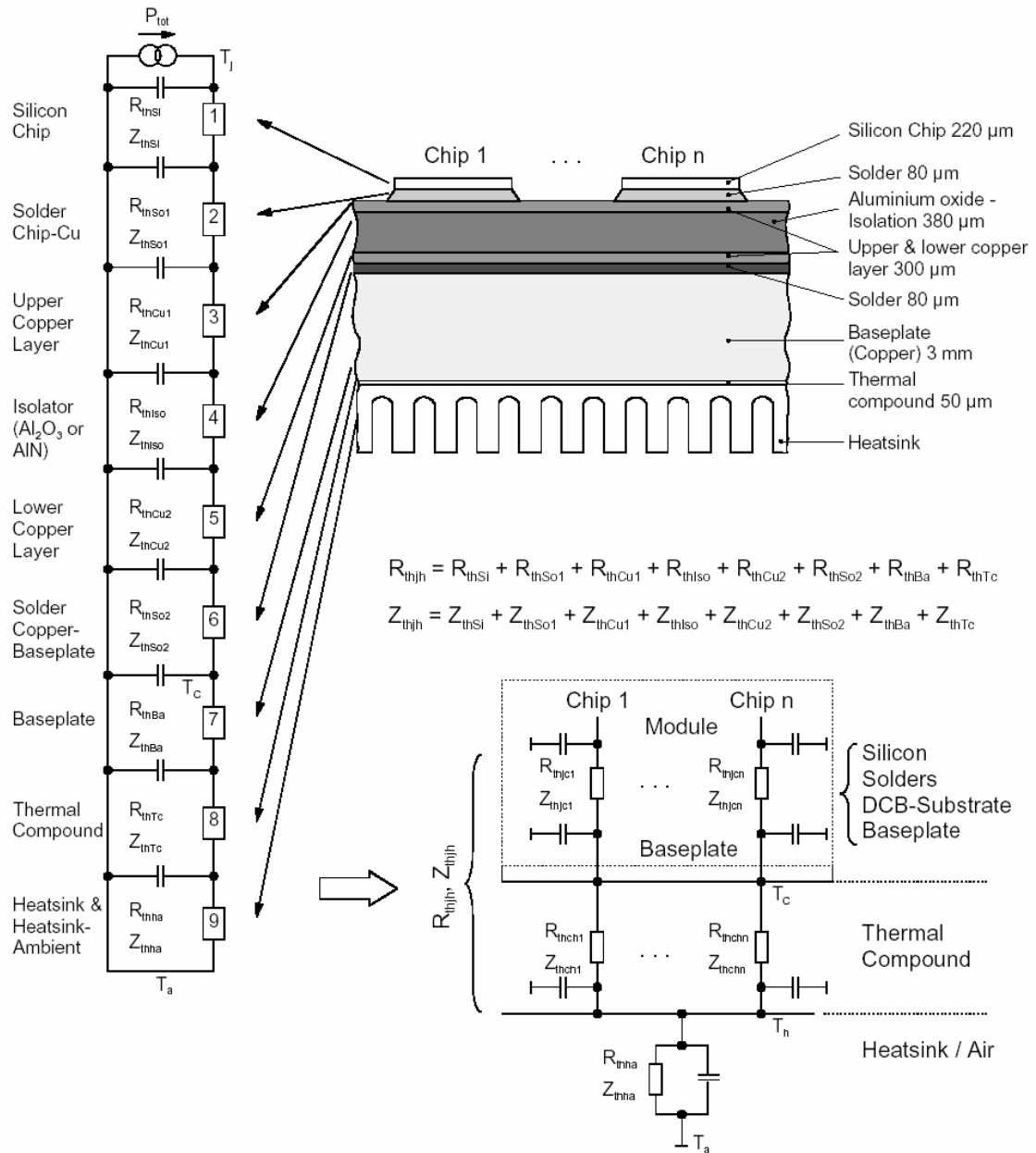


Figure 30 : Complete thermal cascade model



Modelling – thermal-electrical equivalence

Figure 31 : thermal impedance

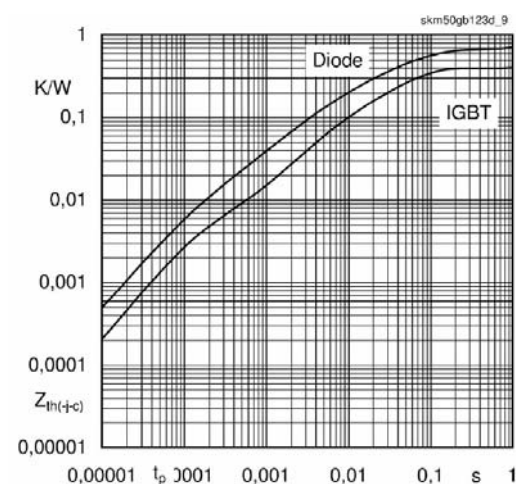
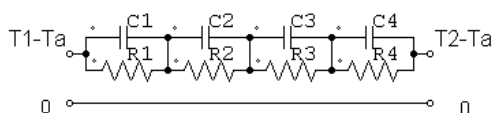


Figure 32 : electrical equivalent model



The component on its heat sink can be modelled as a succession of thermal resistances, as indicated before:

- Junction-case thermal resistance ($R_{th\ jc}$)
- case-heat sink thermal resistance ($R_{th\ ch}$)
- heat sink-ambient thermal resistance ($R_{th\ ha}$)

However, this model is only an approximation for steady state. Because of the material property, from **Figure 31**, it can be noted that the thermal impedance is time-dependant. We can model each transient thermal impedance curve as a RC network cascade, such as the one displayed **Figure 31 : thermal impedance**. Thanks to the values given in the data-book, it is possible to determine with good accuracy all temperatures, even for very short transients. For times greater than 0.5 s, it's not relevant any more to consider the impedances of the semiconductors, only resistances. This approach is fundamental for the heat sink, as the time constants are much longer for this big mass of aluminium. Here are the values for the heat sink of the Power Electronics Teaching System:

τ_i (s)	0.5	70	180	2000
R_{ha-i} (K/W)	$3.44 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$7.08 \cdot 10^{-2}$	$5.95 \cdot 10^{-3}$

At any time, the thermal impedance can be approached with the formula

$$Z_{th-ha}(t) = \sum_i R_{ha-i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right)$$

References

- (1) SEMIKRON DATA BOOK : www.semikron.com
- (2) Application Manual, Power Modules, First Edition, U. Nicolai, T. Reimann, J. Petzoldt, J. Lutz, Ed P. Martin, SEMIKRON International, 2000. ISBN 3-932633-46-6. Available from the Internet www.semikron.com under the application link.
- (3) Application Note, First Edition 1998, Power Electronics Teaching System, SEMIKRON
- (4) Application Note, AN 7006, 2008, J. Lamp, SEMIKRON

Important Note:

All data and information referred to in this data book are based on the best of our knowledge and state-of-the-art technology available at the time of printing and are only intended to be used for information purposes. The specifications of our components may not be considered as an assurance of component characteristics. The use of SEMIKRON products in life support appliances and systems is subject to prior specification and written approval by SEMIKRON.

All product specifications and terms of delivery are subject to modification. For updates of our datasheets as well as information on our latest products please refer to www.SEMIKRON.com. Sales and delivery of SEMIKRON products are subject to our "General Terms and Conditions of Sale". Please refer to www.SEMIKRON.com, regarding applicable power semiconductor standards. Reproduction on request is generally authorized on the condition that the source is indicated. Modifications of the data published by SEMIKRON are expressly prohibited. All product specifications and promotion statements are valid for SEMIKRON International GmbH and all SEMIKRON companies of the SEMIKRON group.

© by SEMIKRON International GmbH

SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH
P.O. Box 820251 • 90253 Nürnberg • Deutschland • Tel: +49 911-65 59-234 • Fax: +49 911-65 59-262
sales.skd@semikron.com • www.semikron.com

Annex : SKHI 22 AR data-sheet

SKHI 22 A / B H4 (R) ...



SEMIDRIVER™

Hybrid Dual IGBT Driver

SKHI 22 A / B H4 (R)

Preliminary Data

Features

- Double driver for halfbridge IGBT modules
- SKHI 22A H4 is compatible to old SKHI 22 H4
- SKHI 22B H4 has additional functionality
- CMOS compatible inputs
- Short circuit protection by V_{CE} monitoring and switch off
- Drive interlock top / bottom
- Isolation by transformers
- Supply under voltage protection (13V)
- Error latch / output

Typical Applications

- Driver for IGBT modules in bridge circuits in industrial applications
- DC bus voltage up to 1200 V

1) see fig. 6

2) At $R_{CE} = 36 \text{ k}\Omega$, $C_{CE} = 470 \text{ pF}$,
 $R_{VCE} = 1 \text{ k}\Omega$

Absolute Maximum Ratings			
Symbol	Conditions	Values	Units
V_S	Supply voltage prim.	18	V
V_{IH}	Input signal volt. (High) SKHI 22A H4 SKHI 22B H4	$V_S + 0,3$ $5 + 0,3$	V
$I_{outPEAK}$	Output peak current	8	A
$I_{outAVmax}$	Output average current	40	mA
f_{max}	max. switching frequency	50	kHz
V_{CE}	Collector emitter voltage sense across the IGBT	1700	V
dv/dt	Rate of rise and fall of voltage secondary to primary side	50	kV/ μ s
V_{isolIO}	Isolation test voltage input - output (2 sec. AC)	4000	Vac
V_{isol12}	Isolation test voltage output 1 - output 2 (2 sec. AC)	1500	V
R_{Gonmin}	Minimum rating for R_{Gon}	3	Ω
$R_{Goffmin}$	Minimum rating for R_{Goff}	3	Ω
$Q_{out/pulse}$	Max. rating for output charge per pulse	4 ¹⁾	μ C
T_{op}	Operating temperature	- 40 ... + 85	$^{\circ}$ C
T_{stg}	Storage temperature	- 40 ... + 85	$^{\circ}$ C

Characteristics		$T_a = 25^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified			
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
V_S	Supply voltage primary side	14,4	15	15,6	V
I_{SO}	Supply current primary side (no load)		80		mA
	Supply current primary side (max.)			290	mA
V_i	Input signal voltage SKHI 22A H4 on/off SKHI 22B H4 on/off		15 / 0 5 / 0		V
V_{IT+}	Input threshold volt. (High) SKHI 22A H4 SKHI 22B H4	10,9 3,5	11,7 3,7	12,5 3,9	V
V_{IT-}	Input threshold volt. (Low) SKHI 22A H4 SKHI 22B H4	4,7 1,5	5,5 1,75	6,5 2,0	V
R_{in}	Input resistance SKHI 22A H4 SKHI 22B H4		10 3,3		k Ω
$V_{G(on)}$	Turn on gate voltage output		+ 15		V
$V_{G(off)}$	Turn off gate voltage output		- 7		V
R_{GE}	Internal gate-emitter resistance		22		k Ω
f_{ASIC}	Asic system switching frequency		8		MHz
$t_{d(on)IO}$	Input-output turn-on propagation time	0,85	1	1,15	μ s
$t_{d(off)IO}$	Input-output turn-off propagation time	0,85	1	1,15	μ s
$t_{d(Err)}$	Error input-output propagation time		0,6		μ s
$t_{pERRRESET}$	Error reset time		9		μ s
t_{TD}	Top-Bot Interl. Dead Time SKHI 22A H4 SKHI 22B H4	3,3		4,3	μ s
	no interlock			4,3	μ s
V_{CEsat}	Reference voltage for V_{CE} -monitoring		5 ²⁾	10	V
C_{ps}	Coupling capacitance primary secondary		12		pF
MTBF	Mean Time Between Failure $T_a = 40^{\circ}\text{C}$		2,0		10^6 h
w	weight		45		g

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

Annexe H

Fiche technique du simulateur Opal-RT

SIMULATOR ARCHITECTURE

CONFIGURATION OPTIONS

The OP5600 is available in a number of different configurations that make it easier to integrate into your environment:

Product	Configuration Description
OP5640-I/O	OP5600 RCP/HIL Spartan3 FPGA Processor and I/O Expansion Unit (4U)
OP5640-4	OP5600 RCP/HIL Spartan3 FPGA-based Real-Time Simulator - 4 cores (4U, Xeon E5, 4 Cores, 3.0 GHz, 10M, 16GB, 512GB SSD)
OP5640-8	OP5600 RCP/HIL Spartan3 FPGA-based Real-Time Simulator - 8 cores (4U, Xeon E5, 8 Cores, 3.2 GHz, 20M, 16GB, 512GB SSD)
OP5640-16	OP5600 RCP/HIL Spartan3 FPGA-based Real-Time Simulator - 16 cores (4U, Xeon E5, 2x8 Cores, 3.2 GHz, 2x20M, 2x16GB, 512GB SSD)
OP5640-32	OP5600 RCP/HIL Spartan3 FPGA-based Real-Time Simulator - 32 cores (4U, Xeon E5, 2x16 Cores, 2.3 GHz, 2x40M, 2x16GB, 512GB SSD)
OP5660-4	OP5600 RCP/HIL Virtex6 FPGA-based Real-Time Simulator - 4 cores (4U, Xeon E5, 4 Cores, 3.0 GHz, 10M, 16GB, 512GB SSD)
OP5660-8	OP5600 RCP/HIL Virtex6 FPGA-based Real-Time Simulator - 8 cores (4U, Xeon E5, 8 Cores, 3.2 GHz, 20M, 16GB, 512GB SSD)
OP5660-16	OP5600 RCP/HIL Virtex6 FPGA-based Real-Time Simulator - 16 cores (4U, Xeon E5, 2x8 Cores, 3.2 GHz, 2x20M, 2x16GB, 512GB SSD)
OP5660-32	OP5600 RCP/HIL Virtex6 FPGA-based Real-Time Simulator - 32 cores (4U, Xeon E5, 2x16 Cores, 2.3 GHz, 2x40M, 2x16GB, 512GB SSD)

The following images illustrate the simulator's architecture for each option using assembly views of the simulation hardware components within the OP5600 chassis.

Simulator Architecture Example

The example shown is only to illustrate how the OP5600 is assembled. OPAL-RT strictly prohibits users from opening the OP5600. Opening the unit will render the warranty null and void.

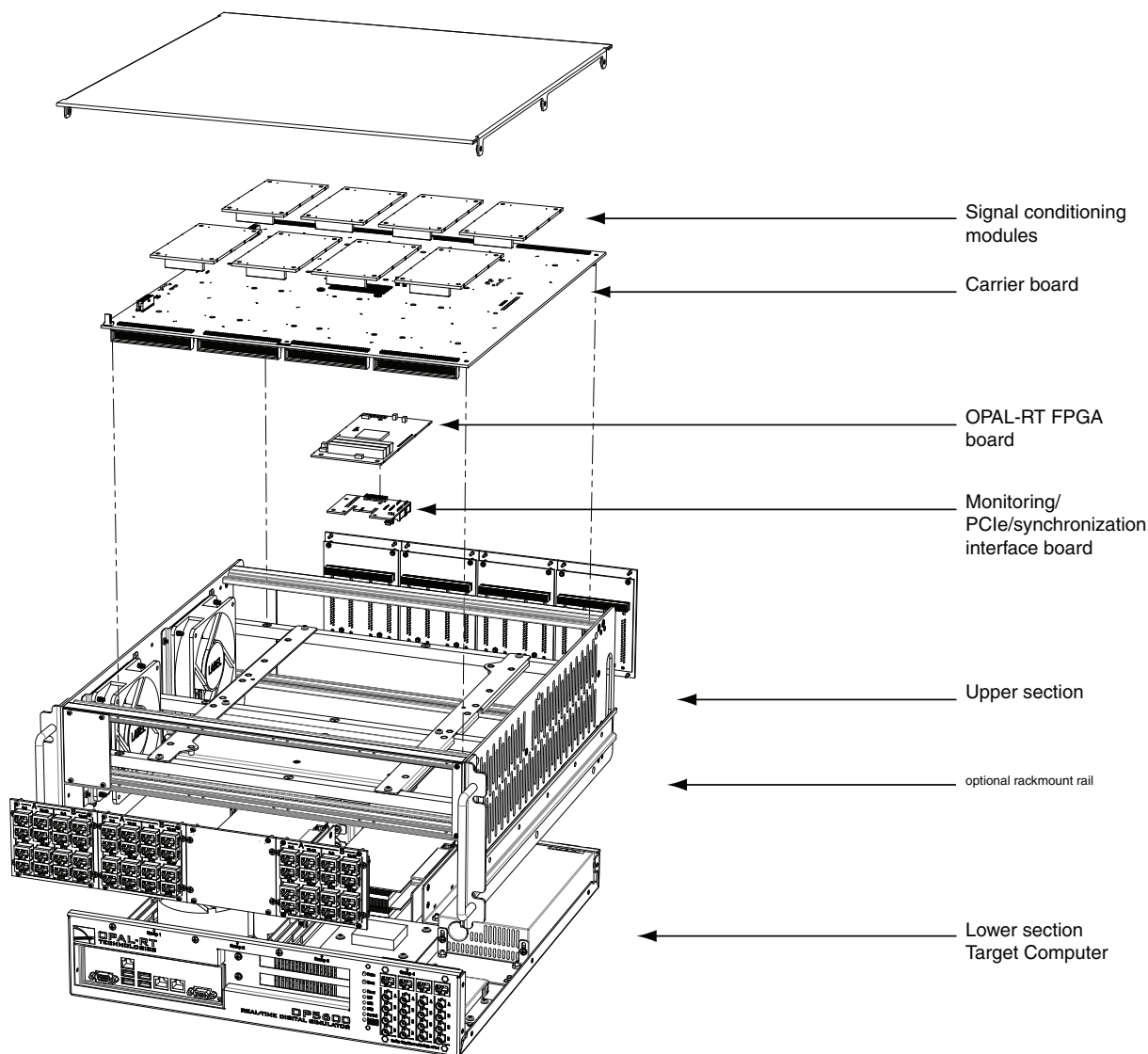


Figure 1: OP5600 with Spartan 3 and target computer

RECEIVING AND VERIFICATION

After opening the package, remove the equipment and components. Make sure that all the items described in “standard hardware” are actually in the box and are undamaged.

STANDARD HARDWARE

The OP5600 real-time simulator includes the following basic hardware:

Item	Description	Part Number
OP5600 simulator with Linux-based real-time O/S	With PC 429-0101-0099	429-0101-0099
	OP5600-OP5142 without PC	429-0101-0100
System Integration binder	RT-LAB or HYPERSIM software CD O/S CD Documentation CD	N/A
Mini-BNC cables (4)	2 m (6 ft 6”) adapter cables for mini-BNC to BNC. 75 Ohms simplex	213-0100-0017
RJ45 cables (5)	61cm (24”) RJ45 cables BLACK 61cm (24”) RJ45 cables GREEN 61cm (24”) RJ45 cables RED 61cm (24”) RJ45 cables WHITE 305cm (120”) RJ45 cable BLUE	213-0100-0040 213-0100-0043 213-0100-0042 213-0100-0041 213-0100-0263
DB37M breakout board	Provides extended space for connections	226-0700-0015
Loopback Kit	DB37 TestBoard Loopback Flat cable Power cable For Quick testing and Troubleshooting	000-0126-0361 000-0113-0737 000-0113-0799
Power cable	1.83 m (6') power cord, black (10A 125V) Power Cord 6ft European (Schuko CEE7/7 to C13) - For Type E and Type F Power Cord 6ft Australia (AS3112 to C13) - Type I Power Cord 6ft Brazil (NBR14136 to C13) - Type N Power Cord 6ft China (GB2099 to C13) - Type I Power Cord 6ft India (IS16A3 to C13) - Type D Power Cord 6ft Switzerland (SEV1011 to C13) - Type J Power Cord 6ft UK (BS1363 to C13) - Type G	213-0100-0308 213-0100-0166 213-0100-0167 213-0100-0182 213-0100-0146 213-0100-0181 213-0100-0147 213-0100-0438
USBA to USBB Cable	6ft. Black USB 2.0 With ML605 only	213-0100-0442
Screws and rubber feet kit	Extra if needed	N/A



OPAL-RT strongly recommends the use of anti-static wrist straps whenever handling any electronic device provided by OPAL-RT. Damage resulting from electrostatic charges will not be covered by the manufacturer's warranty.



Disconnect power before servicing



The OP5600 may be subjected to EMI when installed in proximity to other devices. Make sure to connect the OP5600 ground to the rack to prevent any EMI related damage to the simulator.

INSTALLATION AND CONFIGURATION

Follow this simple installation procedure. Make sure to respect proper grounding, as described in “Spartan 3 Configuration”.

1. Place the OP5600 on a shelf or a desktop, or install in a traditional rack
2. Connect the power cable to the nearest power outlet
3. Connect the OP5600 to the same network used by the host PC, using the cables provided.

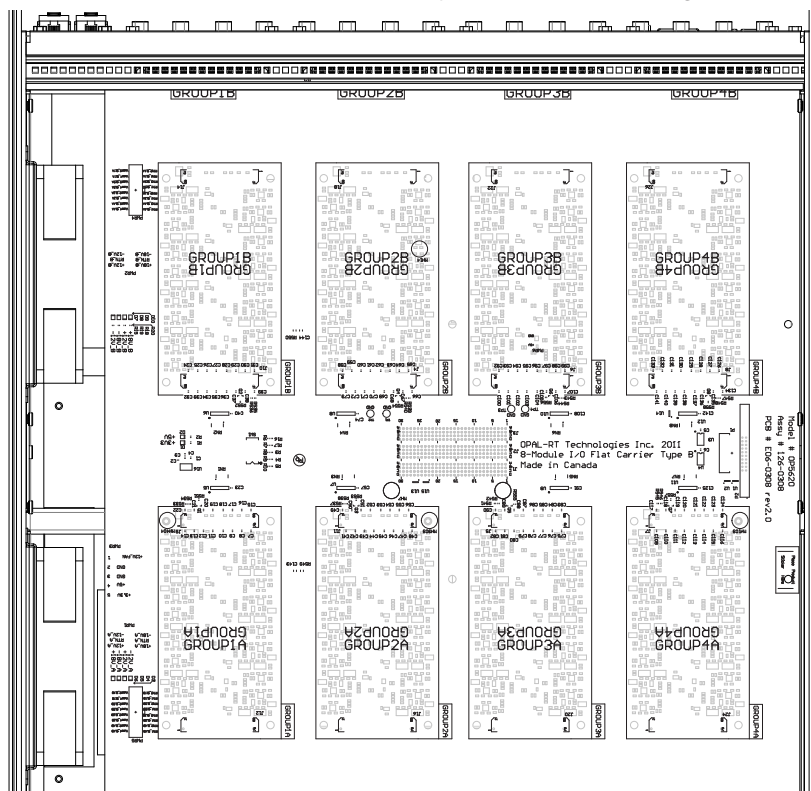


Figure 2: Top view of mezzanines installed on carrier

The top of the chassis can be removed to access the signal conditioning mezzanine boards installed on the carrier board. The layout and configuration of the boards depends on the selected platform (which must be factory installed):

If the system is configured with the Virtex 6, ML605 FPGA board, there is a maximum of 6 signal conditioning mezzanines (these will be in groups 1, 2 and 4 on the carrier board).

If the system is configured with the Spartan 3, OP5142 signal conditioning board, there is maximum of eight mezzanines allowed (shown).

At power-up, the carrier will autodetect installed mezzanines and transfer information to the FPGA and the simulator.

CAUTION

The system must be powered down before changing mezzanines. Failure to do so may damage the equipment.



Disconnect power before servicing

HARDWARE CONFIGURATION

The interfaces provided on the OP5600 simulator may vary depending on the system configuration selected, Virtex 6 (ML605) or Spartan 3 (OP5142).

SPARTAN 3 CONFIGURATION

Front Connectors

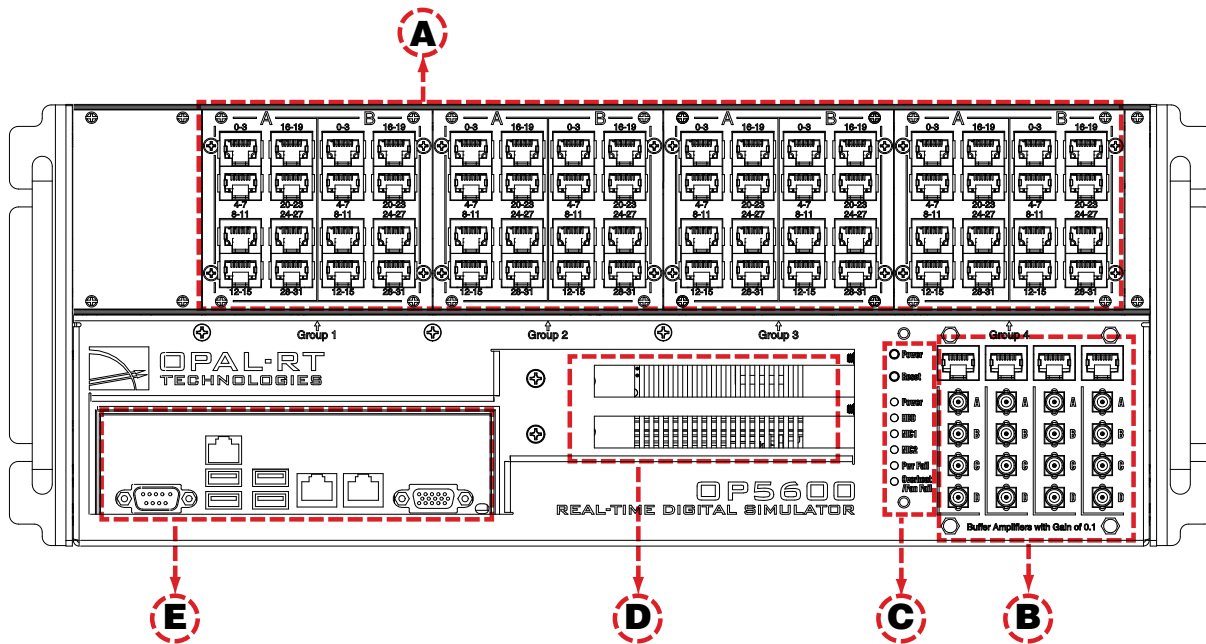


Figure 3: OP5600 front connector panels (Spartan 3)

- A. 4 panels of RJ45 connectors provide connections to monitor output from mezzanine I/O boards. Each connector is linked to front and back mezzanines on the carrier board. Analog mezzanines (channels 0-15) will use only the first column of connectors. Digital mezzanines will use both columns (channels 0-15 in the first column and channels 16-31 on the second column of connectors). See “DB37F Connections” and “RJ45 connections” for more detailed information.
- B. Monitoring RJ45 connectors with mini-BNC terminals: RJ45 cables connect from a channel on an RJ45 panel (B) to one of four RJ45 monitoring connectors (C). Mini-BNC connectors allow for quick cable connections to monitoring devices (such as an oscilloscope). See “connecting monitoring devices” for details.

- C. Target computer monitoring interface. Two push buttons include POWER in top position to start the target computer and RESET in the bottom position to reset the target computer. There are 6 LED indicators:

LED	NAME	Description
Green	Power	On indicates that the unit is powered up.
Green	HDD	On indicates that the hard disk drive is operating.
Green	NIC1	On indicates that network port 1 is in use.
Green	NIC2	On indicates that network port 2 is in use.
Red	Power Fail	On indicates a power fault.
Red	Overheat/Fan Fail	On indicates either that unit has overheated or a fan fault.

- D. Optional PCI or PCIe connector slots (by default, these spaces will be covered by blank plates if there are no optional PCI cards. If there are PCI cards installed, the spaces will contain the PCI connectors).
- E. Standard computer connectors (left to right): mouse and keyboard, USB ports, monitor, network ports. Although use of these connectors is optional but not required to use the OP5600, one network port is required for network connection.

ML605 CONFIGURATION

The Virtex 6 monitoring interface is nearly identical to the Spartan 3, except that there are 3 RJ45 monitoring panels and one panel with an LCD screen instead of 4 RJ45 monitoring panels.

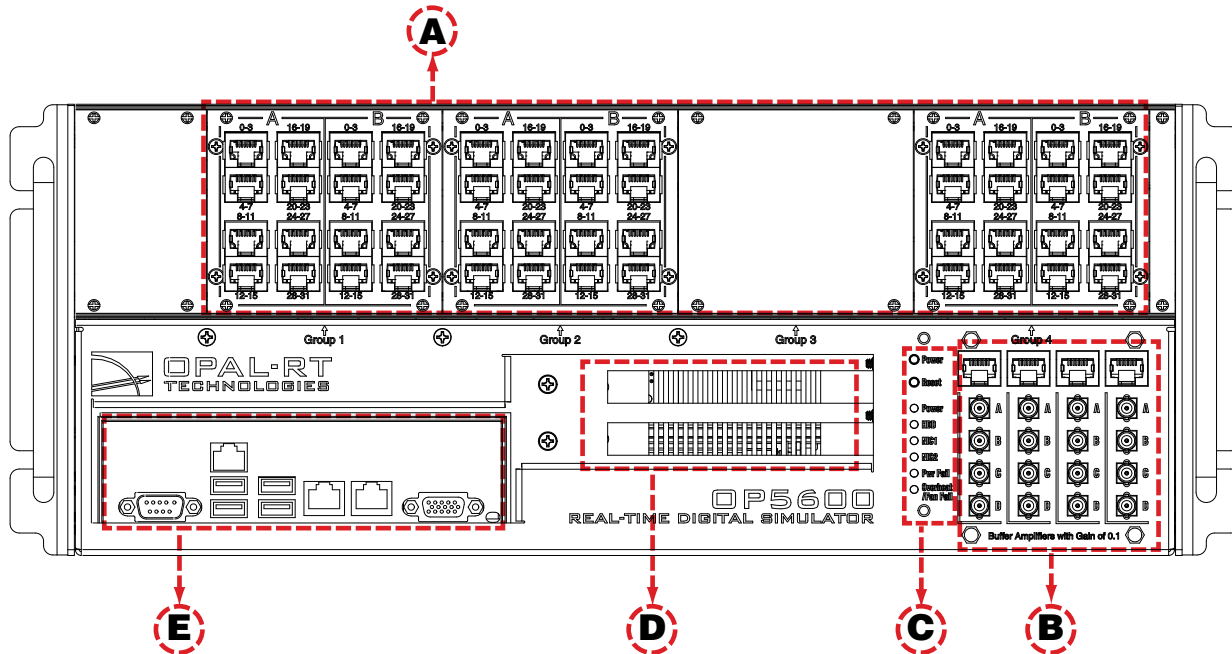


Figure 4: OP5600 front connector panels (Virtex 6)

- A. 3 panels of RJ45 connectors provide connections to monitor output from mezzanine I/O boards. Each connector is linked to front and back mezzanines on the carrier board. Analog mezzanines (channels 0-16) will use only the first column of connectors. Digital mezzanines will use both columns (channels 0-15 in the first column and channels 16-31 on the second column of connectors). See the mezzanines connector image and the RJ45 pinouts for more detailed information.
- B. Monitoring RJ45 connectors with mini-BNC terminals: RJ45 cables connect from a channel on an RJ45 panel (B) to one of four RJ45 monitoring connectors (C). Mini-BNC connectors allow for quick cable connections to monitoring devices (such as an oscilloscope). See “connecting monitoring devices” for details.

- C. Target computer monitoring interface. Two push buttons include POWER in top position to start the Target computer and RESET in the bottom position to reset the Target computer. There are 6 LED indicators:

LED	NAME	Description
Green	Power	On indicates that the unit is powered up.
Green	HDD	On indicates that the hard disk drive is operating.
Green	NIC1	On indicates that network port 1 is in use.
Green	NIC2	On indicates that network port 2 is in use.
Red	Power Fail	On indicates a power fault.
Red	Overheat/Fan Fail	On indicates either that unit has overheated or a fan fault.

- D. Optional PCI or PCIe connector slots (by default, these spaces will be covered by blank plates if there are no optional PCI cards. If there are PCI cards installed, the spaces will contain the PCI connectors).
- E. Standard computer connectors (left to right): mouse and keyboard, USB ports, monitor, network ports. Although use of these connectors is optional but not required to use the OP5600, one network port is required for network connection.

BACK CONNECTORS

The back connectors may vary, depending on the configuration option selected.

ML605 Configuration

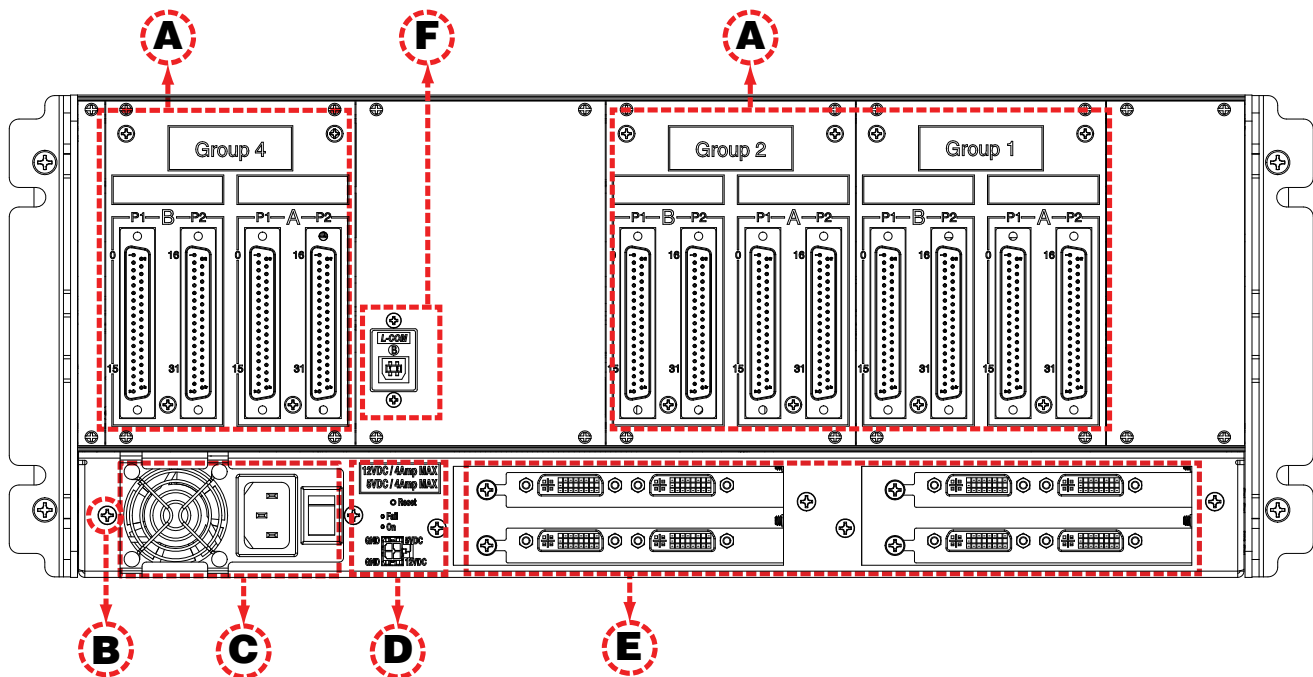


Figure 5: OP5600 rear connector panels (ML605 configuration)

- A. DB37F I/O connectors (see “Table 1: Pin Assignments” for more details). The images (see “DB37F Connections”) illustrates the links between the mezzanines and the DB37 I/O connectors
- B. Ground screw. The OP5600 may be subjected to EMI when installed in proximity to other devices. Make sure to connect the OP5600 ground to the rack to prevent any EMI related damage to the simulator (see Figure 7)
- C. Power connector and power On/Off switch
- D. Power reset and 5/12V power source connector for test purposes:
 - Pushbutton reset after 4A overcurrent shutdown
 - Red LED indicates fault, green LED indicates nominal function
 - Microfit connector for 5V or 12V power allows users to test whether I/Os are functioning. Each voltage has its own ground reference. Caution: these power sources are not isolated.
- E. Optional PCI or PCIe connector slots.
- F. USB connector for JTAG programming (used in the event of lost or damaged FPGA configuration).

Spartan 3 Configuration

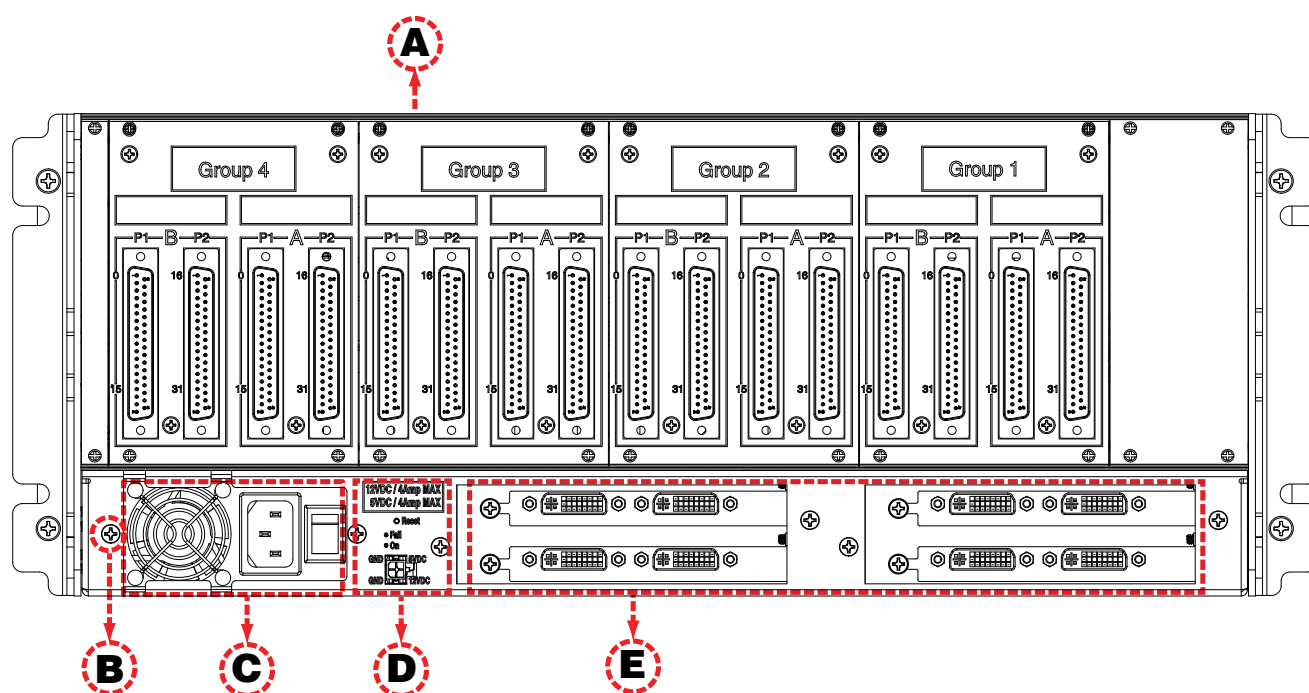


Figure 6: OP5600 rear connector panels (Spartan 3 configuration)

- A. DB37F I/O connectors (see “Table 1: Pin Assignments” for more details). The images (see “DB37F Connections”) illustrates the links between the mezzanines and the DB37 I/O connectors
- B. Ground screw. The OP5600 may be subjected to EMI when installed in proximity to other devices. Make sure to connect the OP5600 ground to the rack to prevent any EMI related damage to the simulator (see Figure 7)
- C. Power connector and power On/Off switch
- D. Power reset and 5/12V power source connector for test purposes:
 - Pushbutton reset after 4A overcurrent shutdown
 - Red LED indicates fault, green LED indicates nominal function
 - Microfit connector for 5V or 12V power allows users to test whether I/Os are functioning. Each voltage has its own ground reference. Caution: these power sources are not isolated.
- E. Optional PCI or PCIe connector slots.

Connecting the Ground Screw

You must connect a grounding cable from the OP5600 ground screw to the rack to ensure that the OP5600 terminates securely in a ground. Proper grounding will help prevent electric shocks, protect the OP5600 from voltage spikes (from a variety of causes, including lightening strikes), and provide increased immunity from EMI by lowering noise levels and emissions.

1. Select a flat braided grounding strap of adequate length (as short as possible provides best protection), with ring terminals on each end.
2. Attach one ring terminal to the ground screw on the OP5600 (shown in Figure 7)
3. Attach the other ring terminal to the rack using a nut and lockwasher.

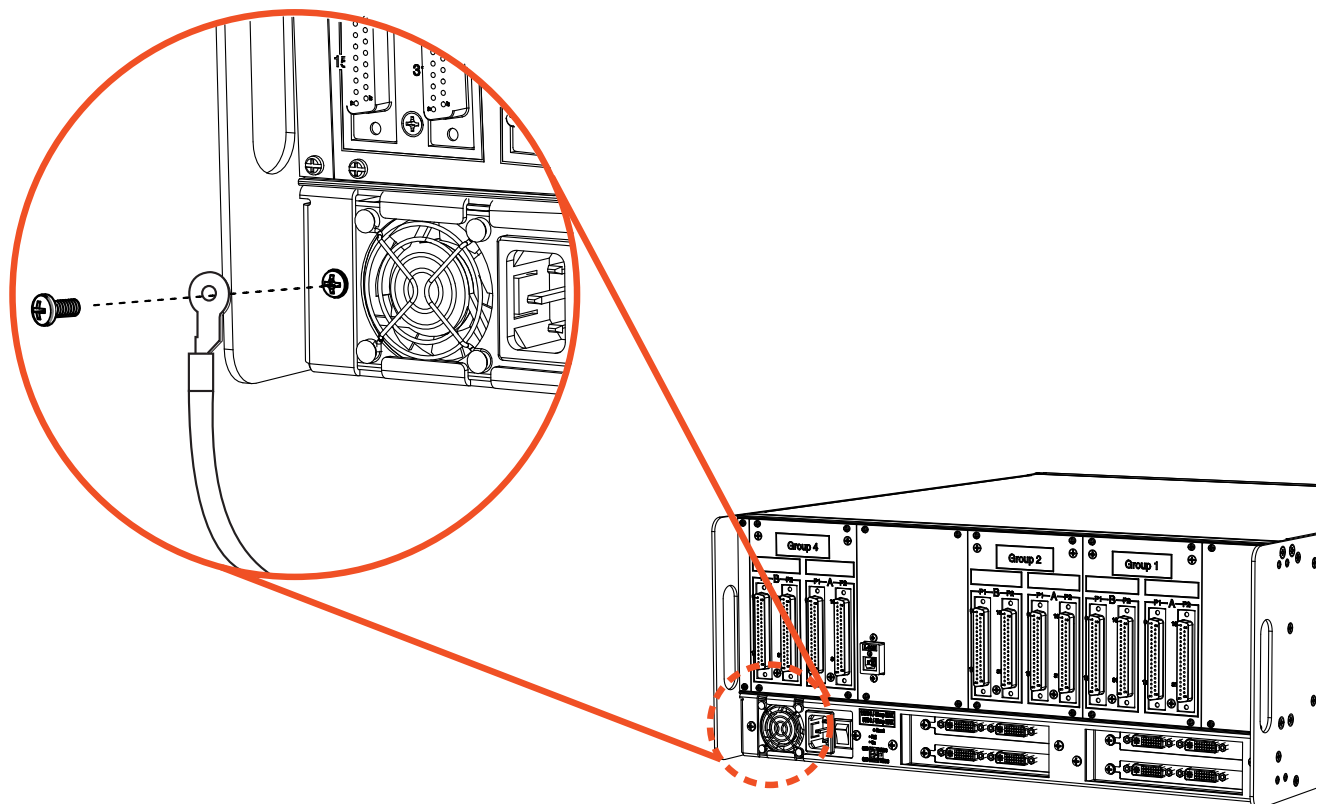


Figure 7: Connecting the OP5600 to the ground

DB37F CONNECTIONS

Each pair of mezzanines (A & B) is linked to four female DB37 connectors (I/Os) on the back of the chassis:

The first two connectors (left to right) represent channels from Group B, which are linked to the conditioned channels from the **back** mezzanine. The last two connectors (left to right) represent channels from Group A, which are linked to the conditioned channels from the **front** mezzanine.

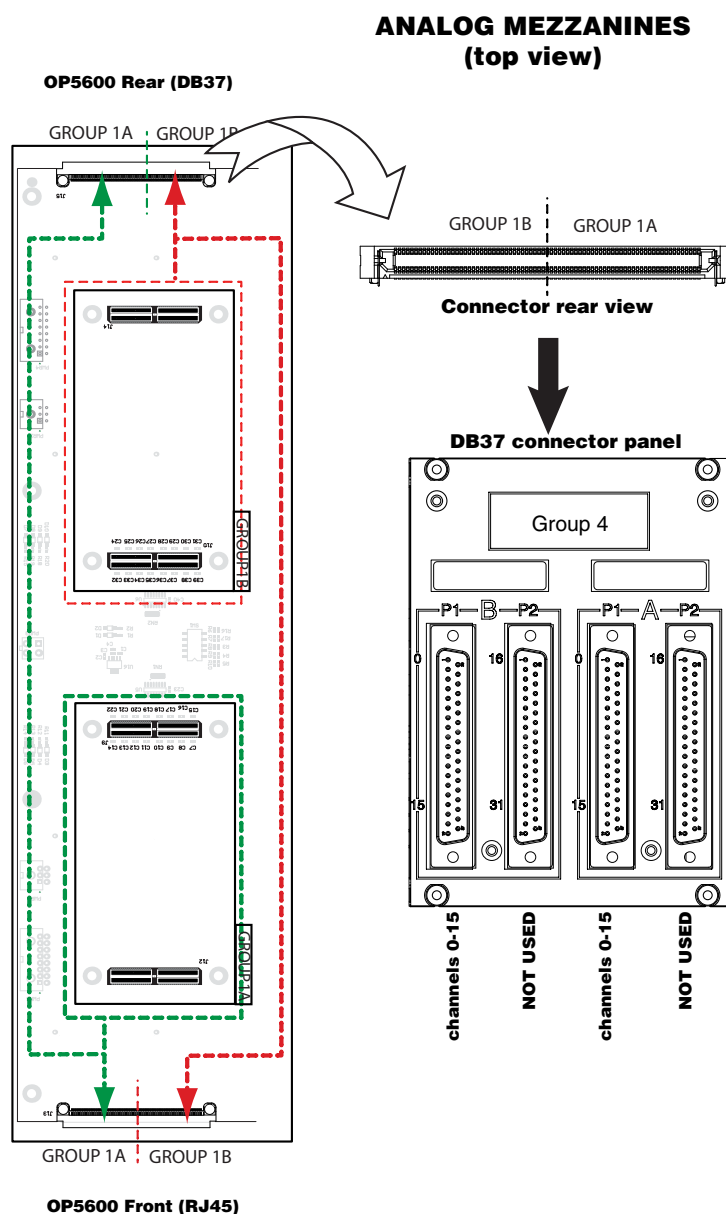


Figure 8: DB37 connection to mezzanines

If the front mezzanine is an analog module (DAC or ADC), the 16 channels are on connector A and connector B does not carry any signals.

If the back mezzanine is an analog module (DAC or ADC), the 16 channels are on connector C. Connector D does not carry any signals.

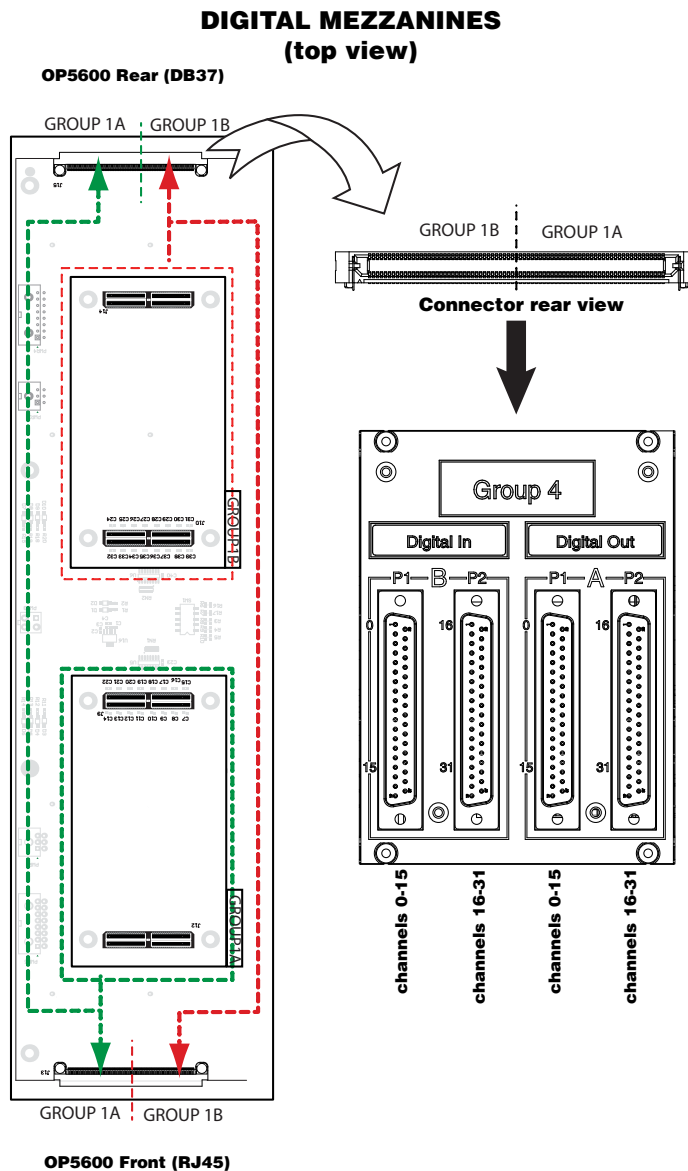


Figure 9: DB37 connection to mezzanines

If the front mezzanine is a digital module (Din or Dout), the first 16 channels (00 to 15) are on the first connector and the next 16 channels (16 to 31) are on the second connector.

If the back mezzanine is a digital module (Din or Dout), the first 16 channels (00 to 15) are on the first connector and the next 16 channels (16 to 31) are on the second connector.

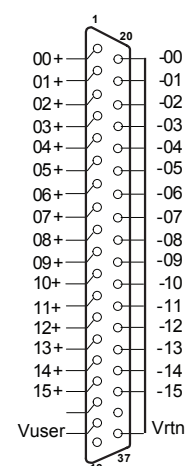
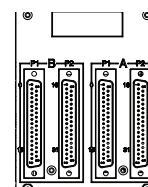
All signals are represented by a positive-negative pair that are always available on the connector pins, for example: for channel 08 : (08+, -08)

INTERFACE:

- For a single-ended output, the negative conductor is connected to Ground.
- For a differential output, the positive and negative signals are on the connector.
- For a differential input, the connection must be between the positive/negative pair.
- If the input is singled-ended, user's ground must be connected to the negative side of the pair.

OP5600 DB37 PIN ASSIGNMENTS

Connector A Ch. 0-15				Connector A Ch. 16-31			
DB37	Module pin assignment	DB37	Module pin assignment	DB37	Module pin assignment	DB37	Module pin assignment
1	+CH00	20	-CH00	1	+CH16	20	-CH16
2	+CH01	21	-CH01	2	+CH17	21	-CH17
3	+CH02	22	-CH02	3	+CH08	22	-CH18
4	+CH03	23	-CH03	4	+CH19	23	-CH19
5	+CH04	24	-CH04	5	+CH20	24	-CH20
6	+CH05	25	-CH05	6	+CH21	25	-CH21
7	+CH06	26	-CH06	7	+CH22	26	-CH22
7	+CH07	27	-CH07	7	+CH23	27	-CH23
9	+CH08	28	-CH08	9	+CH24	28	-CH24
10	+CH09	29	-CH09	10	+CH25	29	-CH25
11	+CH10	30	-CH10	11	+CH26	30	-CH26
12	+CH11	31	-CH11	12	+CH27	31	-CH27
13	+CH12	32	-CH12	13	+CH28	32	-CH28
14	+CH13	33	-CH13	14	+CH29	33	-CH29
15	+CH14	34	-CH14	15	+CH30	34	-CH30
16	+CH15	35	-CH15	16	+CH31	35	-CH31
17		36		17		36	
18	Vuser 1 A	37	Vrtn 1 A	18	Vuser 2 A	37	Vrtn 2 A
19				19			



Connector B Ch. 0-15				Connector B Ch. 16-31			
DB37	Module pin assignment	DB37	Module pin assignment	DB37	Module pin assignment	DB37	Module pin assignment
1	+CH00	20	-CH00	1	+CH16	20	-CH16
2	+CH01	21	-CH01	2	+CH17	21	-CH17
3	+CH02	22	-CH02	3	+CH08	22	-CH18
4	+CH03	23	-CH03	4	+CH19	23	-CH19
5	+CH04	24	-CH04	5	+CH20	24	-CH20
6	+CH05	25	-CH05	6	+CH21	25	-CH21
7	+CH06	26	-CH06	7	+CH22	26	-CH22
7	+CH07	27	-CH07	7	+CH23	27	-CH23
9	+CH08	28	-CH08	9	+CH24	28	-CH24
10	+CH09	29	-CH09	10	+CH25	29	-CH25
11	+CH10	30	-CH10	11	+CH26	30	-CH26
12	+CH11	31	-CH11	12	+CH27	31	-CH27
13	+CH12	32	-CH12	13	+CH28	32	-CH28
14	+CH13	33	-CH13	14	+CH29	33	-CH29
15	+CH14	34	-CH14	15	+CH30	34	-CH30
16	+CH15	35	-CH15	16	+CH31	35	-CH31
17		36		17		36	
18	Vuser 1 B	37	Vrtn 1 B	18	Vuser 2 B	37	Vrtn 2 B
19				19			

Table 1: Pin Assignments

RJ45 CONNECTIONS

Each RJ45 monitoring panel on the front of the OP5600 simulator connects to front and back mezzanines. The following images illustrate how the mezzanines are linked to the connectors.

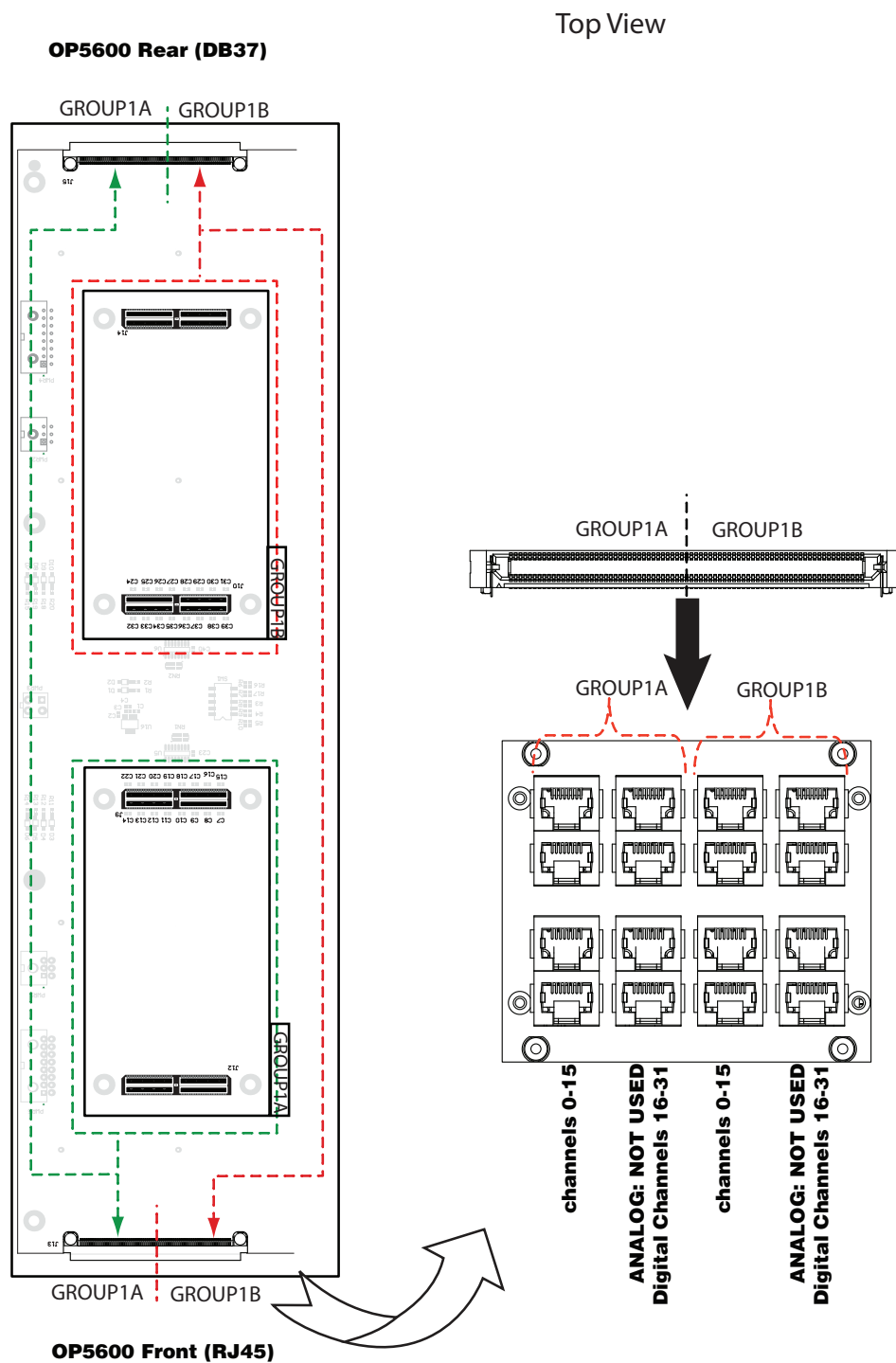
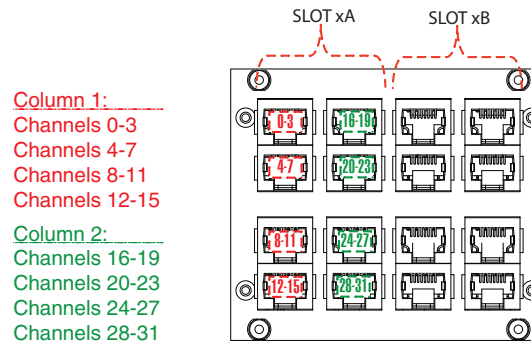


Figure 10: RJ45 connection to mezzanines

RJ45 CHANNEL ASSIGNMENTS

Each mezzanine is assigned two columns of RJ45 connectors. Each column represents a series of channels, divided into 4 channels per jack, as shown in Figure 11.



Analog boards use only channels 0-15

Digital boards use channels 0-31

Figure 11: RJ45 channel assignments

CONNECTING MONITORING DEVICES

The OP5600 simulator offers quick, single-ended connections, through RJ45 and mini BNC connectors, to any monitoring device (i.e. oscilloscope, etc.). These mini-BNC jacks let you monitor 4 channels individually. Simply follow these instructions (as illustrated in Figure 12):

CAUTION Only connect RJ45 cables from upper section (A) monitoring jacks to lower section monitoring panel (B, as shown). Connecting any other cable or device may result in damage to the equipment.

The network cable must only be connected to the standard computer connector network jack (see page 15). DO NOT connect the network cable in any jack other than the jack intended for that purpose.

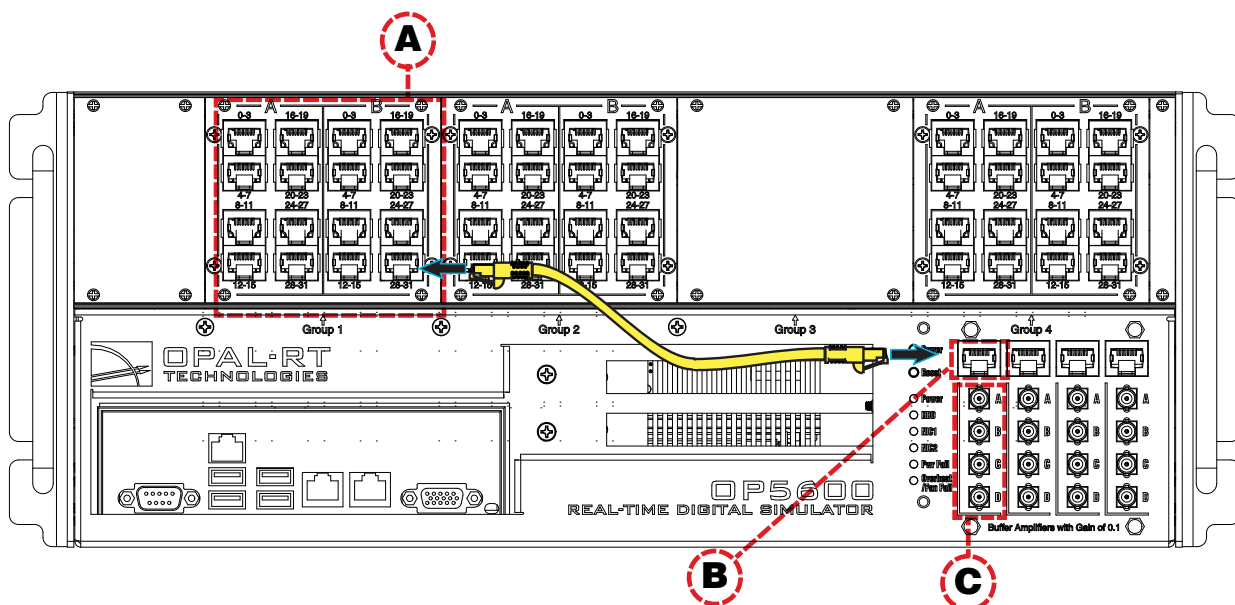


Figure 12: How to connect cables for monitoring

1. Connect one end of the RJ45 cable to the desired channels (A). See Figure 11 for RJ45 connector pinouts
2. Connect the other end of the RJ45 cable to the monitoring connector (B)
3. Connect a mini-BNC cable to each BNC jack (C) and connect the other end of the cable to the desired monitoring device. The mini-BNC jacks each connect to one of the 4 channels of the RJ45 Connector (A). In the example shown in Figure 8, the RJ45 cable is connected to channels 28-31. The mini-BNC cable jacks, identified as A, B, C, D, represent each channel in the following order;
A = channel 28,
B = channel 29,
C = channel 30
D = channel 31.

SPECIFICATIONS

Product name	OP5600 V2	
Power supply	Universal input and active power factor correction 650W continuous power DC to DC converters for analog voltage	
Power rating	Input : 100-240VAC, 50-60Hz, 10A/5A	
	Power: 600W	
Input/output power	-30V to +30V maximum	
I/O connectors	Spartan 3: 4 panels of 4 DB37F connectors	Virtex 6: 3 panels of 4 DB37F connectors
Monitoring connectors	Spartan 3: 4 panels of RJ45 connectors 1 rear panel of 2x RJ45 and LEDs for FPGA monitoring and stereo jacks for FPGA synchronisation	Virtex 6: 3 panels of RJ45 connectors 1 panel LCD display 1 panel 2x RJ45 and LEDs for FPGA
PC interface	Standard PC connectors (monitor, keyboard, mouse and network)	
PCI slots	6 PCIe slots (capable of accommodating up to 4 PCI boards)	
Hard disk	500 Gb, 7200 rpm, SATA	
Dimensions	48.3 x 45.7 x 17.8cm (19" x 18" x 7")	
Weight	With PC: 9.07 - 15 Kg (20 lbs to 33 lbs) Without PC: 4.54 - 5.9 Kg (10 lbs to 13 lbs)	
Operating temperature	10 to 35 °C (50 to 95°F)	
Storage temperature	-55 to 85°C (-67 to 185°F)	
Maximum rated ambient temperature	40°C (104°F)	
Relative humidity	10 to 90% non-condensing	
Maximum altitude	2000 m (6562 ft.)	

OP5620 8 I/O FLAT CARRIER SPECIFICATIONS

Product name	OP5620
Part Number	126-0308
Number of mezzanines	8 with Spartan 3 configuration 6 with Virtex 6 configuration
Dimensions	38.1 x 38.1 cm (15 in x 15 in)
I/O connector	8 connectors, 160 positions each
Output power supply (from DC-to-DC converters)	±12 VDC @ 1.2 A (4 mezzanine A) ±12 VDC @ 1.2 A (4 mezzanine B) ±18 VDC @ 800 mA (4 mezzanine A) ±18 VDC @ 800 mA (4 mezzanine B)
Input power supply	+12 VDC @ 6 A +5 VDC @ 3A
Operating temperature	10 to 40 °C (50 to 104°F)
Storage temperature	-55 to 85°C (-67 to 185°F)
Relative humidity	10 to 90%, non condensing
Maximum altitude	2,000 m (6562 ft.)

Annexe I

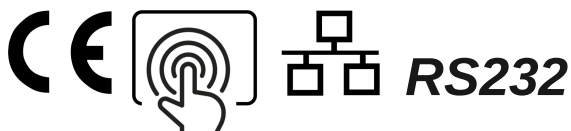
Fiche technique de l'amplificateur de puissance 4 quadrant de 3X7000VA



3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

PERFORMANCES

- Grande précision
- Haute stabilité
- Transitoires rapides
- Tenue aux courants d'appel élevée
- Large bande passante
- Très faible distorsion
- Passage des quadrants sans transition
- Très faible impédance de sortie



APPLICATIONS

- 3 sorties isolées
- AC, AC+DC, DC
- Réseaux avioniques 300-800-1200Hz
- Réseaux industriels 50-60 Hz
- Essais selon ABD100.1.8 / MIL-STD-704
- Réseaux perturbés
- Simulation de moteur AC ou DC
- Charges non linéaires
- Génération d'harmoniques



DESCRIPTION

- Le PCU-3X7000 est un amplificateur de tension « 4 quadrants » AC+DC triphasé. Ses performances électriques élevées permettent de tester ou simuler toutes sortes de générateurs ou de charges avec une dynamique élevée, une très faible distorsion sur une large bande de fréquences et une large bande passante.
- Sa technologie linéaire permet une intégration simple et rapide pour des applications « Temps Réel » ou « Hardware In the Loop » en combinaison avec des simulateurs tels qu'Opal-RT, dSpace ou National Instruments.
- Construit sous la forme d'une baie de largeur 800 mm et de hauteur 2 m, ses connexions d'entrée et de sortie sont disponibles en face arrière et en face avant.
- Son pilotage à distance par protocole TCP/IP sur liaison Ethernet ou SCPI sur liaison RS232 permet son intégration aisée dans un système de test automatique.
- L'ajout d'un « panier résistif » permet d'augmenter de 30% à 100% sa capacité d'absorption pour une utilisation en tant que charge alternative ou continue.

REFERENCES COMMERCIALES

- **PCU-3x7000-AB/400V/4G**
 - Option « PCU-3X7-ACQ » ajout d'un analyseur de puissance
 - Option « PCU-3X7-SR » gammes de tension personnalisées
 - Option « PCU-3X7-WBW » bande passante étendue à 50kHz à -3dB
 - Option « PCU-3X7-L100 » panier résistif
 - Option « PCU-3X7-ISO OUTPUT » images de la tension et du courant
 - Option « PCU-3X7-REG-I » régulation en courant
 - Option « PCU-3X7-MAINS » réseau d'alimentation spécifique



3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

CARACTERISTIQUES DE L'EQUIPEMENT

SORTIES

Puissances	
Puissance nominale par sortie	7000VA
Gammes AC	130V / 200V / 260V / 400V
Gammes DC	180V / 280V / 360V / 560 V / 720V / 1120V
Type de sortie	Directe (sans transformateur)
Tension et courant en AC	Gammes
	130V200V260V400V
Tension AC (VRMS)	0-1300-2000-2600-400
Courant AC permanent In (ARMS)	0-540-360-280-18
Courant crête max In (3.In < 5 s)	1621088454
Tension et courant en DC	Gammes
	180V280V360V560V720V1120V
Tension DC (VDC)	±180±280±360±560±720±1120
Courant DC permanent In (ADC)	±54±36±54±36±28±18
Courant crête maximal (3.In < 5 s)	1621081621088454
Précision de la tension	
Typique	0,1% de la gamme + 0,1% de la valeur programmée
Résolution	12 bits
Précision du courant	
Typique	0,1% de la gamme + 0,1% de la valeur programmée
Résolution	12 bits
Distorsion de la tension à pleine puissance	
Typique	< 0,3%
Max	< 0,7%
Régulation de la tension pour une variation secteur de +6% -10%	
Max	< 0,1% de la tension nominale
Régulation de la tension pour une variation de 0 à 100% du courant	
Max	< 0,1% de la tension nominale
Bruit résiduel	
Max RMS	0,02% de la tension nominale
Max crête à crête	0,3% de la tension nominale
Bande passante	
Pleine échelle	DC – 5 kHz
Petits signaux à -3 dB	25 kHz
Temps de variation de la pleine échelle avec signal pilote carré	
Montée 10% / 90%	< 20 µs
Descente 10% / 90%	< 20 µs
Temps de transfert	< 20 µs
Transition de Q1 à Q4	< 10µs
Variation en fonction de la température	
Typique	50 ppm/°C
Max	100 ppm/°C
Stabilité après 15 minutes de fonctionnement	
Max	< 0,05% de la tension nominale
Isolement de la sortie par rapport au châssis	
Mesure à 500 VDC	> 100 MΩ
Sorties Images (option PCU-3x7-ISO OUTPUT)	
Image de la tension	1 VRMS pour 60,2 VRMS
Image du courant	1 VRMS pour 15,56 ARMS
Précision des mesures affichées sur l'écran tactile	
Mesure de la tension	0,3% de la gamme + 0,3% de la mesure
Mesure du courant	0,3% de la gamme + 0,3% de la mesure



3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

CARACTERISTIQUES DE L'EQUIPEMENT (suite)

ALIMENTATION	Réseau d'alimentation	
	Nombre de phases	Triphasé (3 Phases) sans Neutre + Terre
	Tension	400 VRMS -10% +6%
	Fréquence	47 - 63 Hz
	Courant d'entrée à pleine puissance de sortie	
	Max	45 ARMS par phase
	Protection	Disjoncteur magnéto thermique
	Courant d'appel	Limitation à 2 x courant max
	Rigidité diélectrique de l'entrée secteur par rapport à la sortie reliée au châssis	
	Mesure à 2500 VRMS / 50Hz	Courant < 10 mA

ENTREES	Amplitude du signal d'entrée	
	Isolement	> 10 MΩ (1)
	Tension (pleine échelle de sortie)	7,07 VRMS / ± 10V crête
	Tension maximale	± 15 V crête
	Impédance d'entrée	10 kΩ
	Fréquence du signal d'entrée	
	Fondamental	DC – 5kHz
	Harmoniques (petits signaux)	Max 50 kHz
	Entrées numériques (4 entrées)	
	Type	DC 0-24V
	Niveau Bas	< 5V
	Niveau Haut	> 11 V
	Impédance d'entrée	10 kΩ

MECANIQUE ET ENVIRONNEMENT	Traitements de surface	
	Châssis	Aluminium peint RAL7021
	Face arrière et côtés	Aluminium peint RAL7035
	Dimensions et poids	
	Largeur	800 mm
	Profondeur (hors connecteurs)	800 mm
	Hauteur	2010 mm (38U) sans option « PCU-3X7-L100 »
		2230 mm (43U) avec option « PCU-3X7-L100 »
	Poids	550 kg sans option « PCU-3X7-L100 »
		600 kg avec option « PCU-3X7-L100 »
	Température et humidité	
	Température de stockage	-10°C à +85°C
	Température de fonctionnement	+0°C à +50°C
	Humidité relative	10% - 90% non condensant
	Niveau sonore (ventilation en vitesse maximale)	
	Mesure à 1 m de la face avant	< 70 dBA
	Marquage	
	Marquage	CE
	Indice de protection	IP30
	Protections	
	Contre les surcharges	Limitation de la tension (2)
	Contre le court-circuit en sortie	Coupe de l'étage de puissance (3)
	Contre la surchauffe	Coupe de l'étage de puissance (4)

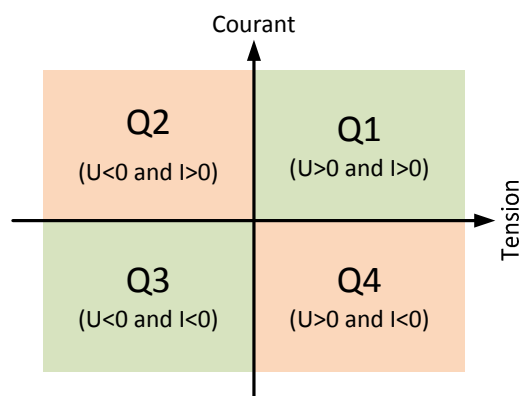
- 1) Les entrées analogiques ont la même référence et sont isolées des sorties de puissance.
- 2) En cas de surcharge temporaire, la tension diminue pour limiter le courant.
- 3) La sortie est coupée et devra être réactivée par l'écran tactile ou une commande externe.
- 4) Un capteur de température est disposé sur chaque élément de puissance. Il coupe la sortie de l'amplificateur en cas de surchauffe.

FONCTIONNEMENT 4 QUADRANTS

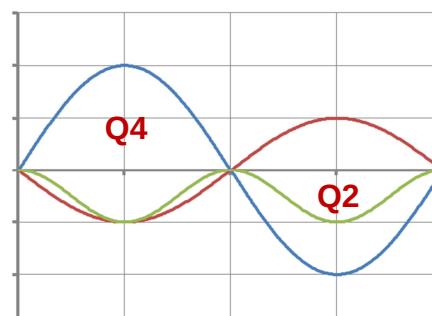
Les amplificateurs fonctionnent en régulation de tension avec limitation du courant : en cas de surcharge temporaire, la tension diminue pour limiter le courant.

Dans les zones « Q1 » et « Q3 » du diagramme, l'amplificateur se comporte en « GENERATEUR » ou « SOURCE » : la puissance instantanée est positive.

Dans les zones « Q2 » et « Q4 » du diagramme, l'amplificateur se comporte en « ABSORBEUR » ou « SINK » : la puissance instantanée est négative.



Sur une échelle temporelle (tension en bleu, courant en rouge, puissance en vert) :



CONSTITUTION INTERNE

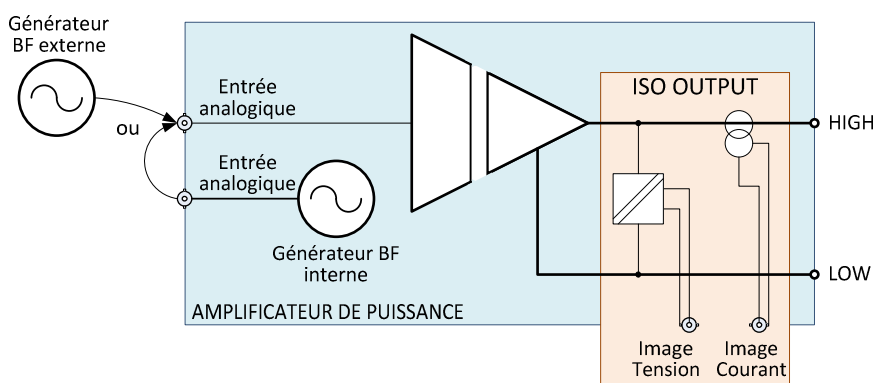
L'amplificateur PCU-3x7000 est constitué de trois amplificateurs identiques de puissance 7000 VA chacun.

Chaque amplificateur est électriquement isolé des deux autres.

Chaque amplificateur possède :

- Son générateur BF,
- Son entrée analogique,
- Sa sortie de puissance,
- Ses deux sorties « Image »

(Si l'option « PCU-3X7-ISO OUTPUT » est installée.)



Les sorties « Image Tension » et « Image Courant » sont isolées des sorties de puissance.



3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

OPTIONS PROPOSEES

Option « PCU-3X7-ACQ » : ajout d'un analyseur de puissance par phase

Il permet des mesures de fréquence, tension, courant, puissance, distorsion et une analyse fréquentielle (transformée de Fourier).

Voir sa description dans la fiche technique « FT-Carte ACQ-FR »

Option « PCU-3X7-SR » : modification des gammes de tension de sortie

Les gammes peuvent être adaptées à votre besoin - Nous consulter

Option « PCU-3X7-WBW » : extension de la bande passante « petits signaux »

Augmentation de 25 kHz à 50kHz (mesure à -3dB) en régulation en tension

Option « PCU-3X7-L100 » : panier résistif et diode

(Voir pages 10 et suivantes)

Option « PCU-3X7-ISO OUTPUT » : ajout de sorties « images » de la tension et du courant

Les sorties « Image U » et « Image I » sont isolées des sorties de puissance.

D'amplitude ± 10 V crête, elles sont l'image en temps réel de la tension et du courant en sortie de l'amplificateur.

Option « PCU-3X7-REG-I » : ajout d'une régulation en courant

En complément de la régulation en tension, elle présente une bande passante de 15kHz à -3dB (petits signaux).

Option « PCU-3X7-MAINS » : adaptation de l'alimentation de l'amplificateur

Une adaptation de l'étage d'alimentation à votre réseau peut être proposée - Nous consulter.

BANDE PASSANTE « petits signaux »

Courbe bleue :

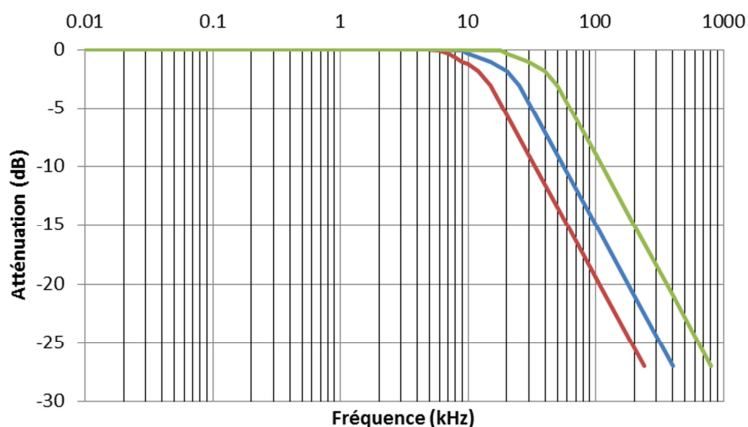
En régulation en tension, la bande passante à -3dB est de 25 kHz.

Courbe verte :

En régulation en « tension », avec l'option « PCU-3x7-WBW », la bande passante à -3dB est de 50 kHz.

Courbe rouge :

En régulation en « courant », avec l'option « PCU-3x7-REG-I », la bande passante à -3dB est de 15 kHz





3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

FONCTIONNEMENT PERMANENT EN AC (sans panier résistif)



La mise **EN PARALLELE** des sorties des amplificateurs en AC n'est pas autorisée : deux sources de tension ne peuvent être branchées en parallèle sans un dispositif de compensation.

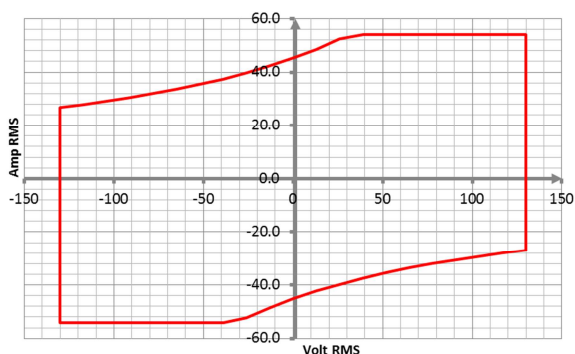
La mise **EN SERIE** des sorties des amplificateurs en AC n'est pas autorisée, même s'ils utilisent le même signal pilote.

Ces diagrammes expriment la relation entre courant et tension pour un facteur de puissance de 1 (génération pure) et -1 (absorption pure).

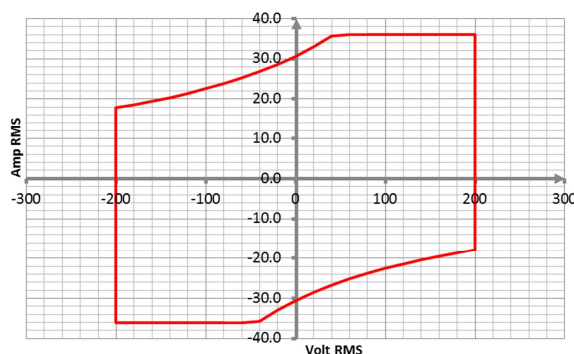
Le fonctionnement permanent est autorisé « à l'intérieur » des diagrammes. Les limitations en génération ou en absorption sont dues à l'échauffement des transistors de puissance.

Un fonctionnement « à l'extérieur » des diagrammes va se traduire soit :

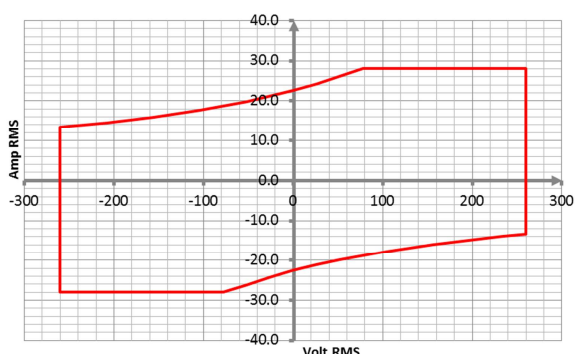
- par une coupure immédiate : protection surintensité en cas de courant supérieur aux limites,
- par une coupure au bout d'un certain temps : protection thermique en cas de surchauffe des éléments de puissance.



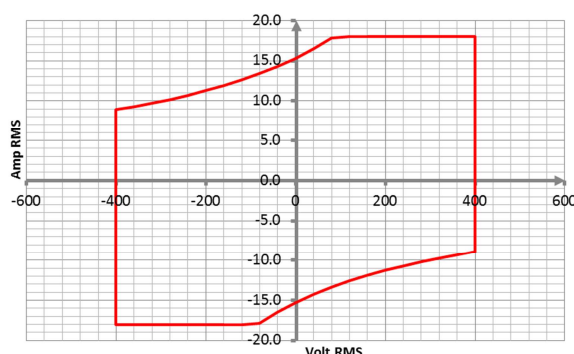
GAMME 130V-54A



GAMME 200V-36A



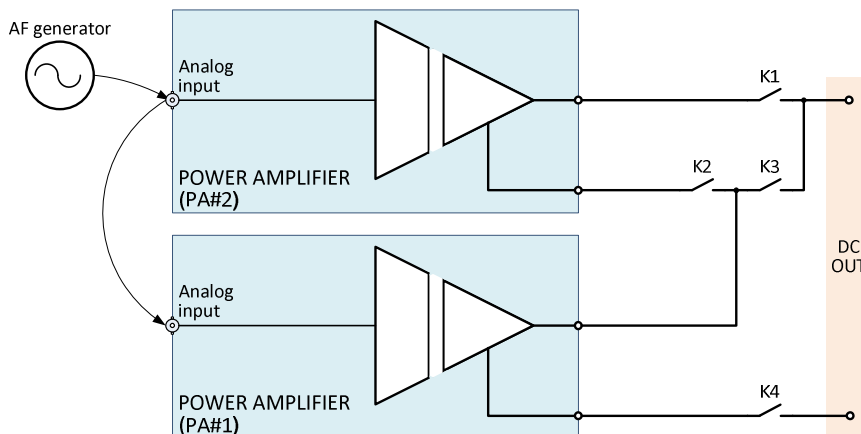
GAMME 260V-28A



GAMME 400V-18A

FONCTIONNEMENT PERMANENT EN DC (sans panier résistif)

Pour sécuriser le fonctionnement des amplificateurs en DC, leurs sorties ont été pré câblées sur des bornes distinctes des bornes des sorties AC. Pour cela, deux amplificateurs sont couplés ou non en série à l'aide de contacteurs adaptés. Le troisième amplificateur « PA#3 » n'est pas utilisé.



Le contacteur K4 permet d'isoler la sortie DC lorsque les amplificateurs sont utilisés en AC. Cet amplificateur comporte donc une seule sortie DC avec huit gammes :

Gamme	Relais	Tension	Courant	Puissance
180V-54A	K3 + K4 fermés K1 + K2 ouverts	0-180 VDC	0-54 ADC	9 720 W
280V-36A	K3 + K4 fermés K1 + K2 ouverts	0-280 VDC	0-36 ADC	10 080 W
360V-28A	K3 ouvert K1 + K2 + K4 fermés	0-360 VDC	0-28 ADC	10 080 W
360V-54A	K3 + K4 fermés K1 + K2 ouverts		0-54 ADC	19 440 W
560V-18A	K3 + K4 fermés K1 + K2 ouverts	0-560 VDC	0-18 ADC	10 080 W
560V-36A	K3 ouvert K1 + K2 + K4 fermés		0-36 ADC	20 160 W
720V-28A	K3 ouvert K1 + K2 + K4 fermés	0-720 VDC	0-28 ADC	20 160 W
1120V-18A	K3 ouvert K1 + K2 + K4 fermés	0-1120 VDC	0-18 ADC	20 160 W

Les différentes gammes permettent d'adapter l'équipement au plus proche des besoins des utilisateurs. Grâce à cela il est possible de favoriser l'excursion en génération ou en absorption.



3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

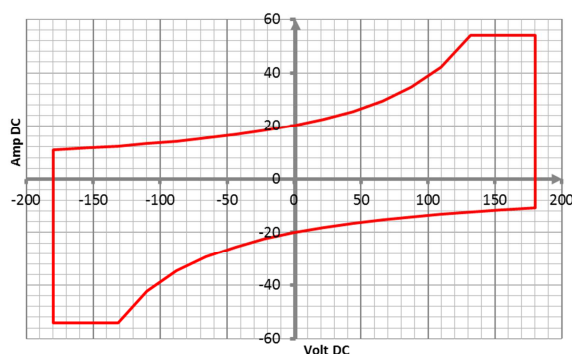
FONCTIONNEMENT PERMANENT EN DC (sans panier résistif)

Ces diagrammes expriment la relation entre courant et tension pour un fonctionnement en génération pure et en absorption pure.

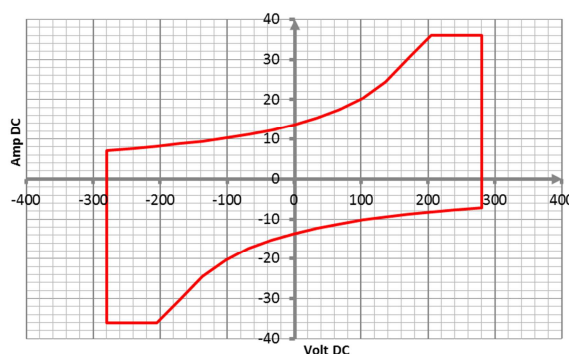
Le fonctionnement permanent est autorisé « à l'intérieur » des diagrammes. Les limitations en génération ou en absorption sont dues à l'échauffement des transistors de puissance.

Un fonctionnement « à l'extérieur » des diagrammes va se traduire soit :

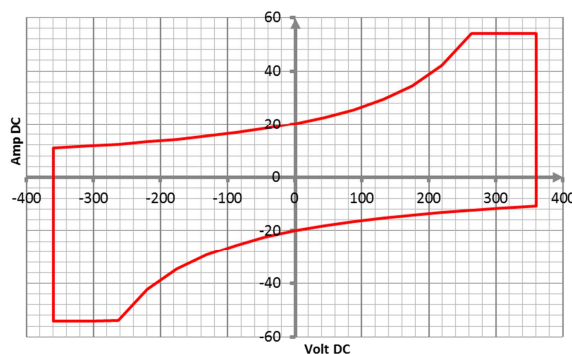
- par une coupure immédiate : protection surintensité en cas de courant supérieur aux limites,
- par une coupure au bout d'un certain temps : protection thermique en cas de surchauffe des éléments de puissance.



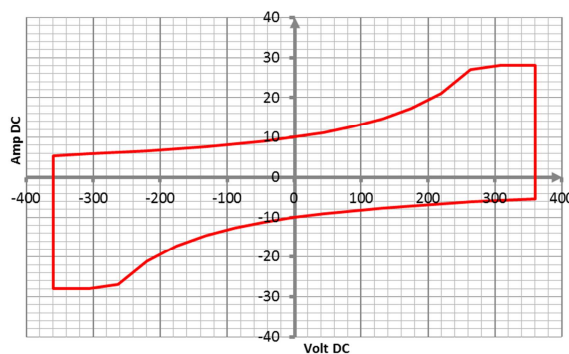
GAMME 180V-54A



GAMME 280V-36A



GAMME 360V-54A

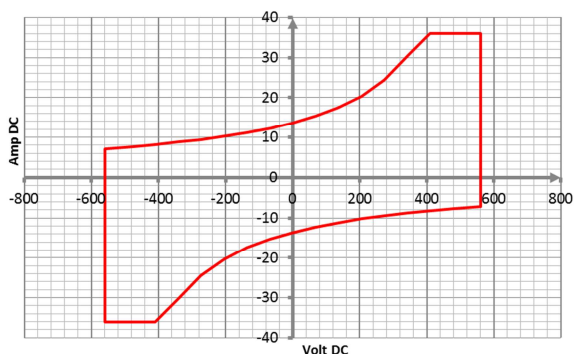


GAMME 360V-28A

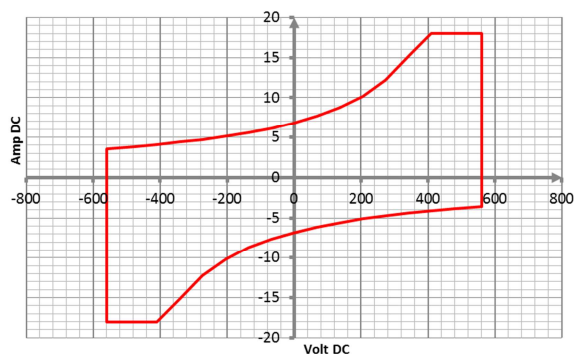
Sans panier résistif, la gamme « 360V-54A » est préférée pour la puissance qu'elle autorise.



3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

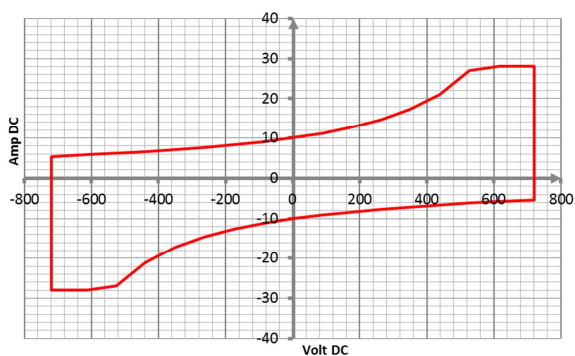


GAMME 560V-36A

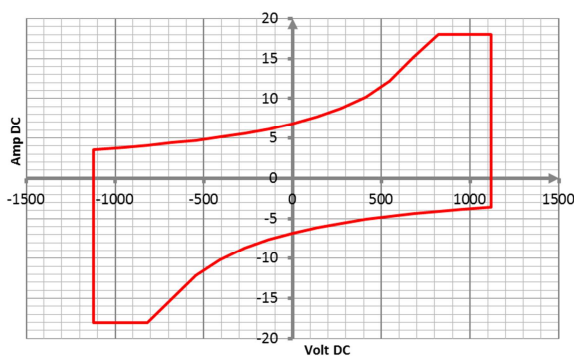


GAMME 560V-18A

Sans panier résistif, la gamme « 560V-36A » est préférée pour la puissance qu'elle autorise.



GAMME 720V-28A

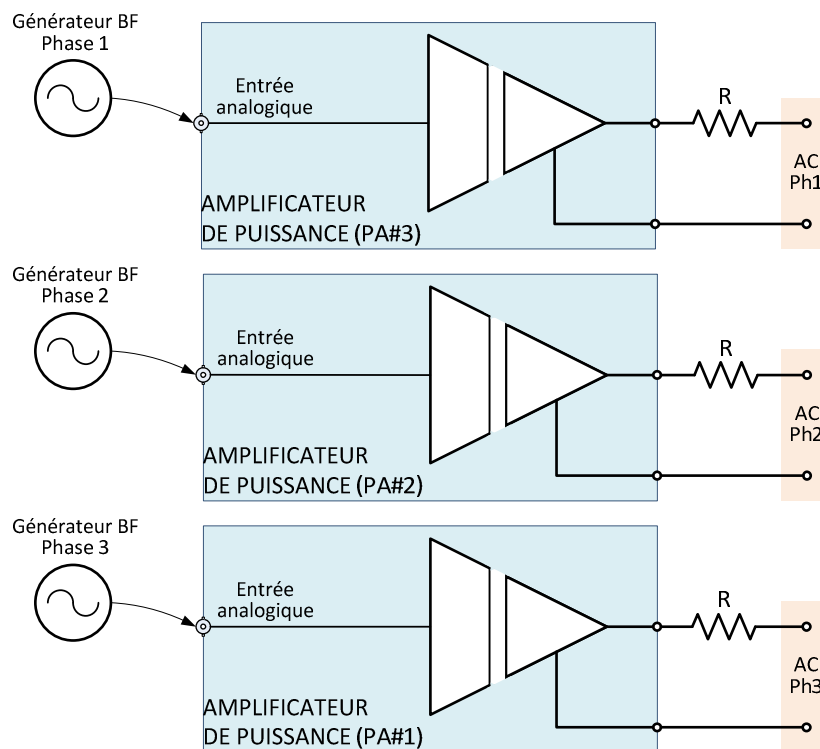


GAMME 1120V-18A

FONCTIONNEMENT EN AC DU « PANIER RESISTIF » (option PCU-3x7-L100)

Le « panier résistif » augmente la capacité d'absorption de l'amplificateur dans les quadrants « Q2 » ou « Q4 » (voir diagramme explicatif en page 5 de ce document).

Le schéma de principe est le suivant en AC :



La résistance « R » peut prendre deux valeurs :

- 8 ohms (limitation du courant à 28 ARMS)
- 32 ohms (limitation du courant à 18 ARMS)

En gamme « 200V », seule la valeur de « 8 ohms » est utilisable.

En gammes « 260V » et « 400V », les valeurs de « 8 ohms » et « 32 ohms » sont utilisables.

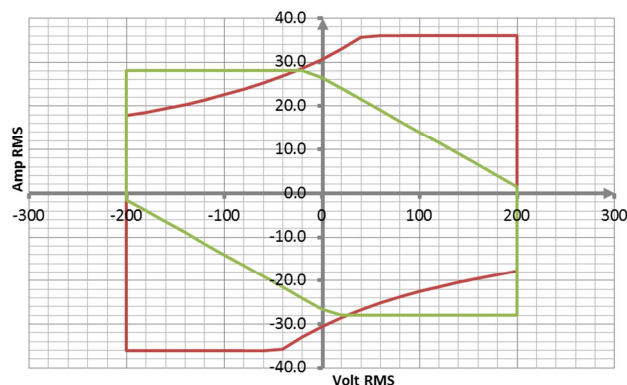


3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

FONCTIONNEMENT EN GAMME « 200V »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 8 ohms

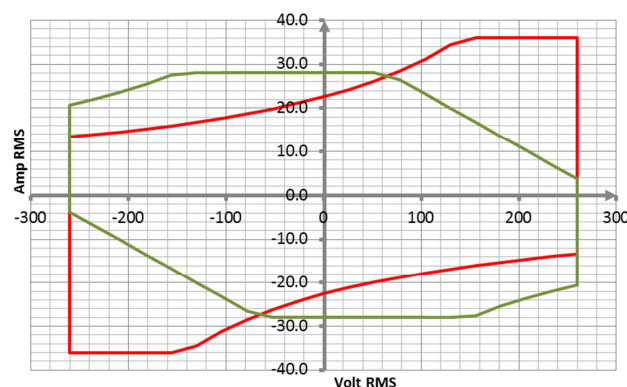
En gamme « 200V », l'utilisation du panier résistif apporte une absorption supplémentaire de 30% dans les quadrants « Q2 » et « Q4 » pour atteindre 28 ARMS.



FONCTIONNEMENT EN GAMME « 260V »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 8 ohms

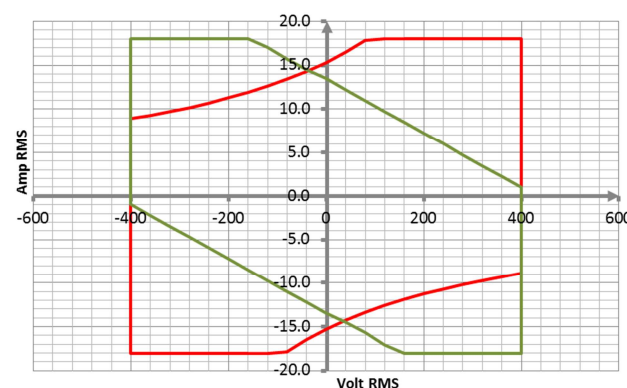
En gamme « 260V », l'utilisation du panier résistif permet une absorption de 100% pour une tension comprise entre 0 et 160 VRMS dans les quadrants « Q2 » et « Q4 ».



FONCTIONNEMENT EN GAMME « 400V »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 32 ohms

En gamme « 400V », l'utilisation du panier résistif de valeur 32 ohms permet une absorption de 100% pour une tension comprise entre 160 et 400 VRMS dans les quadrants « Q2 » et « Q4 ».



FONCTIONNEMENT EN DC DU « PANIER RESISTIF » (option PCU-3x7-L100)

La résistance « R » peut prendre deux valeurs :

- 8 ohms (courant maximal limité à 28 ADC)
- 32 ohms (courant maximal limité à 18 ADC)

La diode permet d'éviter une chute de tension en génération de tension positive.

En gammes :

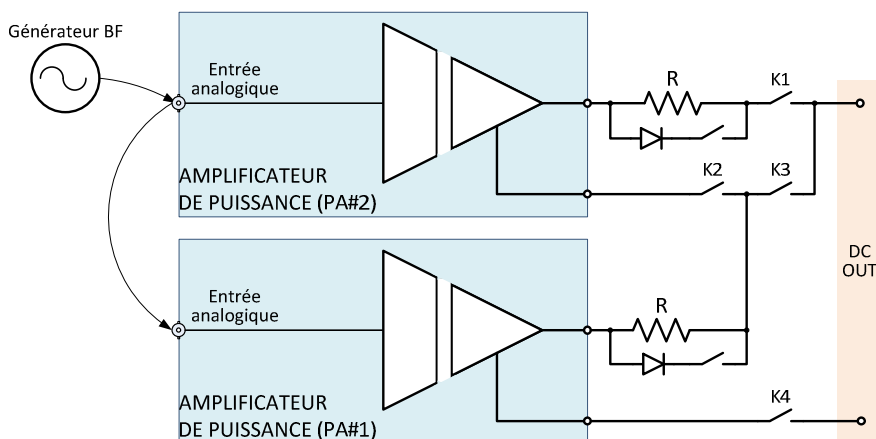
- « 180V-54A »,
- « 280V-36A »,
- « 360V-54A »,
- « 560V-36A »,

Seule la valeur de « 8 ohms » est utilisable.

En gammes :

- « 360V-28A »,
- « 560V-18A »,
- « 720V-28A »,
- « 1120V-18A »,

les valeurs de « 8 ohms » et de « 32 ohms » sont utilisables.

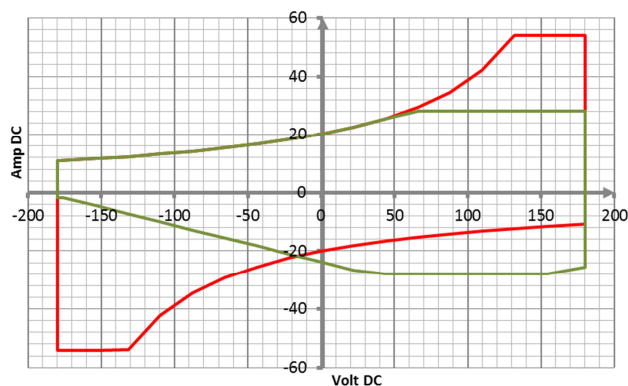


FONCTIONNEMENT EN GAMME « 180V-54A »

Courbe rouge = sans panier résistif

Courbe verte = avec panier résistif 8 ohms

En gamme « 180V-54A », l'utilisation du panier résistif apporte une absorption de 28 ADC pour une tension comprise entre 40 et 150 VDC dans le quadrant « Q4 ».

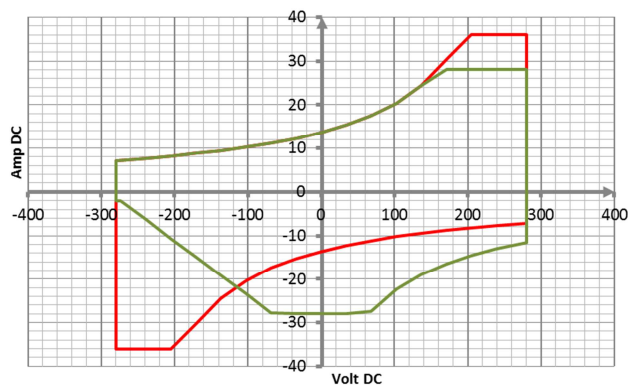


FONCTIONNEMENT EN GAMME « 280V-36A »

Courbe rouge = sans panier résistif

Courbe verte = avec panier résistif 8 ohms

En gamme « 280V-36A », l'utilisation du panier résistif permet une absorption de 28 A pour une tension comprise entre -60 et +60 VDC dans les quadrants « Q3 » et « Q4 ».



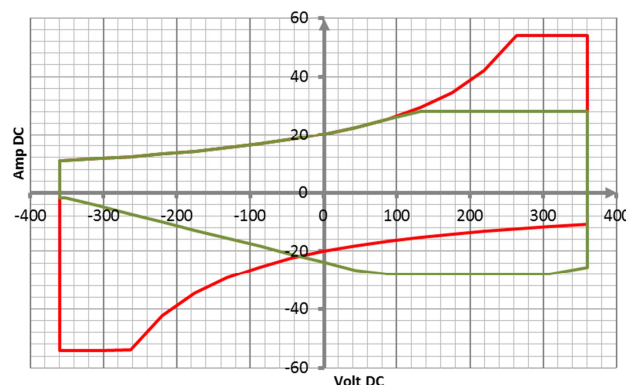


3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

FONCTIONNEMENT EN GAMME « 360V-54A »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 8 ohms

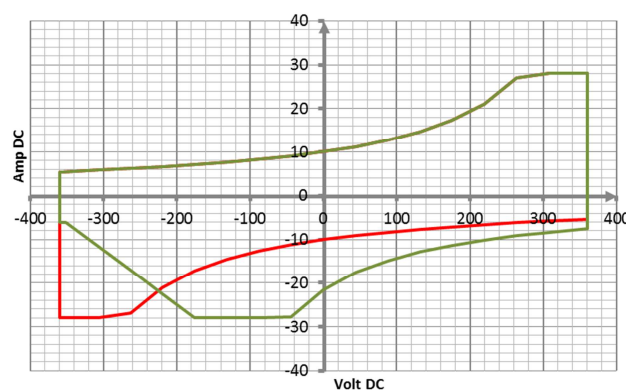
En gamme « 360V-54A », l'utilisation du panier résistif de valeur 8 ohms permet une absorption de 28 ADC pour une tension comprise entre 100 et 300 VDC dans le quadrant « Q4 ».



FONCTIONNEMENT EN GAMME « 360V-28A »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 8 ohms

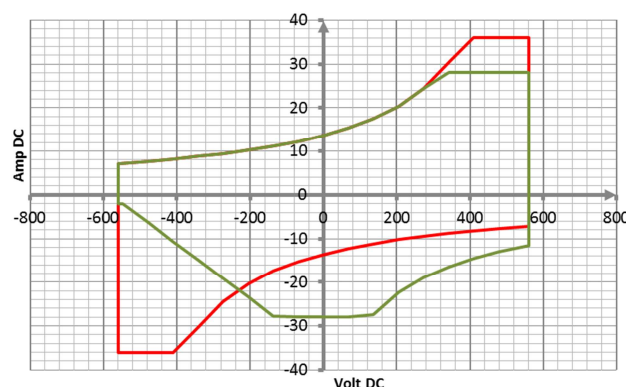
En gamme « 360V-28A », l'utilisation du panier résistif de valeur 8 ohms permet une génération de 100% pour une tension comprise entre 50 et 180 VDC dans le quadrant « Q3 ».



FONCTIONNEMENT EN GAMME « 560V-36A »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 8 ohms

En gamme « 560V-36A », l'utilisation du panier résistif permet un fonctionnement à 28 A pour une tension comprise entre -120 et +120 VDC dans les quadrants « Q3 » et « Q4 ».



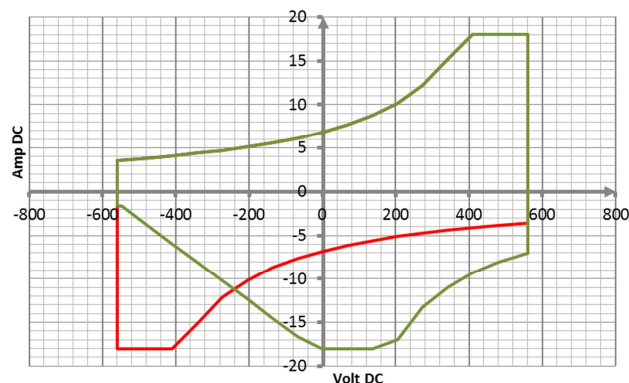


3 x 7000 VA - 4Q POWER AMPLIFIER PCU-3x7000-AB/400V-54A/4G (HP)

FONCTIONNEMENT EN GAMME « 560V-18A »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 32 ohms

En gamme « 560V-18A », l'utilisation du panier résistif permet de doubler l'absorption dans le quadrant « Q4 ».

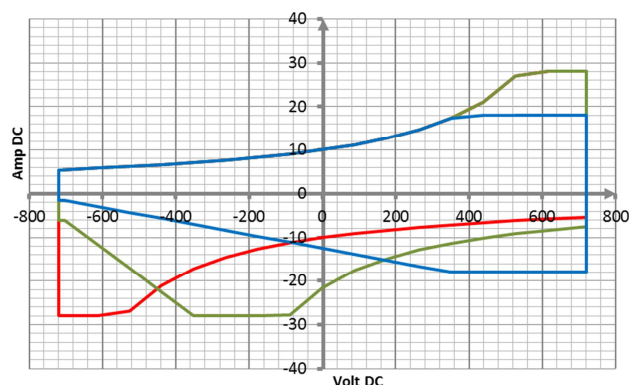


FONCTIONNEMENT EN GAMME « 720V-28A »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 8 ohms
Courbe bleue = avec panier résistif 32 ohms

En gamme « 720V-28A », l'utilisation du panier résistif de valeur 8 ohms décale la plage de génération dans le quadrant « Q3 ».

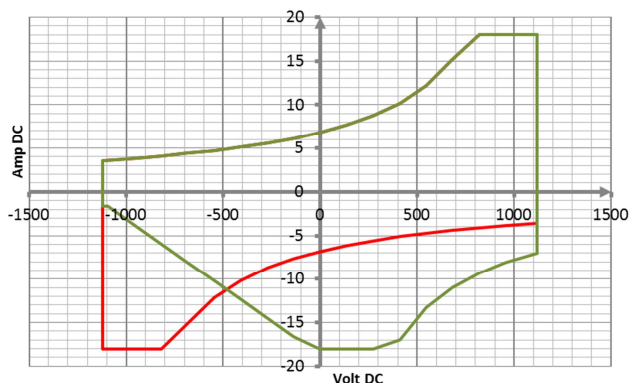
L'utilisation du panier résistif de valeur 32 ohms permet de doubler l'absorption dans le quadrant « Q4 ».



FONCTIONNEMENT EN GAMME « 1120V-18A »

Courbe rouge = sans panier résistif
Courbe verte = avec panier résistif 32 ohms

En gamme « 1120V-18A », l'utilisation du panier résistif permet de doubler l'absorption dans le quadrant « Q4 ».



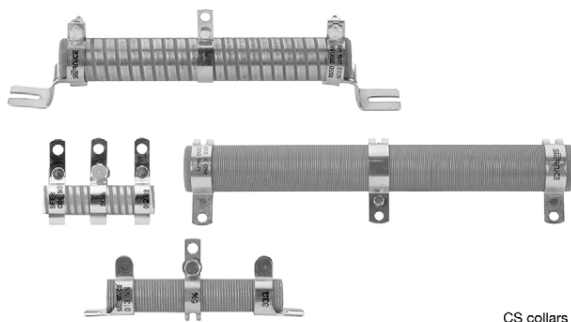
Référence de ce document : FT-PCU-3x7000-FR-V3 - Les caractéristiques techniques citées dans ce document sont susceptibles d'évoluer sans préavis.

Annexe J

Fiche technique de la resistance



Wirewound Resistor, Industrial High Power, Vitreous Tubular, Adjustable, Low Values 0.12 Ω to 560 Ω



CS collars

FEATURES

- High power rating: 16 W to 600 W at 25 °C
- Heavy overloads 10 P_n 15 s $\leq$ 1 %
- Low ohmic values 0.10 Ω available
- High long term stability drift < 1.5 % after 1000 h
- Excellent withstanding of thermal shock
- Mechanical strength
- Fire proof
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912

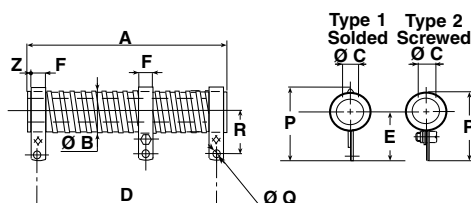
RoHS
COMPLIANT

RSSD medium and high power resistors are noted for their ability to withstand heavy transient and severe shock and vibration conditions. They complement the ohmic range of Vishay styles RW, RWST and RA in the low value area, and can be tapped by means of adjustable collars. Standard RSSD resistors have a single adjustable collar.

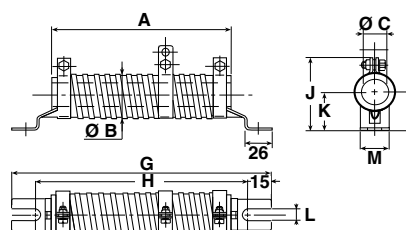
NF F 16101, 10/1988 and 16102, 04/1992: Not applicable (our parts are made of metallic and refractory materials).

DIMENSIONS in millimeters

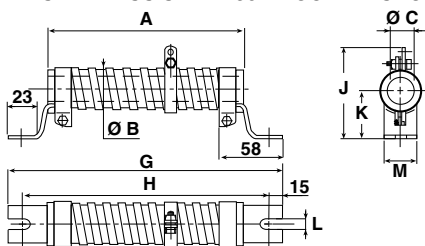
WELDED STAINLESS STEEL 304 L COLLARS "AN" TYPE 1



SCREWED STAINLESS STEEL 304 L COLLARS "CS" TYPE 1



SCREWED STAINLESS STEEL 304 L COLLARS "CS" TYPE 2



RSSD SERIES	CONNECTION	A $\pm$ 2	Ø B MAX.	Ø C MIN.	D	E	F + 0.5 + 0	P	Ø Q	R	Z APPROX.	AVERAGE UNIT WEIGHT IN g
8 x 34	AN type1	34	10	4.1	27 $\pm$ 2	20 $\pm$ 0.5	5	28 $\pm$ 1	3.2	16 $\pm$ 0.5	1	10
10 x 50	AN type1	50	11.5	5	40 $\pm$ 2	22 $\pm$ 0.5	6.35	31 $\pm$ 1	4.2	18 $\pm$ 0.5	1.5	22
13 x 70	AN type1 CS ⁽¹⁾	70	14.5	6.7	56 $\pm$ 2	24 $\pm$ 0.5	6.35	34 $\pm$ 1	4.2	20 $\pm$ 0.5	3.5	38
16 x 94	AN type1	94	18	9.2	78 $\pm$ 2	26.5 $\pm$ 0.5	6.35	38 $\pm$ 1	4.2	21 $\pm$ 0.5	4	55
20 x 117	AN type1	117	22	12.6	98 $\pm$ 2	31 $\pm$ 0.7	6.35	42 $\pm$ 1	4.2	24 $\pm$ 0.7	5	80

Note

⁽¹⁾ CS connections on request.

**DIMENSIONS** in millimeters

RSSD SERIES	CONNECTIONS		A ± 2	Ø B MAX.	Ø C MIN.	D	E	F + 0.5 + 0	G - 4 - 0	H - 4 - 0	J
25 x 138	AN type1	cs type1	138	27	16.4	117 ± 2	33.5 ± 1	9	199	169	50 ± 1.5
25 x 168	AN type1	cs type1	168	27	16.4	147 ± 2	33.5 ± 1	9	229	199	50 ± 1.5
30 x 250	AN type1	cs type1	250	32	21.3	227 ± 2.5	36 ± 1	13	317	287	60 ± 1.5
40 x 370	AN type2	cs type2	370	43	22.3	332 ± 3	57 ± 1.5	18	432	405	69 max.
50 x 373	AN type2	cs type2	373	53	27.1	332 ± 3	63 ± 1.5	18	432	405	80 max.
RSSD SERIES	CONNECTIONS		K	L ± 0.5	M ± 0.5	P	Ø Q	R	Z APPROX.	AVERAGE UNIT WEIGHT IN g	
										AN	CS
25 x 138	AN type1	cs type1	27 ± 1	6.5	24	51 ± 1.5	5.7	28.5 ± 1	6	90	135
25 x 168	AN type1	cs type1	27 ± 1	6.5	24	51 ± 1.5	5.7	28.5 ± 1	6	115	160
30 x 250	AN type1	cs type1	30 ± 1	9	25	55 ± 1.5	5.7	31 ± 1	5	240	290
40 x 370	AN type2	cs type2	45 ± 1	9	30	81.5 max.	9.2	45 ± 1.5	10	845	925
50 x 373	AN type2	cs type2	51 ± 1.5	9	30	92.5 max.	9.2	51 ± 1.5	11.5	1270	1350

STANDARD ELECTRICAL SPECIFICATIONS

MODEL	SIZE	RESISTANCE RANGE Ω	RATED POWER P _{25 °C} W	TOLERANCE ± %
RSSD 8 x 34	0834	0.12 to 10	16	5, 10, 20
RSSD 10 x 50	1050	0.12 to 22	25	5, 10, 20
RSSD 13 x 70	1370	0.12 to 43	42	5, 10, 20
RSSD 16 x 94	1694	0.33 to 75	70	5, 10, 20
RSSD 20 x 117	20117	0.22 to 100	100	5, 10, 20
RSSD 25 x 138	25138	0.10 to 150	140	5, 10, 20
RSSD 25 x 168	25168	0.12 to 220	200	5, 10, 20
RSSD 30 x 250	30250	0.22 to 360	280	5, 10, 20
RSSD 40 x 370	40370	0.47 to 470	450	5, 10, 20
RSSD 50 x 373	50373	0.68 to 560	600	5, 10, 20

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Mechanical Protection	Vishay Sfernice special cement
Resistive Element	Nickel alloy wire
Connections	AN collars CS supporting collars
Average Unit Weight	10 g to 1350 g

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Resistance Range	0.12 Ω to 560 Ω (E12 series)
Standard Tolerance	R ≥ 10 Ω ± 5 % ⁽¹⁾ 1 Ω ≤ R < 10 Ω ± 10 % 0.1 Ω ≤ R < 1 Ω ± 20 %
Power Rating	14 W to 600 W at 25 °C

Note⁽¹⁾ 10 % for RSSD 8 x 34 only.**ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS**

Temperature Range	-55 °C, +450 °C
Climatic Category	-55 °C / +200 °C / 56 days

PERFORMANCE

TESTS	CONDITIONS	REQUIREMENTS	TYPICAL VALUES AND DRIFTS
Short Time Overload	10 P _r during 5 s	2 %	1 %
Climatic Sequence	-55 °C, +200 °C 5 cycles	3 %	1 %
Thermal Shock	Load at 100 % P _r followed by cold -55 °C / 15	2 % or 0.05 Ω	1 %
Load Life	90 / 30 cycle 1000 h at P _r at +25 °C	5 %	1.5 %



SPECIAL FEATURES											
RSSD TYPE		8 x 34	10 x 50	13 x 70	16 x 94	20 x 117	25 x 138	25 x 168	30 x 250	40 x 370	50 x 373
Power Rating at 25 °C	Continuous	16 W	25 W	42 W	70 W	100 W	140 W	200 W	280 W	450 W	600 W
	Reduced	14 W	22 W	38 W	62 W	90 W	125 W	170 W	240 W	360 W	450 W
Resistance Ohmic Range (E12, E24 Series) with 1 Tapping		0.12 Ω 10 Ω	0.12 Ω 22 Ω	0.12 Ω 43 Ω	0.33 Ω 75 Ω	0.22 Ω 100 Ω	0.10 Ω 150 Ω	0.12 Ω 220 Ω	0.22 Ω 360 Ω	0.47 Ω 470 Ω	0.68 Ω 560 Ω
Maximum Number of Additional Tapping		0	1	1	1	1	1	2	2	4	4
Reduction % of Ohmic Value by Tapping		23	21	14	11	10	8	6.5	6	5.7	5.7

ADDITIONAL TAPPINGS

Are supplied with their adjustable collars fastened but not set to any specific value. Please note that, on request, allappings can be adjusted by Vishay Sfernice. For adjustment purposes we would need to be advised of the ohmic values, and tolerances of the sections in successive order in addition to their sum R_n .

The permissible maximum value for an adjustment should take into account the possible negative tolerance of R_n .

Please consult Vishay Sfernice regarding the acceptable tolerance.

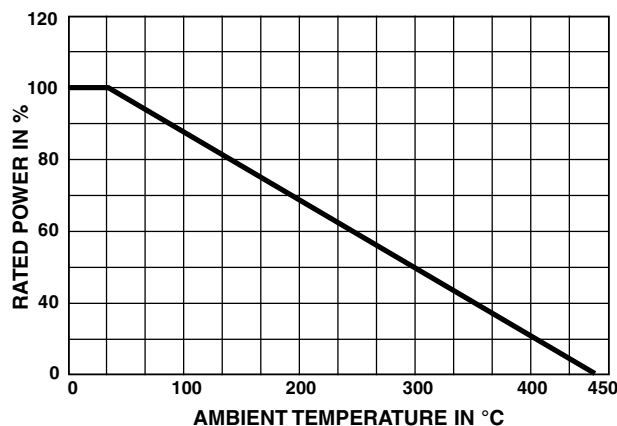
RECOMMENDATIONS FOR USE

Maximum Current Strength:

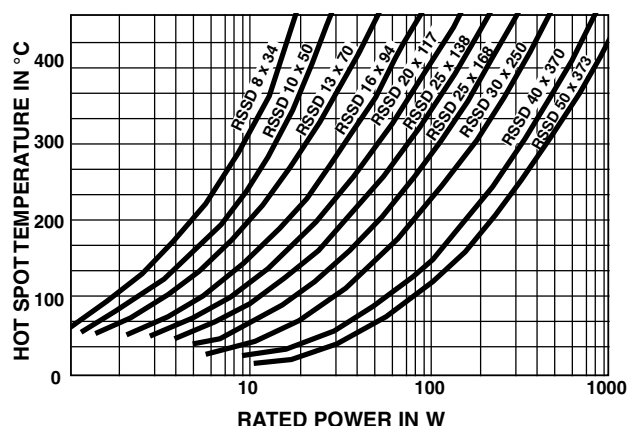
The ohmic value and the power decrease as the connections are brought together. To avoid overload, the maximum current strength that is permissible for R_n should never be exceeded:

$$I_{\max.} = \sqrt{P_r / R_n}$$

POWER RATING



TEMPERATURE RISE



MARKING

Vishay Sfernice trademark, model, style, nominal resistance (in Ω), tolerance (in %), manufacturing date.

ORDERING INFORMATION							
RSSD	10 x 50	AN	10U	5 %	BA25	e	
MODEL	STYLE	SPECIAL DESIGN	CONNECTIONS	OHMIC VALUE	TOLERANCE	PACKAGING	LEAD (Pb)-FREE
		Method N° Optional		Custom items are subject to extra-charge and min. order. Please see price list.			



GLOBAL PART NUMBER INFORMATION

R	S	S	D	2	5	1	3	8	A	1	5	R	0	J	B	1	5			
GLOBAL MODEL		SIZE		LEADS		OHMIC VALUE				TOLERANCE		PACKAGING		SPECIAL						
RSSD		08 x 34 10 x 50 13 x 70 16 x 94 20 x 117 25 x 138 25 x 168 30 x 250 40 x 370 50 x 373		A = AN B = B C = CS F = faston		The three first digits are significant figures and the last digit specifies the number of zeros to follow. R designates decimal point. 4700 = 470 Ω 48R5 = 48.5 Ω R010 = 0.01 Ω ...				J = 5 % K = 10 % M = 20 %		Standard packaging: BXX = box, XXPCS (fixed qty depending on size) No standard packaging: B00 = box, qty open		As applicable. Example: CB4						

RELATED DOCUMENTS

APPLICATION NOTES

Packaging Information	www.vishay.com/doc?50033
Accessories	www.vishay.com/doc?50021



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Annexe K

L'interface graphique du programme Python

Dans cette partie, nous allons voir plus en détail le visuel de l'interface graphique qui a été abordée dans la partie II, chapitre 2, section 2.

Lors de l'exécution du programme, la fenêtre principale de l'interface graphique apparaît, voir Figure K.1.

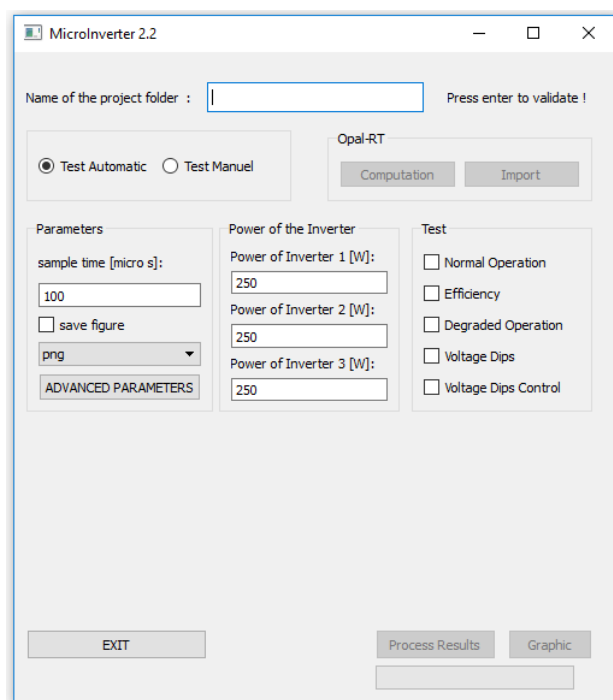


FIGURE K.1 – Fenêtre principale de l'interface graphique

Dans cette fenêtre, il est nécessaire de commencer par compléter le champ du nom du dossier pour le stockage des résultats pour rendre les autres options cliquables. Ensuite, on peut choisir les tests que l'on désire effectuer. Ils sont classés par catégorie,

- fonctionnement normal (Normal Operation)
- fonctionnement sur un réseau dégradé par des harmoniques (Degraded Operation)
- creux de tension (Voltage Dips).

Suivant celle choisie, il est possible que de nouveaux éléments apparaissent dans l'interface, comme montré dans la Figure K.2.

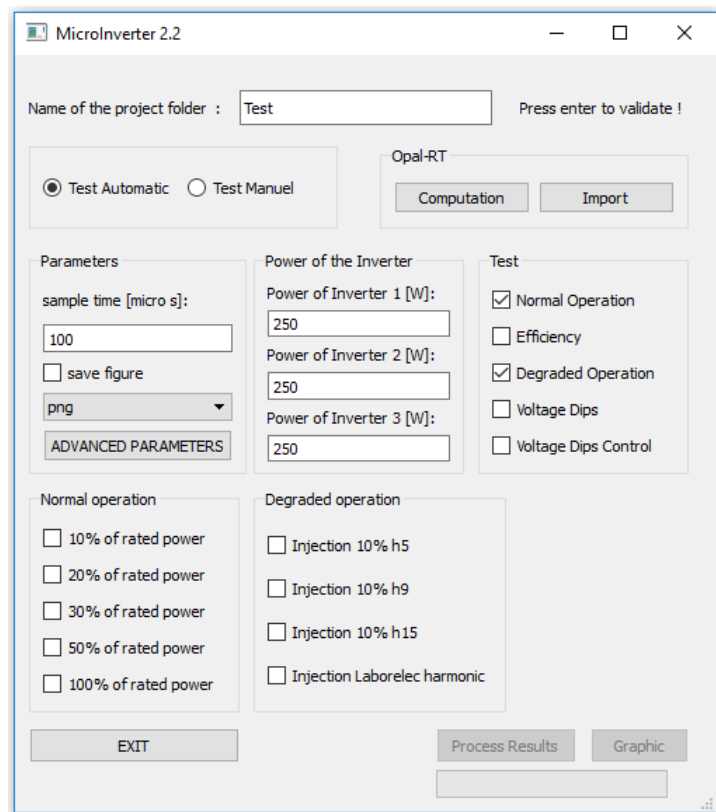


FIGURE K.2 – Fenêtre principale de l'interface graphique avec tous les tests possibles

Une fois les tests sélectionnés, le programme les lance grâce au bouton " Computation " ce qui ouvre une nouvelle fenêtre, voir Figure K.3, qui donne la faculté de choisir le nombre d'onduleurs que l'on va tester. Puis, une seconde fenêtre apparaît, voir Figure K.4, avec les options suivantes,

- amplitude de la tension sur le réseau et
- possibilité de faire un creux de tension personnalisable, avec pour choix la tension résiduel ainsi que la durée de celui-ci.

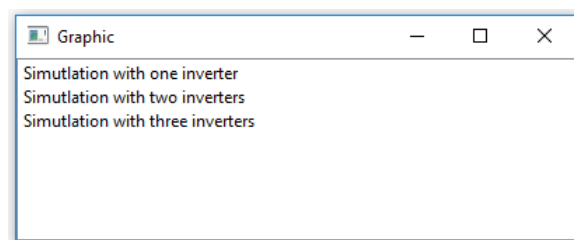


FIGURE K.3 – Fenêtre de choix du nombre de simulateurs

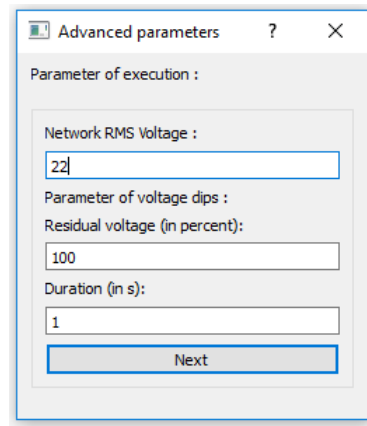


FIGURE K.4 – Fenêtre de choix d'amplitude réseau et de creux de tension

Après, il est possible de traiter ces tests via le bouton "Process Results". Une fois le travail terminé, on peut demander les graphiques, que l'on peut au préalable paramétrer grâce au bouton "Advance parameter" qui va ouvrir une nouvelle fenêtre, voir Figure K.5.

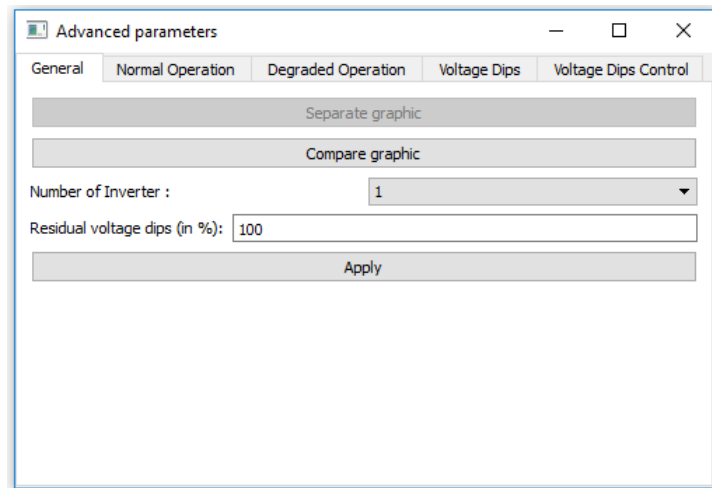


FIGURE K.5 – Fenêtre des paramètres avancés

Plusieurs onglets apparaissent dans le haut de cette fenêtre. Ils permettent de choisir les échelles des graphiques que l'on souhaite modifier comme on peut l'observer sur la Figure K.6.

Advanced parameters

General Normal Operation Degraded Operation Voltage Dips Voltage Dips Control

Graphic Option

Graphic Current

X axis limits 0 5

Y axis limits -2 2

Graphic Voltage

X axis limits 0 5

Y axis limits -350 350

Graphic Power

X axis limits 0 5

Y axis limits -300 0

Apply

FIGURE K.6 – Changement des échelles des graphiques dans la fenêtre des paramètres avancés

Annexe L

Tests de micro-onduleurs

Dans cette annexe, nous allons analyser les résultats des différents tests présentés dans la partie I, chapitre 3 pour trois micro-onduleurs qui ont des puissances nominales proches de 250W. Pour des raisons de simplicité et de confidentialité, le micro-onduleur 1 sera appelé MO_1 , les deux autres MO_2 et MO_3 .

La structure des tests est la suivante :

1. Le fonctionnement normal
 - mesure de puissance à 10%, 20%, 30%, 50% et 100%
 - calcul des rendements et du rendement européen
2. Les systèmes de protection
 - tension AC maximum et minimum
 - fréquence maximum et minimum
 - impossibilité de fonctionner en mode isolé avec une charge RLC
3. Le fonctionnement sur un réseau dégradé
 - avec injection de 10% d'harmonique 5 ou 9 ou 15
 - avec injection de plusieurs harmoniques
 - avec un creux de tension

1 Tests en fonctionnement normal

Cette partie porte sur l'analyse des résultats en fonctionnement normal des trois micro-onduleurs.

1.1 Fonctionnement à 10% de la puissance nominale

Les résultats des tests sont donnés dans la Table L.1. Mais au-delà de ces résultats sur le rendement, qui comme prévu est très bas, proche de 50%, l'analyse de la sinusoïde de courant est très intéressante.

La Figure L.1 représente le courant AC de sortie du premier micro-onduleur. Ce courant est censé être sinusoïdal, mais on observe un signal très dégradé avec de grands pics de courant qui sont jusqu'à quatre fois supérieurs à l'amplitude normale de la sinusoïde. Ces pics pourraient être néfastes pour le réseau. Pour le MO_2 , le courant est représenté à la Figure L.2. On y observe un courant beaucoup plus sinusoïdal, mais qui est quand même entaché d'interférences. Mais attention, dans ce cas-ci, le micro-onduleur travaille à 12% de sa puissance nominale comparé aux autres qui sont à 10%. Le courant du MO_3 à la Figure L.3 se situe sur le plan de la qualité entre le MO_1 et le MO_2 , avec une sinusoïde plus visible et des pics de courant plus faibles que le MO_1 .

	Puissance d'entrée [W]	Point de fonctionnement	Puissance de sortie [W]	Rendement
MO_1	23	10.4%	11	47.8%
MO_2	32	12%	18	56.3%
MO_3	25	10%	12	48%

TABLE L.1 – Résultat du test en fonctionnement normal à 10% de la puissance nominale

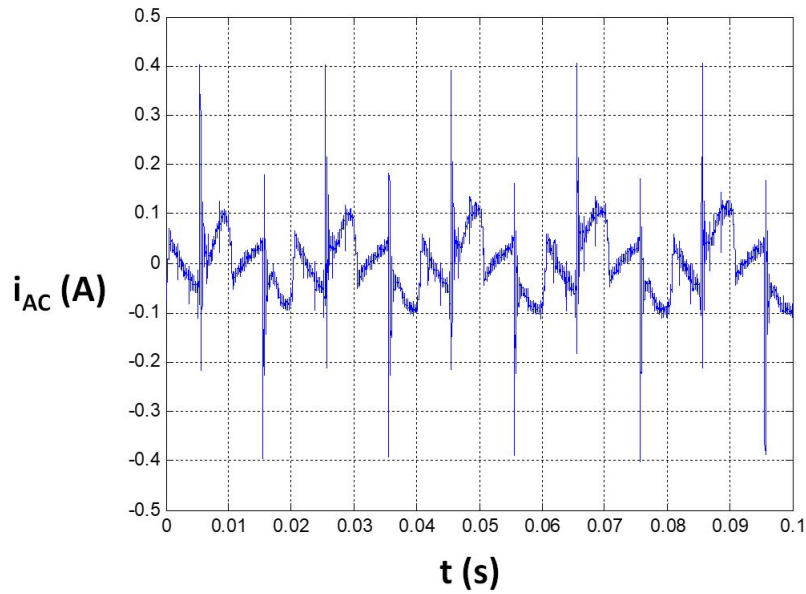


FIGURE L.1 – Courant AC du micro-onduleur 1 à 10% de sa puissance nominale

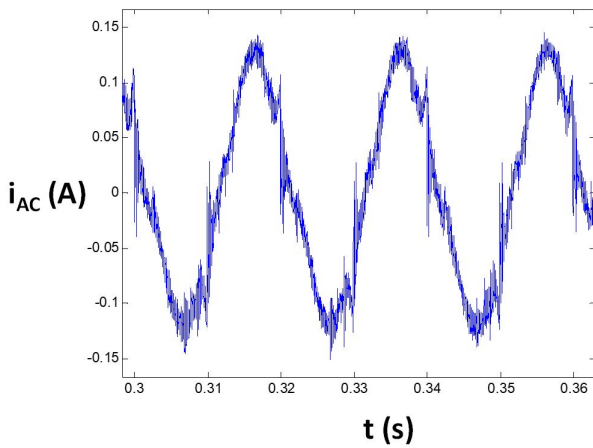


FIGURE L.2 – Courant AC du micro-onduleur 2 à 10% de sa puissance nominale

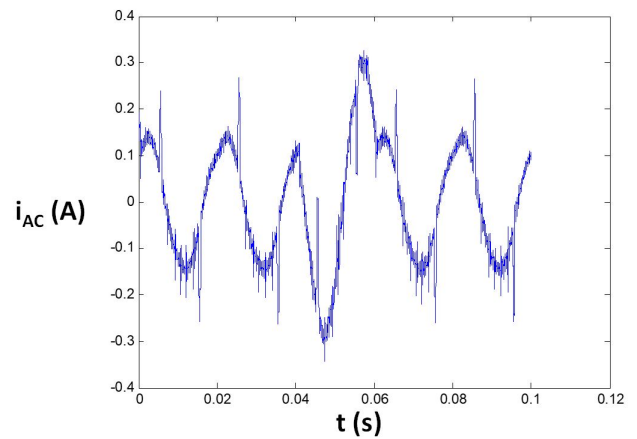


FIGURE L.3 – Courant AC du micro-onduleur 3 à 10% de sa puissance nominale

1.2 Fonctionnement à 20% de la puissance nominale

Les résultats des tests sont donnés dans la Table L.2. On remarque bien dans ce cas-ci une augmentation du rendement chez tous les micro-onduleurs.

Comme le montre la Figure L.4, la forme du courant du MO_1 est meilleure qu'avant, mais celle-ci est toujours entachée de pics de courant qui cette fois s'amenuisent pour atteindre seulement une valeur de 1.8 fois la valeur de l'amplitude de la sinusoïde. Pour le MO_2 , le courant

est représenté à la Figure L.5. Dans ce cas-ci, on observe également une amélioration de la forme de la sinusoïde. L'amplitude des interférences devient aussi moins importante. La Figure L.6 qui représente la forme du courant du MO_3 , dispose toujours d'une qualité entre MO_1 et MO_2 .

	Puissance d'entrée [W]	Point de fonctionnement	Puissance de sortie [W]	Rendement
MO_1	44	20%	30	68.2%
MO_2	51	20%	39	76.5%
MO_3	50	20%	30	60%

TABLE L.2 – Résultat du test en fonctionnement normal à 20% de la puissance nominale

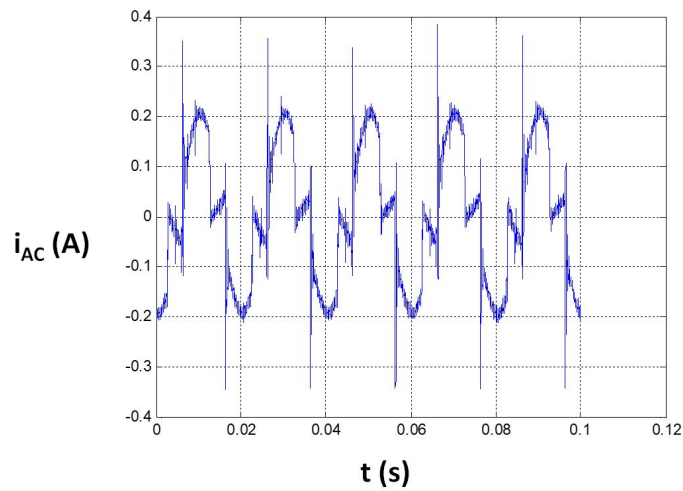


FIGURE L.4 – Courant AC du micro-onduleur 1 à 20% de sa puissance nominale

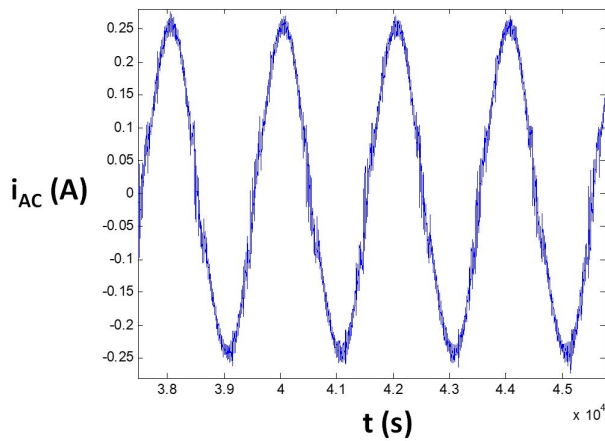


FIGURE L.5 – Courant AC du micro-onduleur 2 à 20% de sa puissance nominale

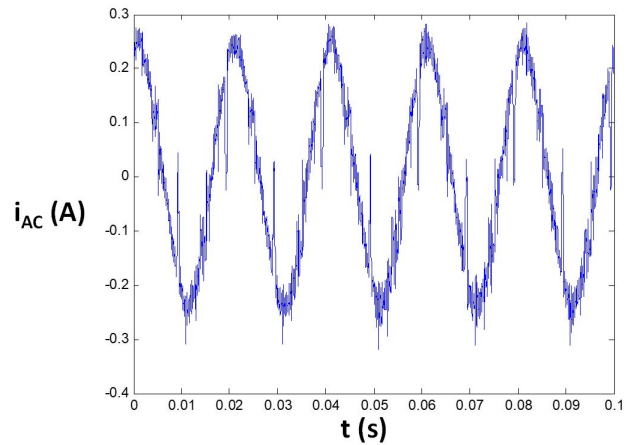


FIGURE L.6 – Courant AC du micro-onduleur 3 à 20% de sa puissance nominale

1.3 Fonctionnement à 30% et à 50% de la puissance nominale

Les résultats des tests sont donnés dans la Table L.3. On remarque toujours une amélioration de la forme de la sinusoïde entre le fonctionnement à 20% et à 30% ainsi qu'à 50%. Mais uniquement dans le cas du MO_2 à 50%, la Figure L.10, on a un résultat proche d'une belle sinusoïde sans pic de tension ou déformation. Mais on peut toujours en observer pour les MO_1

et MO_3 à 50% de la puissance nominale sur les Figures L.8 et L.12.

	Puissance d'entrée [W]	Point de fonctionnement	Puissance de sortie [W]	Rendement
MO_1	67	30.4%	52	77.6%
MO_2	74	29.6%	61	82.4%
MO_3	75	30%	54	72%
MO_1	110	50%	90	81.8%
MO_2	125	50%	112	89.6%
MO_3	125	50%	102	81.6%

TABLE L.3 – Résultat du test en fonctionnement normal à 30% et à 50% de la puissance nominale

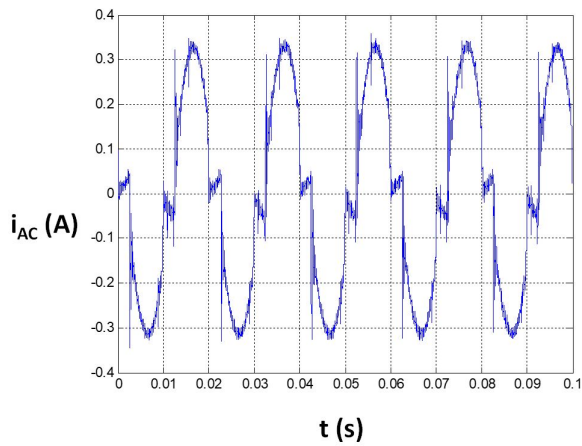


FIGURE L.7 – Courant AC du micro-onduleur 1 à 30% de sa puissance nominale

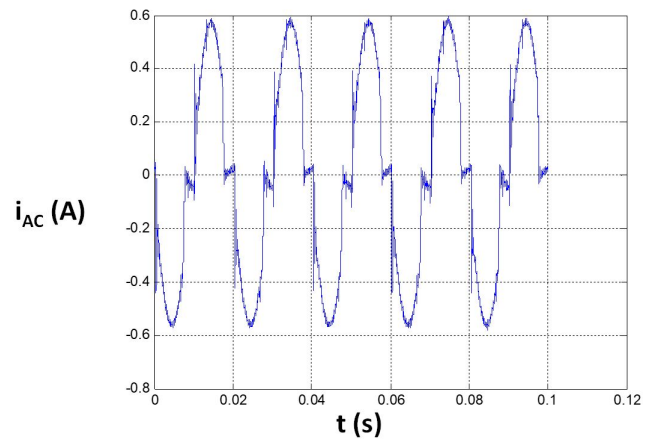


FIGURE L.8 – Courant AC du micro-onduleur 1 à 50% de sa puissance nominale

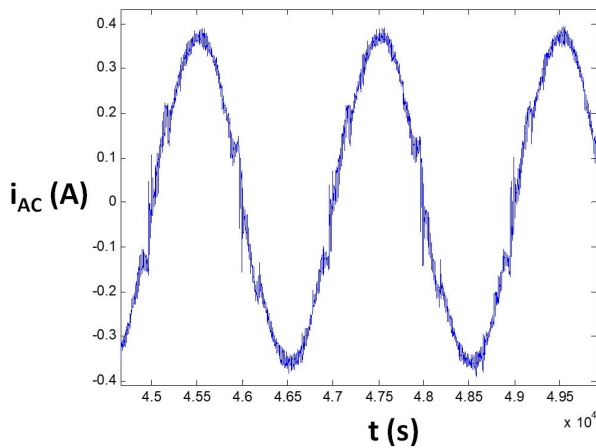


FIGURE L.9 – Courant AC du micro-onduleur 2 à 30% de sa puissance nominale

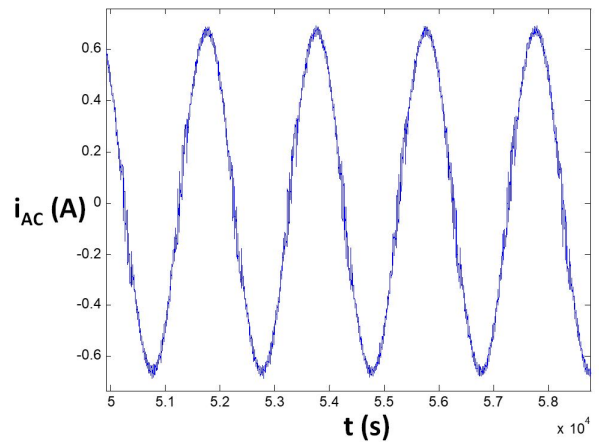


FIGURE L.10 – Courant AC du micro-onduleur 2 à 50% de sa puissance nominale

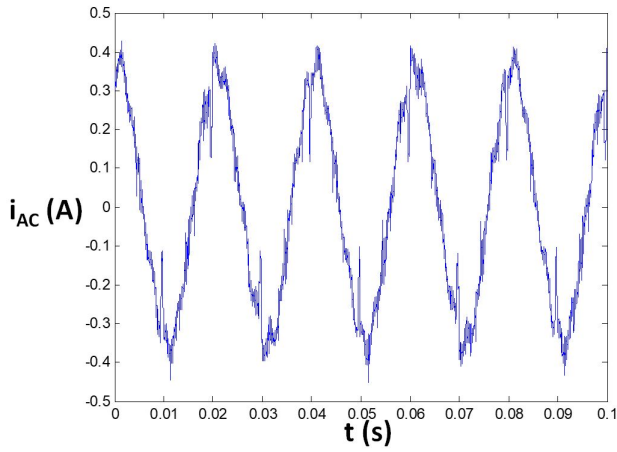


FIGURE L.11 – Courant AC du micro-onduleur 3 à 30% de sa puissance nominale

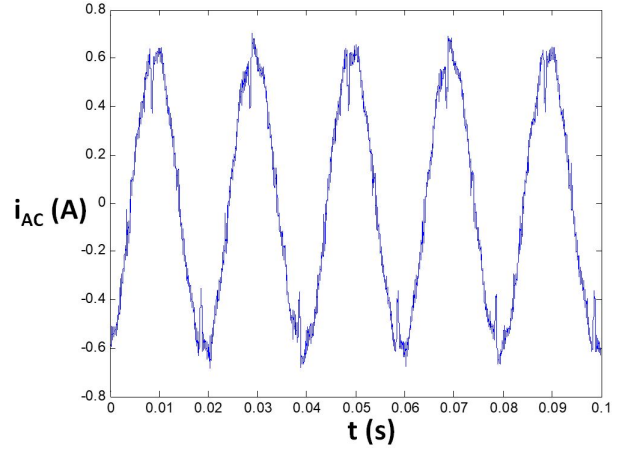


FIGURE L.12 – Courant AC du micro-onduleur 3 à 50% de sa puissance nominale

1.4 Fonctionnement à 100% de la puissance nominale

Les résultats des tests sont donnés dans la Table L.4. On observe sur les Figures L.13 et L.14 de belles sinusoïdes de courant. Sur la Figure L.15 du MO_3 , on remarque que l'on a toujours une sinusoïde bruitée.

	Puissance d'entrée [W]	Point de fonctionnement	Puissance de sortie [W]	Rendement
MO_1	220	100%	192	87.3%
MO_2	250	100%	232	92.8%
MO_3	250	100%	214	85.6%

TABLE L.4 – Résultat du test en fonctionnement normal à 100% de la puissance nominale

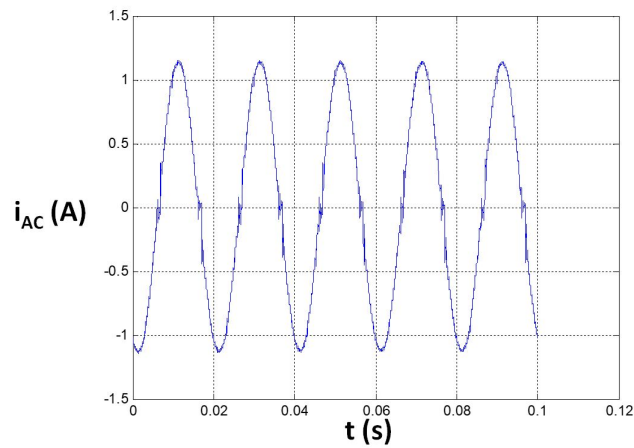


FIGURE L.13 – Courant AC du micro-onduleur 1 à 100% de sa puissance nominale

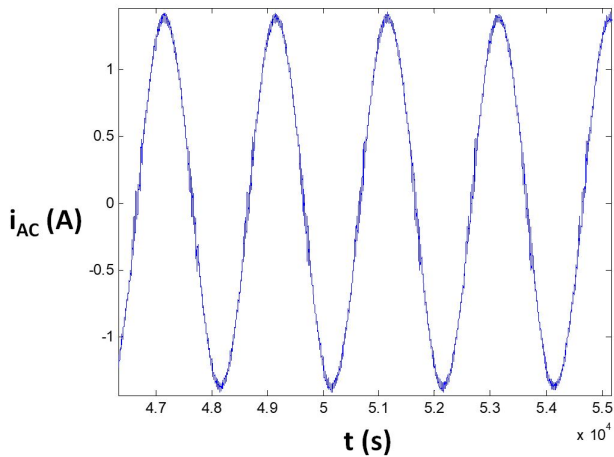


FIGURE L.14 – Courant AC du micro-onduleur 2 à 100% de sa puissance nominale

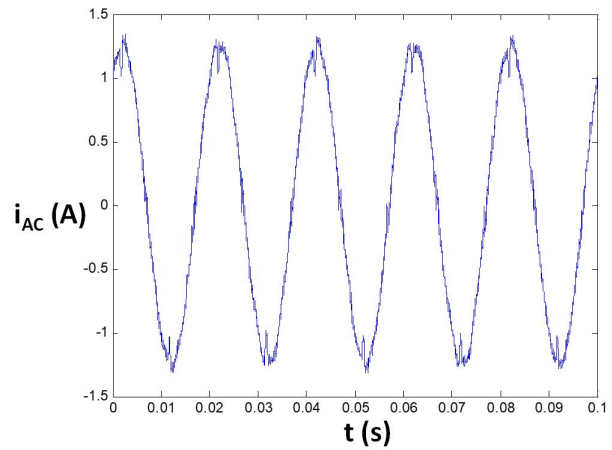


FIGURE L.15 – Courant AC du micro-onduleur 3 à 100% de sa puissance nominale

Dans la Table L.5, nous avons mis en relation le rendement maximum donné par le constructeur et celui que nous avons mesuré pour pouvoir les comparer. On y observe des différences pouvant atteindre près de 10% de rendement. Il faut relativiser la différence entre les deux valeurs de rendement car les tests n'ont pas été exécutés dans les mêmes conditions. En l'occurrence, nous n'avons pas essayé de respecter la norme européen EN 50530 qui vise à déterminer la manière de calculer l'efficacité globale des onduleurs photovoltaïques raccordés au réseau.

	Rendement maximum observé	Rendement maximum fourni par le constructeur
MO_1	87.3%	96.3%
MO_2	92.8%	95.5%
MO_3	85.6%	Non communiqué par le constructeur

TABLE L.5 – Comparaison des rendements maximums des micro-onduleurs

Dans la Table L.6, lorsqu'on en tient compte, les différences sont beaucoup plus marquées pour atteindre jusqu'à 20%. Mais il est à noter que le rendement à 5% n'a pas été calculé, on l'a considéré égal à celui à 10%. Ce qui, selon la logique de croissance de rendement en fonction de l'augmentation de la puissance d'entrée par rapport à la puissance nominale, veut que ce soit bénéfique au calcul du rendement.

	Rendement européen observé	Rendement européen fourni par le constructeur
MO_1	77.7%	95%
MO_2	84.4%	94%
MO_3	75.6%	95.7%

TABLE L.6 – Comparaison des rendements européens des micro-onduleurs

La Figure L.16 présente les courbes des rendements observés. Grâce à ces courbes, on voit qu'en tout point le MO_2 est supérieur aux autres micro-onduleurs. Les droites en pointillés représentent le rendement européen observé. On constate donc bien ici que le rendement maximum est important pour le rendement européen, mais que la forme de la courbe à basse utilisation du micro-onduleur l'est tout autant. On peut remarquer cela en comparant la courbe rouge du MO_1 et la courbe verte du MO_3 , qui ont un rendement maximum proche, mais que dû à la différence de courbure à basse puissance le MO_1 a un meilleur rendement européen.

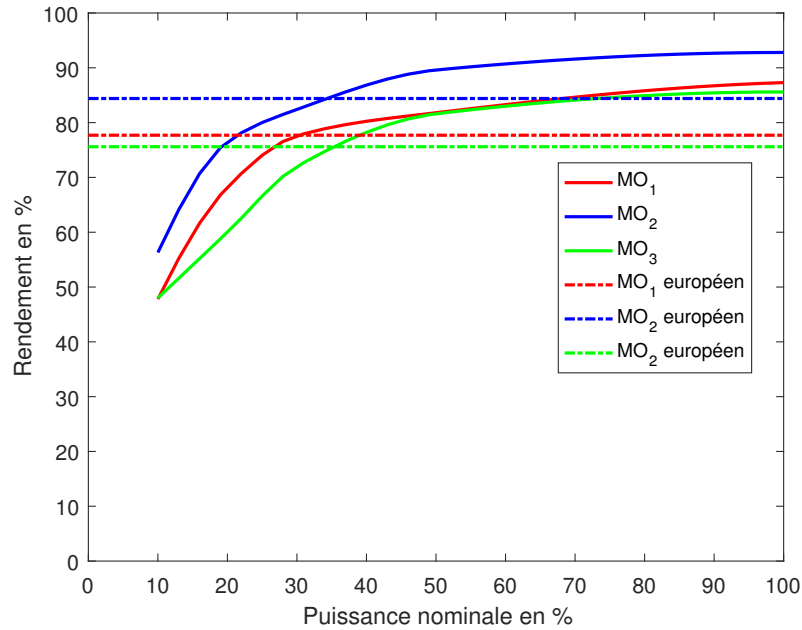


FIGURE L.16 – Rendement des micro-onduleurs en fonction du pourcentage de puissance utilisé

2 Tests des systèmes de protection

Les résultats pour les trois micro-onduleurs sont fournis dans la Table L.7. On remarque que pour le MO_1 la fréquence de seuil supérieur de coupure est TRÈS élevée. Ce qui peut poser de graves problèmes, car une fréquence de réseau supérieure à 50Hz signifie une surproduction d'électricité par rapport à la consommation. Si l'onduleur ne se déconnecte pas, il continue à produire de l'électricité et il va donc aggraver le problème. Les autres micro-onduleurs respectent à peu près les valeurs des normes. Les différences peuvent être expliquées par des imprécisions du matériel ou du fait que nous ne sommes pas dans les mêmes conditions que la norme.

		Résultat expérimental	Donnée du constructeur
MO_1	tension minimum	183V	Non communiqué
	tension maximum	264V	Non communiqué
	fréquence minimum	47.5Hz	Non communiqué
	fréquence maximum	51.45Hz	Non communiqué
MO_2	tension minimum	180V	200V
	tension maximum	274V	270V
	fréquence minimum	47.7Hz	47.5Hz
	fréquence maximum	50.45Hz	50.5Hz
MO_3	tension minimum	180V	182V
	tension maximum	262V	264.5V
	fréquence minimum	47.5Hz	47.5Hz
	fréquence maximum	50.2Hz	50.2Hz

TABLE L.7 – Limites de fonctionnement en tensions et en fréquences

Quant au test d'ilotage, le MO_1 montre que suite à la perte du réseau le micro-onduleur se déconnecte après 0.16s, pour le MO_3 il faudra attendre 0.5s. Ces deux micro-onduleurs ne fonctionnent donc pas en mode isolé mais ils respectent la norme même si le MO_3 est plus lent.

Le MO_2 ne se déconnecte quant à lui pas après la perte du réseau, il reste connecté plus de 40s (le test a ensuite été arrêté). Ce micro-onduleur est pourtant certifié pour respecter cette norme de déconnexion en cas d'îlotage.

3 Tests en fonctionnement sur un réseau dégradé

Dans cette section, nous allons soumettre les micro-onduleurs à des réseaux dégradés pour observer leurs réactions ainsi que la forme du courant qui en découle. On calculera aussi le THD du réseau pour savoir si les micro-onduleurs ont un effet atténuateur ou amplificateur.

3.1 Tests avec injection de 10% d'harmonique 5

Dans ces tests, nous allons soumettre les micro-onduleurs à un réseau de 230V d'amplitude avec une fréquence de 50Hz (représentant la fondamentale). À cette sinusoïde, on superpose une sinusoïde à 250Hz dont l'amplitude est 10% de la fondamentale, soit 23V, représentant l'harmonique 5, et donc le réseau à un $THD_1 = 10\%$.

La forme du courant de ce réseau en l'absence de micro-onduleur et de toute autre interférence est montrée à la Figure L.17. Une première observation des Figures L.18 et L.19 des deux de nos trois micro-onduleurs ¹, nous montre que, suivant le micro-onduleur utilisé, la sinusoïde est plus ou moins déformée.

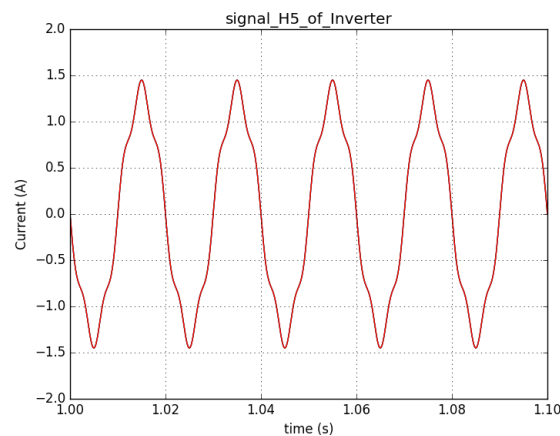


FIGURE L.17 – Courant AC de référence avec 10% d'harmonique 5

1. Suite à une erreur dans le rapport du MO_1 la figure n'est pas disponible

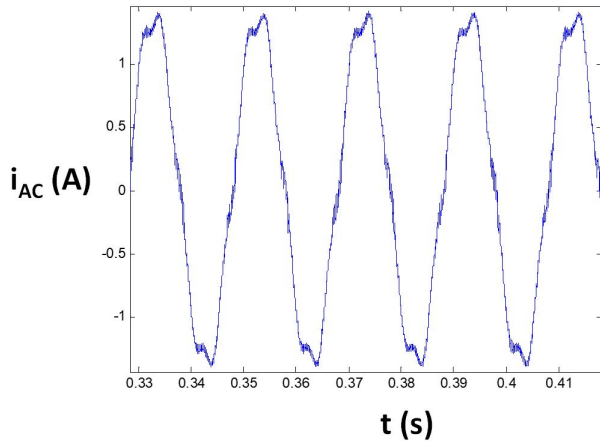


FIGURE L.18 – Courant AC du micro-onduleur 2 avec 10% d'harmonique 5

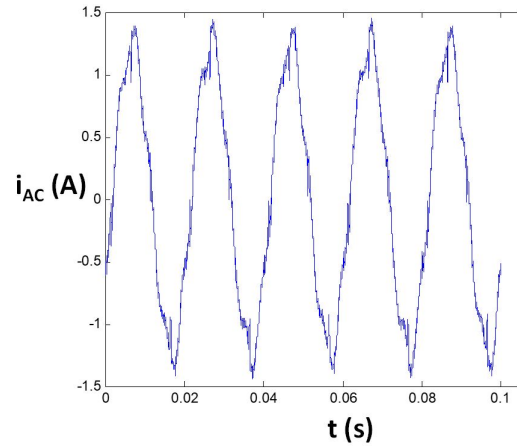


FIGURE L.19 – Courant AC du micro-onduleur 3 avec 10% d'harmonique 5

On peut faire une Fast Fourier Transform (transformation de Fourier rapide) (FFT) ² sur ces signaux pour analyser si il y a apparition ou non d'autres harmoniques. En faisant cette analyse, on ne s'occupe pas des inter-harmoniques. Grâce à cette FFT, on peut voir sur la Figure L.22 que le MO_3 génère de nouvelles harmoniques comparé au signal de référence sur la Figure L.20. De plus avec la FFT, il est possible de calculer le THD_1 . On obtient pour MO_2 , $THD_1 = 8.53\%$, et pour MO_3 , $THD_1 = 11.1\%$. il apparaît donc que le MO_2 amorti les harmoniques 5 tandis que le MO_3 augmente le taux de distorsion harmonique total.

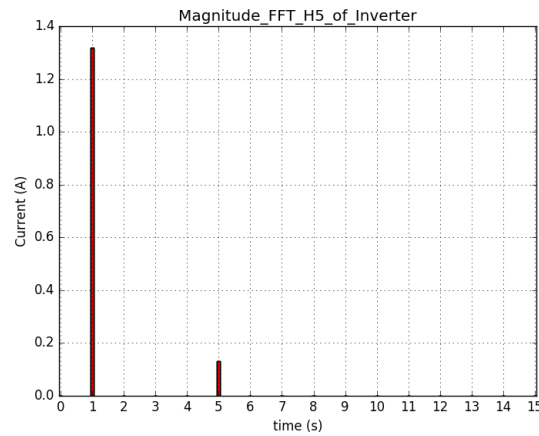


FIGURE L.20 – FFT du courant AC de référence avec 10% d'harmonique 5

2. La FFT est un algorithme de calcul de la transformation de Fourier discrète

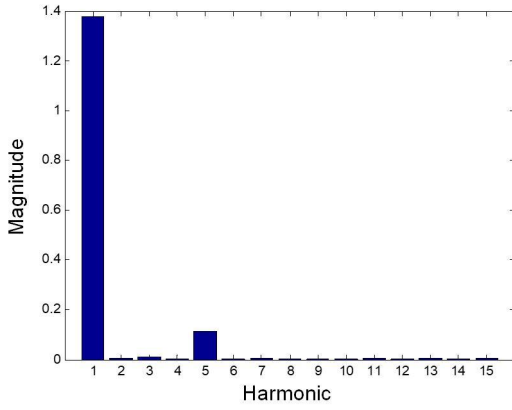


FIGURE L.21 – FFT du courant AC du micro-onduleur 2 avec 10% d'harmonique 5

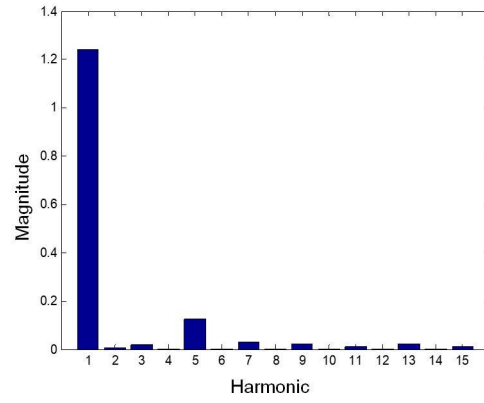


FIGURE L.22 – FFT du courant AC du micro-onduleur 3 avec 10% d'harmonique 5

3.2 Tests avec injection de 10% d'harmoniques 9 et 15

Pour ces tests, nous soumettrons les micro-onduleurs au même réseau de 230V d'amplitude avec une fréquence de 50Hz (représentant la fondamentale), mais à cette sinusoïde, nous superposerons une sinusoïde à 450Hz dont l'amplitude est 10% de la fondamentale, soit 23V, représentant l'harmonique 9, et lors des tests d'harmonique 15, nous remplacerons la sinusoïde de 450 Hz par une sinusoïde de même amplitude, mais à 750Hz.

Le réseau de référence avec 10% d'harmonique 9 est montré en Figure L.23. On peut le comparer aux MO_2 et MO_3 dont les Figures sont respectivement L.24 et L.25. On observe ici que les différences entre les deux micro-onduleurs commencent à s'atténuer.

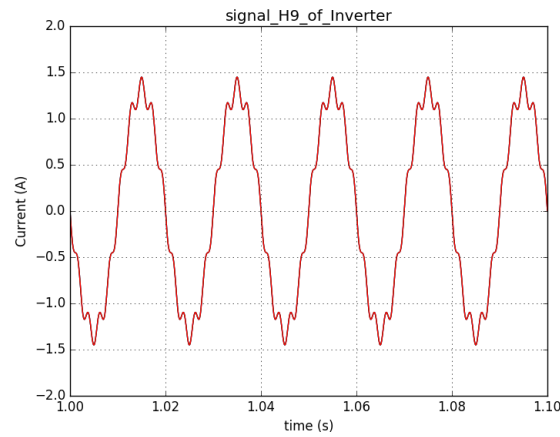


FIGURE L.23 – Courant AC de référence avec 10% d'harmonique 9

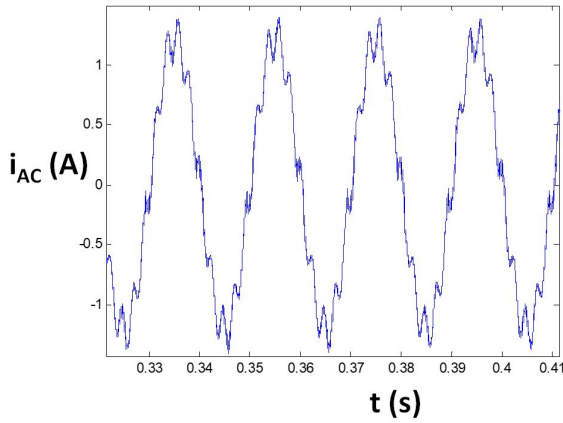


FIGURE L.24 – Courant AC du micro-onduleur 2 avec 10% d’harmonique 9

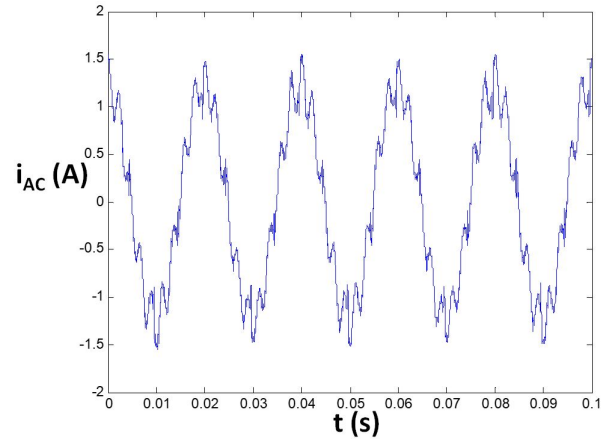


FIGURE L.25 – Courant AC du micro-onduleur 3 avec 10% d’harmonique 9

Lorsque l’on réalise la FFT, on observe que la Figure L.28 représentant le MO_3 , génère plus d’harmoniques et amplifie aussi l’harmonique 9, comparé à la Figure L.27 qui représente le MO_2 . Ce qui est corroboré par le THD_1 du MO_3 qui est égal à 19.14% tandis que celui du MO_2 n’est que de 13.66%. On a donc dans les deux cas une augmentation du taux de distorsion harmonique.

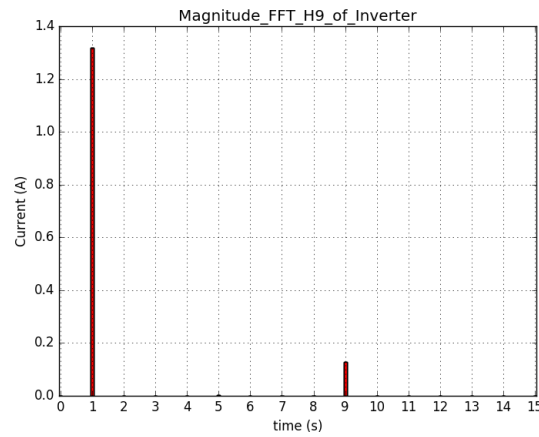


FIGURE L.26 – FFT du courant AC de référence avec 10% d’harmonique 9

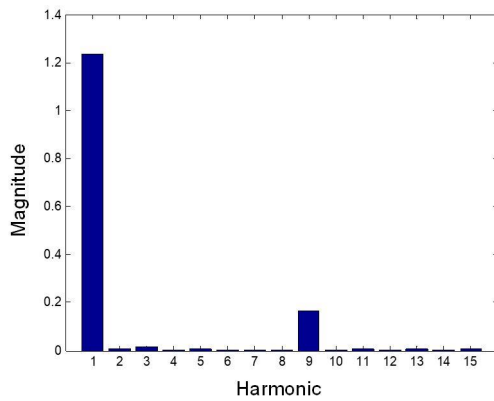


FIGURE L.27 – FFT du courant AC du micro-onduleur 2 avec 10% d’harmonique 9

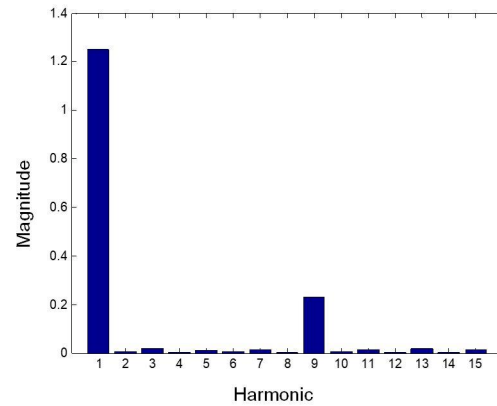


FIGURE L.28 – FFT du courant AC du micro-onduleur 3 avec 10% d’harmonique 9

Le réseau de référence avec 10% d'harmonique 15 est montré en Figure L.29. On peut le comparer aux MO_2 et MO_3 dont les Figures sont respectivement L.30 et L.31. On observe ici qu'autant le MO_2 se comporte correctement, autant le MO_3 génère énormément d'interférences.

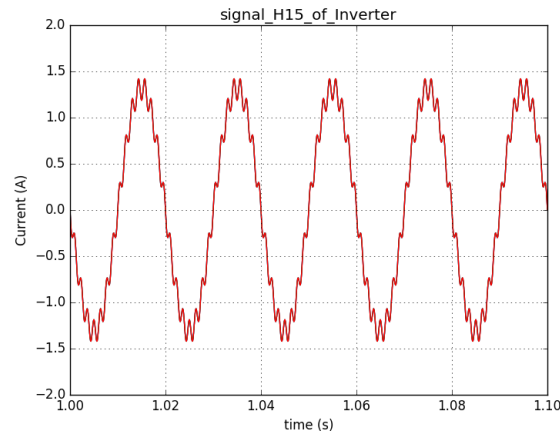


FIGURE L.29 – Courant AC de référence avec 10% d'harmonique 15

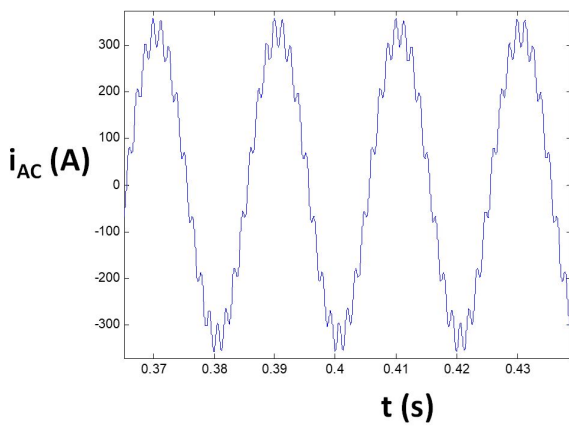


FIGURE L.30 – Courant AC du micro-onduleur 2 avec 10% d'harmonique 15

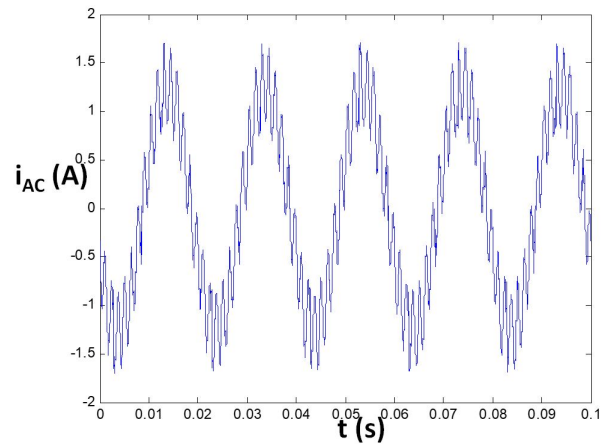


FIGURE L.31 – Courant AC du micro-onduleur 3 avec 10% d'harmonique 15

Regardons ce que la FFT nous donne comme informations. La référence est fournie à la Figure L.32. Lorsqu'on la compare avec celle du MO_2 qui est fournie à la Figure L.33, on note peu de différence, on a dans ce cas si un $THD_1 = 9.9\%$. Mais lorsque l'on compare la référence à la Figure L.34 du MO_3 , on observe tout de suite que l'on a une grande amplification de l'amplitude de l'harmonique de rang 15, on obtient dans ce cas si un $THD_1 = 30.7\%$.

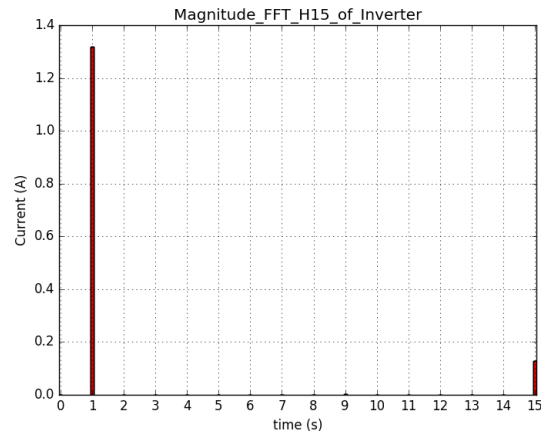


FIGURE L.32 – FFT du courant AC de référence avec 10% d'harmonique 15

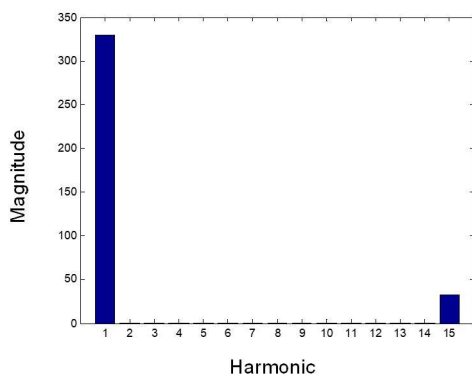


FIGURE L.33 – FFT du courant AC du micro-onduleur 2 avec 10% d'harmonique 15

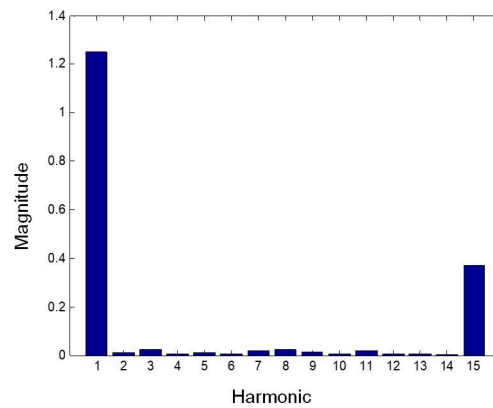


FIGURE L.34 – FFT du courant AC du micro-onduleur 3 avec 10% d'harmonique 15

3.3 Tests avec injection de plusieurs harmoniques

Dans ces tests-ci, il est question de mettre les micro-onduleurs sur un réseau très dégradé. Pour cela, on va générer un réseau dans les pires conditions d'harmoniques relevées par Laborelec - Engie-Lab. Le rang des harmoniques ainsi que leurs amplitudes respectives sont donnés dans la Table L.8.

Rang de l'harmonique	Amplitude en % de la fondamentale
2	8
3	22
4	4
5	10
7	6
9	4
11	3
13	2.5
15	2

TABLE L.8 – Rang des harmoniques associées à leur amplitude pour le pire cas relevé par Laborelec - Engie-Lab

On peut observer la représentation du courant que cela représente sur le réseau sur la Figure L.35. On peut ensuite constater les réponses de MO_1 , MO_2 et MO_3 qui sont respectivement les Figures L.36, L.37 et L.38.

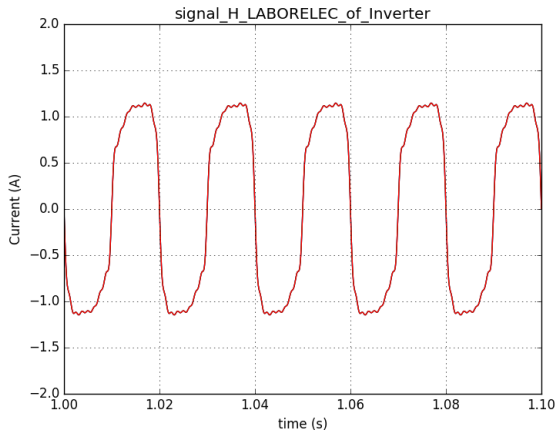


FIGURE L.35 – Courant AC de référence avec les harmoniques de la Table L.8

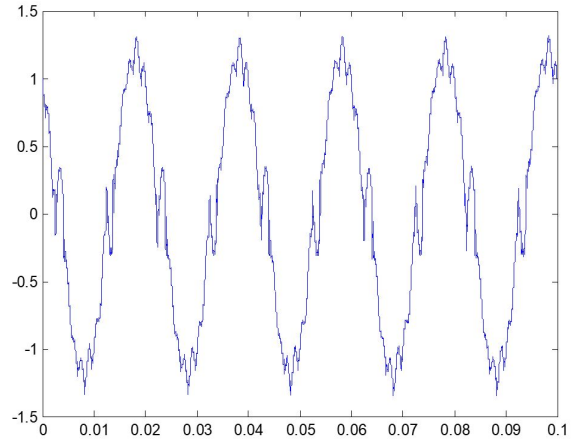


FIGURE L.36 – Courant AC du micro-onduleur 1 avec les harmoniques de la Table L.8

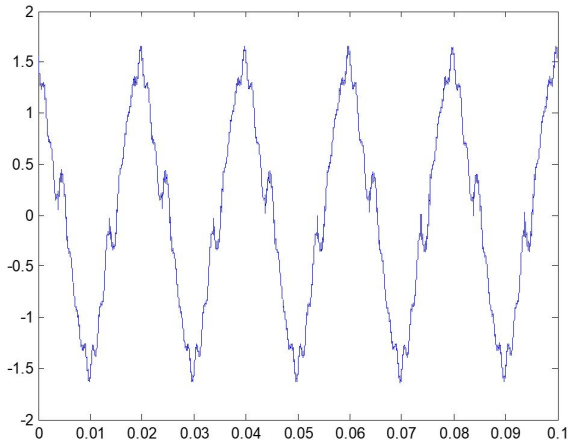


FIGURE L.37 – Courant AC du micro-onduleur 2 avec les harmoniques de la Table L.8

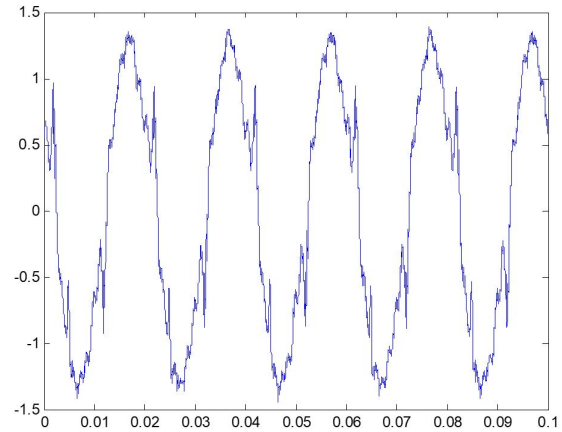


FIGURE L.38 – Courant AC du micro-onduleur 3 avec les harmoniques de la Table L.8

Grâce au FFT, on peut voir que l'atténuation des harmoniques aux Figures L.40, L.41 et L.42 comparé à la référence Figure L.39 est différente suivant l'onduleur. Il est donc important de connaître ces caractéristiques lors de l'installation de micro-onduleurs pour permettre d'avoir un impact positif sur le réseau.

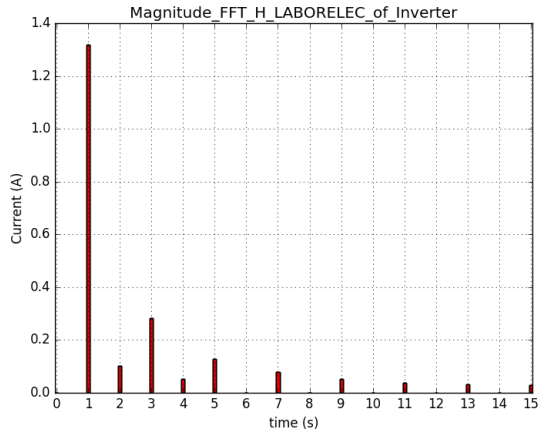


FIGURE L.39 – FFT du courant AC de référence avec les harmoniques de la Table L.8

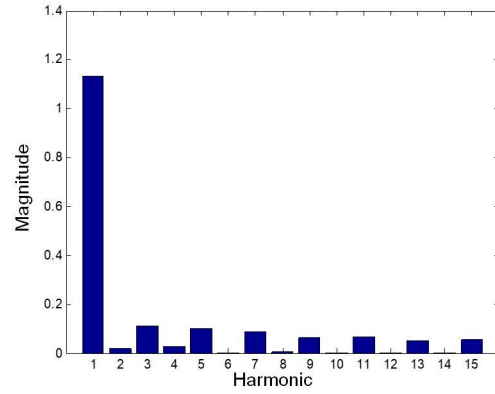


FIGURE L.40 – FFT du courant AC du micro-onduleur 1 avec les harmoniques de la Table L.8

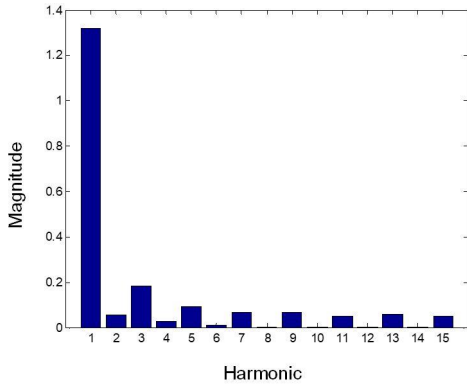


FIGURE L.41 – FFT du courant AC du micro-onduleur 2 avec les harmoniques de la Table L.8

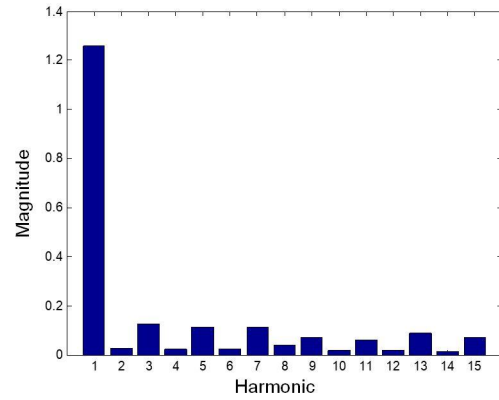


FIGURE L.42 – FFT du courant AC du micro-onduleur 3 avec les harmoniques de la Table L.8

3.4 Tests avec un creux de tension

Dans cette sous-section, nous allons analyser la réaction du micro-onduleur à un creux de tension qui vient d'une situation observée sur le réseau. La Figure L.43 donne un aperçu de ce creux de tension.

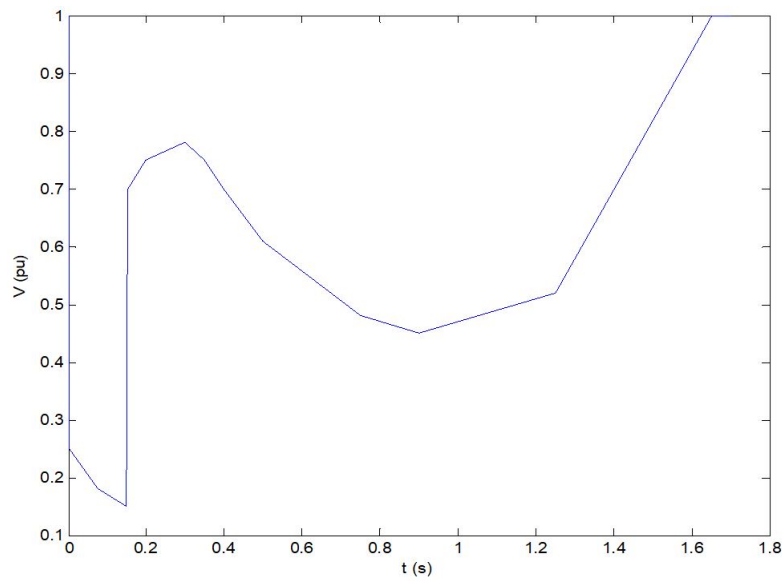


FIGURE L.43 – Profil du creux de tension

Pour faire cette analyse, nous allons mettre en correspondance tension, courant et puissance instantanés du MO_1 . À la Figure L.44, on peut observer la tension du réseau. On peut donc repérer que le creux de tension commence légèrement après 2s. On voit sur la Figure L.45 qu'au moment de la faute, on a une augmentation très brève du courant. Suite à ce défaut, la puissance passe à 0W comme le montre la Figure L.46, ce qui signifie que le micro-onduleur a déclenché sa protection anti-îlotage et s'est donc déconnecté du réseau. Il ne redémarre pas immédiatement après, car il lui faut de cinq à dix minutes pour se resynchroniser.

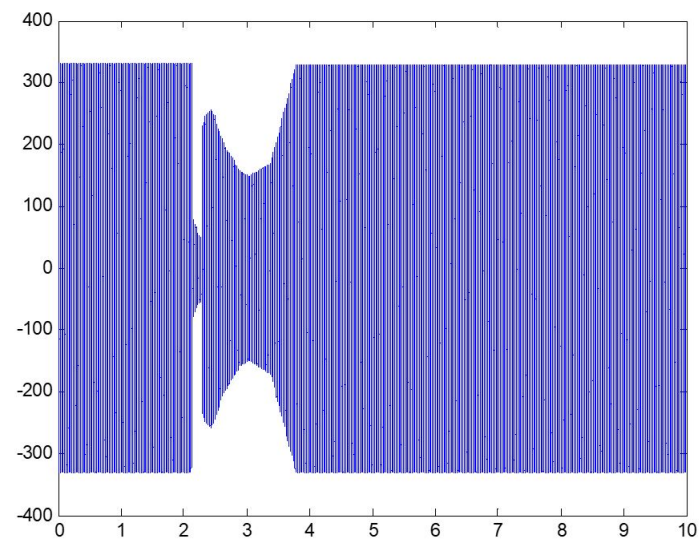


FIGURE L.44 – Tension instantanée sur le réseau

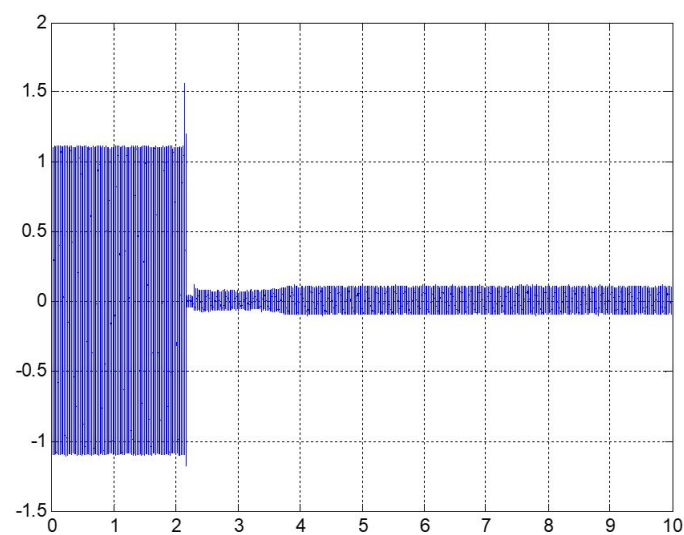


FIGURE L.45 – Courant instantané sur le réseau

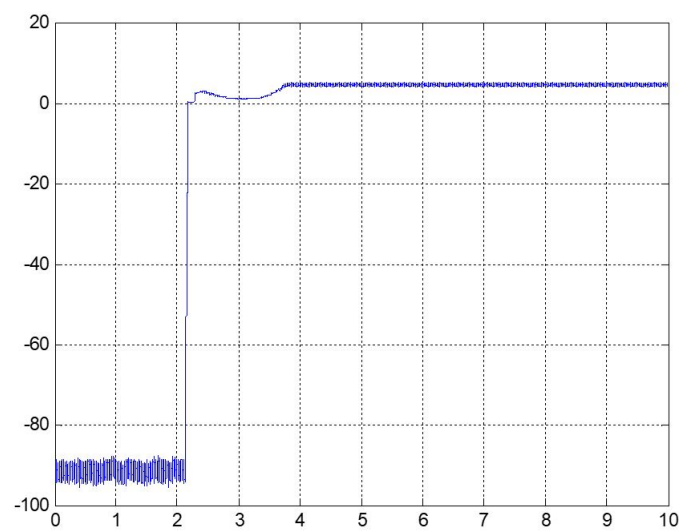


FIGURE L.46 – Puissance instantanée sur le réseau

