



HAL
open science

Base de données publique des caractéristiques des diodes de puissance à température cryogénique

Yasmine Baazizi, Ana Luiza Haas Bezerra, Lauro Ferreira, Simon Meunier,
Tanguy Phulpin, Loïc Quéval

► To cite this version:

Yasmine Baazizi, Ana Luiza Haas Bezerra, Lauro Ferreira, Simon Meunier, Tanguy Phulpin, et al..
Base de données publique des caractéristiques des diodes de puissance à température cryogénique.
Conférence des jeunes chercheurs en génie électrique, Jun 2024, Le Croisic, France. hal-04620665

HAL Id: hal-04620665

<https://hal.science/hal-04620665v1>

Submitted on 21 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Base de données publique des caractéristiques des diodes de puissance à température cryogénique

Yasmine BAAZIZI, Ana Luiza HAAS BEZERRA, Lauro FERREIRA, Simon MEUNIER, Tanguy PHULPIN, Loïc QUÉVAL

Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, GeePs, 91192, Gif-sur-Yvette, France

Sorbonne Université, CNRS, GeePs, 75252, Paris, France

yasmine.baazizi@centralesupelec.fr

RESUME – La conception de convertisseurs électroniques de puissance à des températures cryogéniques nécessite des données techniques sur les composants à ces températures-là. Cependant, le manque de données sur les caractéristiques électrique, tel que par exemple pour des diodes, en dehors de la plage de température spécifiée par le fabricant (p. ex. -50°C) limite leur développement. Nous avons lancé une initiative basée sur notre plateforme de mesure de 4,8 kA DC afin de créer une base de données sur les caractéristiques des diodes à des températures cryogéniques. Cette base de données, qui sera rendu publique, permet aux utilisateurs de télécharger des fichiers de données à différentes températures. Bien que certains aspects puissent être discutés et ajoutés ultérieurement, ce document est une contribution importante à la définition du cadre de la base de données actuelle et à la présentation de la méthodologie expérimentale utilisée. Il met également en évidence l'utilité pratique des données par le biais d'une étude de cas.

ABSTRACT – The design of power electronic converters at cryogenic temperatures requires technical data on the components at these temperatures. However, the lack of data on electrical characteristics, such as those of diodes, outside the temperature range specified by the manufacturer (e.g. -50°C), hinders their development. We have launched a project based on our 4.8 kA DC measurement platform to establish a database of diode characteristics at cryogenic temperatures. This database, which will be made public, allows users to download data files at different temperatures. Although some aspects may be discussed and added later, this document is a contribution to the definition of the current database scope and to the presentation of the experimental methodology used. It also highlights the practical utility of the data through a case study.

MOTS-CLES – Base de données, Électronique de puissance, Cryogénie, Redresseur à diodes

1. Introduction

La supraconductivité est très prometteuse pour diverses applications, notamment l'énergie éolienne [1], l'aviation électrique [2], le transport maglev [3] et les sous-stations de traction supraconductrices [4]. Dans les chaînes de conversion supraconductrices, où les générateurs, les câbles et les moteurs opèrent à des températures cryogéniques, des convertisseurs électroniques de puissance sont employés pour assurer la liaison entre les composants AC et le bus DC. Ces convertisseurs fonctionnent traditionnellement à température ambiante, ce qui entraîne un transfert de chaleur important et nécessite des composants d'interface spécialisés, augmentant ainsi le poids, le volume et le coût de l'ensemble du système [5]. Conscients de ces difficultés, les chercheurs travaillent activement pour permettre aux systèmes électroniques de puissance de fonctionner à des températures cryogéniques et pour construire des cryo-convertisseurs efficaces [5]-[11].

Malgré certains progrès, il y a un manque de données sur les dispositifs de puissance disponibles dans le commerce, tels que les diodes, fonctionnant à des températures cryogéniques. Les fiches techniques précisent généralement les caractéristiques électriques du semi-conducteur fonctionnant dans une plage de températures commençant à 223 K (-50°C) comme limite inférieure [12]. Cependant, les diodes de puissance peuvent être utilisées à des températures plus basses, par exemple pour protéger les aimants LTS de la trempe [13]. Des essais récents en laboratoire ont montré que certaines diodes au silicium peuvent résister à des températures aussi basses que 77 K [14]. Les implications pour le système global comprennent des avantages potentiels en termes d'efficacité, de réduction du poids et d'optimisation du volume [15].

Le présent document vise à combler ces lacunes en constituant une base de données des caractéristiques des diodes de puissance disponibles dans le commerce à des températures cryogéniques. Dans la section II, nous présentons le champ d'application de la base de données, tandis que la section III décrit les aspects expérimentaux. La section IV traite du format des données. La section V explore le potentiel de l'ensemble de données en proposant un exemple : la prédiction des performances d'un redresseur à diodes monophasé fonctionnant à 77 K et 293 K en utilisant uniquement les caractéristiques de la base de données.

2. Champ d'application de la base de données

L'objectif premier de la base de données est d'être représentative, librement accessible et dynamique. La représentativité est assurée par la collecte de données sur des sujets présentant un grand intérêt pour la communauté. Le libre accès garantit que les informations sont disponibles sans restriction, ce qui favorise la diffusion libre et équitable des connaissances. Il encourage la participation et la collaboration et renforce la portée et l'impact de la base de données au sein de la communauté. En outre, la nature dynamique de la base de données garantit qu'elle est constamment mise à jour et enrichie, ce qui lui permet de suivre les progrès réalisés dans le domaine et de rester pertinente et utile au fil du temps. Elle comprend des diodes de puissance disponibles dans le commerce et provenant de fabricants renommés tels que Vishay, STMicroelectronics et Littelfuse. Nous

avons testé des dizaines de diodes de puissance afin d'assurer une représentation diversifiée dans notre ensemble de données. Pour l'instant, nous avons testé les diodes à la température ambiante de 293K et à 77,3 K uniquement, mais d'autres tests à d'autres températures seront ajoutés à l'avenir.

La base de données regroupe les données que nous avons collectées à ce jour, mais les contributions indépendantes sont les bienvenues pour être incluses dans la base de données. Si une organisation souhaite fournir des ensembles de données à inclure, ou souhaite caractériser une diode spécifique, des dispositions peuvent être prises directement avec les auteurs. Il est essentiel d'expliquer que la base de données est conçue pour être dynamique. Des mises à jour permanentes seront effectuées au fur et à mesure que de nouveaux tests de diodes seront réalisés, afin d'obtenir un ensemble de données plus complet ou d'améliorer la qualité des mesures. Cette base de données est initialement développée pour les diodes de puissance, mais pourrait être proposée ultérieurement pour d'autres composants tels que les transistors.

3. Aspects expérimentaux

3.1 Essai de tension directe

Les diodes de puissance sont caractérisées par la mesure de leur caractéristique courant-tension (I-V), comme le montre la figure 1. Tout d'abord, nous mesurons la caractéristique I-V dans le quadrant I uniquement, car il s'agit de la plage de fonctionnement habituelle d'une diode. Pour ce faire, nous effectuons un "test de tension directe" sur le dispositif testé (DUT), comme le montre la figure 2. La caractéristique I-V de la diode est d'abord mesurée à température ambiante, puis à température cryogénique, et enfin de nouveau à température ambiante, après avoir laissé le composant atteindre naturellement l'équilibre thermique et sécher complètement pendant au moins 24 heures. Cela permet de s'assurer que la diode n'est pas endommagée au cours du processus de test. Pour les essais à température cryogénique, la diode est progressivement immergée dans un bain ouvert d'azote liquide à 77,3 K. Il faut laisser suffisamment de temps pour établir l'équilibre thermique avant de commencer l'essai. Ce temps correspond à une phase de pré-refroidissement de 20 minutes avec de l'azote gazeux, suivie de 10 minutes dans le bain de LN2, puis on effectue le test.

Lors de la caractérisation de la diode, nous mesurons la caractéristique I-V de la diode afin d'obtenir un courant maximal égal à 120% du courant direct moyen ($I_F(A_V)$) pour 298 K (25°C) spécifié dans la fiche technique de la diode, valeur pour laquelle la diode a été conçue pour une performance optimale.

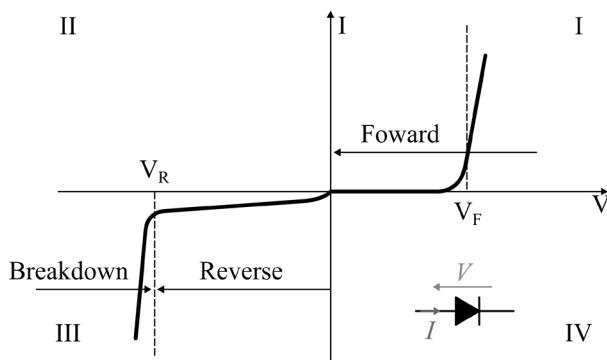


Figure 1 : Caractéristique courant-tension (I-V) de la diode.

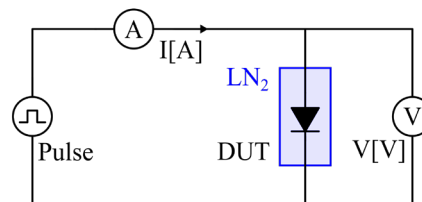


Figure 2 : Essai de tension directe

3.2 Connexion de la diode

Les diodes de puissance sont disponibles dans une variété de formats de boîtiers, tels que DO-5, ISOTOP, TO-220-2 et autres (voir figure 3). Cette diversité de boîtiers a nécessité la conception et la fabrication de divers support pour faciliter la connexion de la diode à l'alimentation. La figure 4 montre un exemple d'un tel support. Il est important de noter que, pour une mesure précise de la tension, la configuration à 4 fils est utilisée, et la mesure de la tension doit être placée aussi près que possible des bornes de la diode pour une meilleure précision.

3.3 Matériel

La tension directe est généralement mesurée à moins de 2 V. Mais le courant direct peut varier considérablement, de 1 A à plusieurs centaines d'ampères, en fonction de la référence de la diode. Cette variabilité du courant direct représente un défi majeur pour le processus de mesure. Pour relever ce défi, nous utilisons la station de test à haut courant GeePs, qui est capable de délivrer jusqu'à 4,800 A à 10 V DC [16]. Le courant de la diode est mesuré à l'aide d'une sonde de courant Tektronix A622 [17] ou de la sonde de courant Pico TA167 [18] pour les forts courants. La tension de la diode est mesurée directement. Les valeurs de courant et de tension sont enregistrées à l'aide d'un PicoScope 4444 [19].

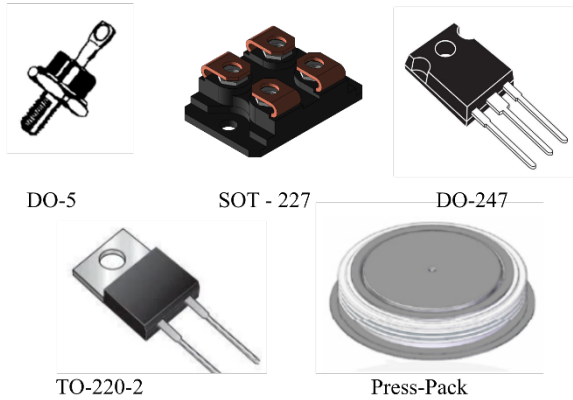


Figure 3 : Exemples de boîtiers de diodes

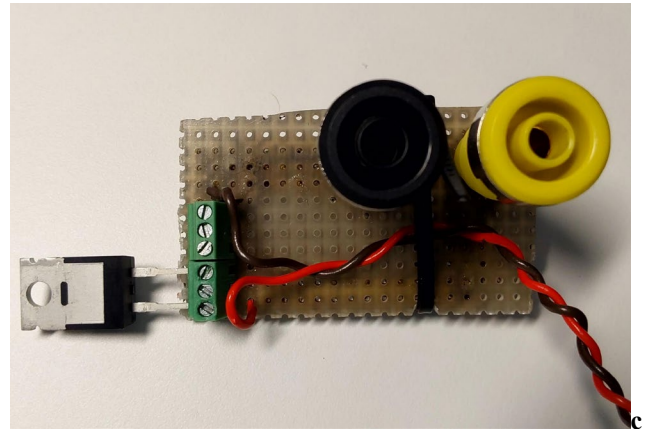


Figure 4 : support pour la connexion d'une diode de puissance TO-220-2 à l'alimentation.

Le deuxième défi consiste à gérer efficacement la production de chaleur pour s'assurer que la température du composant reste constante tout au long de la mesure. Une solution à ce problème consiste à appliquer une seule impulsion de courant. Dans cette approche, la source est chargée de monter à 120 % du courant moyen ($I_f(av)$) avant de s'éteindre. Pendant cette phase de montée, les caractéristiques I-V sont enregistrées. Le temps de montée varie pour chaque diode en fonction de sa constitution. Avec la source Gargantua, la durée de l'impulsion ne peut pas être choisie, mais cette méthode garantit la mesure la plus rapide possible.

3.4 Résultats

À ce jour, les caractéristiques I-V de plusieurs dizaines de diodes de puissance provenant de divers fabricants ont été mesurées. La figure 5 montre une sélection de caractéristiques I-V de différentes références de diodes, mettant en évidence les différences de comportement des diodes lorsqu'elles sont refroidies à 77 K. La diode MR5106 présente une augmentation de la tension de seuil à 77 K, mais la résistance reste pratiquement la même. La diode DD89NK, quant à elle, présente une tension de seuil plus faible à 77 K avec une résistance interne similaire. Toutefois, la diode RBQ30NS100A a une tension de seuil plus élevée mais une résistance interne beaucoup plus faible à température cryogénique qu'à température ambiante. Notamment, certaines diodes telles que ETU300FP-M3 et HFA220FA120 ont une résistance significativement plus faible à des températures cryogéniques, mais elles présentent un comportement particulier : une tension anormalement élevée à faible courant, dû au gel des porteurs de charge selon [20]. Nous notons que les diodes présentent des comportements divers et imprévisibles à des températures cryogéniques.

4. Format des données

Pour améliorer l'utilité et la réutilisation de notre base de données, nous avons rassemblé toutes les données acquises et les avons organisées dans un ensemble de fichiers CSV. Chaque fichier CSV contient les données d'une diode, y compris les mesures de courant et de tension à des températures ambiantes et cryogéniques. L'étiquetage détaillé de chaque fichier comprend des informations pertinentes telles que la référence de la diode, la technologie, l'emballage, la date de la mesure et le nom de la personne qui a effectué la mesure. La figure 6 montre une capture d'écran d'un fichier CSV typique. Le format CSV a été choisi pour ces fichiers en raison de sa facilité d'utilisation et d'extraction des données. Sa taille compacte, idéale pour le stockage et la transmission pour garantir une large accessibilité.

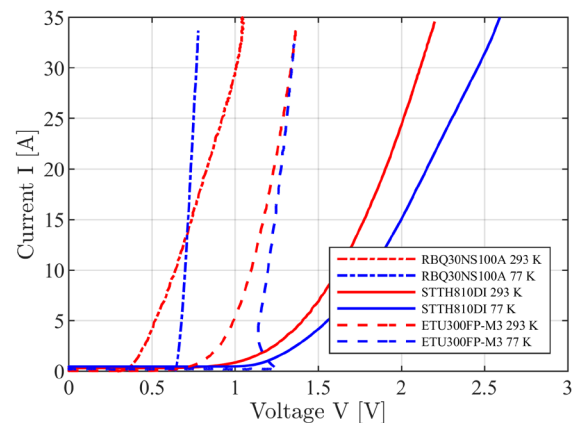
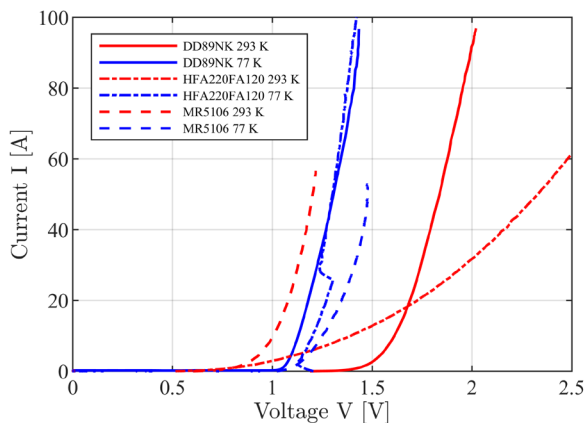


Figure 5 : Caractéristique courant-tension de quelques diodes mesurées.

```

Reference : 30FQ030,,,
Technology : Schottky Power rectifier,,,
Package : DO-4,,,
Autor : Yasmine Baazizi,,,
Date : 20241110,,,
'''
''v [V] @293 K, i [A] @293 K, v [V] @77 K, i [A] @77 K'',,,
'''
0.00070199,-0.00305213,-0.00091564,0.2502747
0.00070199,-0.00305213,-0.00091564,0.2502747
0.00073251,-0.00305213,-0.00091564,0.2502747
0.00073251,-0.00305213,-0.00091564,0.2502747
0.00073251,-0.00305213,-0.00091564,0.2502747
0.00073251,-0.0045782,-0.00091564,0.2502747
0.00073251,-0.0045782,-0.0008546,0.2502747
0.00076303,-0.0045782,-0.0008546,0.2502747
0.00076303,-0.0045782,-0.0008546,0.2502747
0.00076303,-0.0045782,-0.0008546,0.2502747
0.00076303,-0.0045782,-0.0008546,0.2502747
0.00076303,-0.0045782,-0.0008546,0.2502747
0.00076303,-0.0045782,-0.0008546,0.2502747
0.00079355,-0.0045782,-0.0008546,0.2502747
  
```

Figure 6 : Aperçu du fichier CSV.

5. Exemple d'utilisation des données

Nous illustrons le potentiel de ces données à l'aide d'un exemple spécifique : la prédiction des performances d'un redresseur à diodes monophasé de 1 kW fonctionnant à 77 K et 293 K. Dans la section 5.1, nous présentons le modèle du redresseur à diodes et les résultats de simulation. Ce modèle est basé sur la caractéristique I-V d'une diode présente dans la base de données. Dans la section 5.2, nous présentons le redresseur à diode réalisé expérimentalement. Puis, nous comparons les résultats expérimentaux à ceux du modèle. Cela permet d'évaluer si la caractéristique I-V de la base de données permet une modélisation précise.

Dans la base de données, nous avons sélectionné la VS-HFA220FA120 [21], une diode de redressement à récupération ultra-rapide fabriquée par Vishay Semiconductors. Elle est fabriquée en silicium et se trouve dans un boîtier SOT-227, un module avec deux diodes séparées. Ses caractéristiques sont présentées dans la figure 5.

5.1 Modèle

Le modèle électrique est implémenté dans MATLAB Simulink à l'aide de la boîte à outils Simscape. Nous avons supposé que le côté AC du redresseur à diodes est connecté à une source de tension AC de 50 V RMS et que le côté DC est connecté à une charge résistive variable. La figure 7 montre le circuit du redresseur à diodes.

La diode est modélisée à l'aide de sa caractéristique I-V tabulée dans le bloc "Diode" de Matlab [22]. Cette caractéristique est dérivée de 10 points de données expérimentales, en considérant une température de jonction de 293 K pour la température ambiante et de 77 K pour les conditions cryogéniques. La résistance R représente la résistance série parasite et a été estimée pour les températures ambiante et cryogénique, en supposant que le modèle reproduit fidèlement la caractéristique I-V de la diode. La chute de tension est supposée être due à une résistance parasite du circuit et a été calculée pour un point de fonctionnement spécifique.

La figure 8 montre les pertes simulées du pont de diodes P_D en fonction de la puissance côté courant continu P_{dc} à des températures ambiantes et cryogéniques. Pour une puissance DC P_{dc} de 1 kW, les pertes à température ambiante sont de 101 W, alors qu'elles sont de 70 W à température cryogénique. Les résultats de la simulation indiquent que les pertes diminuent d'environ 30 % lorsque le redresseur à diodes fonctionne à 77 K. Le rendement estimé est illustré à la figure 9 et s'améliore de plus de 3 % pour une puissance DC P_{dc} de 1 kW.

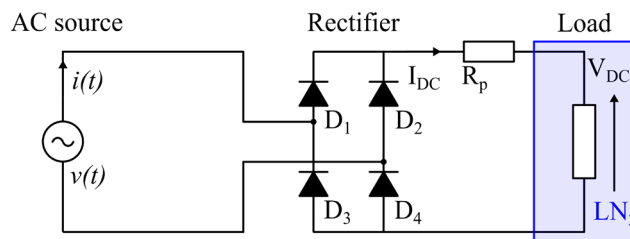


Figure 7 : Le circuit redresseur à diodes monophasé

5.2 Validation expérimentale

Pour vérifier l'utilité de l'ensemble de données, un prototype de laboratoire d'un redresseur à diodes a été construit et testé. Il est présenté dans la figure 10. Deux VS-HFA220FA120 ont été installées sur un dissipateur thermique et connectées comme un redresseur à diodes monophasé, les diodes étant reliées entre elles par des bandes tressées en aluminium. Nous avons utilisé un dissipateur RS PRO 150×300×83 mm en aluminium anodisé pour un refroidissement efficace. Des feuilles de béryllium et de la pâte thermique sont utilisées pour minimiser la résistance thermique tout en assurant l'isolation électrique entre le boîtier et le

dissipateur. Pour les tests cryogéniques, l'assemblage est progressivement pré-refroidi puis refroidi à 77 K dans un bain d'azote liquide ouvert (Fig.11).

Nous avons effectué les mesures correspondant au cas de simulation précédent. Les pertes et les rendements des diodes sont mesurés et ajoutés aux figures 8 et 9. Les résultats expérimentaux correspondent bien aux résultats de la simulation, notamment en ce qui concerne les pertes et le rendement du convertisseur. Nous pouvons donc conclure que l'utilisation des caractéristiques expérimentale I-V à 77K permet de prédire les performances du convertisseur à des températures cryogéniques.

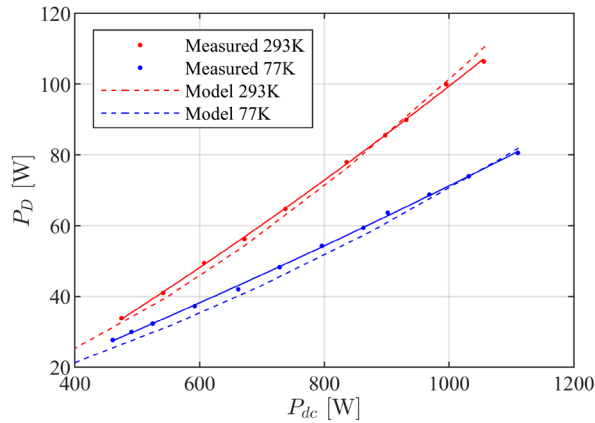


Figure 8 : Pertes mesurées du pont de diodes, à température ambiante et à température cryogénique ($P_D = P_{ac} - P_{dc}$).

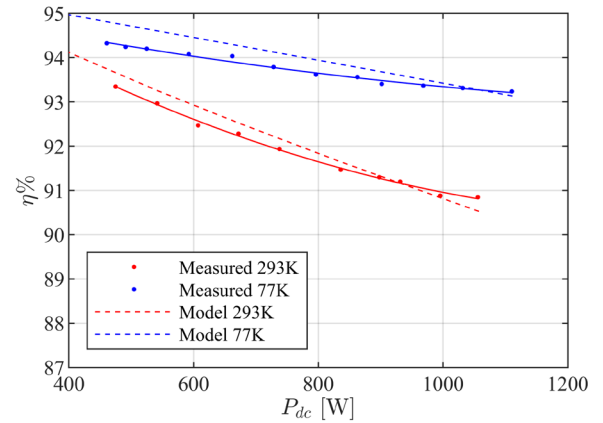


Figure 9 : Efficacité mesurée du pont de diodes, à température ambiante et à température cryogénique.

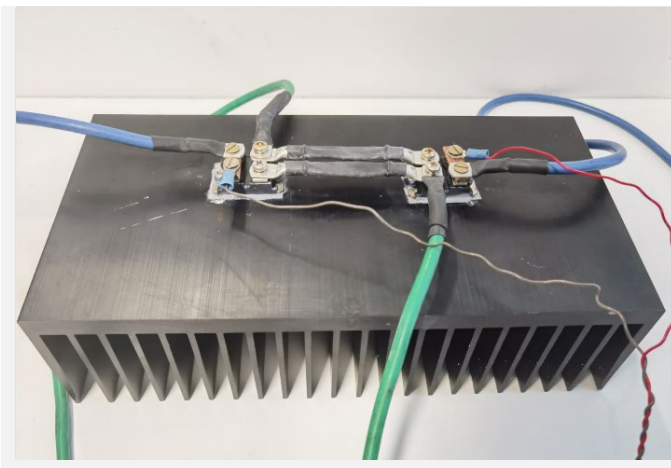


Figure 10 : Fonctionnement du redresseur à diode à température ambiante

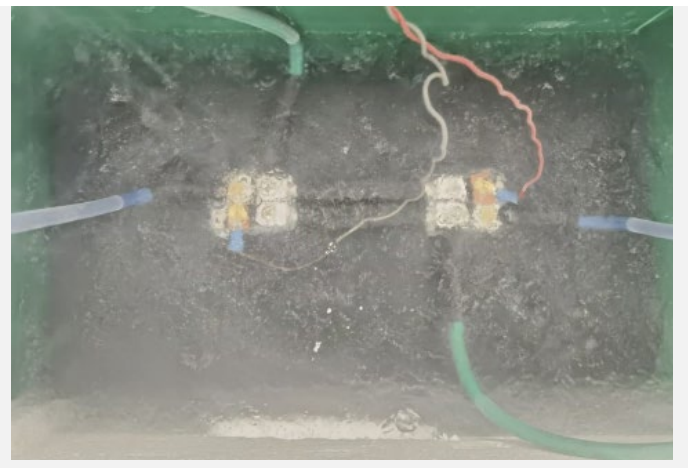


Figure 11 : Fonctionnement du redresseur à diodes à une température cryogénique.

6. Conclusion

Cet article souligne le besoin de données sur les composants électroniques de puissance fonctionnant à des températures cryogéniques. La création d'une base de données représentative, librement accessible et dynamique, axée initialement sur les caractéristiques des diodes à des températures cryogéniques, est une contribution importante dans ce domaine. À ce jour, cette base de données est initialement développée pour les diodes de puissance et leurs caractéristiques en direct, mais pourrait être proposée ultérieurement pour d'autres caractéristiques (p. ex., inverse) ou d'autres composants tels que les transistors. Une étude de cas justifie l'utilité pratique de la base de données, en prédisant les performances d'un redresseur à diodes opérant à des températures cryogéniques en utilisant uniquement les caractéristiques I-V d'une diode de la base. Cette base de données est amenée à évoluer, avec des mises à jour régulières et des extensions pour inclure plus d'informations et d'autres dispositifs. Elle constitue une plate-forme adaptable prête à soutenir la recherche collaborative et à encourager l'innovation continue dans l'électronique de puissance fonctionnant à des températures cryogéniques.

Références

- [1] T.-K. Hoang, L. Quéval, C. Berriaud, L. Vido, "Design of a 20 MW fully superconducting wind turbine generator to minimize the levelized cost of energy," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1-4, Jun. 2018.

- [2] "ASCEND - a first step towards cryogenic electric propulsion in aircraft," [Online], 2021. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-03-cryogenics-and-superconductivity-for-aircraftexplained> (accessed Feb. 13, 2023).
- [3] M. Uno, "Chuo Shinkansen Project using Superconducting Maglev System," Japan Railway & Transport Review No.68, Oct 2016
- [4] A. Allais *et al.*, "SuperRail–World-First HTS Cable to be Installed on a Railway Network in France," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, pp. 1-7, May 2024, Art no. 4802207, doi: 10.1109/TASC.2024.3356450
- [5] R. L. Patterson, A. Hammoud, J. E. Dickman, S. S. Gerber and E. Overton, "Development of Electronics for Low Temperature Space Missions," 4th European Workshop on Low Temperature Electronics, Noordwijk, The Netherlands, June 2000.
- [6] M. Ostapchuk, D. Shishov, D. Shevtsov, S. Zanegin, "Research of Static and Dynamic Properties of Power Semiconductor Diodes at Low and Cryogenic Temperatures". *Inventions* 2022, 7, 96. <https://doi.org/10.3390/inventions7040096>
- [7] M. M. Hossain, A. Ur Rashid, Y. Wei, R. Sweeting and H. A. Mantooth, "Static Characterization and Modeling of GaN HEMT at Cryogenic Temperature in Saber," 2021 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), Denver, CO, USA, 2021, pp. 1-10, doi: 10.23919/EATS52162.2021.9704829.
- [8] A. Beckers, F. Jazaeri, A. Grill, S. Narasimhamoorthy, B. Parvais and C. Enz, "Physical Model of Low-Temperature to Cryogenic Threshold Voltage in MOSFETs," in *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, vol. 8, pp. 780-788, 2020, doi: 10.1109/JEDS.2020.2989629.
- [9] B. Ozpineci and L. M. Tolbert, "Characterization of SiC Schottky diodes at different temperatures," in *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 54-57, June 2003, doi: 10.1109/LPEL.2003.821026.
- [10] A. Elwakeel, Z. Feng, N. McNeill, M. Zhang, B. Williams and W. Yuan, "Study of Power Devices for Use in Phase-Leg at Cryogenic Temperature," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2021, Art no. 5000205, doi: 10.1109/TASC.2021.3064544.
- [11] L. Bradley, C. Donaghy-Spargo, G. Atkinson, A. Horsfall, "Evaluating suitable semiconducting materials for cryogenic power electronics," *The Journal of Engineering*, 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018). DOI: 10.1049/joe.2018.8099
- [12] K. Kan and H.L. Lin, "Power Diode Parameters and Characteristic Introduction," AN-1006, Taiwan Semiconductor Co., Ltd., New Taipei City, Taiwan R.O.C., 2024. [Online]. Available: www.taiwansemi.com
- [13] S. S. Chouhan, M. A. Green and A. F. Zeller, "Voltage Characteristics of Diodes Used for Passive Quench Protection of Low-Current Magnets," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-4, June 2015, Art no. 8801204, doi: 10.1109/TASC.2014.2362574
- [15] Y. Wei, M. Hossain and H. A. Mantooth, "Evaluation and Modeling of SiC Based Power Converter for Low Temperature Operation," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 3, pp. 3660-3673, May-June 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3247404.
- [16] L. Quéval, D. Huchet, F. Trillaud, M. Kiuchi, T. Matsushita, "Test station for high temperature superconducting power cables," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. xxx, no. xxx, pp. xxx, Feb. 2024
- [17] "Current Probes A622 datasheet," Feb. 2023. Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.tek.com/fr/datasheet/current-probes>
- [18] "200 A / 2000 A AC/DC current probe, BNC connector," Jun. 11, 2020. [Online]. Available: <https://www.picotech.com/accessories/current-probes/200a-2000a-current-probe-bnc>
- [19] "PicoScope 4444," Feb. 2022. Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.picotech.com/oscilloscope/4444/picoscope-4444-overview>
- [20] R. R. Ward *et al.*, "Power diodes for cryogenic operation," *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC '03.*, Acapulco, Mexico, 2003, pp. 1891-1896 vol.4, doi: 10.1109/PESC.2003.1217741
- [21] "Diode VS-HFA220FA120 datasheet, Vishay," Sep. 2019. Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.vishay.com/docs/93636/vs-hfa220fa120.pdf>
- [22] "MATLAB, 'Diode,'" 2023. Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/diode.html>