

Générateur de Courant impulsif à Stockage Capacitif pour Décharges à Barrière Diélectrique

Nicolas BENTE¹, David FLOREZ², Rafael DIEZ², Hubert PIQUET¹

¹Laboratoire LAPLACE, Université de Toulouse, Toulouse INP, CNRS, Toulouse, France

²Pontificia Universidad Javeriana, Bogota, Colombie

RESUME - Ce travail présente le principe de fonctionnement d'un générateur de courant délivrant des impulsions de haute intensité et de très courte durée pour les Décharges à Barrière Diélectrique (DBD) : une source d'énergie électrique de faible puissance charge les capacités formées par les barrières diélectriques de la DBD ; une fois que l'énergie assignée y a été stockée, un interrupteur haute-tension connecté en parallèle met la DBD en court-circuit, produisant une décharge très brève et très intense. Le courant impulsif qui circule à travers la décharge est limité en intensité par une inductance placée en série avec l'interrupteur. Ce principe d'alimentation ne nécessite pas de transformateur haute tension ; il requiert que la tenue en tension de l'interrupteur soit supérieure à la tension maximale de la DBD. Pour les autres cas, une mise en série de plusieurs semi-conducteurs est proposée.

Mots-clés—Décharge à Barrière Diélectrique, DBD, Courant impulsif, Convertisseur statique, Alimentation Sans Transformateur, Plan de phase.

1. INTRODUCTION

Les Décharges à Barrière Diélectrique (DBD) sont utilisées dans de nombreux procédés pour créer un plasma hors équilibre, riche en espèces très réactives ; elles permettent de maintenir un fonctionnement à basse température et peuvent produire dans des conditions spécifiques une décharge uniforme en surface ou en volume. Les sources d'alimentation électrique des DBD proposées dans la littérature peuvent se diviser entre sources de tension et sources de courant, de type sinusoïdal ou impulsif.

Quelle que soit la structure d'alimentation, la caractéristique capacitive de la DBD, que montre son modèle électrique simplifié (partie droite Fig. 1), interagit avec les composantes parasites du circuit (inductance du câblage et des composants) pour former des circuits résonants. De ce fait, l'obtention de courants impulsifs, particulièrement intéressants pour augmenter les performances des procédés plasma [1], est limitée aussi bien en amplitude que pour la réduction de leur durée. Dans la plupart des cas, l'obtention des impulsions de courant est réalisée par l'intermédiaire d'un convertisseur statique qui utilise un transformateur élévateur en sortie [2],[3],[4].

C'est en particulier l'inductance de fuites de ce transformateur, vue du secondaire, qui limite la vitesse de variation et l'amplitude du courant dans la DBD [5]. Dans ce travail, nous proposons une structure sans transformateur afin d'obtenir des valeurs plus importantes dans la rapidité de montée du courant dans la DBD ainsi que dans son amplitude.

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La Fig. 1 présente le schéma de principe de l'alimentation proposée ; elle comprend :

- un circuit fonctionnant comme une source de courant j , (continue ou alternative), présentant une valeur moyenne positive ;
- un interrupteur haute tension s , qui peut être unidirectionnel en courant si l'on souhaite une seule impulsion de courant pendant la décharge ;
- une inductance L utilisée pour contrôler l'amplitude du courant et protéger l'interrupteur ;
- la DBD, qui est modélisée avec trois éléments [6] : une capacité C_d qui représente les barrières diélectriques ; une capacité C_g qui symbolise le gaz à l'état isolant ; la conductance du gaz G_g représentée par la caractéristique statique tension-courant lorsqu'il y a décharge ; dans cet état, le plasma présente à ses bornes une tension que nous considérons constante, égale, selon le signe de i_g , à $\pm V_{th}$ (décharge en régime de Townsend).

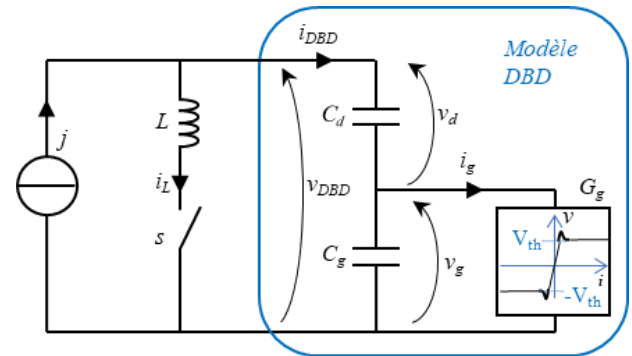


Fig. 1. Schéma de principe de fonctionnement de l'alimentation proposée.

La période de fonctionnement du convertisseur proposé peut se diviser en 4 séquences principales, détaillées ci-dessous. L'étude des séquences est réalisée dans le plan de phase.

2.1. Séquence de charge avant claquage

L'interrupteur s étant maintenu à l'état bloqué, les deux capacités de la DBD sont chargées par la source de courant positif j . Le circuit équivalent correspond à la Fig. 2, où C_{eq} est la capacité équivalente série formée par C_g et C_d .

La tension aux bornes de la DBD (v_{DBD}) augmente jusqu'au moment du claquage positif du gaz, obtenu quand la tension aux

bornes du gaz (v_g) atteint la tension d'amorçage (V_{th}). Dans le plan de phase (i_{DBD} vs. v_{DBD}) on dessine une augmentation de la tension aux bornes de la DBD, due à l'injection d'un courant, considéré constant ($j = J$) – cette caractéristique de j facilite l'analyse, mais n'est pas obligatoire : le résultat, correspondant au stockage de charges dans les capacités, ne change pas avec une autre forme d'onde du courant injecté, tant que la valeur de j reste positive.

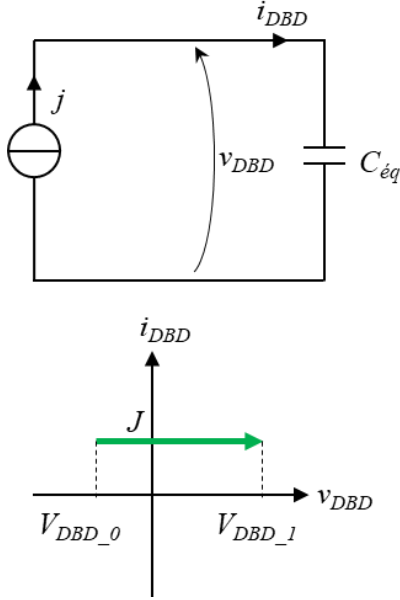


Fig. 2. Circuit équivalent de charge avant le claquage avec la trajectoire de montée de la tension aux bornes de la DBD.

A la fin de cette séquence :

$$v_g = V_{th} \quad (1)$$

Si on considère que la condition initiale sur la tension aux bornes du gaz correspond à la fin d'un claquage dans le sens inverse ($v_g = -V_{th}$, comme cela sera obtenu au § 2.4), nous pouvons calculer la tension (v_{DBD_1}) aux bornes de la DBD lors de ce claquage, en variation par rapport à sa valeur initiale (v_{DBD_0}) :

$$v_{DBD_1} = v_{DBD_0} + 2 \cdot V_{th} \left(\frac{C_d + C_g}{C_d} \right) \quad (2)$$

La valeur initiale v_{DBD_0} de la tension dans ce plan de phase correspondra à la valeur finale à l'issue de la dernière séquence expliquée dans ce chapitre (§ 2.4).

2.2. Séquence de charge après claquage positif

Une fois le gaz passé à l'état conducteur, sa tension (v_g) reste à peu près constante (V_{th}), comme le dessine la caractéristique statique de sa conductance (G_g), Fig. 1. De ce fait, nous pouvons utiliser le circuit équivalent de la Fig. 3, où le courant ne circule plus à travers la capacité du gaz C_g , mais à travers la conductance, avec une injection d'énergie dans la décharge. La puissance instantanée sera proportionnelle au courant délivré par la source de courant j (faible intensité).

Le but principal de cette séquence n'est pas la génération de cette décharge mais surtout le stockage d'énergie dans la capacité C_d du diélectrique, afin de la libérer ultérieurement (§ 2.3). Ce stockage est réalisé par l'action de la source de courant j qui continue à faire croître la tension de la capacité des

diélectriques (C_d). À la fin de l'intervalle, cette énergie vaudra : $\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot V_{D_2}^2$. L'énergie injectée dans le plasma durant cette séquence est égale à :

$$\text{Énergie}_{\text{charge}} = V_{th} [C_d (V_{D_2} - V_{D_1})] \quad (3)$$

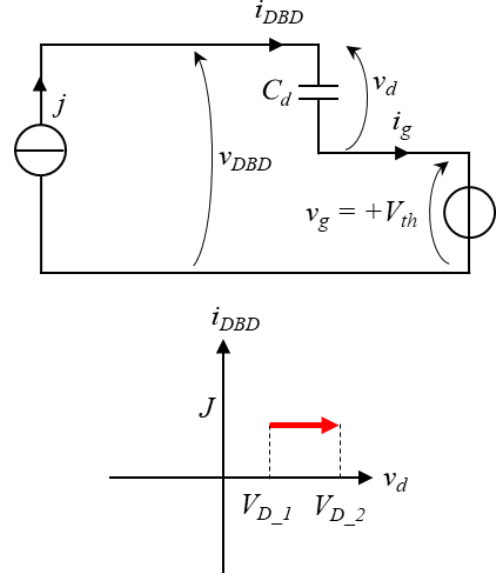


Fig. 3. Circuit équivalent de charge après le claquage (positif) du gaz avec injection de puissance faible intensité.

La valeur de V_{D_2} augmente avec la durée du maintien dans cette phase, avant la fermeture de l'interrupteur s ; elle n'est limitée que par la tenue en tension des diélectriques, de la source de courant j et de l'interrupteur s .

Il faut noter que dans ce nouveau plan de phase (Fig. 3), l'axe des abscisses correspond à la seule tension diélectriques (v_d), au lieu de la tension de la totalité de la DBD (v_{DBD} , Fig. 2). Ces deux variables, ainsi que leurs valeurs initiales et finales, sont liées dans cette séquence par :

$$v_d = v_{DBD} - V_{th} \quad (4)$$

Ainsi, la tension crête aux bornes de la DBD, atteinte à la fin de ce cycle, correspond à :

$$\hat{V}_{DBD} = V_{DBD_2} = V_{D_2} + V_{th} \quad (5)$$

2.3. Séquence d'inversion de tension du gaz

L'interrupteur est fermé quand l'énergie stockée dans les diélectriques est jugée suffisante : un circuit résonant s'installe, mettant en jeu la capacité équivalente C_{eq} et l'inductance L , comme le montre le circuit équivalent de la Fig. 4, pompant l'énergie stockée préalablement dans les capacités C_d de la DBD.

Dans le plan de phase, à nouveau avec un axe de tension v_{DBD} , nous avons un cercle centré sur les conditions de régime permanent $v_{DBD} = 0V$, $i_{DBD} = j$, qui démarre sa trajectoire avec pour conditions initiales $v_{DBD} = V_{DBD_2}$, $i_{DBD} = j$. En tenant compte de la faible valeur de l'inductance L (insérée uniquement pour protéger l'interrupteur s), l'amplitude du courant (négatif) développé dans la DBD sera beaucoup plus importante (impulsionnel) que la valeur de j (négligeable dans cette

séquence). Ainsi, nous pouvons dessiner le cercle centré sur la valeur zéro du courant.

Avec ce courant i_{DBD} négatif, le plasma étant éteint (suite à l'annulation de son courant), la tension de la DBD diminue pendant que la tension du gaz change de polarité et produit un nouveau claquage (négatif), cette fois-ci avec $v_g = -V_{th}$.

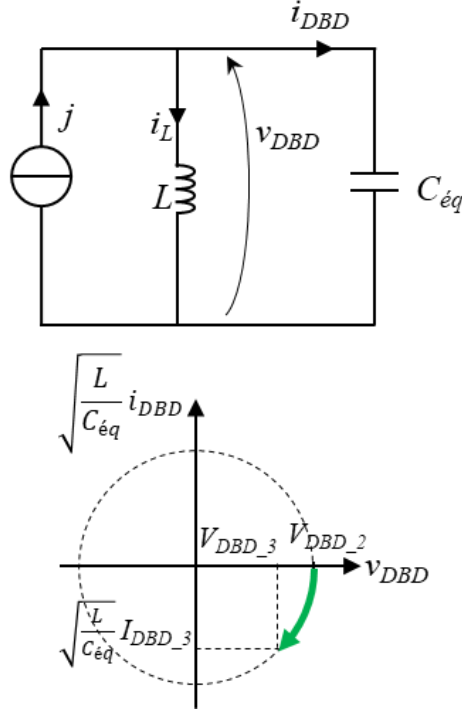


Fig. 4. Circuit équivalent dans la séquence d'inversion de la tension du gaz.

Cette impulsion peut être déclenchée immédiatement après les séquences de charge (§ 2.1 et § 2.2). On peut aussi introduire une période d'attente, en annulant le courant j (si la source j le permet) pour procurer un temps de relaxation aux espèces excitées du gaz, avant de déclencher le claquage par courant impulsif – l'énergie transférée est identique.

Les conditions finales de cette séquence seront :

$$v_{DBD_3} = v_{DBD_2} - 2 \cdot V_{th} \left(\frac{C_d + C_g}{C_d} \right) \quad (6)$$

$$I_{DBD_3} \cong - \sqrt{\frac{C_{eq}}{L} (v_{DBD_2}^2 - v_{DBD_3}^2)} \quad (7)$$

2.4. Séquence de courant impulsif à travers le gaz

Au cours de la séquence (2.3), le courant résultant du circuit résonant conduit à l'inversion de polarité de la tension du gaz. C'est après cette inversion, quand la tension gaz v_g atteint $-V_{th}$, que le courant produit la décharge et circule dans le plasma en y apportant de l'énergie sous forme impulsif.

Comme le montre la Fig. 5, le circuit résonant est changé par rapport à la séquence (2.3) puisque la capacité concernée est maintenant uniquement celle du diélectrique C_d . Un nouveau plan de phase permet de calculer l'évolution de la tension du diélectrique (ainsi de la DBD) et le courant dans la décharge i_g .

La relation entre les tensions des diélectriques et de la DBD diffère de celle de § 2.2 (équation (4)), suite à l'inversion de la tension v_g aux bornes du gaz, qui vaut maintenant $-V_{th}$:

$$v_d = v_{DBD} + V_{th} \quad (8)$$

La trajectoire circulaire du plan de phase est centrée sur le point $(j, +V_{th})$ que nous approximations à $(0, +V_{th})$ en considérant la valeur très élevée du courant dans la DBD par rapport à j .

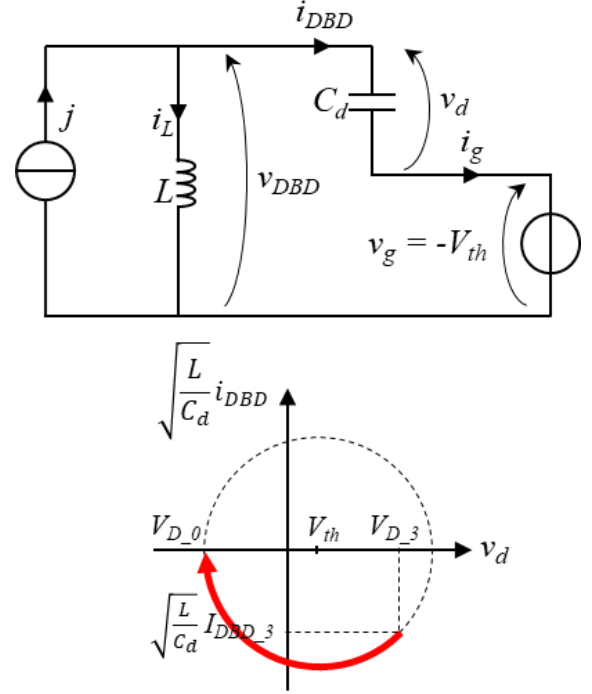


Fig. 5. Circuit équivalent dans la séquence de courant impulsif.

Le courant DBD atteint son amplitude maximale (négative) au cours de cette séquence :

$$\hat{i}_{DBD} \cong - \sqrt{\frac{C_d}{L} (V_{D_3} - V_{th})^2 + I_{DBD_3}^2} \quad (9)$$

Il faut noter que dans le circuit Fig. 5, plus la valeur de l'inductance est faible, plus l'amplitude du courant est importante et la durée de l'impulsion courte (pulsation plus élevée) : c'est la performance qui est recherchée. Cependant, pour protéger l'interrupteur s , il faut limiter la valeur crête de ce courant i_L : pour cela il faut inclure l'inductance L dans le circuit et non pas utiliser uniquement les inductances du câblage, mal maîtrisées.

La fin de la séquence se produit avec le blocage de l'interrupteur s , idéalement lorsque le courant s'annule à travers l'inductance. Ceci peut être obtenu avec un interrupteur de type thyristor qui permet uniquement un courant positif et procure un blocage spontané. Néanmoins, avec un interrupteur bidirectionnel, un second claquage impulsif peut se produire après cette séquence. Cette dernière option implique une commande non seulement à l'amorçage de l'interrupteur mais aussi au blocage à un instant parfaitement contrôlé. Pour le travail présenté, nous restons sur la première option.

En régime permanent périodique, à la fin de la séquence en cours, les tensions aux bornes des capacités et le courant i_L dans

l'inductance doivent retrouver les mêmes valeurs qu'au début de la première séquence (§ 2.1) ; on doit donc avoir : $v_g = -V_{th}$; $v_d = V_{D_0}$ et $i_L = 0$. On en déduit :

$$V_{D_0} = V_{th} - \sqrt{(V_{D_3} - V_{th})^2 + \frac{L}{C_d} I_{DBD_3}^2} \quad (10)$$

Pendant cette séquence, l'énergie stockée dans la capacité du gaz reste la même au début et à la fin. L'énergie transférée au plasma sera ainsi la somme des énergies apportées par l'inductance et par la capacité du diélectrique :

$$\text{Énergie}_{\text{impulsion}} = \frac{1}{2} L \cdot I_{DBD_3}^2 + \frac{1}{2} C_d (V_{D_3}^2 - V_{D_0}^2) \quad (11)$$

La puissance moyenne délivrée à la DBD est donc proportionnelle à la fréquence de commutation f de l'interrupteur s :

$$P = f \cdot (\text{Énergie}_{\text{charge}} + \text{Énergie}_{\text{impulsion}}) \quad (12)$$

3. APPLICATION A L'ALIMENTATION D'UN JET PLASMA

L'analyse développée dans la section précédente est utilisée pour le dimensionnement de l'alimentation d'un jet plasma d'hélium : cette DBD de faible puissance nécessitant des tensions limitées est choisie car elle permet de n'utiliser qu'un seul MOSFET 3,3 kV pour l'interrupteur s et permet de valider le principe de fonctionnement proposé. Cependant, une mise en série de ces interrupteurs, comme celle montrée en [7], peut être envisagée pour une DBD requérant une tension plus élevée.

Les paramètres de la DBD (jet plasma) sont présentés ci-dessous et correspondent au dispositif dont l'identification figure dans l'article [8] :

Tableau 1. Paramètres du schéma électrique équivalent du jet plasma (He)

Paramètre du modèle	Valeur
C_g	11 pF
C_d	38 pF
V_{th}	470 V

Pour respecter les calibres de l'interrupteur commercial référence GeneSiC G2R1000MT33J, nous choisissons une tension maximale aux bornes de la DBD $V_{DBD_2} = 3000$ V et un courant pic répétitif $\hat{I}_{DBD} = 10$ A. En utilisant les équations développées dans la section précédente nous calculons d'abord $L = 1,7 \mu H$. L'énergie totale injectée au cours d'une période de fonctionnement (équation (11)) est alors égale à 139,6 μJ .

Avec cette valeur d'énergie et la puissance moyenne désirée (5 W dans notre exemple), nous choisissons la fréquence de commutation $f = 35,8$ kHz.

Validation du dimensionnement et résultats de simulation

Avec les paramètres de la DBD et les valeurs calculées ci-dessus, pour un réglage de la source de courant (continu dans notre exemple $j=8,05$ mA), nous effectuons la simulation numérique (PSIM) du circuit de la Fig. 1. Nous obtenons les formes d'onde de la Fig. 6.

On identifie aisément les 4 séquences étudiées précédemment ; on observera en particulier la courbe présentant les variations de l'énergie injectée dans le plasma, avec une montée linéaire lente (décharge positive, sous courant faible j) et une autre très rapide (décharge sous courant impulsionnel négatif).

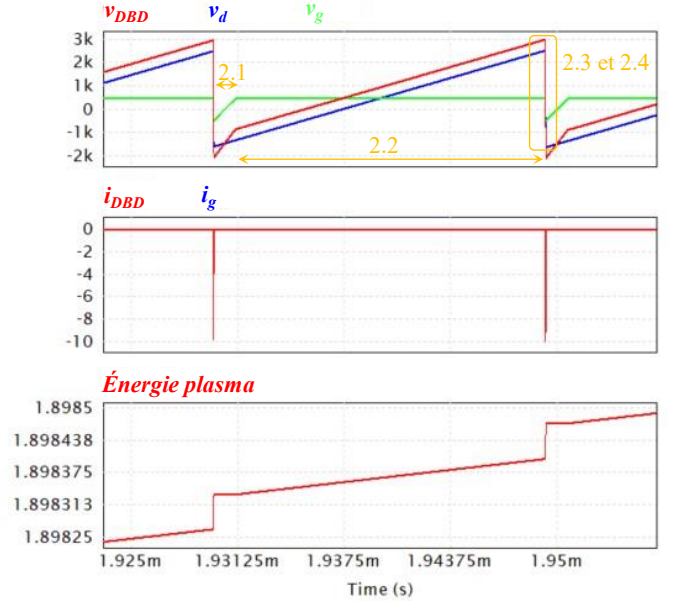


Fig. 6. Simulation du convertisseur avec les paramètres du cas d'étude.

Les détails des formes d'onde associées à l'impulsion, sont présentés Fig. 7, avec la résonance entre l'inductance L et la capacité équivalente dans un premier temps. Après le claquage, seule la capacité C_d du diélectrique participe. Nous relevons que la valeur crête (négative) du courant est bien comme attendu de 10 A et que la durée de l'impulsion de courant dans la décharge est d'environ 20 ns. Ces résultats valident le principe de fonctionnement recherché et les équations de dimensionnement proposées.

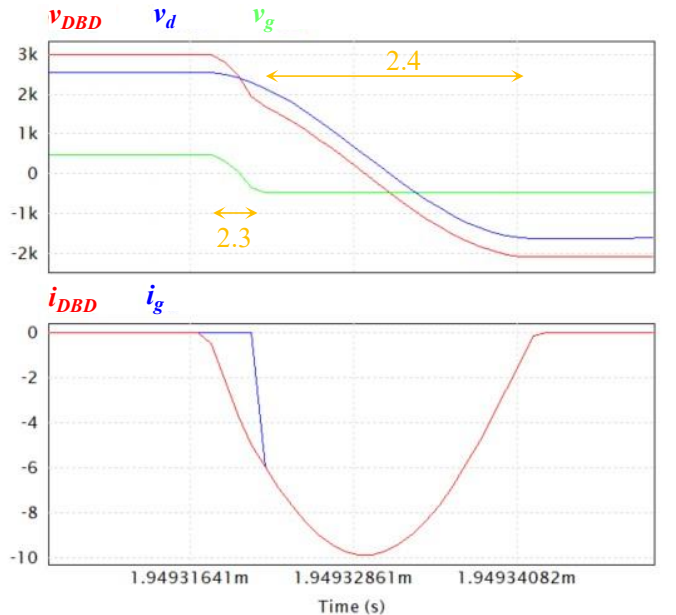


Fig. 7. Détail de l'impulsion dans les formes d'onde simulées.

4. CONCLUSIONS

Ce travail présente l'analyse d'une topologie innovante permettant de délivrer dans une DBD, sous forme d'impulsions intenses et très brèves, une énergie préalablement stockée dans la capacité des barrières diélectriques.

L'analyse théorique dans le plan de phase, validée par les résultats de simulation, permet d'établir les équations à utiliser pour réaliser le dimensionnement d'un tel convertisseur.

Cette structure n'utilise pas de transformateur entre le convertisseur et la DBD, ce qui élimine les limitations imposées par les composants parasites de ce transformateur. Notamment, la restriction dans la durée minimale de la décharge, liée à son inductance de fuites.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire LAPLACE (Toulouse) et la Pontificia Universidad Javeriana de Bogota, Colombie. Il bénéficie du soutien de Toulouse-INP à travers l'action « ETI - TPS_4_DBD ».

6. REFERENCES

- [1] J. M. Williamson, D. D. Trump, P. Bletzinger et B. N. Ganguly, « Comparison of high-voltage ac and pulsed operation of a surface dielectric barrier discharge », J. Phys. D: Appl. Phys. 39 4400, 2006. [doi: 10.1088/0022-3727/39/20/016](https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/20/016)
- [2] S. Candolfi, P. Viarouge, D. Aguglia and J. Cros, "HV pulse transformer generalized equivalent circuit identification based on detailed mechanical structure," 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC), Brighton, UK, 2017, pp. 1-6, [doi: 10.1109/PPC.2017.8291257](https://doi.org/10.1109/PPC.2017.8291257)
- [3] Xavier Bonnin, Hubert Piquet, Rafael Diez, David Florez. "Designing the high voltage transformer of power supplies for DBD: Windings arrangement to reduce the parasitic capacitive effects". *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, Sep 2013, Lille, France. pp. 1-9, [doi: 10.1109/EPE.2013.6631928](https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631928). [hal-01444212](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01444212)
- [4] Mame Andallah Diop, Antoine Belinger, Hubert Piquet. "DBD tranformerless power supplies: impact of the parasitic capacitances on the power transfer". *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 825, pp. 012004. [doi: 10.1088/1742-6596/825/1/012004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/825/1/012004). [hal-01515718](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01515718)
- [5] C. Sanabria, D. Florez, H. Piquet et R. Diez, « Sizing Equations for a Square Voltage Pulse Power Supply for Dielectric Barrier Discharges », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 4, pp. 4374-4384, avril 2022. [doi: 10.1109/TPEL.2021.3122934](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3122934).
- [6] Manley, T. C. "The Electric Characteristics of the Ozonator Discharge". *Trans. Electrochem. Soc.*, vol. 84, no. 1, page 83, 1943. [doi: 10.1149/1.3071556](https://doi.org/10.1149/1.3071556)
- [7] Y. Ren et al., « A Compact Gate Control and Voltage-Balancing Circuit for Series-Connected SiC MOSFETs and Its Application in a DC Breaker », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 10, pp. 8299-8309, Oct. 2017. [doi: 10.1109/TIE.2017.2711579](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2711579)
- [8] D. Florez, H. Piquet, E. Bru and R. Diez, «Single-Switch Transformer-Less Power Supply for Low Temperature Plasma Jet – 3.3 kV SiC MOSFET Opportunities », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 6, pp. 7230-7237, June 2024, [doi: 10.1109/TPEL.2024.3372836](https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3372836)