

NOTE D'APPLICATION

Génération de haute tension, commutations de condensateurs

Introduction

Dans le cadre du projet de conception d'un système électronique d'électroporation, un des points clés est la réalisation d'un procédé de décharge d'une tension allant jusqu'à 2,5 kV à l'aide d'un condensateur de 50 μ F dans un milieu cellulaire compatible avec le budget du projet. Cette note d'application a donc pour but d'expliquer le concept de la solution trouvée et les démarches techniques utilisées.

1. Le condensateur

Sur l'électroporateur utilisé actuellement, on retrouve un condensateur à film de 10 μ F, capable de soutenir une charge allant jusqu'à 3,5 kV.



Figure 1 : condensateur de l'électroporateur commercial

Pour le projet, nous avons donc recherché un condensateur de 50 μ F (valeur donnée par le protocole d'électroporation) capable de supporter une tension de 2,5 kV (valeur maximale de tension donnée par le protocole d'électroporation). La technologie se prêtant le mieux à la charge et décharge d'un condensateur de manière régulière est celle des condensateurs à film. Le problème rencontré est que les condensateurs à film capables de soutenir 2,5 kV et ayant une capacité de 50 μ F sont très coûteux et difficiles à trouver sur le marché. Le plus proche trouvé est un condensateur de 10 μ F capable de soutenir des piques de tension de 2 kV, à 300 euros. Il en faudrait donc 5 pour obtenir une capacité de 50 μ F, pour un coût de 1500 euros. La seule solution pour obtenir un condensateur correspondant au cahier des charges est de le faire fabriquer par une entreprise spécialisée, et le coût de production d'un seul condensateur (ces entreprises produisent des condensateurs en grande quantité pour des industriels) est beaucoup trop haut pour le budget du projet (plus de 1000 euros pour un condensateur). Il nous a donc fallu trouver une solution alternative.

2. Utilisation de plusieurs condensateurs

L'approche que nous avons effectuée est la suivante : remplacer le condensateur unique par plusieurs condensateurs, afin d'avoir un condensateur équivalent à moindre coût.

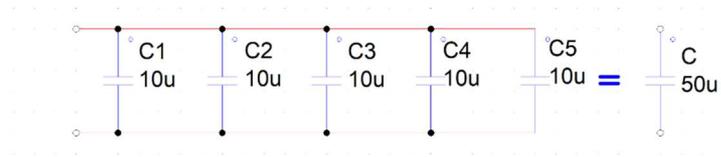


Figure 2 : condensateurs de 10 μF en parallèle

Le problème de cette solution est qu'il faut que chaque condensateur supporte jusqu'à 2,5 kV pour que le montage complet puisse délivrer la tension nécessaire. On revient donc au problème de coût initial. Il nous a donc fallu concevoir une solution incluant plusieurs condensateurs qui n'auraient pas à atteindre les 50 μF et qui n'auraient pas besoin de supporter 2,5 kV.

Cette solution est la suivante : charger les condensateurs en parallèle comme précédemment, puis ensuite les basculer en série. On a ainsi à la charge un condensateur équivalent :

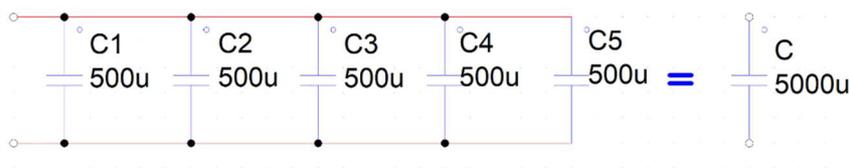


Figure 3 : condensateurs de 500 μF en parallèle

On vient appliquer aux bornes de ce montage une tension égale à la tension désirée divisée par le nombre de condensateurs. Par exemple, si l'on veut en sortie une tension de 1000 V, on vient appliquer en entrée 200 V. Chaque condensateur sera ainsi chargé à 200 V. On va ensuite basculer les condensateurs en série.



Figure 4 : condensateurs de 500 μF en série

On obtient ainsi un condensateur équivalent de 50 μF . Chaque condensateur étant chargé à 200 V, la tension aux bornes du système est maintenant de $200 \text{ V} \times 5 = 1000 \text{ V}$. On pourra ensuite décharger cette tension dans le milieu cellulaire, en obtenant ainsi la décharge d'une tension élevée avec un condensateur de 50 μF . Les condensateurs ne sont pas chargés à des tensions très élevées, on peut donc trouver des condensateurs correspondant à ces caractéristiques beaucoup plus facilement.

Le test de cette solution a été réalisé à l'aide de 2 condensateurs, chargés en parallèle, puis déchargés en série, à l'aide de ce montage :

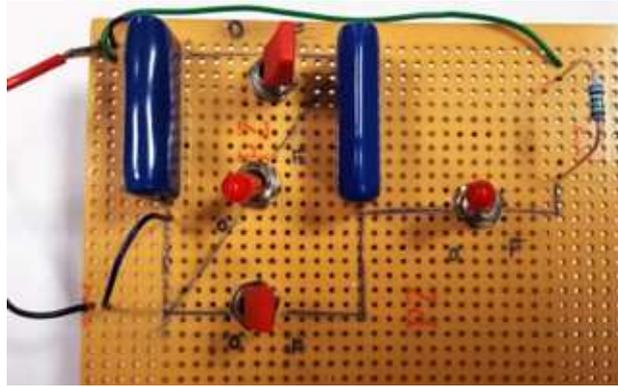


Figure 5 : montage de test du système

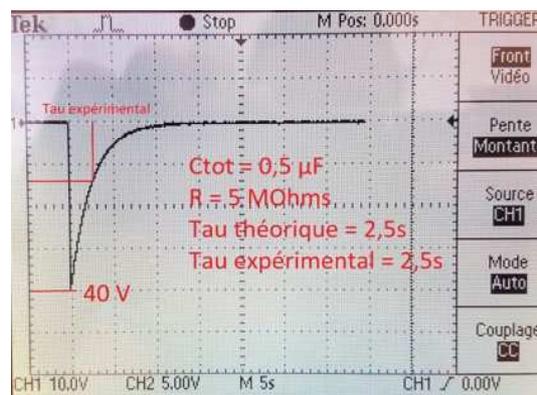


Figure 6 : résultat de la décharge du système

On charge 2 condensateurs de $1 \mu\text{F}$ supportant une tension de 25 V en parallèle, à 20 V . Une fois les condensateurs chargés, on déconnecte la source de tension, et on bascule les condensateurs de parallèle à série à l'aide des interrupteurs. On vient ensuite décharger les 2 condensateurs en série dans une résistance modélisant le milieu cellulaire. On peut voir sur la capture de l'oscilloscope qu'on vient décharger 40 V ($2 \times 20 \text{ V}$) dans la résistance, avec un Tau équivalent à un condensateur de $0,5 \mu\text{F}$ (2 condensateurs de $1 \mu\text{F}$ en série), sans détériorer les condensateurs. On obtient donc un système capable de se comporter comme un multiplicateur de tension, avec des caractéristiques conformes au cahier des charges du projet.

Nous avons choisi des condensateurs chimiques pour notre application, le coût de ces condensateurs étant bas comparé à des condensateurs à film (10 euros par condensateur pour les chimiques contre 100 euros par condensateur pour les condensateurs à film). Ces condensateurs chimiques ne sont pas conçus pour des applications de charge et décharge, mais plutôt pour supporter des tensions continues, et ne présentent donc pas dans leur datasheet d'indications sur leur durée de vie et caractéristiques en impulsion. Afin de tester ces condensateurs, nous avons établi un protocole de test consistant à charger et décharger un condensateur chimique un grand nombre de fois, avec à chaque fois un pic de courant à la décharge supérieur au courant continu maximal supporté par ce condensateur (dans le protocole de test, le condensateur utilisé supporte un courant de 400 mA qui décharge une tension de 20 V dans une résistance de 5 Ohms ce qui entraîne un pic de courant de 4 A à chaque décharge). Ce protocole de test a été réalisé 15000 fois (à l'aide d'un relais qui déconnecte le condensateur de la source de tension et le connecte à une résistance), et le condensateur n'a pas subi de détérioration (valeur de capacité inchangée, pas de chauffe).

Il faut ensuite concevoir un système permettant d'effectuer le passage de parallèle à série, sans risques pour l'utilisateur et pour les composants.

3. Le changement de la position parallèle à la position série

Une fois les condensateurs chargés en parallèle, il faut pouvoir les passer en série sans créer de court-circuit. La solution que nous avons développée consiste à déconnecter l'ensemble des condensateurs une fois qu'ils sont chargés, et les passer de parallèle à série à l'aide de relais.

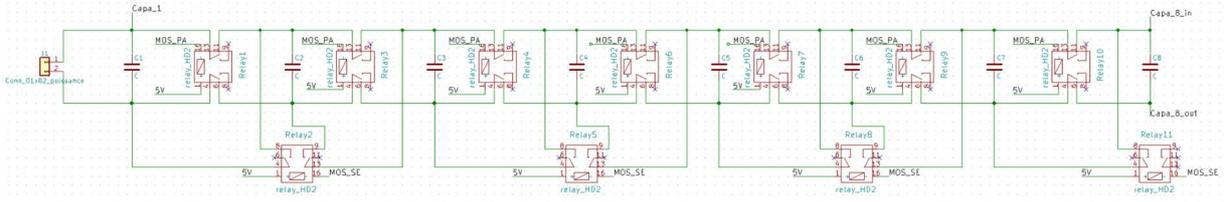


Figure 7 : montage du système des condensateurs avec les relais

Une fois la source d'alimentation déconnectée, les condensateurs sont flottants. On peut donc sans risque commander les relais. Sur le montage final, les relais connectés à la broche « MOS_PA » sont responsables de la connexion des condensateurs en parallèle, et les relais connectés à la broche « MOS_SE » permettent de connecter les condensateurs en série. Chaque set de relais est contrôlé par un transistor MOSFET, qui permet de les connecter à une alimentation 5 V et donc de les alimenter. L'utilisation de 2 sets est une précaution car si on connecte les condensateurs en série avant de les avoir déconnectés de la position parallèle, cela peut créer un court-circuit qui pourrait détruire les condensateurs. On va donc d'abord déconnecter les condensateurs de la position parallèle en alimentant le premier set, puis une fois que chaque condensateur est flottant, les connecter ensemble en série en alimentant le deuxième set, puis lancer la décharge dans le milieu cellulaire.

Ce jeu de relais doit cependant être contrôlé par un microcontrôleur, il faut donc une isolation galvanique pour protéger le contrôleur d'un éventuel retour de tension ou de courant. Nous avons pour cela utilisé un optocoupleur 4N25.

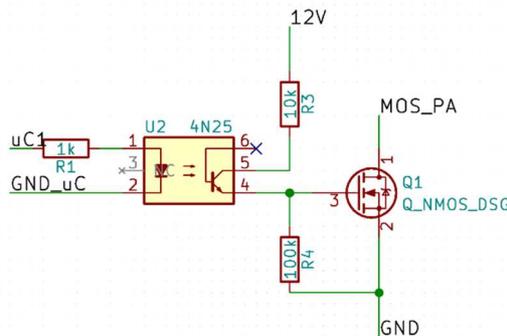


Figure 8 : isolation galvanique pour la commande des relais

Conclusion

Ce système de décharge permet de multiplier la tension d'entrée par le nombre de condensateurs du montage, et permet également de remplacer un condensateur très coûteux par un ensemble de condensateurs beaucoup plus économiques et donc plus facile à remplacer. Une étude à grande échelle ainsi que de tests concernant la durée de vie pourront par la suite permettre de caractériser ce système de manière plus spécifique.