

# Dispositifs de protection filaire innovants pour une protection contre les perturbations de forte amplitude

Frédéric BROYDÉ, Evelyne CLAVELIER

Excem

12, chemin des Hauts de Clairefontaine

78580 Maule - France

e-mail : fredbroyde@excem.fr tel : 01 34 75 13 65

**Résumé - A la suite d'une recherche systématique sur les architectures envisageables pour les dispositifs de protection des pénétrations filaires courants forts contre les perturbations de grande amplitude, nous refinmes deux principes innovants. Nous réalisâmes deux maquettes, qui permirent de valider les principes choisis pour l'extinction d'éclateurs sans emploi de varistance de puissance.**

**Abstract - After conducting a thorough research program on possible schemes applicable to apparatus for the protection of high current wire penetrations against high power surges, we selected two innovating principles. We build two feasibility models, which allowed the validation of the principles choosen for switching off spark gaps without implementing a high power varistor.**

## I. INTRODUCTION

Excem a eu à traiter la conception de dispositifs de protection filaire (notés DPF dans la suite) pour des pénétrations courant fort de shelters faradisés, contre des perturbations impulsionnelles de grande amplitude. Bien que la fonction attendue d'un DPF soit celle d'un limiteur de perturbation classique ou parasurtenseur, nous utilisons le terme DPF pour désigner un dispositif remplissant une fonction, par opposition au mot parasurtenseur qui désignera un composant (éclateur, varistance, etc).

Le but de notre mission était de réaliser des maquettes de DPF destinées à la protection de conducteur d'énergie (basse tension), affranchies des limitations des DPF classiques, notamment celles liées à la détérioration des varistances [2] et à la présence d'inductances de forte valeur (par exemple 200 mH par phase sur des DPF existants). Nous devons également valider ces DPF en utilisant une perturbation correspondant à une impulsion spécifiée par notre client, correspondant à l'effet d'une IEMN (impulsion électromagnétique d'origine nucléaire) basse altitude sur des liaisons courtes non blindées.

Nous avons rapidement écarté la possibilité de réaliser un DPF basé uniquement sur des semi-conducteurs, qui puisse atteindre les caractéristiques attendues, à un coût et un volume compétitif.

Nous avons alors imaginé deux types nouveaux de protections filaires hybrides, mettant en oeuvre des éclateurs et des dispositifs à semi-conducteurs, sans varistance, et sans inductance importante, pouvant présenter des caractéristiques de coût et d'encombrement tout à fait intéressantes.

## II. DÉFINITIONS

**conducteur à protéger** : conducteur sur lequel on installe un dispositif de protection filaire (DPF). Le conducteur à protéger se décompose en deux portions, une de chaque côté du DPF : une portion exposée et une portion protégée.

**courant présumé** : courant qui circulerait du fait de la perturbation, au niveau du DPF, si celui-ci était remplacé par un court-circuit à la masse. Dans notre spécification, la valeur crête de ce courant était de 1,6 kA, la charge de 4,1 C et l'intégrale d'action 905 A<sup>2</sup>s.

**courant de suite** : le courant que fournit un conducteur à protéger, en l'absence de perturbation. Si le DPF est branché sur un conducteur actif d'un réseau électrique d'énergie basse tension, et que le DPF comporte un éclateur directement entre ce conducteur et la masse (mise au neutre), ce courant est voisin du courant de court-circuit de l'installation.

**portion exposée** : portion d'un conducteur à protéger qui peut être le siège de la perturbation.

**portion protégée** : portion d'un conducteur à protéger qui est moins affectée par la perturbation que la portion exposée, grâce à l'action du DPF.

**parasurtenseur** : tout composant non linéaire capable d'écouler les courants liés à une perturbation. Les parasurtenseurs usuels sont les éclateurs, les varistances, les diodes à avalanche de puissance, et les diodes Shockley de puissance.

**repliement** : phénomène par lequel un dispositif laisse passer très aisément le courant après l'occurrence d'une perturbation, en présentant une hystérésis. Le repliement est notamment présent dans les éclateurs et dans les diodes Shockley.

**tension présumée** : tension qui apparaîtrait du fait de la perturbation, au niveau du DPF entre le conducteur à protéger et la connexion de masse du DPF, si celui-ci était remplacé par un circuit ouvert. Dans notre étude, la tension présumée était caractérisée par une valeur crête en circuit ouvert de 100 kV, et une pente maximale en circuit ouvert de 180 V/ns.

## III. STRUCTURES DE PROTECTION ENVISAGEABLES

Il n'est manifestement pas souhaitable, pour une forte valeur de tension présumée, de concevoir un DPF qui ne présenterait pas en premier lieu, dans le sens de propagation de la perturbation impulsionnelle, une protection à structure parallèle, c'est-à-dire entre le conducteur à protéger et la masse. Nous envisagerons donc des DPF à structure parallèle et des DPF à

structure parallèle-série. Les termes "parallèle" et "série" se réfèrent uniquement à la position des parasurtenseurs dans la DPF, comme on le verra sur les exemples ci-après.

Les figures 1 à 3 montrent trois exemples de protection à structure parallèle.

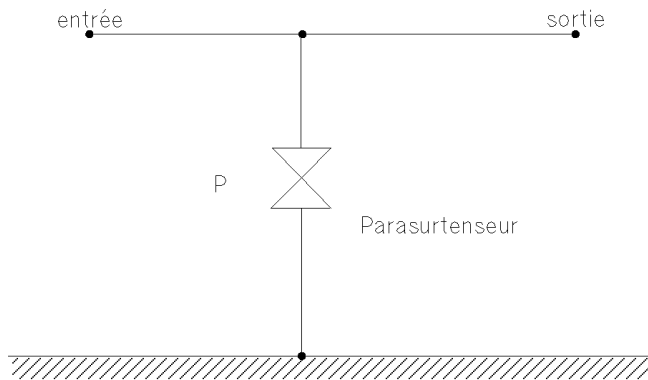


Fig. 1 : parasurtenseur monté en parallèle

La fig. 1 représente tout simplement un parasurtenseur P rapide et capable de supporter la totalité du courant présumé, connecté entre ce conducteur à protéger et la masse.

Une caractéristique de limitation satisfaisante ne peut être en pratique obtenue qu'avec un parasurtenseur comportant un éclateur : en général un éclateur ou bien un éclateur en série avec une varistance. Le rôle du parasurtenseur est de pouvoir dériver une partie importante du courant lié à la perturbation. Eventuellement, l'action du parasurtenseur est complétée par l'action d'un filtre sur la portion protégée du conducteur.

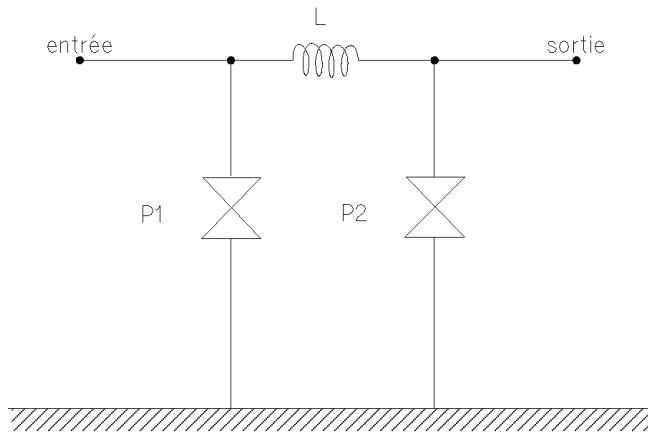


Fig. 2 : un autre DPF à structure parallèle

Un DPF selon la fig. 1 équipé uniquement d'un éclateur n'est applicable qu'à des conducteurs normalement destinés à des petits signaux. Sur les conducteurs soumis par leur fonction à des tensions plus importantes, et capables de fournir un certain courant de suite, comme ceux des lignes d'énergie, de certaines lignes de télécommunication, et des lignes d'antenne reliées à des émetteurs puissants, ce type de protection filaire n'est généralement pas envisageable car l'éclateur risque de ne plus se désamorcer après la perturbation. On utilise alors parfois un parasurtenseur constitué d'une varistance en série avec un éclateur. Cette varistance présente l'inconvénient de laisser monter aux bornes du parasurtenseur la tension à une valeur très

importante, par exemple de 3 kV pour un courant présumé de 5 kA. Comme cette surtension n'est généralement pas considérée acceptable, on doit souvent passer à des protections à structure parallèle plus complexes telle que celle de la fig. 2.

La fig. 2 est un DPF à structure parallèle composite, comportant un parasurtenseur rapide P2 capable seulement d'écouler une fraction du courant présumé de la perturbation, protégé par un parasurtenseur P1 capable d'écouler de forts courants. Cette disposition est tout à fait classique avec en P1 un parasurtenseur constitué d'un éclateur en série avec un varistance, et une varistance à l'oxyde de zinc (MOV) en P2.

La fig. 3 montre un DPF dans laquelle un organe de commutation (noté C) est fermé à la suite d'une surtension, par un déclencheur électronique (noté "décl."), de façon à ce que la DPF présente un repliement, puis ouvert lorsque la perturbation est terminée. Cette structure n'est pas classiquement employée.

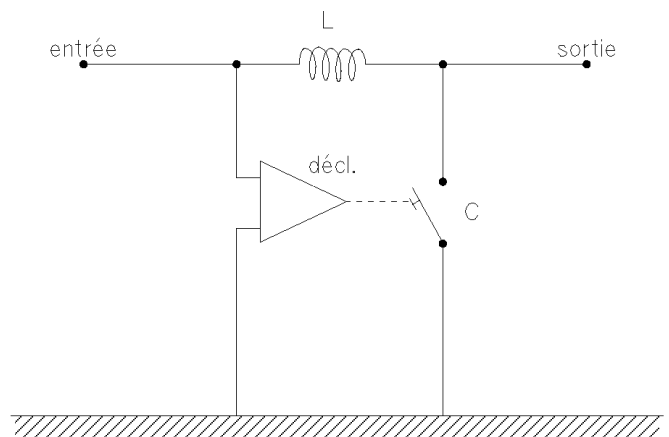


Fig. 3 : un DPF avec déclenchement

Elle présente l'intérêt de pouvoir fermer C avant que le courant ait atteint une valeur importante, et d'éliminer la surtension résiduelle due au temps de réponse d'un parasurtenseur dipolaire.

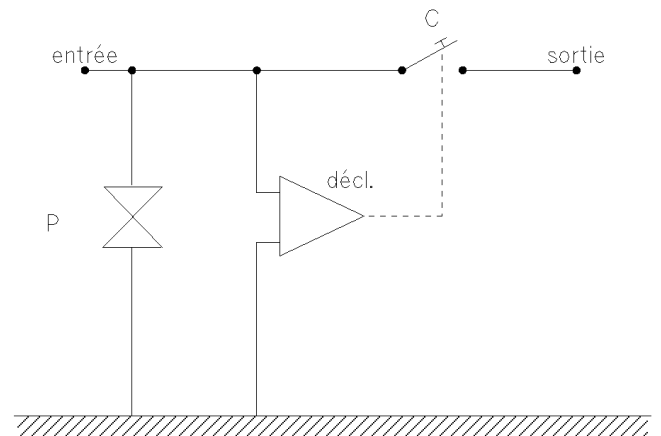


Fig. 4 : DPF parallèle-série

La fig. 4 montre un exemple de protection parallèle-série, dans lequel un parasurtenseur P est chargé de la protection fort courant, sur lequel une surtension importante est acceptée lors du passage du courant, cette surtension résiduelle étant éliminée par l'ouverture de l'organe de coupure noté C sur la figure,

commandé par un ensemble électronique de contrôle. L'organe de coupure doit être de type rapide. Si cette protection est insérée sur une ligne capable d'un courant de suite important, le parasurtenseur doit être capable de s'éteindre seul (une varistance en série avec un éclateur peut convenir).

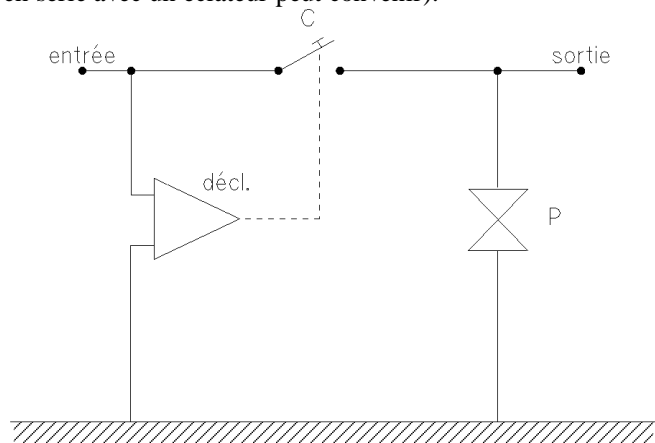


Fig. 5 : DPF à structure série-parallèle

La fig. 5 montre un exemple de protection série-parallèle, dans lequel un parasurtenseur P assure une protection rapide avec une faible surtension résiduelle, le rôle de l'organe de coupure noté C, commandé par un ensemble électronique de contrôle, étant d'interrompre le courant de suite.

Les structures des fig. 4 et 5, comme celle de la fig. 3, ne sont pas classiquement mises en oeuvre.

#### IV. DISCUSSION DES DPF PUREMENT À L'ÉTAT SOLIDE

##### A. DPF purement à l'état solide

Nous envisagerons ici en quelques mots l'emploi des différents semi-conducteurs disponibles pour un DPF "purement à l'état solide", c'est-à-dire dans lequel les effets de la perturbation seraient réduits uniquement par des semi-conducteurs.

L'utilisation des diodes Shockley de puissance et des thyristors ne sera pas discutée car l'amorçage de ces composants est trop lent pour être exploitable avec une impulsion rapide.

Cet examen va nous conduire à écarter l'idée d'un DPF purement à l'état solide.

##### B. Varistances

Les varistances au carbure de silicium ne s'utilisent guère qu'en série avec un éclateur, de façon à en permettre l'extinction. Les varistances à l'oxyde de Zinc ont par contre une non-linéarité suffisante pour permettre leur emploi comme parasurtenseur indépendant, dans un DPF à structure parallèle. Elles sont constituées d'une céramique, donc d'une structure polycristalline. Entre monocristaux s'établit une barrière de potentiel d'une hauteur de l'ordre de 3,5 V. Une caractéristique très importante des varistances au ZnO est que la hauteur de barrière de potentiel diminue avec une élévation de température, et qu'elles ont plusieurs mécanismes de dégradation et de destruction [2].

A chaque fois qu'une varistance est traversée par un courant

important, ses caractéristiques changent un peu. Lorsque la dégradation de la varistance devient significative, on observe normalement une diminution de la tension de coude. Il est très important de noter que la dégradation est beaucoup plus rapide avec des fronts de montée rapide.

Bien que les varistances au ZnO soient rapides, l'ensemble de ces caractéristiques font de la varistance un composant délicat à utiliser lorsque l'on souhaite réaliser une protection filaire efficace, durable et fiable, et que la mise en parallèle pose des problèmes d'appariement insurmontables.

##### C. Diodes à avalanche de puissance

Les diodes à avalanche de puissance ont pour les modèles classiques un pouvoir de dissipation maximal de l'ordre de un à quelques Joules. Par contre l'écrêtage est presque parfait, tant du point de vue du facteur d'écrêtage que de la vitesse de réponse. Un modèle comme le 1.5KE440P de chez SGS Thomson a une tension d'avalanche nominale de 440 V, mais ne supporte que 33 A en onde 8/20 $\mu$ s (la tension d'écrêtage monte alors à 770 V), et 3,5 A en onde 1 ms (la tension d'écrêtage se limitant alors à 600 V), car sa puissance nominale de crête est de 1500 W (pour l'onde 1 ms).

Si l'on envisage d'utiliser des diodes à avalanche comme protection primaire d'une DPF à structure parallèle, une protection capable de supporter un courant de crête de 1600 A pourrait utiliser de l'ordre de 400 diodes à avalanche de ce type. Un autre problème est que la dispersion des tensions de seuil sur ces composants (de l'ordre de  $\pm 20$  V) imposera, en série avec chacun d'eux, une résistance de l'ordre de 4,7  $\Omega$ , ce qui réduit les performances d'écrêtage à environ 620 V pour une onde de 1600 A.

On notera enfin que ces composants très rapides sont également très rapides à aller à la destruction en cas de surcharge. Il est donc indispensable de surdimensionner convenablement le dispositif. Avec 400 diodes, on peut écouler environ 10 kA en onde 8/20 $\mu$ s. Dans ce cas, la tension d'écrêtage attendra toutefois environ 890 V, ce qui est beaucoup.

Ce type de composant est donc difficilement envisageable comme protection primaire. Il est par contre envisageable de l'employer comme protection ultra-rapide pendant un temps très court d'une perturbation, avant qu'une autre protection n'intervienne.

##### D. Transistors bipolaires

Compte tenu de la valeur des tensions présumées considérées dans notre étude (100 kV), il ne semble pas réaliste d'envisager l'utilisation de transistors bipolaires dans une branche série d'une DPF à structure série ou à structure série-parallèle, du fait des limitations en tension maximale, de l'ordre du kilovolt, que peuvent accepter les transistors bipolaires.

Si l'on envisage un transistor bipolaire comme protection primaire parallèle, on note que ces composants n'ont qu'une très faible faculté de supporter les surcharges : le rapport entre le courant de collecteur de crête maximum et le courant continu maximum est généralement inférieur à 2. Ceci oblige à utiliser une surface de silicium considérable (c'est-à-dire beaucoup de

composants) pour arriver à un courant écoulé de 1600 A. Comme ces composants sont lents, ils ne peuvent être retenus.

### E. Utilisation de transistors MOS

Comme pour les transistors bipolaires, il ne semble pas réaliste d'envisager l'utilisation de transistor MOS dans une branche série d'une DPF à structure série ou à structure série-parallèle, du fait des limitations en tension maximale, de l'ordre de 600 Volts, que peuvent accepter les transistors MOS.

Si l'on envisage des transistors MOS comme protection primaire parallèle, on note que ces composants ont une assez bonne faculté de supporter les surcharges : le rapport entre le courant de collecteur de crête maximum et le courant continu maximum est généralement de l'ordre de 3 à 6. Un transistor comme l'IRF840 a par exemple un temps de commutation total de 50 ns, un VDS de 500 V pour un courant de drain de 8 A en continu. Le courant de surcharge est de 32 A. Il faudrait donc environ 50 de ces transistors pour écouler 1600 A, ce qui n'est pas envisageable bien entendu.

## V. DPF HYBRIDES

Nous parlons de "DPF hybrides", pour désigner des dispositifs dans lesquels nous autorisons l'emploi de composants tels que les éclateurs, ou des dispositifs électromécaniques.

Deux principes de DPF hybrides sont présentés au § VI et au § VII. Seule la première structure de DPF hybride emploie un ensemble de commutation à semi-conducteurs. Son rôle est de désamorcer un éclateur. Les thyristors sont parfaitement adaptés à cette fonction, dans la mesure où ils acceptent des surcharges très importantes. Le thyristor SKT100/12C de chez SEMIKRON que nous avons employé est un modèle 1200 V et 175A, qui accepte une surcharge sinusoïdale de 2000 A pendant 10 ms, et des surcharges encore supérieures pour des temps plus courts, à condition de respecter la limite de 20000 A<sup>2</sup>s. La croissance du courant ne doit par contre jamais dépasser 50 A/ $\mu$ s, sans quoi l'on risque de créer un point chaud sur la pastille du thyristor.

### VI. DPF AVEC DISPOSITIF D'EXTINCTION EN DÉRIVATION

La première structure de DPF hybride que nous allons discuter est celle d'un dispositif pour la protection contre les perturbations conduites impulsives de grande amplitude, avec extinction d'un éclateur par un dispositif de dérivation à semiconducteur [3].

La structure que nous envisageons à présent, dérivée de celle de la fig. 3, apparaît sur la fig. 6, représentant schématiquement la première structure de DPF hybride. Selon cette structure, la DPF (1) est tripolaire et comporte une première branche avec un éclateur (2), cette première branche étant connectée entre la borne A du dispositif de protection et sa borne M de masse, une seconde branche comportant une bobine (7) entre ses bornes A et B, et une troisième branche entre ses bornes B et M comportant les deux bornes fort courant de l'organe de commutation à semiconducteur (8), une capacité (6) étant branchée en parallèle

sur cette dernière branche, l'ensemble électronique de contrôle (9) surveillant la tension entre les points A et M pour délivrer son ordre de déclenchement à l'organe de commutation (8). Le DPF est normalement connecté premièrement à une masse (10), deuxièmement à la portion exposée (20) du conducteur, troisièmement à la portion protégée (30) du conducteur, portion qui peut être considérée comme relativement peu perturbée par la perturbation.

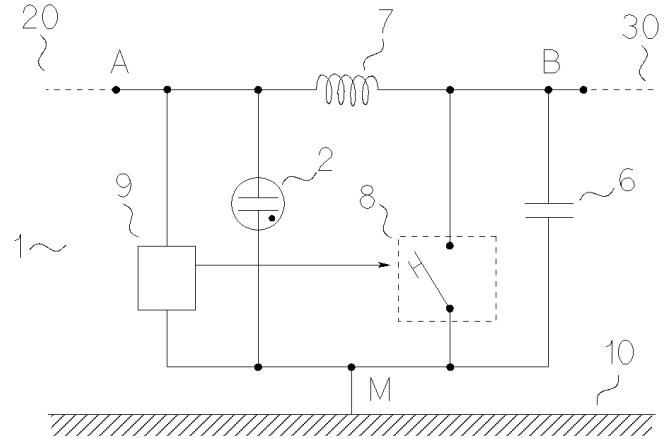


Fig. 6 : première structure de DPF hybride

Lorsque la perturbation survient, l'éclateur se laisse rapidement (au bout de quelques nanosecondes ou dizaines de nanosecondes) traverser par des courants tels qu'il ramène la tension à ses bornes à quelques dizaines de volts. La bobine (7) et la capacité (6) éliminent de la portion protégée du conducteur et des bornes de l'organe de commutation, les pointes de tension et de dérivée de la tension produites par la perturbation, car ces phénomènes peuvent être nuisibles à certains types d'organes de commutation à semiconducteurs. Après un temps de latence d'une milliseconde par exemple, l'ensemble électronique de contrôle donne ordre, par émission de l'ordre de déclenchement, à l'organe de commutation à semiconducteur de se fermer.

On sait qu'une fois qu'un éclateur est amorcé, il restera dans cet état tant qu'il reçoit suffisamment de puissance électrique ; plus précisément, l'éclateur pourra se désamorcer s'il n'est pas traversé par des courants importants pendant suffisamment longtemps, ce qui permet au plasma qu'il contient dans son état amorcé, de se refroidir. La commande de la fermeture l'organe de commutation conduit ici à une très forte réduction de la tension aux bornes de l'éclateur qui devient inférieure à sa tension d'arc. Si la perturbation ne dure pas trop longtemps, le courant dans l'éclateur sera interrompu suffisamment longtemps pour permettre son désamorçage et lorsque l'organe de commutation se rouvre, le signal est rétabli sur la portion protégée du conducteur.

La fig. 7 détaille un mode de réalisation de la première structure de DPF hybride, conçu pour la protection d'une ligne d'alimentation en courant alternatif à 50 Hz. Selon cette figure, les repères (1), (2), (6), (7), (8), (10), (20) et (30), ainsi que les bornes A, B et M correspondent aux mêmes définitions et aux mêmes fonctions que sur la figure 6. L'organe de commutation (8) est ici réalisé à partir de deux thyristors (81) et (82) montés en tête-bêche et supportant un courant non répétitif de surcharge accidentelle à l'état passant de 2000 A pendant 20 ms, et de deux

transformateurs d'impulsion (83) et (84) pour la transmission de l'ordre de déclenchement transmis ici par deux liaisons distinctes.

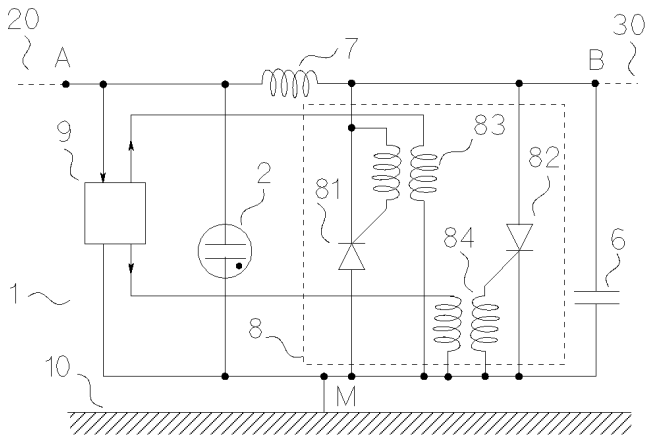


Fig. 7 : détails pour la mise en oeuvre de la structure de la fig.6

Un dispositif selon la première structure de DPF hybride doit être conçu de façon à ce qu'il ne risque d'être endommagé ni par la perturbation ni par le courant de suite. Ceci implique des précautions bien connues des spécialistes au niveau de la conception de l'ensemble électronique de contrôle, et du dimensionnement du ou des éclateurs et des organes de commutation.

Si l'ensemble électronique de contrôle ou le ou les organes de commutation nécessitent une alimentation en énergie électrique, celle-ci peut par exemple être assurée par une connexion à un ou plusieurs conducteurs que la protection filaire protège. On note dans ce cas que, si une perturbation survient alors que le ou les conducteurs sur lequel la protection est installée ne sont pas sous tension, il est probable que le ou les organes de commutation ne recevront pas d'ordre de déclenchement, mais que cette absence est sans conséquence préjudiciable puisqu'il n'est pas nécessaire de forcer l'extinction de l'éclateur dans ce cas.

Nous ne détaillerons pas ici le riche sujet de la conception de l'ensemble électronique de contrôle.

## VII. DPF AVEC DISPOSITIF D'EXTINCTION EN SERIE

La seconde structure de DPF hybride est celle d'un dispositif pour la protection contre les perturbations conduites impulsives de grande amplitude, avec extinction d'un éclateur par un dispositif de coupure électromécanique [4]. Elle améliore une technique existante [1].

La structure que nous envisageons à présent, dérivée de celle de la fig. 5, apparaît sur la fig. 8. Selon cette structure, le DPF (1) est tripolaire et comporte une première branche avec un éclateur (2), cette première branche étant connectée entre la borne B du dispositif de protection et sa borne M de masse, une seconde branche comportant le contact (82) de l'organe de coupure électromécanique (8) entre ses bornes A et B du dispositif de protection, l'ensemble électronique de contrôle (9) surveillant la tension entre les points A et M pour délivrer son

ordre de déclenchement à la bobine (81) de l'électro-aimant de l'organe de coupure (8). Le DPF est normalement connecté premièrement à une masse (10), deuxièmement à la portion exposée (20) du conducteur, troisièmement à la portion protégée (30) du conducteur, portion qui peut être considérée comme relativement peu perturbée par l'impulsion grâce à l'action de la protection filaire.

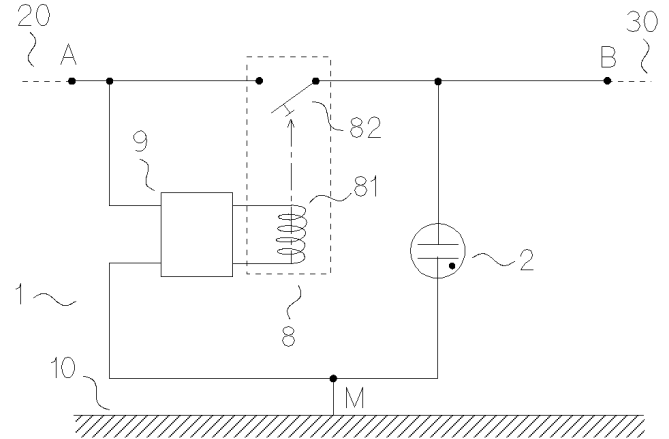


Fig. 8 : seconde structure de DPF hybride

Lorsque la perturbation survient, l'éclateur se laisse rapidement (au bout de quelques nanosecondes ou dizaines de nanosecondes) traverser par des courants tels qu'ils ramènent la tension à ses bornes à quelques dizaines de volts. Après un temps de latence d'une milliseconde par exemple, l'ensemble électronique de contrôle donne ordre, par émission de l'ordre de déclenchement, à l'organe de coupure de s'ouvrir.

La commande de l'ouverture de l'organe de coupure produit l'ouverture du contact. Le courant dans l'éclateur doit être limité ou interrompu suffisamment longtemps pour permettre son désamorçage et lorsque l'organe de coupure se referme, l'alimentation est rétablie sur la portion protégée du conducteur.

Il est important que l'organe de coupure soit suffisamment rapide pour s'ouvrir avant que l'éclateur ne souffre du courant de suite, et qu'il ait un pouvoir de coupure convenable.

## VIII. ESSAIS SUR LES DEUX DPF HYBRIDES

Les maquettes de DPF hybride que nous avons réalisées ont une inductance série totale inférieure à environ 15  $\mu\text{H}$ . Elles sont plus complexes que les schémas de principe présentés.

Nous présentons les résultats d'essais effectués avec des impulsions de courant présumé de 1400 A et de tension présumée de 1000 V, donc différentes de celles définies au § II. Des résultats obtenus avec une maquette du premier DPF hybride, réalisé selon le principe de la fig. 7 apparaissent sur les figures 9 à 11. Ils montrent des tensions mesurées lors d'essais différents, avec différentes vitesses d'échantillonnage, pour les impulsions positives superposées au secteur. Sur la fig. 10, on observe nettement le passage du régime d'arc au régime de conduction des thyristors, au bout de 25  $\mu\text{s}$  environ. La fig. 11 montre, avec une échelle de temps de 5 ms par division, un des modes possibles d'extinction d'un thyristor après une impulsion positive.

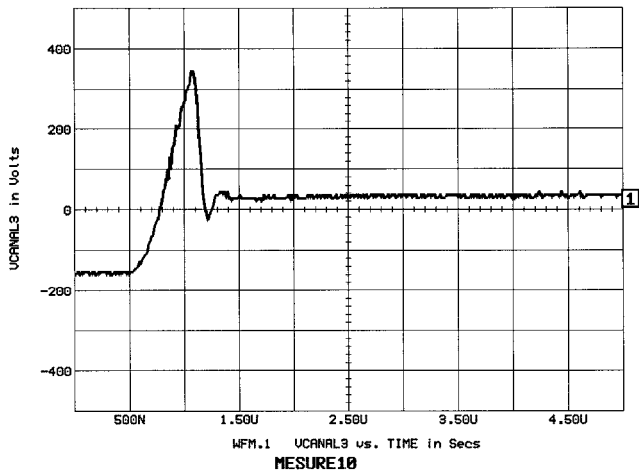


Fig. 9 : premier DPF hybride, 500 ns/div

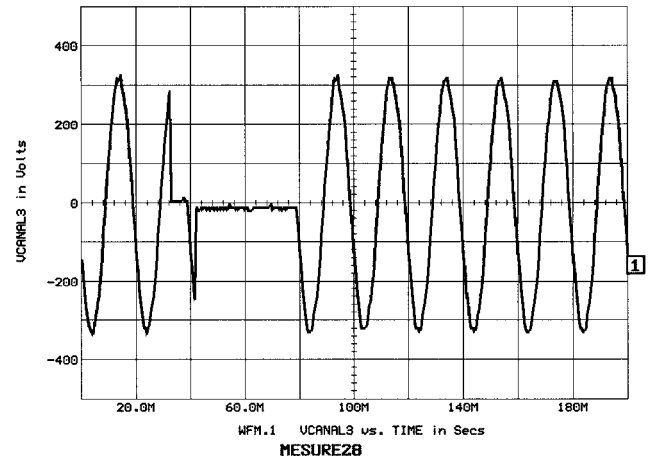


Fig. 12 : deuxième DPF hybride

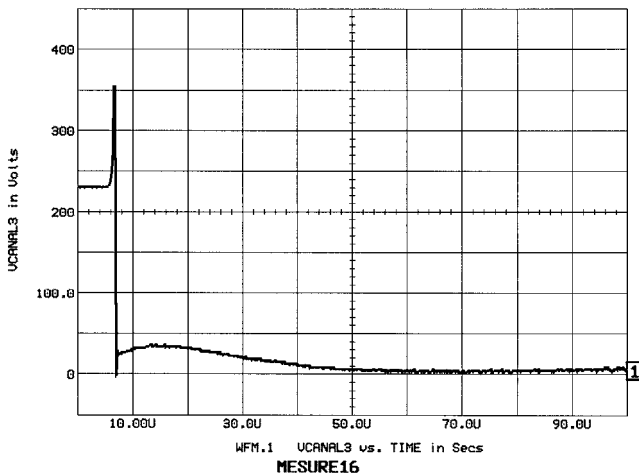


Fig. 10 : premier DPF hybride, 10  $\mu$ s/div

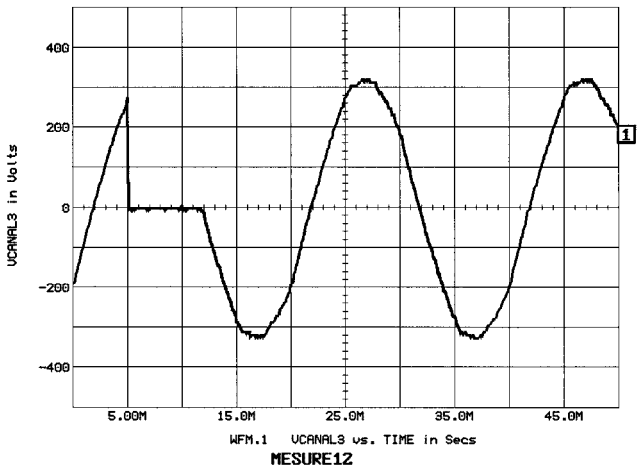


Fig. 11 : premier DPF hybride, 5 ms/div

Une maquette du second DPF hybride a aussi été réalisée, ce qui nous a obligé à fabriquer un organe de coupure spécial. La fig. 12 montre le signal obtenu pour une impulsion positive, avec une échelle de temps de 20 ms par division. On note que le fonctionnement n'est pas totalement satisfaisant sur cette maquette, du fait d'une réponse électromécanique trop lente.

## IX. CONCLUSION

Selon les deux structures de DPF hybride que nous avons proposées, le désamorçage des éclateurs était réalisé par des circuits qui ne détériorent pas les caractéristiques d'écrêtage des éclateurs, comme le feraient des varistances en série.

Ces structures de DPF peuvent être mises en oeuvre pour être installées sur une ou plusieurs lignes d'énergie en courant alternatif ou en courant continu. Des variantes sont également possibles pour la protection de lignes d'antennes d'émetteurs.

Nous avons ainsi montré la faisabilité de DPF hybrides. Les principes retenus permettent d'envisager la mise en service de DPF plus performants.

Avant le développement de DPF selon ces principes, il conviendra de prêter une attention toute particulière à la définition : si les DPF hybrides peuvent faire mieux que les dispositifs existants, encore faut-il qu'il y ait une demande. Il sera par exemple important d'imposer des caractéristiques de fiabilité et de reproductibilité, un bon comportement sur des types variés de perturbations (y compris des perturbations lentes ou d'amplitude moyenne), et une faible aire de la tension de surcharge en sortie du DPF. En effet ce sont des caractéristiques importantes, pour lesquelles un DPF hybride bien conçu donnera des résultats meilleurs d'un DPF conventionnel.

## RÉFÉRENCES

- [1] F. Broydé, *Dispositif de protection contre les effets des impulsions électromagnétiques nucléaires*, brevet français n° 88 08792, demande du 28 juin 1988.
- [2] K. Feser, L. Kehl, "Degradation of metal-oxide varistors by steep current impulses", *proceedings of the 9th international Zürich Symposium on EMC*, 12-14 March 1991, pp 531-534.
- [3] E. Clavelier, F. Broydé, *Dispositif pour la protection contre les perturbation électromagnétiques conduites inulsionnelles de grande amplitude, avec extinction d'un éclateur par un dispositif de dérivation à semi-conducteur*, brevet d'invention français n°94 01804, demande du 15 février 1994.
- [4] E. Clavelier, F. Broydé, *Dispositif pour la protection contre les perturbation électromagnétiques conduites inulsionnelles de grande amplitude, avec extinction d'un éclateur par un dispositif de coupure électromécanique*, Certificat d'Utilité français n° 94 01803, demande du 15 février 1994.