



HAL
open science

Essais de tenue d'isolation entre spires pour enroulements de machines électriques alimentées par des ondes de tension à très forts dV/dt

Veronika Bolgova, Andrey Leonov, Sami Hlioui, Stéphane Lefebvre

► To cite this version:

Veronika Bolgova, Andrey Leonov, Sami Hlioui, Stéphane Lefebvre. Essais de tenue d'isolation entre spires pour enroulements de machines électriques alimentées par des ondes de tension à très forts dV/dt . 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981851

HAL Id: hal-02981851

<https://hal.science/hal-02981851v1>

Submitted on 28 Oct 2020

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.

Essais de tenue d'isolation entre spires pour enroulements de machines électriques alimentées par des ondes de tension à très forts dV/dt

Veronika BOLGOVA^{1,2}, Andrey LEONOV², Sami HLIQUI¹, Stéphane LEFEBVRE¹

¹SATIE, CNRS, ENS Paris-Saclay, Cnam

²Université Polytechnique de Tomsk

RESUME - La mise en œuvre de composants à semi-conducteurs grand gap, tels que le SiC et le GaN permet la réalisation de convertisseurs de forte densité de puissance notamment pour les systèmes d'entraînement à vitesse variable des machines électriques. Les vitesses de commutation élevées de ces composants conduisent à des contraintes électriques en dV/dt plus sévères sur l'isolation des enroulements des moteurs alimentés par de tels convertisseurs. L'article que nous proposons consiste à évaluer la tenue en isolation de fils émaillés dédiés aux bobinages des enroulements de machines électriques lorsqu'ils sont soumis à des contraintes de fort dV/dt .

Mots-clés—'Isolation', 'Machine électrique', 'Carbure de silicium (SiC)', 'Décharge partielle'.

1. INTRODUCTION

La qualité et la stabilité des propriétés des matériaux diélectriques jouent un rôle vital dans le fonctionnement fiable des machines électriques. L'isolation des bobinages des moteurs alimentés par des convertisseurs statiques basés sur la modulation de largeur d'impulsion (MLI) est soumise à des contraintes électriques provenant de la forme d'onde de la tension d'alimentation [1], [2], [3]. Les phénomènes de nuisances électromagnétiques sur l'ensemble de la chaîne de conversion, les ondes réfléchies dans le câble d'alimentation, ainsi que la non adaptation des impédances du câble et de l'enroulement de la machine, peuvent conduire à l'apparition de surtensions aux bornes de la machine.

Les surtensions peuvent être suffisamment élevées pour dépasser le seuil d'apparition des décharges partielles (SADP). L'apparition de ces décharges partielles (DP) entraîne alors la dégradation des isolants qui, à son tour, amène à une augmentation de la fréquence des impulsions de DP et de leurs amplitudes. Il en résulte une dégradation de l'isolation entre les spires qui, à terme, peut avoir pour conséquence la défaillance de la machine [2].

Pour étudier le phénomène de DP et évaluer la tenue des fils de bobinage aux contraintes appliquées au moteur alimenté par un convertisseur statique de puissance à MLI, différentes méthodes expérimentales sont utilisées. Les principaux objectifs des essais expérimentaux sont : la caractérisation des DP et des conditions de leur apparition, ainsi que leur influence sur

l'isolation [2], [4] ; la détection des défauts d'isolation [5], et l'élaboration des modèles de durée de vie des isolants en fonction des contraintes appliquées [6].

L'implémentation des semi-conducteurs à large bande interdite, tels que le SiC et le GaN, conduit à l'augmentation des contraintes électriques sur les machines alimentées par convertisseurs, cela nécessite alors de nouvelles approches d'étude des DP. Par exemple, dans la référence [7] le dispositif expérimental est réalisé en utilisant des composants SiC. Néanmoins, le fait que les essais soient menés sur la chaîne complète d'entraînement les rend relativement coûteux et difficilement utilisables pour étudier les processus physiques du vieillissement des diélectriques.

L'objectif de ces travaux est d'élaborer une méthode plus simple et moins coûteuse afin d'évaluer l'impact des contraintes sévères imposées par de forts dV/dt et de hautes températures sur des isolants utilisés dans des machines électriques. L'article présentera le dispositif expérimental développé qui permet de générer des impulsions de tension avec des fronts d'onde très raides, les essais de vieillissement menés sur différents fils émaillés employés dans l'industrie, et l'analyse des résultats expérimentaux.

2. METHODE D'ESSAI A FORTS DV/DT

Le montage expérimental proposé est conçu pour tester les fils émaillés destinés à la fabrication de bobinages des moteurs électriques de faible et moyenne puissance. Réalisé en utilisant des composants SiC, ce dispositif permet de générer des impulsions de tension avec des fronts d'onde paramétrables à fort dV/dt . L'utilisation d'une chambre thermique rend possible une étude du vieillissement électrothermique de l'isolation.

2.1. Objets sous test

L'étude expérimentale présente des résultats d'essais de vieillissement sur les fils émaillés de Type I selon la classification CEI 60034-18-42 [8]. Ces fils sont généralement utilisés dans des machines ayant une tension assignée inférieure ou égale à 700V. Pour ce type d'isolation, les DP se produisent à la suite du vieillissement thermique, mécanique et électrique. Dans des conditions normales de fonctionnement, leur

apparition est un symptôme du processus de dégradation de l'isolation, qui peut conduire à la défaillance finale.

Nous utilisons des éprouvettes sous forme de paires torsadées (Fig. 1) faites de deux tronçons de fil émaillé selon la norme CEI 60851-5 : 2008 [9]. Deux fils de type conventionnel et un fil corona résistant sont testés. Ces fils ont un diamètre externe $D = 1\text{ mm}$ avec une épaisseur radiale de l'isolant de $\delta_{\text{rad}} = 30\ \mu\text{m}$.

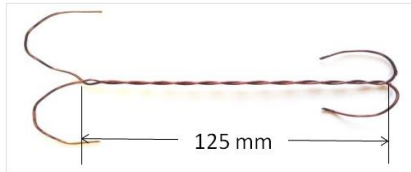


Fig. 1. Paire torsadée de fil émaillé.

Les fils émaillés testés ont une double couche isolante de grade 2. Les compositions de l'isolation selon le fil utilisé sont :

- corona résistant : vernis 3-hydroxyéthylcyanurique comportant des nanoparticules de silicium + polyamide-imide (PAI) ;
- conventionnel 1 : polyéther (PE) + polyamide-imide (PAI) ;
- conventionnel 2 : polyuréthane modifiée (PU) + polyamide (PA).

La composition spécifique du fil corona résistant doit assurer une meilleure résistance à la dégradation provoquée par des DP comparativement aux autres fils émaillés conventionnels.

La résistance thermique du moteur électrique se détermine par celle des isolants du bobinage, donc par leur classe thermique. Dans notre cas, la classe thermique des fils sous test correspond à la température maximale de fonctionnement égale à 180°C , classe H [10].

2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, installé à l'université polytechnique de Tomsk (Fédération de Russie) comprend un générateur de tension DC, un générateur d'impulsions, une chambre thermique où les éprouvettes sont installées et le système de mesures (Fig. 2, Tableau 1).

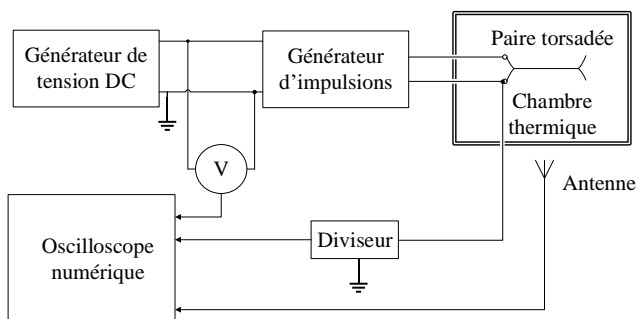


Fig. 2. Synoptique du dispositif expérimental.

Tableau 1. Principaux éléments du dispositif expérimental.

Composant	Caractéristiques
Transistor	MOSFET SiC Wolfspeed, réf. C2M0280120D, $V_{\text{DS}} = 1700\text{ V}$, $R_{\text{DS(on)}} = 1\ \Omega$ à 25°C
Driver	Dual 1700V SiC MOSFET Driver, réf. PT62SCMD17
Oscilloscope	Keysight Technologies DSOX2014A 100 MHz
Kilovoltmètre	0-120 kV, précision 0,25%
Diviseur	RC-diviseur de tension HF, 1 : 3000
Chambre thermique	Éléments de chauffage résistifs au nickel-chrome, température maximale 200°C , écart $\pm 5^\circ\text{C}$

Le générateur d'impulsions est un onduleur monophasé en pont complet à base de MOSFET SiC Wolfspeed 1700V, $1\ \Omega$. Ce transistor a été sélectionné, car il permet d'atteindre des niveaux de tensions commutés élevés avec des dV/dt importants en sortie de l'onduleur (faibles capacités de sortie et de contre-réaction). Les paramètres des impulsions générées telles que l'amplitude, la fréquence de découpage et le rapport cyclique sont réglables. En outre, la variation de la température est possible lorsque des éprouvettes sous tension sont placées dans la chambre thermique. La possibilité de varier ces paramètres permet d'examiner leurs effets sur l'apparition des DP et sur le vieillissement du matériau isolant.

La détection de DP est réalisée en utilisant une antenne car l'apparition des décharges partielles a un impact sur le champ électromagnétique rayonnée par les éprouvettes. Cette antenne (Fig. 3) est réalisée avec un câble coaxial $150\ \Omega$ pour transmission de signaux RF (Radio Fréquence). Les extrémités du câble sont connectées à des résistances d'adaptation : $R_1 = R_2 = 150\ \Omega$.



Fig. 3. Photo de l'antenne

Lorsqu'une DP se produit à proximité de l'antenne (placée à une distance de 15 cm de la paire torsadée), le courant de déplacement créé par la DP est capté par l'antenne.

D'autre part, l'échauffement des éprouvettes soumises aux décharges partielles a été estimé en utilisant une caméra infrarouge FLIR E50 qui possède deux gammes de température de -20°C à $+120^\circ\text{C}$ et de 0°C à $+650^\circ\text{C}$. Les mesures de température IR en présence de DP sont effectuées à une distance d'un mètre de la paire torsadée sous température ambiante.

2.3. Protocole expérimental

Les essais de vieillissement électrothermique ont permis d'évaluer l'effet des vitesses de variation de la tension (dV/dt), de la fréquence des impulsions et de la température sur le vieillissement des isolants de fils émaillés et leur durée de vie.

Les conditions expérimentales sont indiquées ci-dessous :

- tension du bus continu : 1, 1.2, 1.4 kV ;
- fréquence de découpage : 20 et 50kHz ;
- température : 20 et 180°C ;
- rapport cyclique : $\alpha = 50\%$;
- $dV/dt \approx 24\ \text{kV}/\mu\text{s}$ pour une tension de 1.2 kV.

La Fig. 4 présente la forme d'onde de tension appliquée aux éprouvettes pendant les essais de vieillissement, mesurée sur un bras d'onduleur en utilisant le diviseur de tension. Ce dernier est placé au point de connexion de l'éprouvette à une distance d'un mètre de la sortie du générateur d'impulsions (longueur du câblage pour atteindre la chambre thermique). Ce diviseur capacitif - résistif est dédié à la mesure des tensions de choc. La tension est mesurée sans éprouvette installée, donc le signal n'est pas perturbé par les décharges partielles.

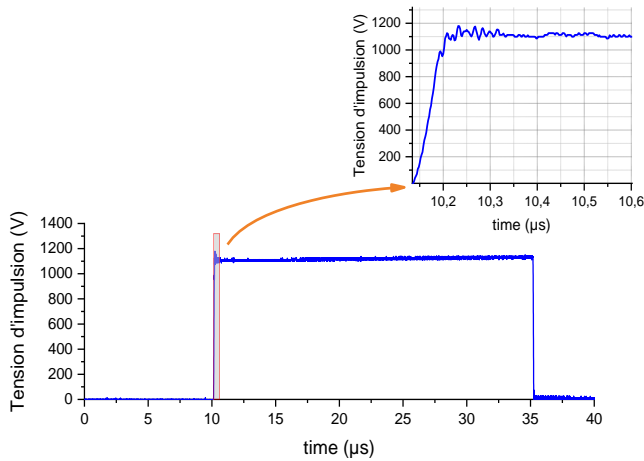


Fig. 4. Forme d'onde de la tension appliquée sur l'éprouvette, le niveau de tension du bus continu 1.1kV

La forme d'onde de la tension représente la réponse du diviseur au signal produit par le générateur d'impulsion avec des oscillations HF durant les premières centaines de nanosecondes suivant la commutation.

Au cours des essais, les éprouvettes sont testées à deux niveaux de température : température ambiante 20°C et température correspondant à la classe thermique d'isolation 180°C. Ce choix a été fait afin d'évaluer l'accélération du vieillissement de l'isolation sous des contraintes à la fois électriques et thermiques dans le but de recherche à dissocier l'effet de ces deux grandeurs sur le vieillissement.

Les résultats obtenus sur deux niveaux de fréquences de découpage, 20 et 50kHz, mettent en évidence un impact important sur la durée de vie des isolants.

Une analyse approfondie des résultats obtenus est présentée dans la section suivante.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les décharges partielles autour des fils constituant l'éprouvette testée sont visibles à l'œil nu sous forme de couronne lumineuse. L'intensité de la luminosité est liée à l'intensité des DP (Fig. 5).

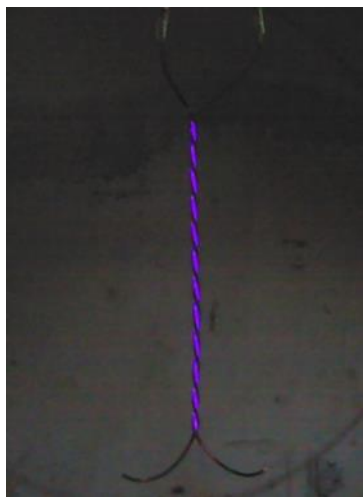


Fig. 5. Photographie des décharges partielles : couronne
 $V = 1.2 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ kHz}$, $dV/dt = 24 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $T_{AMB} = 20^\circ\text{C}$, fil corona résistant

Afin de mesurer la tension appliquée aux éprouvettes et de détecter l'apparition des DP les dispositifs de mesures présentés dans le paragraphe 2 sont utilisés. Au préalable, les mesures en absence de DP (Fig. 6) sont effectuées à vide, c'est-à-dire, sans éprouvette installée. Ensuite, l'éprouvette a été placée, et l'amplitude des impulsions a été augmentée jusqu'à l'apparition des DP qui est confirmée par un contrôle visuel. Les formes d'ondes de tension (Fig. 7) révèlent des perturbations à haute fréquence induites par l'apparition des DP.

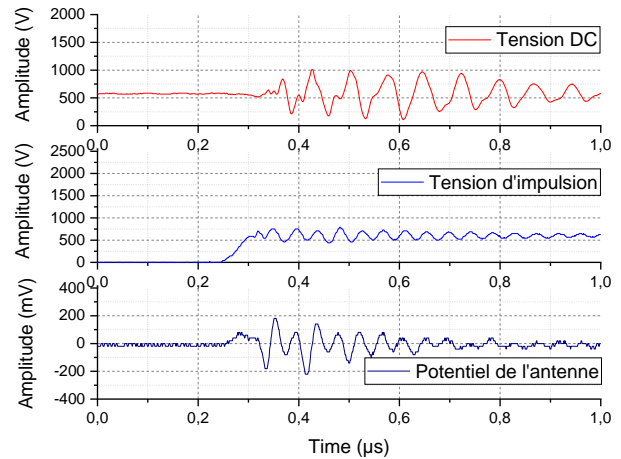


Fig. 6. Formes d'ondes de tension mesurée en absence de DP.

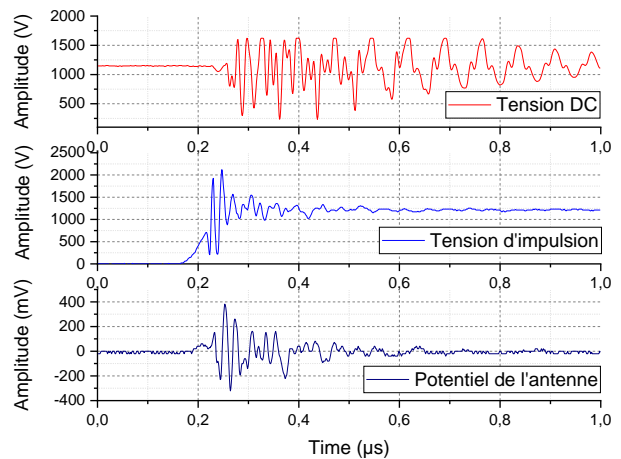


Fig. 7. Formes d'ondes de tension mesurée en présence de DP.

Les caractéristiques des DP, telles que leur nombre par impulsion, le taux de répétition, l'amplitude et la puissance, ne peuvent pas être déduites au travers ces mesures. Par contre, elles permettent de détecter l'apparition des décharges lorsqu'elles sont encore de trop faible intensité pour être visibles à l'œil nu. Afin de déterminer la valeur du SADP, l'amplitude de la tension du bus continu a été augmentée progressivement par pas de 100V. Le seuil d'apparition des DP est de 700V sous une fréquence de 20 kHz et à température ambiante de 20°C. Le dépassement de ce seuil de tension implique l'augmentation des oscillations des tensions mesurées, indiquant l'accroissement de l'intensité des DP.

Dans le but d'estimer la résistance des différents fils émaillés aux décharges partielles et l'impact des décharges sur la durée de vie des isolants, les essais sont poursuivis jusqu'à la rupture de l'isolation, ou claquage. La protection des circuits de

commande rapprochée des transistors se déclenche après claquage des isolants et protège ainsi le banc de test.

Le temps moyen τ jusqu'à claquage a été systématiquement déterminé pour chaque niveau de tension appliquée au-delà du SADP (700V). Pour les trois configurations d'émail présentées précédemment, 5 éprouvettes ont été systématiquement détruite pour chaque niveau de tension, deux valeurs de fréquence et deux niveaux de température. Le temps moyen τ jusqu'à claquage correspond ainsi à la moyenne des temps sur les 5 éprouvettes testées pour chaque essai. L'exception est faite pour le fil corona résistant à cause de sa tenue d'isolation élevée et donc la durée de vie plus longue comparativement aux autres fils émaillés conventionnels. Au total, 34 éprouvettes ont été testées lors de cette campagne d'essais.

Le tableau ci-dessous regroupe les paramètres de tension appliquée, les niveaux de température des essais, et les résultats expérimentaux obtenus.

Tableau 2. Temps moyen jusqu'à claquage des isolants (CR : Corona Résistant, NCR : Non Corona Résistant, émail conventionnel).

Conditions d'essais			Temps moyen jusqu'au claquage, (min)		
V, kV	f, kHz	T, °C	corona résistant CR	conventionnel 1 NCR1	conventionnel 2 NCR2
1	20	20		10,16	5,69
1.2			> 420	5,57	1,60
1.4			9,52	3,76	0,76
1	50	20		11,23	2,31
1.2			5,78	1,87	0,29
1.4			0,56	0,59	0,20
1	20	180		130,27	4,65
1.2			64,82	3,93	0,23
1.4			1,45	1,68	0,12

Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau 2 sont illustrés dans les figures Fig.8 et Fig.9 selon les conditions d'essais. Pour la clarté des figures, les fils sont identifiés par les acronymes donnés dans le tableau 2 (CR, NCR1 et NCR2).

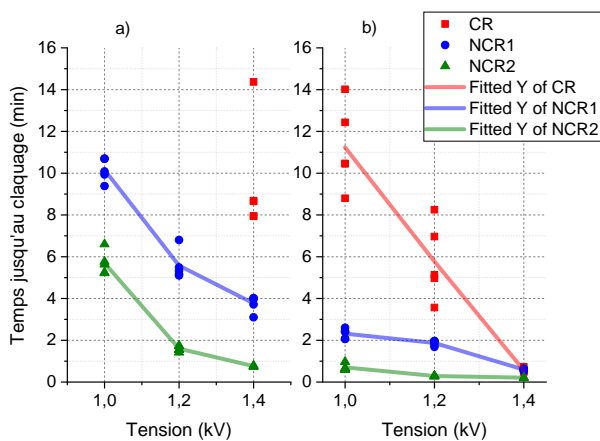


Fig.8. Temps jusqu'à claquage de l'isolation émaillée. Conditions des essais : a) 20°C, 20 kHz ; b) 20°C, 50 kHz.

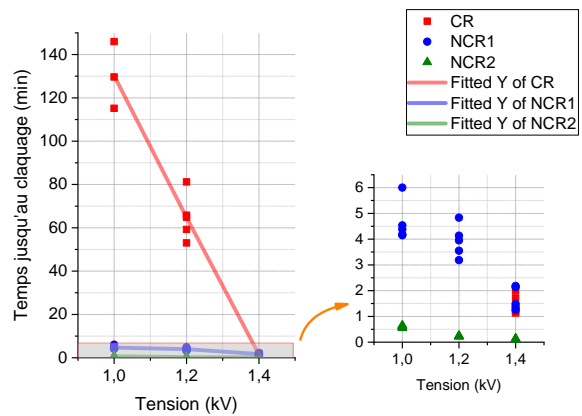


Fig.9. Temps jusqu'à claquage de l'isolation émaillée. Conditions des essais : 180°C, 20 kHz.

Les temps jusqu'à claquage peuvent présenter un fort écart dû à la non-linéarité des propriétés de la couche isolante des fils émaillés et la présence de défauts, distribués aléatoirement dans l'isolant. Les points obtenus sur trois niveaux de tension sont reliés par des courbes de tendance polynomiales du 2^{ème} ordre.

Les essais de vieillissement réalisés montrent une forte dégradation des isolants, sous l'action des DP, qui sont accélérées par les forts dV/dt appliqués et la fréquence de découpage. Par exemple, le temps moyen τ jusqu'à claquage des isolants des éprouvettes de fil corona résistant (CR) sous les conditions : $V = 1.2\text{kV}$, $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 20\text{kHz}$, est de plus de 7 heures (n est pas affiché sur la figure 6). Dans ces mêmes conditions ($V = 1.2\text{kV}$, $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 20\text{kHz}$), pour le fil conventionnel 1 (NCR1), τ est inférieur à 6 min, et inférieur à 2 min pour le fil conventionnel 2 (NCR2). Pour le fil corona résistant, lorsque la fréquence est augmentée à 50kHz, τ diminue jusqu'à une durée moyenne de 6 min ($\tau < 2$ min pour NCR1).

Des claquages quasi instantanés sont observés lors de l'application de la tension 1.4kV avec une fréquence de 50kHz pour les fils conventionnels 1 et 2. Les images de dégradation des couches d'émail sont présentées sur la Fig.8.



Fig.10. Observation microscopique des éprouvettes après défaillance : $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 50\text{kHz}$, a – 1000V, b – 1200V, c – 1400V

Les essais sous la tension et la température maximale mettent en évidence la limite d'endurance du fil corona résistant puisqu'il perd ses performances exceptionnelles vis-à-vis des fils conventionnels. Le même effet est observé lorsque la fréquence de découpage est élevée. Ainsi, la durée de vie des isolants est fortement diminuée lorsque la température augmente, l'effet étant amplifié par le dV/dt et la fréquence de répétition des fronts de tension.

Dans l'intérêt d'évaluer l'échauffement des éprouvettes soumises à des impulsions de tension de fort dV/dt, plusieurs mesures de température ont été effectuées en utilisant la caméra infrarouge sous la température ambiante 20°C.

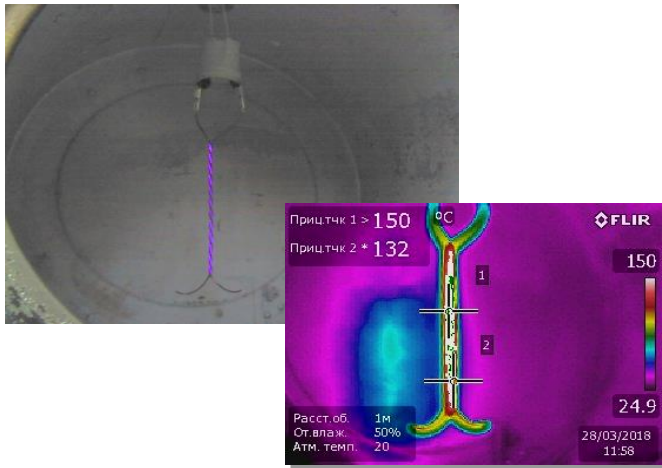


Fig. 11. Photo et image thermique de l'éprouvette sous la tension ; 1.4kV, 50kHz

La Fig. 12 présente l'évolution de la température des points chauds de l'éprouvette en fonction de l'amplitude et de la fréquence des impulsions.

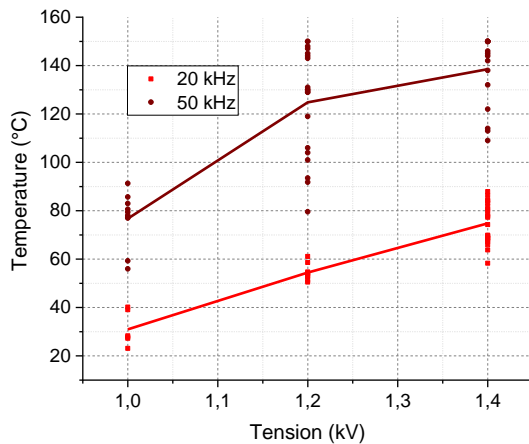


Fig. 12. Changement de température des points chauds de l'éprouvette.

Ces essais montrent que la montée en amplitude et surtout en fréquence a un effet notable sur l'échauffement de l'éprouvette qui conduit à une dégradation importante des isolants. L'augmentation de la température est liée à l'énergie des décharges partielles mais aussi à l'accroissement des courants de fuite et des pertes diélectriques. Les résultats obtenus montrent ainsi l'interaction des contraintes que l'isolation subit pendant les essais provoquant alors un vieillissement à la fois électrique et thermique.

Il est toutefois important de noter qu'à ce stade de l'étude, il est extrêmement difficile de décorrélérer l'effet de l'augmentation de la tension et de la fréquence (qui engendrent une augmentation de la température de l'émail sous l'apparition des décharges partielles) de l'effet de la température ambiante.

4. CONCLUSIONS

Les fortes contraintes en dV/dt imposées par les composants à semi-conducteur grand gap nécessitent une amélioration des

méthodes d'évaluation de la tenue des isolants électriques conformément à l'état actuel de la technologie.

À cet égard, il est indispensable de concevoir des équipements expérimentaux permettant de reproduire les contraintes sévères imposées par de forts dV/dt et des températures élevées afin d'évaluer la fiabilité des matériaux isolants.

Pour atteindre cet objectif, un dispositif expérimental permettant de générer des impulsions avec des fronts d'ondes très raides a été développé par le laboratoire SATIE. La possibilité de varier les conditions d'essai offre l'opportunité d'étudier leur influence sur la tenue de l'isolation du fil pour analyser l'apparition des décharges partielles et les mécanismes de dégradation des diélectriques.

Nous n'avons pas ici fait évoluer le dV/dt et analyser son influence sur la tenue des isolants. C'est une des perspectives de ces travaux. Toutefois, eu égard à de précédents travaux effectués sous des contraintes en dV/dt plus faible, et sur les mêmes isolants [11], il est indéniable que les dV/dt très élevés accélèrent considérablement le vieillissement des isolants émaillés. Les études expérimentales effectuées ici montrent également le très fort impact de la fréquence de découpage et de la tension sur le vieillissement des fils. Les études doivent toutefois être poursuivies afin de mieux discerner les effets respectifs de la tension, de la fréquence et de la température ambiante sur l'accélération du vieillissement.

5. REFERENCES

- [1] M. Fenger, S.R. Campbell, J. Pedersen, Motor winding problems caused by inverter drives. *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 9, no. 4, 2003, pp. 22–31.
- [2] Mihaila, Vasile. Nouvelle Conception des bobinages statoriques des machines à courant alternatif pour réduire les effets négatifs des dV/dt . Diss. Artois, 2011.
- [3] Vermaelen, Christophe. Contribution à la modélisation et à la réduction des perturbations conduites dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable. Diss. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2003.
- [4] P. Werynski, "Vieillessement des diélectriques et surveillance in situ des machines électriques", thèse, LSEE - Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement, Université d'Artois, Béthune, 2006.
- [5] Ray S, Dey D. "Characterization of stator turn to turn faults of induction motor using cross-correlation analysis based features." *Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI)*, International Conference on. IEEE, 2016.
- [6] Salameh, Farah, et al. "Parametric and non-parametric models for lifespan modeling of insulation systems in electrical machines." *IEEE Transactions on Industry Applications* (2017).
- [7] Barater, Davide, et al. "Multistress characterization of fault mechanisms in aerospace electric actuators." *IEEE Transactions on Industry Applications* 53.2 (2017): 1106-1115.
- [8] CEI 60034-18-42:2017. Machines électriques tournantes - Partie 18-42: Systèmes d'isolation électrique résistants aux décharges partielles (Type II) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par convertisseurs de tension - Essais de qualification.
- [9] CEI 60851-5:2008. Fils de bobinage – Méthodes d'essai – Partie 5: Propriétés électriques.
- [10] CEI 60085:2007. Isolation électrique – Evaluation et désignation thermiques.
- [11] Bolgova, Veronika, et al. "Development of testing methods for winding turn-to-turn insulation of low voltage motors fed by PWM converters." *Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, 2017 19th European Conference on. IEEE, 2017.