



HAL
open science

Conception d'un prototype de machine Ultra-Haute Température (500°C)

Vadim Iosif, Nouredine Takorabet, Daniel Roger, Stéphane Duchesne, Farid
Meibody-Tabar

► **To cite this version:**

Vadim Iosif, Nouredine Takorabet, Daniel Roger, Stéphane Duchesne, Farid Meibody-Tabar. Conception d'un prototype de machine Ultra-Haute Température (500°C). Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361648

HAL Id: hal-01361648

<https://hal.science/hal-01361648v1>

Submitted on 7 Sep 2016

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.

Conception d'un prototype de machine Ultra-Haute Température (500°C)

Vadim IOSIF^a, Noureddine TAKORABET^b, Daniel ROGER^a, Stéphane DUCHESNE^a, Farid MEIBODY-TABAR^b

^aUniv. Artois, LSEE, EA4025, Technoparc Futura, F62400 BETHUNE, France

^bUniv. Lorraine, GREEN, EA4366, ENSEM F54516 VANDOEUVRE LES NANCY, France

RESUMÉ—Le papier présente les problématiques et les solutions adoptées pour construire le premier prototype d'un moteur électrique très compact doté de bobinages inorganiques capables de travailler en permanence à une température interne de l'ordre de 500°C. L'analyse des verrous technologiques qui empêchent de faire des machines très compactes à fort gradient de température interne montre que le principal verrou technologique est lié à la nature organique du Système d'Isolation Electrique (SIE). Le prototype de machine synchrone est construit autour de bobines inorganiques rigides montées sur les dents du stator. Ces bobines, testées à 500°C sont capables de résister aux surtensions provoquées par les fronts raides des convertisseurs MLI actuels.

Mots-clés—Bobinages inorganiques, températures extrêmes, machine à bobinages concentrés, impulsions à fronts raides.

1. INTRODUCTION

Les machines capables de travailler à des températures élevées (300-400°C) pendant des temps relativement courts existent depuis longtemps, elles sont souvent utilisées pour entrainer les extracteurs de fumées qui assurent la sécurité des personnes au début des incendies [1]. Ces machines sont dotées d'un SIE organique amélioré pour résister le temps nécessaire aux températures élevées. Des progrès importants ont été apportés en utilisant le Polyimide (PI) chargé de microparticules ou de nanoparticules inorganiques [2,3]. Les technologies classiques basées sur des polymères atteignent cependant leurs limites et un fonctionnement permanent à une température de l'ordre de 400°C n'est pas envisageable à court et moyen termes. Des SIE capable de fonctionner en permanence aux environs de 400°C ont été mis au point pour des applications liées à des forages profonds (Enhanced Geothermal Systems-EGS) [4]. Ces SIE combinent des tissus de verre et des polymères qui facilitent leur mise en œuvre. Les épaisseurs relativement importantes des couches isolantes (100-200µm) limitent leur utilisation à machines puissantes construites avec des gros fils [5].

Seul les SIE totalement inorganiques permettent de fonctionner durablement à des températures internes de l'ordre de 500°C, la conception des machines doit donc prendre en compte des propriétés mécaniques et électriques moins bonnes de ces matériaux. De nombreuses applications, comme l'avion plus électrique, exigent des actionneurs compacts. Par conséquent, ces machines doivent être construites avec des fils de bobinage isolés par des couches inorganiques minces. Une solution Haute Température (HT°) basée sur un fil isolé par

une couche vitrocéramique de 10µm d'épaisseur est mise en œuvre pour réaliser les bobines inorganiques du moteur prototype. Ces bobines sont moulées dans un ciment HT° adapté, elles sont ensuite montées sur les dents du stator de la machine synchrone.

Après avoir analysé globalement les obstacles qui limitent la conception de machines à très forts gradients de température interne, l'accent est mis sur la conception des bobines inorganiques adaptées à des machines de petites tailles. L'article présente les propriétés électriques et mécaniques de l'isolation inter-spires et les solutions mises en œuvre pour mettre au point des bobines compatibles avec une alimentation MLI, sous des tensions comparables à celles imposées par le réseau 540Vdc de l'avion plus électrique.

2. VUE D'ENSEMBLE DES OBSTACLES TECHNOLOGIQUES QUI LIMITENT LES GRADIENTS DE TEMPERATURES INTERNES DES MACHINES A AIMANTS

Une machine électrique à aimants est composée de plusieurs parties qui sont conçues pour assurer trois fonctions principales:

- Le guidage mécanique du rotor,
- La concentration des lignes de champ vers l'entrefer,
- L'isolation électrique des enroulements qui doit supporter les pics de tension avec une marge de sécurité appropriée.

Ces fonctions doivent être assurées sur toute la plage de température de chaque composant, en respectant l'équilibre thermique général de la machine. La température la plus élevée est au cœur des bobines, la plus basse se situe au niveau de la carcasse et de l'arbre. Le circuit magnétique et les aimants sont à des températures intermédiaires.

2.1. Limites liées à la partie mécanique

Lorsque la vitesse reste dans une gamme raisonnable, la partie mécanique d'un moteur électrique est assez simple. Les roulements sont les parties les plus délicates. Des solutions HT° ont été développés par les ingénieurs mécaniciens il y a des années [6,7]. Cette technologie est désormais mûre jusqu'à une température de fonctionnement de l'ordre de 300°C. Cette limite peut être utilisée pour définir une valeur raisonnable température ambiante maximale pour le moteur ; elle sera de l'ordre de 250°C, compte tenu des pertes par friction dans les roulements et de la résistance thermique de son environnement.

Les autres pièces mécaniques assurent la fixation des éléments de la machine, elles doivent être conçues pour limiter les problèmes liés aux dilatations différentielles. Les tôles

magnétiques ont un coefficient de dilatation thermique d'environ $(10 \text{ à } 12) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ alors que celui de l'aluminium est de $25 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, cette différence importante élimine l'aluminium et la plupart de ses alliages. L'acier inoxydable a un coefficient de dilatation thermique plus proche de celui des tôles magnétiques ($16 \cdot 10^{-6} K^{-1}$), il ne s'oxyde pas et a les propriétés mécaniques et magnétiques requise pour fabriquer l'arbre. Ce matériau présente donc des caractéristiques intéressantes mais il est assez difficile à usiner.

2.2. Limites liées au noyau magnétique doux

Le comportement à haute température des matériaux magnétiques doux a été étudié dans l'Université d'Okayama (Japon) [8,9]. Les travaux cités portent sur la mesure des propriétés magnétiques intrinsèques des tôles classiques en fer-silicium de 0,35 mm d'épaisseur à des températures élevées. Pendant ces essais, l'isolation entre tôles était assurée par l'oxydation naturelle de leurs surfaces lors du processus de fabrication. Les figures 1 et 2 sont issues de ces travaux de recherche, ils montrent que les tôles magnétiques FeSi classiques, peuvent travailler jusqu'à 500°C lorsque le concepteur de la machine accepte une légère réduction de l'induction dans les dents. Aux températures élevées, les pertes sont plus faibles car la résistivité du matériau est plus élevée.

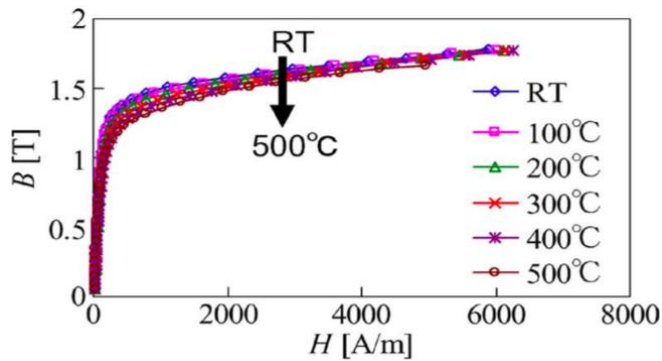


Fig.1. Courbes B(H) mesurées par Takahashi et al. [8].

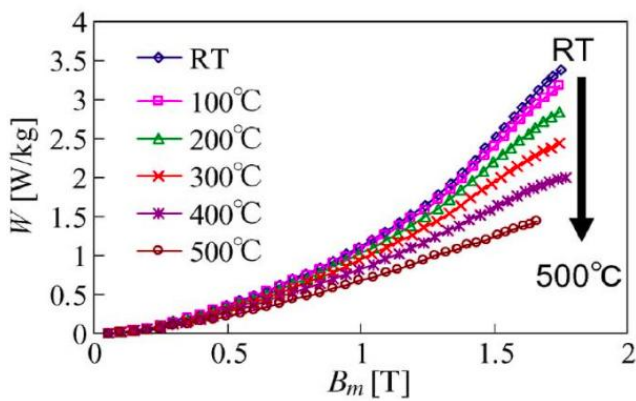


Fig.2. Pertes massiques mesurées par Takahashi et al. [8].

Les matériaux magnétiques doux plus sophistiqués acceptent eux aussi les températures élevées. La figure 3 présente l'évolution de la polarisation de saturation en fonction de la température pour plusieurs alliages de fer-cobalt. Cette figure est extraite d'une documentation commerciale, les matériaux sont repérés par leur désignation usuelle [10]. Cette documentation montre les produits existants peuvent être utilisés, avec des inductions élevées élevées, jusqu'à 450°C environ. Des résultats similaires sont obtenus avec des tôles FeSi à grains orientés. Avec de telles tôles, les empilements sont réalisés en décalant chaque tôle de 90° pour réaliser des

noyaux magnétiques adaptés au champs tournants ; cette structure permet de réduire les pertes dans le fer [11].

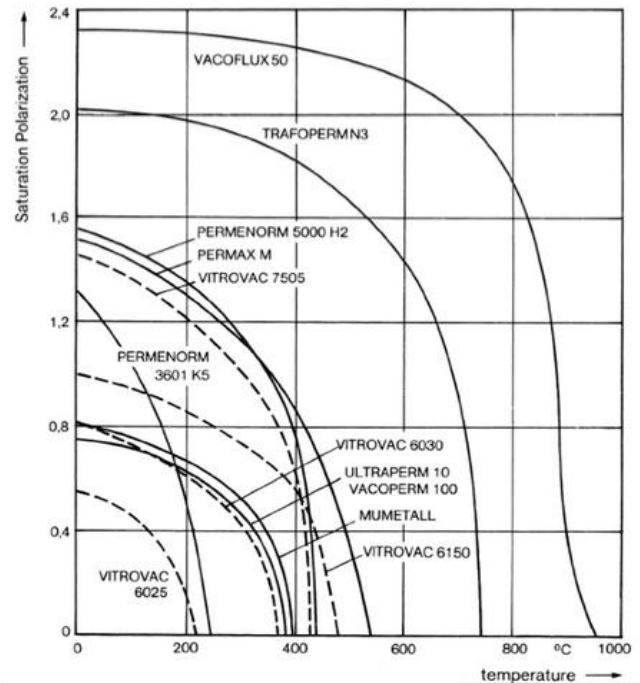


Fig.3. Polarisation à saturation en fonction de la température de plusieurs matériaux magnétiques doux disponibles [10].

Cette revue de la littérature montre que le noyau magnétique doux peut être utilisé à des températures élevées à condition d'utiliser l'oxydation naturelle pour isoler les tôles entre-elles, sans ajouter de couche organique.

2.3. Limites liées aux aimants

Les machines à aimants permanents sont les plus compactes, il est donc naturel de rechercher les limites en température des aimants existants. L'analyse des diverses fiches techniques publiées par les constructeurs met en évidence l'impossibilité d'utiliser les aimants les plus puissants constitués d'un alliage de néodyme, de fer et de bore (NdFeB) car ils ont une plage de température limitée. Il existe cependant des aimants samarium-cobalt qui gardent des caractéristiques intéressantes à des températures élevées. La figure 4, extraite d'une publication écrite par un fabricant [12], montre qu'il est possible d'atteindre des températures élevées, de l'ordre de 350°C, avec une nuance spécifique d'un alliage basé sur le samarium et le cobalt (SmCo). Ce matériau à toutefois une densité d'énergie plus faible que ceux habituellement utilisés aux basses températures.

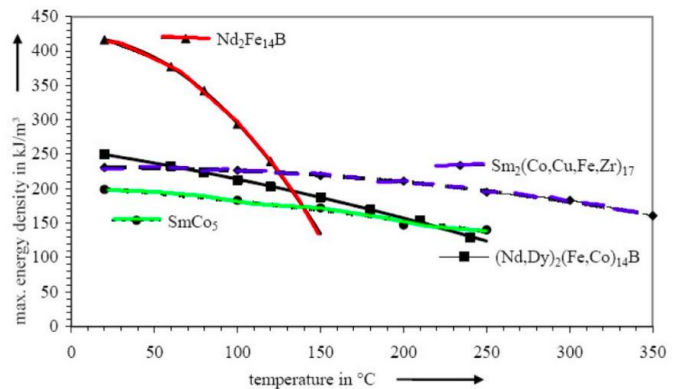


Fig.4. Densité volumique d'énergie maximale en fonction de la température pour divers matériaux magnétiques durs [12].

La figure 5 donne des courbes plus détaillées pour un produit commercial facilement disponible capable de monter en température.

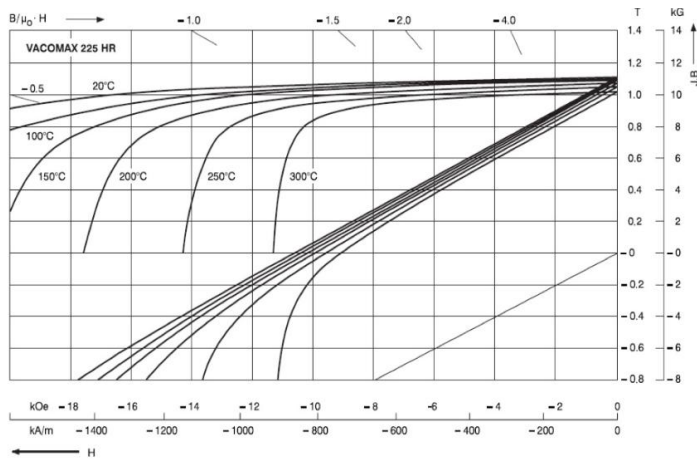


Fig.5. Caractéristiques d'un aimant SmCo capable de travailler à des températures élevées [10].

Pour construire le rotor, deux topologies peuvent être envisagées : le montage des aimants à la surface du rotor ou la structure à aimants intérieurs. La figure 6 illustre la structure où les aimants sont montés en surface. Cette topologie est plus facile à construire, le flux de fuites est faible. Mais les techniques habituelles de collage des aimants n'est pas utilisable car il n'existe aucune colle capable de résister au delà de 280°C. Les aimants doivent être maintenu fermement pour résister aux forces centrifuges, ce serrage est assuré par une frette en titane qui peut fonctionner à des températures très élevées. Le montage de la frette se fait à chaud, à une température supérieure à celle qui sera supportée par le rotor. La frette exerce donc une pression sur les aimants. On peut également envisager des frettes en fibre de carbone. La forme de l'arbre est adaptée à la géométrie du noyau magnétique doux il possède quatre surépaisseurs qui assurent le centrage précis de l'ensemble du rotor.

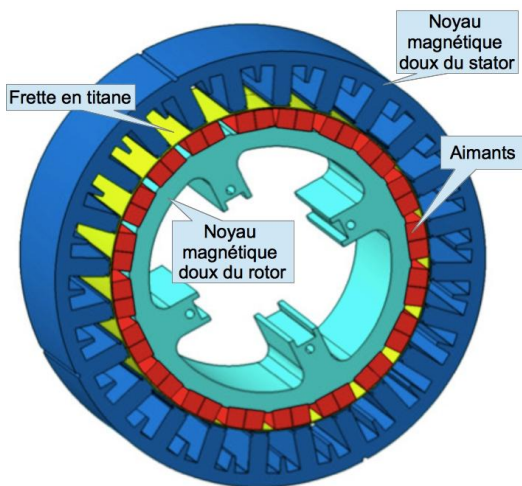


Fig.6. Structure de la machine à aimants montés en surface.

Le montage des aimants à l'intérieur du rotor permet de bénéficier d'un effet de concentration du flux et de travailler à une induction d'entrefer plus élevée que celle dans l'aimant. La figure 7 montre la géométrie prototype. Le noyau magnétique doux est composé de 20 pôles reliés entre eux par un isthme, situé coté entrefer, qui assure la tenue mécanique des pôles. Cet isthme doit être de faible section de façon à le saturer en permanence par le champ magnétique produit par l'aimant qui

est en dessous. L'arbre a une géométrie complexe qui comporte autant de surépaisseurs que de pôle. Cet arbre doit être en acier amagnétique pour ne pas court-circuiter les aimants par l'intérieur et de contraindre les lignes de champ à se refermer au travers de l'entrefer.

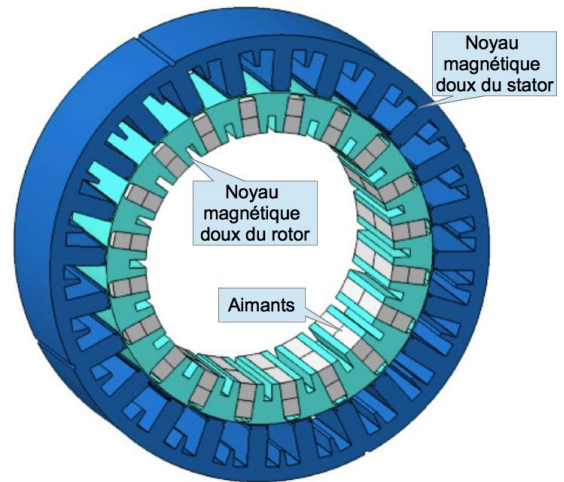


Fig.7. Structure de la machine à aimants intérieurs.

Comme dans toutes les machines, les points les plus chauds sont situés à l'intérieur des bobines montées sur les dents du stator. La comparaison des 2 topologies montre que les aimants montés en surface sont plus près des bobines ils seront vraisemblablement soumis à une température plus élevée que ceux du rotor à aimants intérieurs. Une étude thermique détaillée est en cours pour évaluer la température des aimants dans chaque structure. D'un autre côté, la topologie à concentration de flux avec des aimants insérés, permet d'avoir un flux important si les barrières de flux sont bien dimensionnées. Cette topologie nécessite moins de courant pour une même puissance. L'échauffement sera plus faible. Elle sera certainement plus intéressante.

2.4. Limites liées au bobinage organique classique

La principale limite thermique est liée au système d'isolation électrique (SIE) des bobinages. Pour les SIE classiques construits avec du fil émaillé et du vernis d'imprégnation, la limite de température est due au fait que les isolants sont des polymères issus de la chimie organique. Ces matériaux permettent de construire des bobines qui tiennent des tensions inter-spires de l'ordre de 1kV crête avec des épaisseurs d'isolation de l'ordre de 30µm sur chaque fil [13]. Ces polymères peuvent passer sans dommage dans les machines automatiques de bobinage qui imposent des contraintes mécaniques de torsion et d'extension très grandes au fil de bobinage. Malheureusement la température maximale d'utilisation permanente des fils de bobinage classique est limitée par sa classe thermique. La classe thermique d'un fil émaillé est définie par les normes, pour un temps fonctionnement standardisé fixé à 20000 heures [14]. Les fils émaillés classiques ont une classe thermique de 200°C. Il existe des fils de bobinage isolés avec du Polyimide (PI) de classe 240°C et des produits plus sophistiqués qui utilisent du PI chargé de nanoparticules inorganiques qui ont une classe de 280°C [2]. La couche organique utilisée pour isoler les fils émaillés classiques est étanche, elle empêche le contact entre le cuivre et l'oxygène de l'air ambiant ce qui protège le fil contre l'oxydation.

Les chimistes spécialisés dans les polymères travaillent sur des produits ayant des classes thermiques de plus en plus élevées depuis des années, des progrès sont enregistrés mais il

est difficile d'envisager, à moyen terme, une percée significative dans ce domaine.

Pour travailler durablement à des températures franchement supérieures à 350°C au cœur des bobines, il faut changer la nature chimique des isolants et passer à des isolations inorganiques exemptes de polymères.

3. SIE INORGANIQUE ADAPTE AUX ACTIONNEURS COMPACTS

3.1. Observation d'un fil de bobinage à isolation inorganique fine

Des fils à isolation céramique fine ont été développés pour des applications spécifiques qui ne nécessitent pas de tenue en tension. La couche isolante d'un tel fil est assez irrégulière et très fragile. La figure 8 permet de comparer l'aspect extérieur d'un émaillé classique (à gauche) et d'un fil HT° à isolation vitrocéramique (à droite). La couche isolante est composée de plusieurs matériaux inorganiques MgO, SiO₂ et des additifs qui aident la mise en œuvre. Les compositions chimiques des additifs ne sont pas précisées par le constructeur. Ces oxydes métalliques sont susceptibles de réagir avec le cuivre aux températures élevées. Pour empêcher ces réactions chimiques, une couche de nickel qui sert de barrière de diffusion est placée entre le cuivre et les oxydes métalliques qui constituent le revêtement isolant.

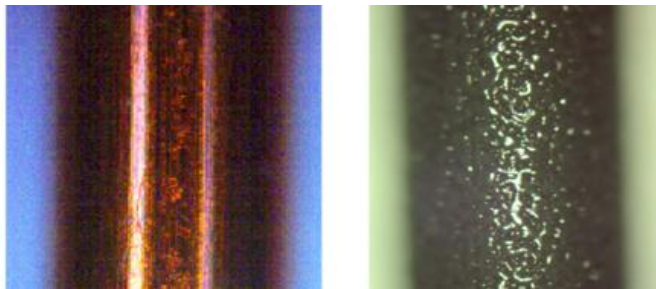


Fig.8. surface extérieure d'un fil émaillé standard (à gauche) et d'un fil à isolation céramique de même diamètre (à droite).

La figure 9 est une microscopie optique de la coupe transversale d'un fil à isolation céramique. Cette microscopie est faite avec un échantillon de fil placé dans une résine époxy qui permet la manipulation et le polissage de l'échantillon. La partie droite de la figure 9 montre clairement l'épaisseur de nickel mais frontière entre la surface extérieure de la couche isolante et la résine est peu contrastée, une ligne pointillée a été ajoutée pour améliorer la lisibilité de la microscopie. L'épaisseur de la couche isolante est très irrégulière avec des creux où elle ne fait que 2 à 3 μm et des bosses, le tout pour une épaisseur moyenne voisine de 10 μm.

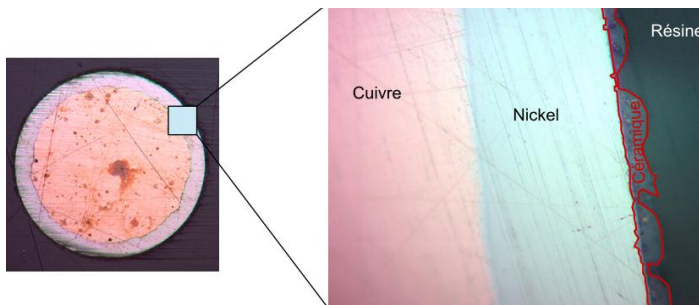


Fig.9. Coupe transversale d'un fil isolé par une couche de inorganique mince.

Le fil HT° est livré sur une bobine de grand diamètre bien emballée. Les échantillons, prélevés sur une bobine neuve, sont manipulés avec précaution. Ils ont été observés au microscope électronique à balayage. La figure 10 montre des microscopies des zones les plus fines, au fond des creux de la surface

extérieure. Des craquelures d'une largeur inférieure à 1 μm et d'une longueur de plusieurs microns apparaissent nettement. Cette observation montre que la couche isolante inorganique n'assure pas une barrière étanche entre l'air ambiant et le métal conducteur, contrairement aux fils émaillés organiques.

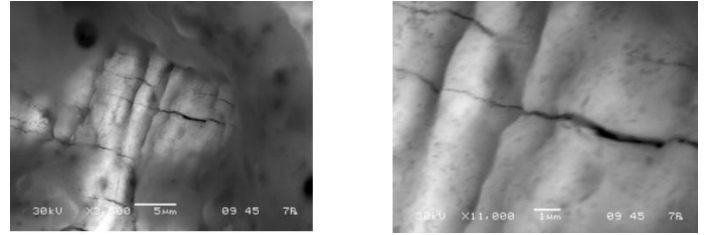


Fig.10. Microscopie MEB du fond d'un creux de la surface extérieure d'un fil à isolation céramique avec deux grossissements différents.

Les craquelures microscopiques observées laissent à penser que le fil HT° à isolation céramique aura des propriétés électriques très inférieures à celles des fils émaillés organiques classiques à cause des microscopiques colonnes d'air en contact avec le métal.

3.2. Mesures des caractéristiques électriques des fils HT°

La fragilité du revêtement céramique mince interdit d'utiliser des paires torsadées normalisées pour effectuer les essais de tenue en tension car les contraintes mécaniques imposées lors de la fabrication des éprouvettes détruit la couche isolante et met les deux fils en contacts électrique direct. Une méthode spécifique doit être utilisée : les essais sont effectués sur des échantillons constitués d'un seul point de contact entre deux fils posés l'un sur l'autre pour former une croix à 90°. La mesure est effectuée en sinusoïdal à 10kHz avec le dispositif schématisé à la figure 11. Le filtre réduit le bruit provenant de l'alimentation et sa résistance limite le courant lorsque l'éprouvette est en court-circuit. Une voie de l'oscilloscope rapide mesure la tension appliquée à l'éprouvette avec une sonde HT. Le shunt permet de mesurer des courants de faibles amplitudes avec l'autre voie de oscilloscope rapide. Cette voie est reliée au shunt par un filtre passe-haut et un système de protection qui écrête la tension d'entrée à environ 5V.

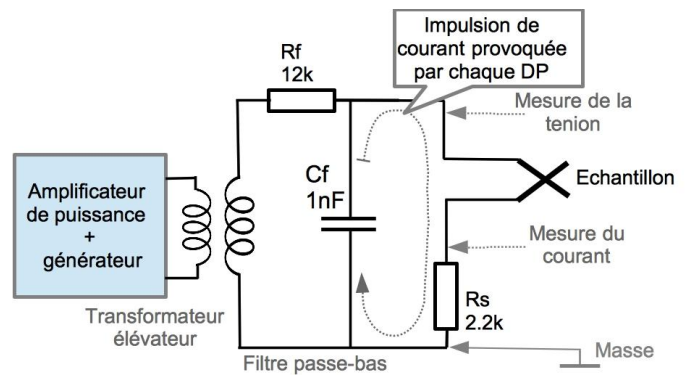


Fig.11. Représentatif schématique du système de mesure des DP.

L'amplitude de la tension sinusoïdale appliquée à l'échantillon est augmentée lentement tandis que l'oscilloscope est synchronisé sur la voie qui mesure le courant. Il est réglé en mode « single sweep » avec un seuil de déclenchement réglé à un niveau légèrement au dessus du niveau de bruit. Aux basses tensions, le courant reste égal à zéro (sous le niveau de bruit) jusqu'à un seuil de tension appelé «Seuil d'Apparition des Décharges Partielles » (SADP). Un peu au dessus du SADP, des pointes de courant rapides créées par les Décharges Partielles (DP) apparaissent de façon aléatoire ; plusieurs

enregistrements sont faits en réarmant la base de temps de l'oscilloscope. Les impulsions de courant sont différentes les unes des autres car les phénomènes physiques responsables des DP sont complexes et l'amorçage du plasma présente un caractère aléatoire.

La figure 12 est un exemple représentatif de ces impulsions. Cette figure montre que les DP sont des phénomènes brefs, l'impulsion donnée en exemple ne dure que un peu plus de 10ns et la pointe de courant correspondant est voisine de 30µA. La charge électrique correspondante peut être estimée en calculant la surface sous la courbe elle est voisine de 0,3pC.

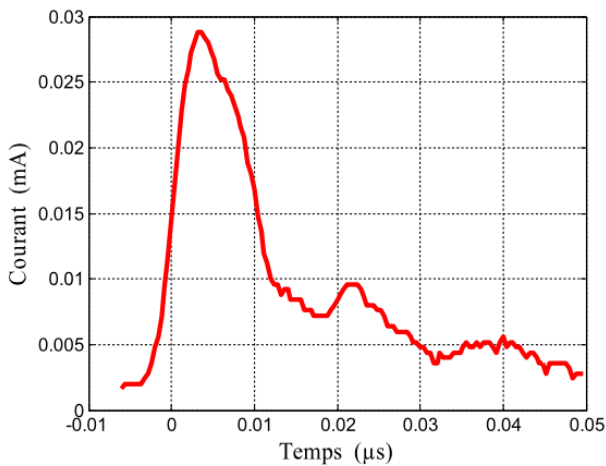


Fig.12. Exemple d'une impulsion de courant causée par une DP.

Lorsque l'opérateur continue à augmenter la tension appliquée à l'éprouvette, les impulsions de courant sont plus intenses, plus larges et plus nombreuses. A un certain niveau de tension, il y a claquage de l'éprouvette qui se met en court-circuit. La figure 13 donne la valeur moyenne du SADP et de la tension de claquage mesurées sur 10 échantillons de fil à isolation céramique de 0,5 mm de diamètre. Les échantillons sont placés dans un four adjacent à l'armoire qui contient le système de mesure. Les connexions sont faites avec un câble HT° à isolation épaisse exempt de DP. Cet ensemble permet d'embarquer 10 échantillons.

Les valeurs mesurées sont analogues pour du fil de 0,8mm.

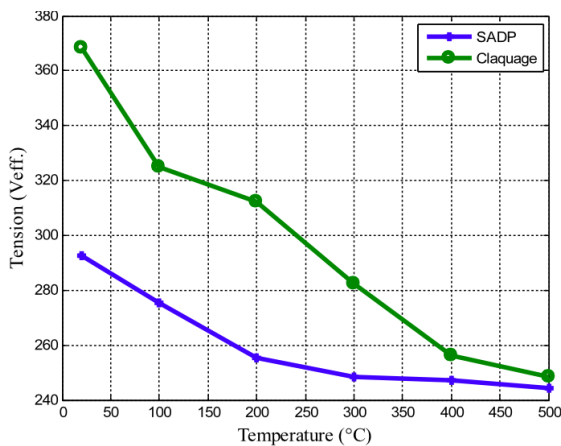


Fig.13. Évolution du SADP et de la tension de claquage en fonction de la température pour du fil à isolation céramique de diamètre 0,5mm.

Ces mesures montrent que la tension inter-spices est très faible par rapport aux valeurs typiques mesurées avec de l'isolation organique classique qui est de l'ordre de 700Veff. Ces courbes montrent que la tension de claquage est à peine

supérieure au SADP alors que cette différence est très importante pour les fils émaillés classiques. Ces deux différences fondamentales s'expliquent par la présence de fissures observées sur les microscopies. Ces fissures créent ces chemins microscopiques d'air ionisé entre les surfaces métalliques des conducteurs au voisinage du point de contact car l'étanchéité n'est pas assurée. La décharge devient totale et tend vers un arc si la puissance de la source le permet.

La diminution du SADP et de la tension de claquage lorsque la température augmente s'explique par l'agitation thermique croissante des atomes des matériaux solides et des molécules d'air. Cette agitation fournit plus d'électrons libres dans la zone microscopique qui est susceptible de s'ioniser sous l'effet du champ électrique.

Les résultats expérimentaux montrent qu'il est possible d'utiliser le fil testé jusque 500°C à condition de concevoir des bobines ordonnées qui limitent la tension inter-spices maximale à environ 340V ($\approx 250\sqrt{2}$).

3.3. Enrobage inorganique HT° de protection des bobines

Les bobines sont enrobées dans un ciment capable de monter en température. Plusieurs ciments ont été testés du point de vue électrique en plaçant le point de contact entre les fils en croix dans le ciment testé et en faisant le traitement thermique prévu par le constructeur. La figure 14 montre un tel échantillon. Lors de la réalisation de l'échantillon, une pression est exercée sur le fil supérieur, de chaque côté du point de contact avant de faire couler le ciment sur le point de contact. Cette pression permet d'avoir la certitude de l'existence d'un contact effectif entre les surfaces des deux fils.



Fig.14. Echantillon permettant de tester l'influence du ciment d'enrobage que les propriétés de l'isolation inter-spices.

Les ciments testés tiennent tous des températures nettement supérieures à 500°C, leurs propriétés mécaniques sont assez différentes les unes des autres. Les données principales sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des ciments testés

Ref. Ciment	Taille des grains (µm)	Nature du composant principal	Durcissement
903HP	1 - 44	Al2O3	12h à temp. ambiante 2h à 120°C + 4h à 370°C
905	74 - 150	SiO2	12h à temp. ambiante + 2h à 120°C
C13	< 50	Non communiqué par le constructeur	12h à temp. ambiante + 2h à 120°C
R780	50 - 200	Al2O3	24h à temp. ambiante + 2h à 120°C

Pour construire la machine prototype, le ciment 903HP a été choisi car le recuit secondaire à 370°C lui donne des propriétés mécaniques supérieures à celles des autres produits. La taille réduite des grains est également un facteur positif.

Le même dispositif expérimental (figure 11) a été utilisé pour tester les nouveaux échantillons. Pour un certain nombre d'entre eux, le SADP n'est pas mesurable car le claquage intervient directement. Les essais ont été faits pour les 4

ciments HT° sur 7 échantillons par ciment. Les résultats sont présentés dans le tableau 2 qui donne la valeur moyenne des mesures et l'intervalle de confiance défini pour la loi normale à 95% (95% des mesures sont dans l'intervalle de confiance).

Tableau 2. Essais électriques de 4 ciments HT°.

Ciment	19°C		500°C	
	BV moy. (V)	Int. Conf. (V)	BV moy. (V)	Int. Conf. (V)
903HP	586	58	536	62
905	657	172	461	240
C13	741	233	509	94
R780	565	91	472	85

Ces résultats montrent que l'enrobage du point de contact par un ciment HT° améliore la valeur moyenne de la tenue en tension à 500°C pour tous les ciments testés. Ces résultats doivent être relativisés par la dispersion très importantes des mesures qui est probablement due à la taille des grains du ciment. Au niveau microscopique, la largeur des fissures de la surface extérieure de la couche isolante du fil et les grains du ciment HT° forment un ensemble complexe fortement aléatoire.

3.4. Bobinage HT° d'une machine synchrone.

La machine prototype possède 24 bobines au stator, une par dent, et 20 pôles. Son principe de fonctionnement est celui des machines synchrones classiques à pas fractionnaires [15]. Contrairement aux machines classiques, l'isolation du fil HT° est trop fragile pour utiliser les méthodes de bobinage dans les encoches, il est donc nécessaire de fabriquer des dents de forme parallélépipédiques capables de recevoir des bobines HT° préfabriquées. Le plan de détail d'une dent et de sa bobine est donné à la figure 15.

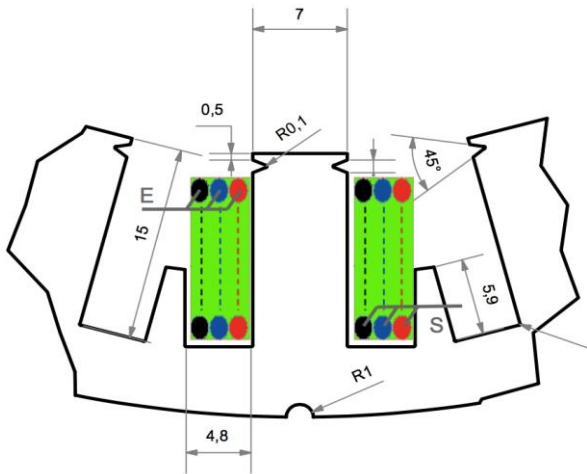


Fig.15. Schéma de la bobine inorganique montée sur une dent.

La machine est alimentée par un onduleur MLI elle reçoit donc des impulsions à fronts raides qui provoquent des surtensions importantes qui doivent être réparties dans l'ensemble du bobinage. Chaque phase est constituée de 8 bobines connectées en série. Les trois phases sont couplées en étoile. À l'intérieur de chaque bobine, les spires sont ordonnées : la bobine est faite de 3 couches de 16 spires de fil de diamètre 0,5mm. Les couches sont connectées en parallèle. L'ensemble est enrobé dans le ciment HT° qui maintient la position des spires et qui définit les cotes de la bobine.

La bobine HT° est donc ordonnée, son entrée est éloignée de sa sortie, la tension inter-spires est minimale car la contrainte en tension est distribuée entre les spires. Cette contrainte est cependant difficile à estimer car elle dépend de la réponse transitoire de l'ensemble du bobinage d'une phase. Les méthodes développées pour les machines à isolation organique

peuvent être appliquées à la machine HT° [16]. Cette analyse doit être faite à deux niveaux : l'estimation de la répartition des tensions entre les 8 bobines de chaque phase, puis l'estimation des contraintes entre les premières spires de la première bobine de chaque phase. Les simulations nécessaires mettent en œuvre des schémas équivalents HF complexes basés sur les inductances propres et mutuelles des spires, les capacités interspires et les capacités de mode commun entre les spires et la masse. Le câble de liaison entre l'onduleur et la machine a également une importance déterminante [16]. La couche de nickel déposée sur le cuivre pour éviter son oxydation a également une influence importante sur inductance car le nickel a des propriétés magnétiques. Les régimes transitoires des bobines HT° sont donc plus complexes que ceux des bobines organiques classiques.

Compte-tenu des choix de bobinage ordonné qui vont tous vers une répartition des contraintes, la pointe de tension reçue par l'isolation entre la première spire et la seconde sera inférieure à la limite mesurée sur les échantillons en croix. Des études sont en cours pour estimer plus précisément la marge de sécurité réelle mais des essais en régime impulsif montrent que cet objectif sera atteint.

3.5. Essais mécaniques de la bobine HT°

La photographie de la figure 16 montre une bobine qui a subi des essais à 500°C. Une protection extérieure en fibre de verre a été ajoutée pour améliorer les caractéristiques mécaniques de la bobine.



Fig.16. Photographie d'une bobine inorganique qui a subi des tests à 500°C.

La figure 17 précise les conditions de l'essai mécanique qui a été réalisé : la bobine est placée dans une presse hydraulique entre le plan de référence de la presse et un cylindre d'acier qui répartit la force appliquée sur une ligne transversale située au milieu de la bobine. Les résultats sont donnés à la figure 18. Des essais destructifs faits sur deux autres bobines donnent des résultats très similaires.

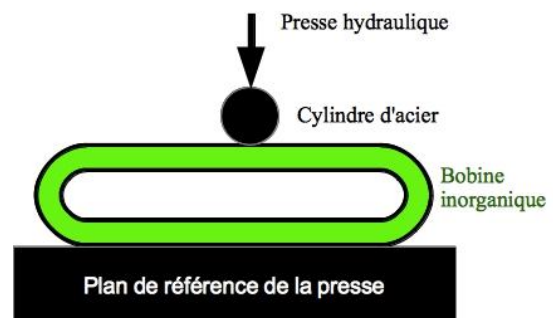


Fig.15. Schéma de l'essai mécanique.

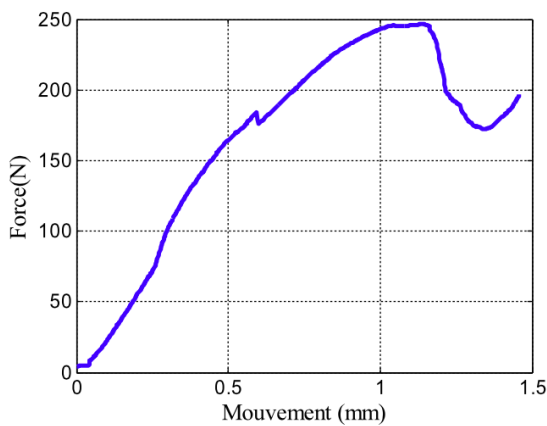


Fig.15. Résultat des essais mécanique.

Cette courbe montre que la bobine inorganique a une certaine élasticité lorsque la force est inférieure à 150N (15kg), avec un déplacement de l'ordre de 0,5mm. Au delà de 170N des fissures apparaissent aux extrémités de la bobine et le processus de destruction commence.

4. CONCLUSION

L'article présente les premières études de dimensionnement d'un prototype de machine synchrone à aimants capable de travailler avec des gradients de température interne très grands et donc des points chauds à des températures de l'ordre de 500°C. L'analyse des obstacles technologiques montre que le verrou critique est la nature organique de l'isolation des bobinages des machines classiques. Ce verrou peut être dépassé franchement en passant à des SIE inorganiques exempts de tout polymère.

Des bobines prototypes ont été réalisées et testées en utilisant un fil HT° recouvert d'une couche vitrocéramique fine et en le combinant avec un ciment HT° approprié qui permet de protéger le fil à isolation vitrocéramique qui est très fragile. Les bobines réalisées ont été testées à 500°C, leurs caractéristiques électriques sont suffisantes pour réaliser un prototype de machine HT° alimenté par un onduleur MLI connecté à un bus HVDC 540V. Il faut cependant réaliser un bobinage ordonné qui répartit le mieux possible les contraintes entre les spires pendant les transitoires brefs qui suivent les fronts raides de tension.

Le prototype est en cours de réalisation mais doré et déjà, la tenue en tension à 500°C des bobines inorganiques est démontrée expérimentalement et les premiers essais mécaniques sont prometteurs. Ce premier prototype de machine capable de travailler à des températures internes extrêmes ouvre une voie nouvelle de recherche vers les

machines à gradient de température interne très élevé et des puissances massives très supérieures à celles qui sont possibles avec des SIE organiques.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace (FRAE) qui a financé ces travaux dans le cadre du projet ACCITE.

6. REFERENCES

- [1] F. Aymonino, T. Lebey, D. Malec, C. Petit, J. Saint Michel and A. Anton, "Dielectrics measurements of rotating machines insulation at high temperature (200-400°C)," IEEE Int. Conf. on Electr. Insul. and Dielectr. Phenomena (ICSD), Winchester, pp. 130-133, July 2007.
- [2] Hitachi cable "high heat-resistance enameled wires," Selection and Use Directions of Magnet Wires, <http://www.hitachi-cable.co.jp/en>.
- [3] L. S. Schadler, J. K. Nelson, C. Calebrese, A. Travelpiece and D. L. Schweickart, "High temperature breakdown strength and voltage endurance characterization of nanofilled polyamideimide," IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul., vol. 19, no 6, pp. 2090-2101, 2012.
- [4] M. Hooker, K. Hazelton, C. S. Kano, M. L. Tupper and S. Breit, "High-temperature electrical insulation for enhanced geothermal system (EGS) dowhole equipment," in thirty-fifth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, fev. 2010.
- [5] Vonroll, "Mica taped wire," Samica Firewall data sheet, www.vonroll.com.
- [6] L. B. Dalzell and J. W. Jan W. Van Wyk, US Patent 3,206,264, 1960.
- [7] H. Sliney, "Solid lubricant materials for high temperatures a review," Tribology International, vol. 15, no. 5, pp. 303-315, Oct. 1982.
- [8] N. Takahashi, M. Morishita, D. Miyagi, and M. Nakano, "Examination of magnetic properties of magnetic materials at high temperature using a ring specimen," Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 46, no. 2, pp. 548-551, Feb 2010.
- [9] —, "Comparison of magnetic properties of magnetic materials at high temperature," Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 10, pp. 4352-4355, Oct 2011.
- [10] "Soft magnetic materials and semi-finished products," in Vacuum-Schmeze GmbH data sheet, 2002.
- [11] D. Cozonac, J.-P. Lecoq, S. Duchesne and G. Velu, "Materials characterization and geometry of a high temperature induction machine," in Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on, Sept 2014, pp. 2499-2505.
- [12] W. Rodewald and O. Katter, "Properties and applications of high performances magnets," in Vacuum-Schmeze GmbH, 2004.
- [13] CEI 60505 - Evaluation and qualification of electrical insulation systems", 2011.
- [14] CEI 60172 - Méthode d'essai pour la détermination de l'indice de température des fils de bobinage émaillés, 1995.
- [15] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, "Design of rotating electrical machines," John Wiley & Son, ltd, 2008.
- [16] V. Mihaila, S. Duchesne and D. Roger, "A simulation method to predict the turn-to-turn voltage spikes in a PWM fed motor winding," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, No. 5, pp. 1609-1615, 2011.