Projets et développements en cryoélectrotechnique

Pascal Tixador, Y. Laumond

► To cite this version:

Pascal Tixador, Y. Laumond. Projets et développements en cryoélectrotechnique. Journal de Physique III, 1991, 1 (2), pp.225-240. 10.1051/jp3:1991118 . jpa-00248575

HAL Id: jpa-00248575

<https://hal.science/jpa-00248575>

Submitted on 1 Jan 1991

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.

Classification
Physics Abstracts
85.25j

Projets et développements en cryoélectrotechnique

P. Tixador ⁽¹⁾ et Y. Laumond ⁽²⁾

⁽¹⁾ CNRS/CRTBT-LEG, B.P.166 X, 38042 Grenoble Cedex, France

⁽²⁾ GEC ALSTHOM DEA, 3, av. des Trois Chênes, 90018 Belfort Cedex, France

(Reçu le 8 mars 1990, accepté le 28 juin 1990)

Résumé. — Les diverses applications de la supraconductivité en électrotechnique ou courants forts sont passées en revue. Comme il s'agit de développements en cours, seule la supraconductivité à basse température est considérée. Les applications « classiques » des supraconducteurs sont abordées en premier. Ce sont les bobines de stockage (S.M.E.S.), qui peuvent fonctionner également en régulateur, les alternateurs à inducteur supraconducteur (SC) avec les programmes japonais (super GM), allemand (KWU Siemens) et soviétique, sans oublier la lévitation magnétique... Ensuite, après un bref rappel sur les multifilamentaires ultrafins utilisables aux fréquences industrielles apparus en 1983, l'article considère les applications de ces nouveaux conducteurs SC : machines électriques avec les alternateurs entièrement supraconducteurs surtout, transformateurs et enfin limiteurs qui utilisent le phénomène original de la transition supra/normal pour limiter les surintensités.

Abstract. — The use of superconductivity in electrical engineering is reviewed. It deals with low T_c superconductors as only applications under development are considered. The article describes first the « classical » uses under constant or slow varying magnetic field : coils for Superconducting Magnetic Energy Storage, they are expected as a power system stabilizer and not only as a energy storage system. The present status of superconducting field a.c. generators is reviewed and the different programs over the world are described : in Germany (KWU/Siemens), in UdSSR, and in Japan where the program Super GM is led by the Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and Materials. After a description of ultra-fine multifilamentary wires for 50-60 Hz use their applications are reviewed : electrical machines, above all fully superconducting a.c. generators, transformers and limiters based on the superconducting-normal transition above the critical current.

1. Introduction.

Deux grandeurs sont à la base de l'électrotechnique : ce sont l'induction magnétique et le courant ou la densité de courant. Les matériels électriques sont d'autant plus performants que ces grandeurs sont élevées. Ainsi, les électrotechniciens purent utiliser la supraconductivité découverte en 1911 par K. Onnes seulement après 1960, date d'apparition des matériaux supraconducteurs (SC) de type II, qui permettent des courants et des champs importants. Les applications sont alors rapidement apparues : chambre à bulle d'Argonne (1964 [1]), machine synchrone à inducteur SC (1965, [2]). La supraconductivité s'est imposée dans le domaine de

la physique des hautes énergies [3, 4], des tokamaks pour la fusion thermonucléaire [5] et dans celui plus industriel de l'imagerie médicale [6].

Jusqu'à une époque récente (1983), l'utilisation des SC était limitée aux courants et aux inductions continus ou très lentement variables, limitation non intrinsèque mais économique à cause des pertes en régime variable. La mise au point des premiers multifilamentaires ultrafins [7] à faibles pertes sous induction variable permet de substituer aux matériaux conducteurs classiques des supraconducteurs dans les très nombreuses applications à fréquences industrielles 50/60 Hz et de proposer également des matériels originaux basés sur la transition supra/normal [8]. L'équipement électrique doit être repensé à partir de ces nouvelles données excluant généralement les cryocopies.

Les années 80 ont vu une autre révolution pour la supraconductivité : l'envolée des températures critiques autorisant l'emploi des supraconducteurs à l'azote liquide et non plus à l'hélium liquide [9]. Malheureusement, la densité de courant critique est encore trop faible pour son utilisation en courant fort sous champ même si des résultats de laboratoire [10] permettent d'être très confiants dans l'avenir. Outre ces propriétés intrinsèques encore insuffisantes, leur mise en forme, leur stabilité physique et chimique font que leur utilisation en électrotechnique ne se situe pas dans le court terme, sauf cas très particulier. Par conséquent, seules les applications des « bas T_c » seront concernées dans cet article.

L'effet médiatique des hauts T_c ne doit cependant pas dissimuler les améliorations des performances (densité de courants critiques) des supraconducteurs classiques [11] grâce à une maîtrise de la fabrication de ces matériaux (extrusion, étirage à froid, traitements thermiques). Les brins industriels contenant un million de filaments de 0,15 μm de diamètre illustrent le degré de maîtrise technologique atteint avec les supraconducteurs classiques.

2. Applications des supraconducteurs en régime continu ou lentement variable.

2.1 S.M.E.S. (SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE).

2.1.1. *Stockage d'énergie.* — Une bobine supraconductrice représente une réserve d'énergie sous forme électromagnétique pour fournir la puissance de pointe et réduire les capacités de production dans les grands réseaux ou pour constituer des sources impulsionsnelles d'énergie à usages spécifiques (champs pulsés) souvent militaires (arme à énergie dirigée, lanceur d'engins). Malgré un rendement élevé, une densité d'énergie importante et un temps de réponse extrêmement rapide comparé aux autres systèmes de stockage (Tab. I), une expérimentation à échelle significative (10 GWh) se heurte au gigantisme des bobines

Tableau I. — *Performances de plusieurs techniques de stockage d'énergie.*

[Various energy storage systems, performances.]

Système de stockage	Rendement (%)	Densité de puissance kW/m ³
Barrage pompe	65-70	0,6 (h = 200 m)
Batteries	75-80	30
Hydrogène	20	2 300
S.M.E.S.	93-97	2

(diamètre 2 km) dont seules les parois rocheuses en sous-sol peuvent supporter les contraintes mécaniques.

Le projet actuel le plus important est américain [12, 13]. Commandé en 1987 par la Défense Nuclear Agency agissant pour le Strategic Defense Initiative, ce programme est composé de deux étapes. La première étape comporte le développement de composants et un dimensionnement pour un modèle test appelé ETM (Engineering Test Model) par deux équipes (Bechtel et Ebasco). Elle devait se terminer en 1989 mais il y aurait des prolongations. Les puissances de l'ETM doivent être : 400 à 1 000 MW pendant 100 s, 10 à 20 MW pendant 2 à 3 h. La réalisation du projet de l'une des équipes retenues constitue la deuxième étape et la mise en fonctionnement devrait intervenir en 1993.

2.1.2 Régulation. — Un réseau, une machine peuvent être stabilisés par transfert contrôlé d'énergie entre une bobine et le système à réguler. L'énergie maximale de la bobine est plus raisonnable que pour une utilisation en stockage. Un équipement complet [14] comprenant une bobine de 30 MJ et son convertisseur de 10 MVA commandé en fonction des puissances active et réactive du réseau de la BPA (Bonneville Power Administration) aux Etats-Unis devait permettre d'éviter les oscillations de puissance active et augmenter les capacités de transmission du réseau. Malheureusement, dus à la seule baisse de la consommation électrique en 1984, les tests complets ne furent pas effectués et cette expérience fut abandonnée sans aucune raison technique. Elle aurait constitué la première application de la supraconductivité aux réseaux électriques.

Une application intéressante des bobines de régulation est leur association aux machines synchrones entièrement supraconductrices [15] dont les oscillations s'amortissent très lentement puisque les pertes sont très faibles. Le régulateur supraconducteur peut aller au-delà de la régulation classique : en cas de défaut par exemple, la bobine pourrait absorber la puissance de la turbine et maintenir la vitesse du groupe constante pour faciliter la resynchronisation après disparition du défaut.

2.2 ALTERNATEUR À INDUCTEUR SUPRACONDUCTEUR [16]. — Ces cryoalternateurs « classiques » (Fig. 1) sont constitués par :

- un bobinage supraconducteur tournant protégé des variations d'induction (régimes déséquilibrés ou transitoires) par un écran électromagnétique formé d'un ou plusieurs cylindres conducteurs à l'extérieur du bobinage,

- des enroulements statiques plus classiques fonctionnant à température ambiante, bobinés à l'intérieur d'une couronne magnétique de refermeture du flux.

Par rapport aux alternateurs classiques, les avantages sont les suivants :

- accroissement de la densité volumique de puissance (30 %-40 %) par l'augmentation du volume actif d'enroulement au stator (disparition des dents magnétiques),

- gain en poids (40 %-50 %) et en rendement (0,5-1 %),

- meilleure stabilité et comportement dynamique par diminution des réactances de la machine (structure « air » essentiellement).

Dû à l'attrait de ces machines, de nombreuses réalisations ont été entreprises à travers le monde (Tab. II).

Après une période d'expérimentation de laboratoire, les années 70 ont vu des projets importants. Les cryoalternateurs représentaient la seule possibilité pour augmenter la puissance unitaire des groupes, rendue nécessaire par la demande alors exponentielle en énergie électrique. En France, le programme ALSTHOM-EDF a permis les tests d'un rotor supraconducteur type 350 MW en 1981-1982 [17]. La crise de l'énergie en 1982 et 1983 a été

Fig. 1. — Coupe schématique d'un cryoalternateur « classique ».

[Schematic axial view of an a.c. generator with a superconducting field coil.]

fatale pour plusieurs projets (France, USA : programme 300 MVA EPRI/Westinghouse stoppé en 1983) et actuellement, seulement trois programmes importants sont en cours :

- U.R.S.S. cryoalternateur de 300 MW en cours de tests cryogéniques.
- Allemagne Siemens KWU - prototype 120 MVA en cours d'achèvement.
- Japon programme Super GM.

On peut signaler les premiers essais d'un prototype autrichien de 2 MW [18].

2.2.1 300 MW soviétique [19, 20] (Fig. 2). — Les caractéristiques principales du cryoalternateur sont rassemblées dans le tableau III [19].

Le bobinage supraconducteur (conducteur monolithique $3,5 \times 2 \text{ mm}^2$ NbTi, matrice cuivre) est protégé des variations électromagnétiques par deux écrans en cuivre (80-100 K et 300-330 K) dont les efforts mécaniques sont supportés par des cylindres en titane. Après les tests mécaniques à 3 000 tr/min, le rotor a été refroidi avec de l'azote liquide (temps de mise en froid : 25 h). Dus à un transfert d'hélium déficient, les tests cryogéniques à l'hélium liquide n'ont pas pu être réalisés.

2.2.2 120 MVA-Siemens KWU [16, 21]. — Il fait partie d'un programme plus vaste sur le développement de technologies avancées d'alternateurs (classique et supraconducteur). L'esprit avec lequel la construction a été menée est davantage industriel que de laboratoire. Sa puissance nominale est de 120 MVA avec des enroulements supraconducteurs réduits et de 400 MVA avec bobinage complet. Son diamètre correspond à une puissance de 850 MVA, puissance du stator sans encoche. Les tests statiques à 4,2 K ont permis d'atteindre 91 % du courant critique obtenu en échantillon court. Le conducteur est constitué de 11 brins torsadés (1 540 filaments NbTi dans une matrice cuivre (rapport : 1,6), $\phi_{\text{ext}} = 1,45 \text{ mm}$). Le système d'écrantage comprend un cylindre froid en alliage d'aluminium et une cage d'amortisseur en cuivre dans le cylindre extérieur.

Tableau II. — *Développement des cryoalternateurs à travers le monde.*

[Development of superconducting generators in the world.]

Années	U.S.A.	U.R.S.S.	Japon	France	Chine	R.F.A.
1965	8 kW (AVCO)			1 kW (Paris)		
1970	45 kVA (MIT)	20 kVA (Len)				
	3 MVA (MIT)	1,5 MVA (Len)		0,5 MVA (Gr.)	0,4 MVA (Shangai)	
	5 MVA (WE)				0,4 MVA (EMMW)	
1975			6,2 MVA (Fuji-Mits)			
1980						0,3 MVA (Munchen)
	300 MVA (Wes-Ep.)	20 MVA (Len)	20 MVA (Fuj)	Rotor modele (ALSTHOM-EDF)		
	20 MVA (GE)		50 MVA (Hit)			
1985			3 MVA (Tosh)			
	10 MVA (MIT)			20 kVA (Gr.)		
			0,1 MVA (To)			
1990		300 MVA	<u>3 × 70 MVA</u>	20 kVA (Gr.)		120 MVA (KWU)
1995			(SUPER-GM)			

Italiques : en cours d'essai, **Gras** : programme débuté abandonné, *Souligné* : projets en cours.Tableau III. — *Caractéristiques du cryoalternateur soviétique CTG-300.*

[Parameters of the superconducting generator at rated operating conditions.]

Puissance (MW)	300
Tension (kV)	20
Vitesse de rotation (tr/min)	3 000
Fréquence (Hz)	50
Rendement supérieur à (%)	99
Réactance synchrone (p.u.)	0,35
Réactance transitoire (p.u.)	0,27
Masse (t)	150
Diamètre extérieur rotor (m)	1,08
Longueur (m)	12
Largeur (m)/Hauteur (m)	5,5/7,7

Fig. 2. — Cryoalternateur soviétique 300 MW, 3 000 tr/min, $\phi_{\text{rotor}} = 1,08$ m.

[300 MW superconducting a.c. generator (UdSSR).]

Les essais de la machine test de 120/400 MVA (Fig. 3) sont prévus pour cette année 1990 tandis qu'un nouveau rotor supraconducteur doit transformer le cryoalternateur test en un prototype de 850 MVA fonctionnant dans une centrale en 1995.

2.2.3 Superconducting generation equipment and material (Super GM). — Il s'agit d'une association regroupant le CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry) et quinze membres industriels avec l'accord du NEDO (New Energy and industrial technology Development Organization). D'une durée de huit années, elle est née en octobre 1987 pour la mise en œuvre d'une technologie supraconductrice de production d'énergie électrique. L'objectif est la conception d'alternateurs supraconducteurs «pilote» de 200 MW, 3 600 tr/min après les tests de modèles de 70 MW. La R & D porte sur les matériaux supraconducteurs (conducteurs, isolation, stabilité), sur les modèles de bobines inductrices, d'échanges thermiques en rotation et de transfert d'hélium (joints), sur l'induit sans dents magnétiques, également sur les technologies de soudure (défauts, fiabilité), sur les matériaux utilisés au rotor (systématiquement étudiés et testés pour obtenir leurs propriétés mécaniques et physiques), sur les systèmes de réfrigération d'hélium (amélioration des rendements, fiabilité et disponibilité à long terme) et sur les méthodes de test et d'analyse des cryoalternateurs. Comme pour les Allemands, l'industrialisation (fabrication, montage) est un souci continu. Trois machines de 70 MW doivent être construites en 1991 (Tab. IV)

Fig. 3. — Prototype 120/400 MVA, KWV (R.F.A.).

[120/400 MVA SC prototype generator.]

Tableau IV: — Caractéristiques des modèles « test » de 70 MW du programme Super GM.

[Parameters of 70 MW class model machine for Super GM program.]

Excitation Machine	Lente ($I_f \sim 1$ Hz)		Rapide ($I_f \sim 10$ Hz)
	A	B	C
Puissance (MW)	70	70	70
Tension (kV)	10	10	10
Nombre de pôles	2	2	2
Fréquence (Hz)	60	60	60
x_d (p.u.)	0,35	0,35	0,45
x'_d (p.u.)	0,25	0,26	0,36
x''_d (p.u.)	0,21	0,19	0,25
Diamètre rotor (mm)	880	870	885
Supra/ ϕ filament	NbTi/2 μ m	NbTi/9 μ m	NbTi/2 μ m
Matrice	Cu/CuNi	Cu/CuNi	Cu/CuNi
Conducteur	Rutherford/ deux étages	Rutherford/ un étage	Rutherford/ deux étages
Dimensions (mm)	6,0 $\times$ 3,6	7,5 $\times$ 2,0	10,5 $\times$ 3,3
Ecran électro- magnétique	1 cylindre chaud (Monel K 500) Système d'écran froid à trois étages	Cage d'écureuil à chaud Un cylindre froid (Alliage d'Al)	Ecran chaud à trois étages (cuivre au chrome) Pas d'écran froid

tandis que le niveau de puissance de 200 MW devrait être atteint en 1995 après un audit en 1991/1992. Par rapport au générateur « pilote » de 200 MW, les modèles de 70 MW ont même diamètre et donc une section identique pour obtenir des données sur les efforts centrifuges et le comportement de l'hélium. La vocation des machines à excitation lente est un fonctionnement dans des centrales de petite ou moyenne importance près des villes tandis que celle des générateurs à excitation rapide est la production d'énergie électrique dans de grands centres avec amélioration de la stabilité du réseau. Des recherches sont menées dans le cadre de Super GM sur le Nb_3Sn (fragilité mécanique, influences des traitements thermiques sur les matériaux de structures et les isolants), sur les oxydes supraconducteurs (densités de courant critique et conducteur en grande longueur) et sur les solutions entièrement supraconductrices, rotor et stator supraconducteurs (brins AC à très faibles pertes, développement de conducteurs, protection...).

Un cryoalternateur à excitation rapide de 100 kVA, 1 800 tr/min, Hesper 1 [24], a été testé avec succès, y compris en régime transitoire. Cette machine a été réalisée par l'Université de Kyoto, de Kansai Electric Power et Toshiba dans le cadre du « Moonlight Project » mené par le gouvernement japonais. Elle sert de prototype au modèle à excitation rapide de 70 MW.

2.3 LÉVITATION MAGNÉTIQUE MAGLEV [25]. — Après des études aux Etats-Unis (MIT) abandonnées en 1975, seuls les Allemands (Siemens) et les Japonais ont eu des programmes importants. Les études ont été arrêtées en Allemagne où le choix se portait sur la lévitation électromagnétique avec des électro-aimants classiques. La J.N.R. (Japanese National Railway) utilise un système de suspension électrodynamique basé sur la force de répulsion entre des aimants nécessairement supraconducteurs dans le véhicule et des bobines court-circuitées au sol. Un moteur linéaire, également supraconducteur, assure la propulsion. Leur prototype ML 500 est célèbre par son record à 517 km/h le 21/12/79, tandis que le dernier véhicule, MLU002 (mars 1987), se rapproche d'une version « pratique ». Le 7 août 1989, le comité d'investigation du Maglev du Ministère des Transports a décidé la construction d'une ligne d'essai de 40 à 45 km, maillon d'une nouvelle ligne « New Maglev Shinkansen » entre Tokyo et Osaka. Cependant, l'intérêt économique, excepté celui d'une réalisation prestigieuse « High Tech », n'est pas établi, tandis que le récent record, le 18/5/90 à 515,3 km/h par la SNCF avec une rame pratiquement de série, démontre que les limites des systèmes classiques ne sont pas encore atteintes. Le train à lévitation serait davantage un remplaçant des avions types lignes intérieures que du train classique.

2.4 AUTRES APPLICATIONS.

2.4.1 Tri-magnétique. — Le tri-magnétique est basé sur la force exercée sur une particule dans un gradient de champ. Les deux procédés sont le « high gradient magnetic separation » utilisant un solénoïde et le « open gradient magnetic separation » avec des enroulements multipolaires. Les solutions supraconductrices améliorent les performances des systèmes classiques. Employé pour purifier, récupérer des minerais ou filtrer l'eau, quelques applications industrielles existent [26].

2.4.2 Machines autres que alternateurs. — Après quelques réalisations de machines homopolaires à travers le monde, en particulier en Grande-Bretagne [27], le programme le plus récent fut mené par la marine américaine [28]. Il a conduit aux essais du navire expérimental Jupiter II (longueur 20 m) équipé d'un moteur homopolaire SC de 2,2 MW (100 V d.c.-22,5 kA) alimenté par un redresseur en sortie d'un alternateur entraîné par une turbine à gaz. Outre la souplesse d'installation et les possibilités opérationnelles qui caractérisent la transmission électrique, la supraconductivité en réduit la taille, le poids et les pertes. Ce

bateau a été présenté au public en octobre 1986 lors d'ASC (Applied Superconductivity Conference).

Une machine originale utilisant un solénoïde SC pour saturer les dents magnétiques d'un rotor a été l'objet d'études et d'une réalisation [29].

2.4.3 MHD (Magnétohydrodynamique). — D'un rendement plus élevé (50 à 60 %) que les systèmes classiques (40 %), la MHD permet l'obtention d'un courant continu par transfert d'ions contenus dans un gaz détendu dans une tuyère où existe une induction perpendiculaire à l'écoulement. Seule la solution supraconductrice [30] est envisageable puisque plusieurs Teslas doivent être maintenus dans des m^3 . Sauf en URSS, les nombreux programmes ont été abandonnés ou fortement diminués à cause des problèmes spécifiques à la MHD : hautes températures, fluides corrosifs, électrodes...

Le principe de la MHD peut être utilisé pour la propulsion navale. Caractérisé par un niveau de vibration faible, un entretien et une utilisation simple et des vitesses élevées possibles, un bateau expérimental à propulsion électromagnétique SC (longueur 22 m) a été construit en 1989 au Japon. Les tests sont envisagés en 1990.

3. Applications des supraconducteurs en régime variable [31].

Les performances actuelles des composites multifilamentaires supraconducteurs sous induction à fréquences industrielles 50/60 Hz [33] ouvrent l'emploi des supraconducteurs au matériel électrique dans sa grande majorité et non plus uniquement aux bobinages à courant et champ continus. Les pertes très faibles en alternatif ont été obtenues par une taille submicronique des filaments (0,1/0,2 μm), une matrice résistive type CuNi et un faible rapport $\frac{\text{pas de torsadage}}{\text{diamètre du brin}}$, de l'ordre de 5 actuellement. Pour donner une indication des

pertes volumiques P des supraconducteurs par rapport à celles du cuivre ρj^2 , (ρ résistivité électrique et j densité de courant), on compare, en fonction de l'induction, ρj à $\xi P/J_c$ où ξ est le facteur de mérite (inverse du rendement de réfrigération) et J_c la densité de courant critique exprimée en valeur efficace. La figure 4 donne de telles comparaisons ; elle indique une diminution importante des pertes des supraconducteurs vis-à-vis du cuivre sous induction peu élevée ($< 1/1,5$ T). Il faut noter que la France sous l'impulsion de GEC ALSTHOM avec l'appui des laboratoires de Marcoussis, a été pionnière dans ce domaine et conserve son avance technologique. Outre l'utilisation de ces multifilamentaires en courant alternatif dans les machines tournantes et les transformateurs, le phénomène de transition ou

Fig. 4. — Pertes comparées Cu-SC (j en A/mm^2 , $\xi = 700$).

[Comparison of normalized loss (W/A.m) for SC wires and copper at 50 Hz.]

retour à l'état normal peut être mis à profit avec ces composites pour des fonctions de protection : auto-protection des systèmes supraconducteurs eux-mêmes mais également des réseaux avec les limiteurs.

On peut envisager des interrupteurs SC appelés soupapes supraconductrices pour remplacer les transistors ou G.T.O. Les problèmes de matériaux ne sont pas entièrement résolus : stabilité électromagnétique et produit ρj^2 (ρ : résistivité à l'état normal et j la densité de courant maximal) inférieur au seuil économique de $10^{14} \Omega \text{ A}^2 \text{ m}^{-3}$ [32]. Les oxydes supraconducteurs seront peut-être de bons prétendants.

3.1 MACHINES ÉLECTRIQUES [32]. — Par rapport aux cryoalternateurs « classiques », l'induit peut être supraconducteur tandis que les écrans électromagnétiques du rotor peuvent être supprimés (simplification de la partie tournante) si l'inducteur est réalisé à partir de multifilamentaires à faibles pertes. Les avantages de ces alternateurs entièrement supraconducteurs sont nombreux :

- augmentation des puissances spécifiques et volumiques due aux fortes densités de courant à l'induit et à la structure « air » de la machine ; par rapport au cryoalternateur classique des gains de 2 à 3 sont attendus [35],
- cryogénie intégrée rotor-stator possible, elle permet une simplification importante du rotor et un très bon couplage induit-inducteur [36],
- réduction des bruits et vibrations due à la simplification du rotor et à la diminution de l'écran magnétique externe.

Ces machines sont caractérisées par de grandes réactances synchrones : les densités linéiques de courant induit sont élevées et l'induction à l'induit est raisonnable ($\sim 1 \text{ T}$) pour maintenir les pertes des enroulements supraconducteurs à un faible niveau. Pour le dimensionnement, de grandes valeurs de x_d réduisent très favorablement les surcouples, surcourants et surchamps en régimes transitoires et de défauts. Mais l'intérêt pour la stabilité des cryoalternateurs à faible x_d semble *a priori* disparaître. Méfions-nous de conclusions rapides :

- dans les machines à amortisseurs classiques, le couplage induit-amortisseur influe davantage que la valeur de x_d [37],
- l'utilisation d'une bobine de régulation présentée en 2.1.2 modifie les critères classiques.

En 1967, Dynatech (USA) a construit et essayé sans succès une machine entièrement supraconductrice [38] à cause des pertes trop élevées et c'est seulement vingt ans après que fonctionna à Grenoble le premier stator triphasé supraconducteur à faibles pertes [39] avec un rotor classique en fer. Le rotor supraconducteur est monté et les essais de la machine entièrement supraconductrice (Fig. 5) sont en cours. Les caractéristiques de cette machine sont rassemblées dans le tableau V tandis que des premiers résultats d'essais à vide et en court-circuit à 2 000 tr/min sont indiqués figure 6.

Les soviétiques auraient réalisé une telle machine avec Nb_3Sn comme supraconducteur mais les pertes seraient élevées. Au Japon, un petit prototype de laboratoire a été essayé dans un cryostat classique vertical [40]. Un projet de moteur de démonstration associant un induit supraconducteur et un inducteur refroidi à aimants permanents NdFeB est en cours au CNRS/CRTBT-LEG [41].

3.2 TRANSFORMATEURS. — L'idée d'utiliser des supraconducteurs pour des transformateurs plus performants n'est pas récente [42], mais les pertes des enroulements étaient rédhibitoires jusqu'à l'apparition des brins 50 Hz. Les gains apportés par la supraconductivité aux transformateurs sont les suivants :

Fig. 5. — Machine entièrement SC, 20 kVA, 3 000 tr/min.

[20 kVA fully superconducting a.c. generator.]

Tableau V. — *Caractéristiques de l'alternateur entièrement supraconducteur CNRS/CRTBT-LEG GEC ALSTHOM.*

[Parameters of the fully superconductivity a.c. generator developed in Grenoble by CNRS-GEC ALSTHOM.]

Puissance (kW)	18	Conducteur	Stator	Rotor
Tension (V)	380	Type	Triplet	6 + 1
Vitesse de rotation (tr/min)	3 000	Diamètre brin (mm)	0,12	0,264
Fréquence (Hz)	50	Diamètre filament (μm)	0,55	1,2
Réactance synchrone (p.u.)	2,8	Nombre de filaments	14 496	13 068
Réactance transitoire (p.u.)	2,1	Matrice	CuNi	Cu/CuNi

Fig. 6. — Caractéristiques à vide et en court-circuit à 2 000 tr/min, machine toute supraconductrice, premiers essais (tension simple).

[Open circuit star voltage and permanent three phase short circuit current *versus* Field current $\Omega = 2\,000$ rpm.]

Fig. 7. — Court-circuit en charge ; indice 1 : primaire, indice 2 : secondaire, V_R : tension résistive [43].

[Load short circuit test — U_1 and I_1 : primary voltage and current, I_2 : secondary current and V_R resistive voltage.]

— diminution du poids due à l'augmentation des ampères-tours, la densité de courant est très élevée comme l'induction au niveau des enroulements est faible ($< 0,5$ T), et à une section de fer réduite ou inexistante si sont acceptés un courant à vide, un volume de supraconducteur et des pertes plus élevées,

— augmentation du rendement comme les pertes fer et Joule diminuent,

— plus de surdimensionnement mécanique pour tenir les régimes de défauts (typiquement court-circuit) en utilisant la transition des enroulements en cas de surintensité.

Pour valider expérimentalement ces avantages, les laboratoires de Marcoussis ont réalisés des transformateurs de 80 kVA et 200 kVA [43]. La figure 7 montre le « plus » apporté par la supraconductivité : la limitation très rapide du courant (10^6 A/s) et donc les efforts lors de court-circuit. L'association d'enroulements auxiliaires « de secours » permet une continuité de fonctionnement en régime légèrement dégradé lors de la transition de l'enroulement

Tableau VI. — *Spécification du limiteur supraconducteur 25 kV.*

[25 kV limiter's characteristics.]

Fréquence (Hz)	50
Tension nominale (kV)	25
Tension test (kV)	50
Courant nominal (I_{eff})	200
Courant seuil (A)	330
Résistance max (Ω)	340
Courant de limitation (A)	350
Courant « théorique » de CC (A)	15 000

Tableau VII. — *Programme possible de développement de machines supraconductrices.*

[Possible program for superconducting machines.]

Dates	1983	1984	85/86/87	1992 Etape 10-30 MW ?	1993	1998/99 Etape pré-série	2004/2006 Commande série possible
Opérations							
GASC		20 kVA	Essais		Essais	Essais	
RASC		20 kVA/20 kJ			Essais	Essais	
TASC			CEE				
Fils et câbles 50 Hz			Eureka				
Structures isolantes		200 kVA	Essais	50 Hz, 400 Hz	Essais	Essais	
GRASC	1 ^{er} brin					1,000 Hz	
générateur ou moteur	50 Hz			Très hauts champs et températures		critiques	
Commercialisations		Fils	Câbles Structures	Commercialisations 10-30 MW RASC < 100 kWh < 100 MW	Commercialisation 300/600	Série possible toutes puissances	

principal. Si ce dernier est isolé rapidement après la transition, il peut récupérer l'état supraconducteur en quelques secondes seulement [44].

3.3 LIMITEUR. — Au-delà des propriétés classiques des supraconducteurs, densité de courant élevée et faibles pertes, l'effet de limitation par transition différencie fondamentalement ces matériaux des conducteurs classiques. Différents appareils ont été présentés dans leurs principes aux précédentes Journées d'Aussois [8] validés expérimentalement à petite échelle à Grenoble [45]. Outre un appareil japonais [46], le développement le plus avancé a été mené par les laboratoires de Marcoussis et GEC-ALSTHOM avec un limiteur de 25 kV [47] constitué par une bobine aselfique afin de réduire la chute de tension en régime nominal et d'avoir une résistance suffisante à l'état normal grâce à une grande longueur de conducteur. Les caractéristiques sont données dans le tableau VI. La limitation du courant de court-circuit à une fraction du courant nominal s'effectue en quelques μ s.

Pour clore sur les applications des supraconducteurs a.c., le tableau VII [48] montre une proposition de ce que pourrait être un programme de développement cryoélectrotechnique.

Conclusion.

Après un début des années 80 assez morose qui a vu l'abandon de plusieurs grands projets cryoélectrotechniques, la nouvelle décennie est beaucoup plus favorable. Les programmes allemand et soviétique de cryoalternateurs aboutissent : les tests de ces machines interviendront en 1990, tandis que le Japon a lancé le vaste programme Super GM. L'effet médiatique des hauts T_c , l'industrialisation des bobines supraconductrices d'imagerie médicale, l'apparition des multifilamentaires pour application à fréquences industrielles 50/60 Hz ne sont certainement pas étrangers à ce regain d'intérêt actuel. Pionnière dans maints domaines de la supraconductivité, la France doit relever le challenge sachant que y compris pour le 50 Hz les concurrents existent : les japonais ont un premier fil a.c. et Siemens s'intéresse au développement des multifilamentaires pour fréquences industrielles et semblerait vouloir s'y consacrer.

Bibliographie

- [1] LAVERICK C., LOBELL G., Large high field superconducting magnet system, *Rev. Sci. Instrum.* **36** (1965) 825.
- [2] CLAUDE M. L., Sur l'étude d'un alternateur à bobinage supraconducteur, *C.R. Hebd. Acad. Sc. Paris* **261** (1965).
- [3] PATOUX A., PEROT J., Les grands accélérateurs de particules, *J. Phys. III* **1** (1991).
- [4] LEBRUN P., Enjeux technologiques du LHC, le grand collisionneur de particules supraconducteur en projet au CERN, cette conférence.
- [5] TURK B., Fusion contrôlée, cette conférence.
- [6] SAUZADE M., Applications médicales : développements récents, *J. Phys. III* **1** (1991).
- [7] DUBOTS P. *et al.*, Behaviour of multifilamentary NbTi conductors with very fine filaments under a.c. magnetic fields, *J. Phys. France* **45** (1984) 467.
- [8] HUVE C., LAUMOND Y., FÉVRIER A., Electrotechnique supraconductrice, 2^{es} Journées de Cryogénie (Aussois, janvier 1986) pp. 15-18.
- [9] TOURNIER R., Matériaux supraconducteurs à haute température critique, cette conférence.
- [10] VAN DOVER R. B. *et al.*, Critical current near 10^6 A cm⁻² at 77 K in neutron-irradiated single-crystal YBa₂Cu₃O₇, *Nature* **342** (1989) 55.
- [11] INOUE K., World's achievements in the development of superconducting materials at liquid helium temperature, Proc. of the 11th Magnet Technology Conference (Elsevier) (Tsukuba, September 1989) pp. 27-35.

- [12] HASSENZAHL W., Superconducting magnetic energy storage, *IEEE Trans. Magn.* **MAG 25** (1989) 750.
- [13] LOYD R. J., WALSH T. E., KIMMY E. R., DICK B. E., An overview of the SMES ETM program : The Bechtel team's perspective, *IEEE Trans. Magn.* **MAG 25** (1989) 1569.
- [14] BOENIG H. J., HAUER J. F., Commissioning test of the Bonneville Power Administration 30 MJ S.M.E.S. Unit, *IEEE Trans. on Power Apparatus and System* **PAS-104** (1985) 302.
- [15] SABRIÉ J. L., Feasibility of large AC superconducting equipment, *J. Phys. France* **45** (1985) 717.
- [16] LAMBRECHT D., Overview on the development of superconducting generators, Proc. of MT 9 (Zürich, 1985) pp. 273-276.
- [17] GILLET R. L., GOYER J., LAUMOND Y., MARQUET A., BERTHET M., Electricité de France - Alsthom-Atlantique Superconducting turbogenerator development program, *IEEE Trans. Magn.* **MAG 17** (1981) 890.
- [18] KÖFLER H., RAMSAUER F., First results of the start up phase of the 2 MVA Superconducting generator SMG, Proc. of the 11th Conférence on Magnet technology (Elsevier) (Tsukuba, September 1989) pp. 519-524.
- [19] FOMIN B. I., KURILOVICH L. V. *et al.*, Main stage of manufacturing a 300 MW superconducting generator, *Cryogenics* **27** (1987) 243.
- [20] RYBIN Y., FILIPPOV I. *et al.*, Prior tests of superconducting turbogenerator CTG-300, Proc. of the 11th Conference on Magnet Technology, Elsevier (Tsukuba, September 1989) pp. 529-533.
- [21] LAMBRECHT D., INTICHAR L., Progress in the construction of a large superconducting generator, Proc. of the 9th Conference on Magnet Technology (Zürich, 1985) pp. 277-279.
- [22] TANAKA T., HIROSE S., TANAKA M., KITAJINA T., SUNADA M., Current situation on R & D on superconducting generators carried out by engineering research association for superconductive generation equipment and materials, Proc. of the 11th Conference on Magnet Technology, Elsevier (Tsukuba, September 1989) pp. 556-561.
- [23] KURIHARA S., TSUKAMOTO O. *et al.*, Conceptual design of 200 000 kW class pilot superconducting generator carried out by Super GM, Part 1 et Part 2, Proc. of International Symposium on New Developments in Applied Superconductivity (Osaka, October 1988) pp. 634-644.
- [24] OKADA T., NITTA T., HAYASHI S., SAIKAWA K., TARI M., KUMAGAI M., Design and manufacture of superconducting generator with high response excitation, Proc. of MT11 (Tsukuba, September 1989) pp. 562-567.
- [25] FUJIE J., Current status of Maglev transportation system in the world, Proc. of the 11th Conference on Magnet Technology (Tsukuba, September 1989) pp. 9-17.
- [26] DUSTMANN C. H., UNKELBACH K. H., FLESSNER H. H., Optimization of the superconducting magnet system for a commercial scale high field drum separator, Proc. of the XVI Int. Min. Proc. Congress (Stockholm, June 1988) p. 905.
- [27] APPLETON A. D., Design and manufacture of a large superconducting homopolar motor, *IEEE Trans. Magn.* **MAG 19** (1983) 1047.
- [28] SUPERCYNSKI M., Superconductive electric propulsion test craft Jupiter II, *IEEE Trans. Magn.* **MAG 23** (1987) 348.
- [29] REZZOUG A., MAILFERT A., MANFE P., Cryogenic supersaturated synchronous machine optimization and first experiment results, *IEEE Trans. Magn.* **MAG 20** (1984) 1795.
- [30] MARSTON P. G., HALE J. R., DAWSON A. M., Advanced superconducting MHD magnet design for a retrofit power plant, *IEEE Trans. Magn.* **MAG 25** (1989) 1562.
- [31] GEORGES J. Y., FÉVRIER A., LAUMOND Y., LACAZE A., BONNET P., Performances of industrial superconducting wires for 50-60 Hz applications, Proc. of MT11 (Tsukuba, September 1989).
- [32] FÉVRIER A., LAUMOND Y., Prospective uses of superconductors for 50/60 Hz applications, Proc. of ICEC 10 (1986) pp. 139-152.
- [33] FÉVRIER A., Latest news about superconducting A. C. machines, *IEEE Trans. Magn.* **MAG 24** (1989) 787.

- [34] GUÉRAUD A., TAVERGNIER J. P., FÉVRIER A., LAUMOND Y., LACAIZE A., DALLE B., ANSART A., Thermoelectromagnetic stability of ultra fine multifilamentary superconducting cables for industrial frequency use, *Idem*.
- [35] BRUNET Y., TIXADOR P., LECOMTE T., SABRIÉ J. L., First conclusions on the advantages of full superconducting synchronous machines, *Electr. Machines and Power Systems* **11** (1986) 511.
- [36] BRUNET Y., TIXADOR P., NITHART H., Cryogenic conceptions for full SC generators, realization of a SC armature cryostat, *Cryogenics* **29**-(1988) 751.
- [37] TIXADOR P., Etude sur les machines synchrones entièrement supraconductrices, contribution à la réalisation d'un prototype : stator supraconducteur, Thèse de l'I.N.P.G. (mars 1987).
- [38] OBERHAUSER C. J., KINER H. R., Some considerations in the design of a superconducting generator, *Adv. Cryog. Eng.* **13** (1967) 161.
- [39] BRUNET Y., TIXADOR P., LAUMOND Y., SABRIÉ J. L., First electrical tests on a machine with an AC superconducting stator winding, *IEEE Trans. on Magn.* **MAG 24** (1988) 796.
- [40] MUTA I., TSUKIJI H., TSUTSUI Y., HOSHINO T., MUKAI E., FURUKAWA T., Fully superconducting AC generator with brushless excitation system, Proc. of the 11th Conf. on Magnet Technology (Tsukuba, September 1989) pp. 568-573.
- [41] TIXADOR P., BRUNET Y., BRISSONNEAU P., IVANES M., Superconductors and rare earth magnets : an exciting combination for electrical motors, Proc. of MT11 (Tsukuba, September 1989) pp. 621-626.
- [42] MC FEE R., Superconducting power transformers - A feasibility study, *Electr. Eng.* **80** (1961) 754.
- [43] FÉVRIER A., Transformer, Applied Superconducting Technology (Now & Future) chapitre V.
- [44] IWAKUMA M., FUNAKI K., KANETAKA H., TASHAKI K., TAKEO M., YAMAFUJI K., Quench analysis in a 72 kVA superconducting four winding power transformer, *Cryogenics* **29** (1989) 1055.
- [45] BRUNET Y., TIXADOR P., Small scale experiments on static devices using AC superconductors, *Electr. Power System Res.* **12** (1987) 149.
- [46] DAISUKE I., YONEDA E. S., FUJIOKA T., TSURUNAGA K., Tests of superconducting AC fault current limiter, Proc. of MT11 (Tsukuba, September 1989) pp. 449-454.
- [47] VERHAEGE T., TAVERGNIER J. P., FÉVRIER A., LAUMOND Y., BEKHALED M., COLLET M., PHAM V. D., 25 kV superconducting fault current limiter, Proc. of MT11 (Tsukuba, September 1989) pp. 413-418.
- [48] SABRIÉ J. L., Perspectives d'application de la supraconductivité dans les réseaux, RGE (avril 1988) pp. 22-27.