超 電 導 交 流 機

秋 山 茂・藤 野 治 之

富士電機製造株式会社中央研究所 横須賀市長坂 2-2-1

(1973年10月23日受理)

Superconducting Alternator

Shigeru AKIYAMA and Haruyuki FUJINO

Central Research Laboratory, Fuji Electric Co., Ltd.

2-2-1, Nagasaka, Yokosuka-shi

(Received Oct. 23, 1973)

Synopsis

The article gives general aspects of superconducting alternator, which is noticed as an application of superconductivity on electrical machine recently. A careful consideration is required to design the machine composed of some unique parts. Electrical characteristics of superconducting machine have been found considerably different from conventional machines owing to lack of iron core. Mainly, superconducting alternator has been considered to be useful as large turbo-generator for central power station, but it is expected to be useful as electrical ship propulsion system and as synchronous condenser also. Finally, present status of development is reviewed.

1. ま え が き

電力の需要は、産業の発達・生活の高度化にしたがって毎年急速な増加を示している。それに応じて、経済性と効率の見地から発電機単機容量もしだいに大きくなってきている。しかし遠心力に対する材料強度の点から発電機の大きさは無制限に大きくすることはできず、主として、冷却方法の改良によって大容量化が進められてきたが、二極機では 1,500 MVA 程度が限度と考えられる。

界磁巻線に超電導線を用いれば、桁はずれに大きな電流密度がとれ、鉄心なしで高磁界がえられるので、同程度の寸法で在来機より格段に大きな容量がえられ、重量も軽減できる。また、ジュール損がないため、励磁パワーがきわめて小さく、極低温に冷却することを考慮に入れても、在来機より高い効率がえられる。

昨年から今年にかけて、ウェスティングハウス(WH)

の 5 MVA 機¹⁾と MIT の 2 MVA 機²⁾が相ついで完成してその試験結果も発表され³⁾、急速に超電導交流機の開発が注目されはじめた。わが国では、富士電機が、固定界磁タイプではあるが 30 KVA 機を試作し、単体試験および配電系統につないだ発電試験に成功した⁴⁾。

以下では、超電導交流機の構成と設計上の注意、電气的特性、各方面への応用の可能性について述べ、最後に現在までの各国の開発状況について述べる。

2. 超電導交流機の構成

大容量機では回転部から大電力を取出すのが困難なため、電機子は固定子、界磁が回転子となる。

回転子は図 1 に示すように、超電導界磁巻線、電流リード、ヘリウムの供給・排出部、熱および電氣的遮蔽板、断熱のための真空部ならびにトルクを伝達する回転軸で構成される。真空部の外壁は、固定壁⁵⁾(MIT

方式)と回転壁¹⁾(WH方式)の二種がある。固定壁の場合には、回転軸と固定壁の間に真空シール部が必要であるが、真空中に回転部があるため風損はない。回転壁の場合は真空部は封じ切りとなり、シール部は不要であるが、長期間の真空保持が問題である。

超電導機に持てなものの一つに、ヘリウムを冷媒とする冷凍装置がある。ヘリウムは危険性や毒性はないが高価であるため、冷凍装置は閉ループを形成するものでなければならない。また実用機では年単位の長時間連続運転が要求される。現存の実験、研究用のヘリウム冷凍機ではこの要求に充分応じられないので、今後、信頼性の高いヘリウム冷凍装置が開発されることが望まれる。

2.1 界磁巻線

界磁巻線には電機子反作用のため、交流磁界が加わり、単相短絡等の不平衡負荷時には、熱輻射遮蔽板等による遮蔽効果を大きくしなければ、かなりの強い交流磁界になるおそれがある。超電導線は直流に対して損失はないが、交流に対しては損失が生じて発熱し、超電導状態が破壊されるおそれもある。直流界磁コイルの場合以上にコイルの線材や冷却には注意を要する²⁾。

回転体の中では、遠心力のためヘリウムは断熱圧縮されてエンタルピーが増加して圧力が上がり、同時に温度も上がる⁵⁾。特に大型機や高速回転機ではヘリウムの温度上昇が無視できなくなり、超電導線の臨界電流が低下することも考えて界磁電流値を設定しておくことが必要である。

2.2 電流リード

界磁電流のリードは、ヘリウムで冷却してジュール

損による発熱と外部からの侵入熱を除去することになる。熱交換性の良い構造にして界磁への熱を遮断するのがポイントとなる。

2.3 ヘリウム供給部

実用機では、冷媒としてヘリウムを常時連続的に供給しなければならない。ヘリウムは冷凍装置から移送管を通して回転軸に注入されるが、この部分の構造は超電導機の成否にかかわる重要なものである。MITでは図2に示す構造を用いて³⁾、2 MVA機の試作に成功した。シール部が極低温のヘリウムによって凍結されるのを防ぐために、回転部と静止部のギャップを非常にせまくして対流による熱伝導を極力小さくするよう工夫されている³⁾。WHの5 MVA機も同様の構造をもっている。

2.4 熱・電気シールド

界磁コイルの外側の真空部には輻射熱を遮断するためのシールド板があり、界磁コイルを冷却したもどりのヘリウムガスによって冷却される。シールド板は銅またはアルミ製で、電機子からの磁界の交流分を遮蔽して超電導巻線の交流損失を少なくする役割も兼ねている。このためシールド板は渦電流によって加熱される。特に単相短絡がおこると渦電流による発熱が非常に大きく、大きな制動トルクも加わるので、熱容量を充分大きくすると共に、トルクの支持についても充分な配慮が必要である¹⁾⁶⁾。

2.5 回転真空シール

MITタイプでは真空部の外壁は固定部にあるため、回転部と固定部間には 10^{-5} Torr程度の真空を保持できるシール構造が必要になる。MITでは油とカーボン面シールによる方法ですでにこの問題を解決して

図1 超電導交流機概念図

図 2 液体ヘリウム供給部断面

いる。

2.6 回転断熱容器

界磁巻線を収納する断熱容器は、外部からの熱侵入を極力抑えることはもちろんであるが、発電電力に見合ったトルクを伝達しなければならない。このため断熱容器にはせん断強度と熱伝導率の比の大きい材料を用いるのが有利である。表1に低温用材料の例を示す。また、発電機の安定な運転の上で考慮しなければならないものに臨界速度（共振回転速度）がある。在来タービン発電機では、第2または第3臨界速度以上で運転しているのが普通である。超電導機の回転部は液体ヘリウムが入っているため臨界速度より上のかかなり広い範囲で不安定⁹⁾で、第1臨界速度以下で運転することが望ましいが、さいわい鉄心がなく軽いため臨界速度が大きく、MITの試算では2極 3,600 rpmの超電導機では8,500 MVAではじめて臨界速度に達する⁹⁾。

2.7 電機子巻線

電機子巻線には鉄心がないため直接強い交流磁界が加わるため、より線構造にして渦電流損を小さくするとともに、周回電流を減らすには転位も必要である。電機子巻線の部分断面を図3に示す²⁾。渦電流損を小さ

図 3 電機子巻線部分断面

くするため、固定子の構造物にできるだけ金属を使わないとすると、各種の力の支持、伝達の構造や、巻線の冷却構造にも在来機とは異なる考え方が必要となる。

2.8 磁気シールド

外部への磁界のもれを防ぐためのシールド材としては、鉄または銅かアルミを用いる。鉄を用いると重量は大きくなるが、シールドのない場合と比べて発電機の磁束密度が大きくなり出力も大きくなる。銅やアルミを用いる場合は軽量であるが、渦電流によって磁界を打消すことになり、発電機の磁束密度は逆に減少し出力もへると同時に損失も加算されなければならない¹⁰⁾。

3. 電気的特性

同期発電機の出力 KVA を電機子直径Dの二乗、有効長Lと同期速度Nの積で割った出力係数は、磁束密度と電機子の電気装荷（A/m）に比例する。超電導機では磁束密度が大きくとれると共に電機子に鉄心がないので導体密度が大ききできる。したがって冷却を良くすれば、磁束密度、電気装荷とも在来機に比べて大きく、出力係数が非

表 1 低温用材料比較

	ステンレス鋼 321	チタン合金 Ti-6 Al-4V	アルミ合金 5052
密度 g/cm ³	8.02	4.42	2.68
熱伝導度 Cal/cm·sec, deg	0.039	0.018	0.33
熱膨張係数 10 ⁻⁶ /deg	16.7	8.8	23.8
電気抵抗 μΩ·cm	72	171	5
縦弾性係数 kg/mm ²	20,300	11,550	7,200
引張強さ kg/mm ²	70	98	58

表 2 大形超電導交流機の試算例

	MIT	IRD	WH	富士電機	在 来 機
容 量 (MVA)	1,000	500	640	1,000	640
ロータ外径 (cm)	64.7	105	92	86	100
有 効 長 (m)	3.3		1.56	4.2	6.2
固定子外径 (cm)	1.0	2.1	2.67	—	2.65
ロータ重量 (ton)	1.17	29	16.4	—	54
全 重 量 (ton)	61.5	210	159	—	433
ベアリング間の長さ(m)		6.4	5.54	—	10.5

表 3 大型超電導交流機の特性比較

	MIT	WH	在来機
容 量 (MVA)	1,000	640	640
同 期 リ ア ク タ ン ス	0.38	0.438	1.891
過 渡 リ ア ク タ ン ス	0.25	0.278	0.31
初期過渡リアクタンス	0.10	0.209	0.264
効 率 (%)		99.63	98.6

図 4 無負荷特性

- (a) MIT 1号機
- (b) 富士電機 30 KVA 機

常に大きくなり、寸法・重量とも大巾に減少できる。
表 2, 3 に試算例を示す。

磁気回路に鉄心がな
いことで超電導機の電
気特性は在来機とはか
なり異なったものにな
る。無負荷電圧は図 4
に示すように界磁電流
に完全に比例し飽和特
性を示さない¹⁾⁴⁾¹¹⁾¹²⁾。
同期リアクタンス x_d
は無負荷電圧と短絡電

流の比になるが、在来の大容量機では通常、定格電圧
と定格電流の比を 1 とする単位法であらわして 2 程度
の値になるが、超電導機では、試算によると 0.3~0.6
程度の値になる¹⁾⁶⁾¹³⁾。出力の小さい試作機ではこれ
より小さい値が得られている⁴⁾¹¹⁾¹²⁾。

発電機の出力 P は、起電力を E 、端子電圧を V 、内
部相差角を δ とすると、

$$P = \frac{EV}{x_d} \sin \delta$$

であらわされる。系統の負荷変動に応じて δ が変化し
て原動機の入力と発電機の出力がバランスする。この
時の発電機の安定度は EV/x_d によってきまるので、
同期リアクタンス x_d が小さければ安定度がすぐれて
いるといえる。

発電機の磁界分布やインダクタンスの計算式は断面
の二次元的解析から求められている¹⁰⁾¹⁴⁾。しかし、軸
長が短かいと、巻線の端部の影響を考慮に入れて有効
長さを見積る必要がある。

4. 超電導交流機の適用例

4.1 事業用火力発電機

前記のとおり、超電導発電機は在来機では到達不可
能な大出力を得ることができ、比較的軽量、小形であ
るため運送上の困難も少なく、発電所用地の有効利用
にも適している。その上鉄心がいないため、高電圧を
発生することも比較的容易である。

容量の小さいものでは、冷凍装置・超電導線等のコス
トが高いため経済性に難点があるが、大容量機では
これらのコスト高はカバーでき、現状でも 1,000 MVA
以上では経済性があると考えられている¹³⁾。更に、材
料や技術の進歩とともに経済的なクロスポイントは下
がってきて数十万 KVA でも経済性が出てくる可能性
もある¹⁵⁾。

4.2 同期調相機

送電系統は負荷の種類によって位相がずれる場合には、無効電力を供給することによって力率が適正に保たれている。この目的のためには現在では同期調相機は高価なため、コンデンサをつないで無効電力の供給源としているが、用地面積が大きくなるのが難点である。超電導回転機が小型・軽量化され、効率もよくなれば、調相機として使われ、この難点を解決する可能性もある。

4.3 船舶用推進装置および航空機補助電源

船舶に電気推進装置を用いることは、通常タービン、ギヤ方式に比べ、信頼性が高く、船内配置の自由度も大きく有効であるが、在来機では、重量も大きく、コストも高くなる点が大きな欠点であった。超電導発電機と超電導電動機を用いれば図5に示すように、小型、軽量化がはかれるため、従来の欠点をカバーできる可能性が検討されている¹⁶⁾。砕氷船のように前進、

後退を繰返すような運転の自由度を要求するものでは直流発電機・直流電動機が有望であると考えられるが、速度コントロールの要求が大きくなれば、交流発電機と交流電動機の組合せにすることも可能であり、信頼度も高い。直流一直流の推進系に単極機を用いるには、大電流の電線の重量が大きくなることも考慮しなければならない。両システムの利点を取るため交直変換器を用いて同期発電機と直流モータの組合せも考えられる。

5. 超電導交流機開発の現況

これまでに行われた試作とテストの結果については表4にある。Dynatechのもの¹⁷⁾は界磁にも電機子にも超電導線を用いた全超電導機であるが、電機子導体には交流電流が流れ、交流磁界がかかるため、超電導にしても交流損失があり、冷凍に必要なパワーを考え

図 5 船舶電気推進システム寸法比較図

表 4 超電導同期発電機の試作例

	全超電導	超電導界磁 (静止)		超 電 導 界 磁 (回転)		
	Dynatech (米)	内側 AVCO (米)	外側 富士電機 (日)	MIT 1 (米)	MIT 2 (米)	WH (米)
配 置	横	立	横	立	横	横
定格出力 (KVA)	50	8	30	80	2,100	5,000
電 圧 (V)	1,000	250	100	103	1,640	4,160
回転速度 (rpm)	24,000	12,000	1,500	3,600	3,600	3,600
周 波 数 (Hz)	400	400	50	60	60	60
超 電 導 材 料	Nb ₃ Sn	Nb-Zr	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti
製 作 年 度	1967	1965	1972	1969	1973	1972

と現状では実用的でない。他はすべて界磁だけを超電導化したものである。MIT, ウェスティングハウス以外は固定界磁であるが電気特性をしらべるには充分である。MIT の1号機¹²⁾は回転界磁ではあるが立軸形で液体ヘリウムを封入するタイプであり、実用機のモデルとは考えられない。MIT の2号機(写真1)とウェスティングハウスの5 MVA 機は在来タービン発電機と同様、水平軸の回転界磁でヘリウムは連続供給できるもので、実用機のモデルと考えられる。これらは1972~1973年に試験運転が行われ、回転界磁の極低温冷却技術が確認された。現在では各国で開発計画が進められようとしている。

アメリカでは NBS を中心に大規模な開発計画が発足しようとしている。この計画は1973年から1978年までの6年間に41,000,000ドルを投入して超電導発電機の工業的可能性を実証し、プロトタイプを製作試験することになっている¹⁵⁾。その後の情報では、国家予算の関係で実施がおくれることになり、現在は小規模の研究を進めているもようである。

アメリカ空軍が航空機補助電源として開発を進めていて、試作機として、表5の仕様のものをウェスティングハウスで製作中である¹⁹⁾。

英国では SRC (Scientific Research Council) で、1982年までに60 MVA 機の完成をめざす開発計画が3年以内にスタートすることになるようである²⁰⁾。

西独でも数万 KVA 機試作の計画があるらしいが詳細については未発表である。

我が国では富士電機で30 KVA 機を試作試験して、超電導機特有の諸特性をたしかめている。通産省工業技術院で、重要な開発テーマとして超電導発電機をとり上げる等、本格的な開発が始まる機運にある。

6. あとがき

超電導交流機としては米国の AV

CO 社が1965年に試作試験したものが最初のものであるが、その後表4に示すように開発が進み、将来の電力需要をまかなうための大容量発電機の理想的なものとして世界的に注目をあつめ、開発の機運も高まってきた。一方送電に関しても、超電導送電によって系統容量を大きくし、ロスを減少させる方向で調査検討が進められていて、近い将来大形プロジェクトへ発展しようとする動きがある。将来のエネルギー資源確保の立場からは原子炉や更に進んで核融合炉の必要性が認められてきているが、エネルギーや用地の有効利

写真1 MIT 2号機

写真2 テスト中の富士電機 30 KVA 機

表 5 米空軍用超電導同期発電機の仕様

容 量	連 続	1,000 KVA
	10秒間	5,000 KVA
相 数		3
周 波 数		400 Hz
電 圧		5,000 V
力 率		遅れ 0.8
回 転 数		12,000 rpm
ロータ外径		25 cm
界磁直線部長		27 cm
界磁巻線全長		40 cm
界磁と電機子ギャップ		2.5 cm
同期リアクタンス		0.35/unit

用の立場からは、超電導を応用した発電電が考えられるべきで、大電力供給システムの一環として超電導発電機の意義はますます大きなものになるであろう。

参 考 文 献

- 1) C. J. Mole, W. C. Brenner and H. E. Haller, III : Proc. IEEE 61 '73 95
- 2) J. L. Kirtley, Jr., J. L. Smith, Jr., P. Thullen, and H. H. Woodson: Proc. IEEE 61 '73 112
- 3) A. Bejan, T. A. Keim, J. L. Kirtley, Jr., J. L. Smith, Jr., P. Thullen and G. L. Wilson : Proc. CEC Atlanta, August '73 Paper M-3
- 4) 藤野, 石原, 高橋, 遠藤 : 富士時報 46 '73 49
- 5) Z. J. J. Stekly and G. Y. Robinson, Jr. : Preprint ICEC 4 Eindhoven, May '72
- 6) M. J. Jefferies, E. E. Gibbs, G. R. Fox, C. H. Holley and D. M. Willyoung: Preprint IEEE PES Winter Meeting New York, January '73 T 73 252-4
- 7) P. Thullen, J. L. Smith, Jr., and J. L. Kirtley, Jr. : Progress Report IEEE Research Project R. P. -92 Sept. '72
- 8) J. A. Wolf, Jr. : Transac. ASME, J. Appl. Mech. Paper No. 68-WA/APM-25
- 9) H. H. Woodson, J. L. Smith, Jr., P. Thullen, J. L. Kirtley : IEEE Transaction Paper No. 70 TP529-PWR
- 10) J. L. Kirtley, Jr. : IEEE Conference Paper No. 71 CP 155-PWR
- 11) G. Müller, W. Seidel and M. Endig: Elektrische 25 '71 325
- 12) P. Thullen, J. C. Dudley, D. L. Greene, J. L. Smith, Jr. H. H. Woodson : IEEE Transaction Paper No. 70 TP 528-PWR
- 13) P. Thullen, J. L. Smith, Jr., and H. H. Woodson: IEEE Conference Paper No. 70 CP 211-PWR
- 14) H. H. Woodson, Z. J. J. Stekly, and E. Halas: IEEE Transac. Power Apparatus and Systems, PAS-85 '66 264
- 15) A. D. Appleton and A. F. Anderson : Proc. Appl. Superconductivity Conf. Annapolis, May 1972 136
- 16) E. F. McCann II and C. J. Mole : AIAA Paper No. 72-590 presented at AIAA/SNAME/USN Advanced Marine Vehicles Meeting, Annapolis July 1972
- 17) C. J. Overhauser and H. R. Kinner: Advanced Cryogenic Engineering Vol. 13 '67 161
- 18) 木村 : 低温工学 8, '73 34
- 19) C. J. Mole, J. H. Parker, Jr. and L. R. Lowry: Paper under Contract F33615-71-C-1591
- 20) Electrical Review 24 '72 701