解 説

実用超電導発電機の展望

牧 直 樹*・高 橋 典 義*

佐 藤 新太郎**・古 山 昌 之***

* (株)日立製作所日立研究所 茨城県日立市久慈町4026

** (株)日立製作所機械研究所 茨城県土浦市神立町502

*** (株)日立製作所日立工場 茨城県日立市幸町3-1-1

(1976年11月15日受理)

Practical superconducting generators

Naoki MAKI*, Noriyoshi TAKAHASHI*, Shintaro SATO**
and Mashayuki FURUYAMA**** Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
4026 Kuji-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken** Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
502 Kandatsu-cho, Tsuchiura-shi, Ibaraki-ken*** Hitachi Work, Hitachi, Ltd.
3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken

(Received Nov. 15, 1976)

Synopsis :

A superconducting synchronous generator consists of superconducting field winding, non-magnetic multi-tubular rotor and airgap armature winding. The superconducting generator has the benefits of $1/2 \sim 2/3$ weight reduction and $0.5 \sim 0.8\%$ efficiency improvement compared with the conventional generator, and the economic crossover between them appears to be $0.5 \sim 1.5$ GVA.

The problems discussed are (1) property, cooling and support of superconducting field winding, (2) thermal contraction of cryogenic torque tube, (3) tubular damper configuration, (4) seal of helium transfer coupling, (5) transposition, cooling and support of airgap armature winding, (6) vibration of the rotor.

1. 緒 言

超電導発電機には(1)直流機, (2)単極機, (3)同期機が考えられるが, 大容量機としては回転超電導界磁形同期発電機にしばられ, 最近ではこの方式に集中して開発が進められている。そこで, ここではこの超電導発電機に限定して述べる。

現在の火力発電および原子力発電に使用されるタービン発電機の回転子は水素ガスあるいは水により冷却

されているが, 液体ヘリウムで冷却される超電導界磁巻線を用いると大幅な寸法, 重量低減と効率向上が期待できる。例えば, 1 GVA 程度の大容量機になると重量は $1/3$ 程度になり, 効率は $0.5 \sim 0.8\%$ 向上すると試算されている¹⁾²⁾。

この超電導発電機(回転超電導界磁形同期発電機)は1969年に MIT(米国)が45kVA機³⁾(堅形)を製作したのが最初である。その後, 1972年には MIT(米国)の2 MVA機⁴⁾, WH(米国)の5 MVA機⁵⁾⁶⁾が

相ついで完成して実用化への糸口が開かれ、開発気運が急速に盛り上がった。現在、米国をはじめソ連、仏国、独国、英国、スイス、日本など世界各国で 0.5～3GVA 機の概念設計およびそのコンポーネント開発が進められている。

この超電導発電機は従来発電機の開発軌道にあるものの、極低温技術の導入や多重円筒回転子の採用など従来技術とかなり異なる特徴をもっている。さらに、従来発電機よりもコスト的に有利になるのは 0.5～2 GVA の大容量機であるといわれている¹⁾。そこで、本稿は大容量機の観点にたつて実用超電導発電機

の特徴と開発問題点について解説する。

2. 超電導発電機の特徴

2.1 基本構造

超電導発電機の基本構造の一例を図 1 に、その構成要素の特徴と機能を表 1 に示す。発電機構成要素の冷却、支持法が異なれば構造も幾分変わってくるが、所要機能から定まる基本構成はほぼ同じである。回転子は主に超電導界磁巻線、それを支持する極低温円筒トルクチューブ、回転子にヘリウムを供給および排出する給排装置、電機子反作用交流磁束から超電導界磁巻

図 1 超電導発電機の基本構造

表 1 超電導発電機構成要素の特徴と機能

No.	構成要素	特徴	機能
1	トルクチューブ	極低温円筒体	トルク伝達と軸からの熱侵入防止
2	界磁巻線	超電導コイル	高界磁磁束密度の発生
3	内側ダンパ	極低電気抵抗円筒体	低周波電磁シールドと輻射熱シールド
4	外側ダンパ	低電気抵抗円筒体	高周波電磁シールドと電気ダンパ
5	電流リード	編組銅線	スリップリングと界磁巻線間の直流電流通電
6	ヘリウム給排装置	回転静止結合構造	冷凍機と界磁巻線間のヘリウム給排送
7	真空層	$10^{-4} \sim 10^{-5}$ Torr	真空断熱
8	電機子巻線	エアギャップ巻線	高エネルギー密度の電力発生
9	固定子鉄心	積層鋼板	ギャップ磁束密度の増大と外部磁気シールド
10	励磁電源	定電流電源	界磁巻線への直流電流供給
11	冷凍機	50～200 l/h (0.5～1.5GVA 機に対して)	排出ヘリウムガスから供給用液体ヘリウムの製造

線を電磁的にシールドするダンパから構成される。他方、固定子は主に高ギャップ磁束密度を許容するエアギャップ電機子巻線および固定子鉄心から構成される。そのほか、超電導界磁巻線冷却のための冷凍機および超電導界磁巻線に直流電流を給電する励磁電源が

設けられる。また、熱侵入防止の点からトルクチューブおよびダンパは円筒構造となるので、回転子は多重円筒体を形成し各円筒体間には真空層が設けられる。

2.2 超電導発電機と従来機の比較

超電導発電機と従来機の性能比較を図2に示す。超

図 2 超電導発電機と従来機の性能比較 (2 極機)

表 2 各社の大容量超電導発電機と従来機の性能、経済性比較

No.	メーカ 項 目	MIT ⁷⁾ (米 国)	WH ⁸⁾ (米 国)	GE ⁹⁾ (米 国)		GEC-EE ¹⁰⁾ (英 国)	EdF - アールス トム ¹¹⁾ (仏 国)	KWU-シーメ ンス ¹²⁾¹³⁾ (独 国)
1	発電機容量 (GVA)	1.0	0.64	2.0		0.66	1.2	3.0
2	回 転 数 (rpm)	3,600	3,600	3,600	1,800	3,000	1,500	3,000
3	回転子外径 (p. u.)	0.8	0.9	1.0	0.86	—	0.8	—
4	固定子外径 (p. u.)	0.9	1.0	0.97	0.94	—	0.8	—
5	軸受間長さ (p. u.)	0.5	0.53	0.5	0.42	—	0.63	—
6	回転子重量 (p. u.)	0.25	0.30	—	—	—	—	—
7	発電機重量 (p. u.)	0.3	0.37	0.3	0.3	—	0.4	0.4
8	効率向上 (%)	0.6	0.8	0.5	0.3	0.6	0.3	0.25
9	経済性 クロスポイント (GVA)	NBS (National Bureau of Standards. 米国) の調査では { 2 極機: 0.8~1.3 GVA { 4 極機: 1.2~1.8 GVA				2 極機: ≈0.5 GVA	—	2 極機: 0.75 GVA 以上 4 極機: 1.5 GVA 以上

(注) MIT : Massachusetts Institute of Technology, WH : Westinghouse Electric Corporation, GE : General Electric Company, GEC-EE : General Electric Co.Ltd-English Electric Company, EdF : Electricite de France, KWU : Kraftwerk Union

電導発電機は超電導界磁巻線、非磁性円筒回転子を用いるために寸法、重量減少と効率向上に基づくコスト低減が期待できる。他方、構造の複雑化、高級材料および冷凍機の使用などによりコストが増加する。以上より超電導発電機と従来機の経済性クロスポイントは単機容量0.5~1.5 GVA となり、これより大容量になると超電導発電機が有利であるといわれている。

表2は各社の大容量超電導発電機概念設計例と経済性について従来機と比較して示したものである。超電導発電機の寸法、重量は従来機に対する相対値で示している。経済性比較には効率向上、冷凍機の費用は含むが、開発費、輸送費および量産化の影響は含めずかつ現時点での比較を示す。

図2、表2の結果をまとめて超電導発電機と従来機を比較すると次のようになる。

- (1) 回転子外径、固定子外径は0.8~1.0、軸長は0.4~0.6と超電導発電機が小形化される。
- (2) 回転子重量は1/4~1/3、発電機重量は1/3~1/2に低減される。
- (3) 回転子銅損がほぼ零、機械損が約1/3に低減することにより全損失は約1/2に減少し、効率は2極機で0.5~0.8%、4極機で0.3~0.5%向上

する。

- (4) 非磁性回転子、エアギャップ電機子巻線を用いるために同期リアクタンスは約1/4に減少し、電圧変動率が1/2に低減する。さらに、定態安定度の指標となる同期化力は約2.5倍、過渡安定度の指標となる臨界事故除去時間は約1.5倍となり、それぞれ安定度の増加が期待できる。
- (5) 経済性クロスポイントは2極機で0.5~1.5 GVA、4極機で1.5 GVA程度と考えられており、その範囲が広いのは使用する材料および製作技術に大きく影響されるためである。

3. 実用超電導発電機の開発問題点

図3に示すように超電導発電機の構造上の特徴に基づいて多くの開発問題点が発生するので、その個々の問題点について次に述べる。

3.1 超電導コイル

超電導発電機用超電導コイルの性能として次項が要求される。

- (1) 最大磁束密度は5 T程度であり、コイル導体電流密度は高い程望ましい。
- (2) 巻線作業が容易なこと。

図3 超電導発電機の構造上の特徴と開発問題点

表 3 各社の超電導界磁巻線設計例

メーカ 項目	MIT ⁽⁴⁾⁽¹⁴⁾ (米 国)	WH ⁽⁵⁾⁽⁶⁾ (米 国)	GE ⁽⁵⁾ (米 国)	GEC-EE ⁽¹⁰⁾ (英 国)	ERA ⁽¹⁶⁾ (英 国)	三菱・富士 ⁽¹⁷⁾ (日 本)	日立 ⁽¹⁸⁾ (日 本)
発電機容量 (MVA)	2	5 (4極) 1973	5 (2極) 1972	660	500	6	50
製作年度	1973	1973	1972	1973 (概念設計)	1974 (概念設計)	製 作 中	製作計画中
界磁電流 (A)	800	230	325	2,640	430	730	800
導体電流密度 (A/mm ²)	125	150	155	—	250	143	160
巻線全電流密度 (A/mm ²)	78	—	—	—	50	90	100
最大磁束密度 (T)	2.5	4.0	5.0	—	4.0	3.5	4.3
起磁電力 (kAT/極)	530	276	—	—	1,040	381	800
蓄積エネルギー (kJ)	56	30	—	—	5,200	80	930
線材組成	Nb-48Ti	Nb-Ti	Nb-50Ti	Nb-44Ti	Nb-Ti	Nb-Ti-Ta	Nb-Ti-Zr
コイル断面寸法 (mm)	1.27×3.18	1.0×1.5	1.59×3.18	3×5	1.5φ	1.6×3.2	1.9×2.7
素線寸法 (mm)	0.254φ×24本	0.025φ×1,350本	0.025φ×2,136本	0.05φ×1,525本	0.043φ×361本	0.053φ×394本	0.0407φ×640本
銅比	2.6	2.0	3.8	4.0	2.0	5.0	4.5
短尺特性 (at 4.2k)	1000 A, 5.0 T	850 A, 4.0 T	750 A, 7.6 T	—	—	1050 A, 4.0 T	1080 A, 6.2 T

(3) 系統事故時の電力動揺に基づいて 1~2 Hz の低周波磁束が超電導コイル導体に侵入し、界磁電流がダンパ仕様に応じて最大 3~15%変動する。この磁束の変動および回転に伴う機械的振動に対して超電導が安定に保たれること。

まず、超電導線材として合金系 (Nb-Ti, Nb-Ti-Zr など) と化合物系 (Nb₃Sn など) が考えられるが、上記(1), (2)の条件を考慮して現在ではもっぱら合金系線材が使用されている。

次に、超電導界磁巻線は巻線の動きを防止する点からエポキシ含浸されるので、上記(3)の条件を考慮して素線径を小さくかつツイストすることにより本質的安定化をはかる。

各社の超電導界磁巻線設計例を表3に示す。巻線全電流密度は 100 A/mm² 程度、最大磁束密度は 4~6 T、銅比は 2~5、素線径は 25~50 μm、フィラメント数は 400~2,000 が考えられている。

3.2 界磁巻線の冷却と支持法

超電導コイルにとって界磁巻線の冷却能力が大きくかつ信頼性が高い冷却法の開発は重要である。また、回転子振動にとって界磁巻線の遠心力、電磁力、熱収縮力およびトルクに対して変位しない強固な支持法の開発は非常に重要な課題である。

界磁巻線の冷却法を表4に示す。当初は循環冷却方式による強制対流冷却法が考えられたが、最近浸漬冷却方式（ヘリウム容器を内蔵）による自然対流冷却法が検討されはじめた。循環冷却方式の場合はヘリウム給排パイプが回転子内を縦横に走るの、これが回転子の不安定振動を助長するおそれがある。他方、浸漬冷却方式の場合は内蔵液体が危険速度以上において不安定振動を発生させるので、その対策が必要になる。

界磁巻線の支持法を表5に示す。界磁巻線の支持法としてレーストラック形巻線をトルクチューブ内表面にボルトにて支持する方法とくら形巻線をトルクチューブ外表面にバインドにて支持する方法が考えられる。この界磁巻線支持法の選択は巻線作業の容易さ、界磁磁束の有効利用のほかに界磁巻線の動き防止、トルク伝達を考慮して決められる。

表 4 界磁巻線の冷却法

項目 \ 方式		循環冷却方式	浸漬冷却方式
構 造
特 徴	①冷却法	強制対流	自然対流
	②内蔵冷媒容器	無	有
	③巻線部温度	高 (≈4.8K)	低 (≈4.3K)
	④冷却能力	小	大
	⑤振動への影響		
	冷 媒	小	大
	給排パイプ	大	小

表 5 界磁巻線の支持法

項目 \ 方式		ボルト支持	バインド支持
構 造
特 徴	①界磁巻線位置	トルクチューブ内表面	トルクチューブ外表面
	②界磁巻線形状	レーストラック形	くら形
	③巻線容易さ	大	中
	④磁束の有効利用	小	大

3.3 トルクチューブの熱収縮対策

トルクチューブは静止時の常温 (300K) から運転時の極低温 (4.2K) へと温度変化するに対して、トルクチューブと同心状に接続される外側ダンパは常に常温で使用される。したがって、トルクチューブは静止時の常温から運転中の極低温になるにつれて生ずる熱収縮 (非磁性鋼の場合約 0.3%) を吸収させる対策が必要になる。

表 6 は各種トルクチューブ熱収縮吸収法を示す。ベロー方式は熱収縮の吸収が容易に行なえるが、径方向

剛性が弱く不安定振動が最も心配される。バネ方式は不安定振動が生じ難いが、バネ部に熱収縮応力が集中して非常に大きい応力が発生する欠点がある。バネの代りにスポークを用いる方法も考えられるが、バネの場合と同様にスポークに非常に大きい応力が発生する。スライド方式は不安定振動の発生をおさえて熱収縮に対してトルクチューブを滑らせようとするものであり、摺動部の構造および隙間をいかに選ぶかが重要になる。2 段ベ어링方式はダンパの支持とトルクチューブの支持を分離するものであり、不安定振動の悪影響なしにトルクチューブの熱収縮を吸収することができる。ただ、この方式はベ어링部の構造が複雑になり、回転子の寸法が増大する欠点がある。

以上の各方式のなかでどの方式がよいかは実測検討により決める問題である。

3.4 ダンパ構造

外側ダンパ、内側ダンパには定格運転時に遠心応力が発生するが、電力系統の短絡事故時には過大の電磁

力 (2 極機の場合ダンパを楕円形に変形させようとする) が遠心力に重畳して加わる。したがって、円筒ダンパとしては低電気抵抗でかつ機械強度の高いことが要求される。そこで、外側および内側の円筒ダンパ構造として図 4 に示すように次の 3 方式が考えられる。

- (1) 低電気抵抗で高機械強度をもつ単一材質
- (2) 低電気抵抗ダンパに高機械強度サポートを接合補強した 2 層複合ダンパ
- (3) 低電気抵抗ダンパの両側に高機械強度サポートを接合補強したサンドイッチ状 3 層複合ダンパ

表 6 トルクチューブ熱収縮吸収法

方式		(A) ベロー方式	(B) バネ方式	(C) スライド方式	(D) 2段ベアリング方式
特 徴					
構 造		ベロー 支え トルク チューブ ベアリング ダンパ	バネ トルク チューブ ベアリング ダンパ	スライド トルク チューブ ベアリング ダンパ	ベアリング トルク チューブ ベアリング ダンパ
特 徴	①発生応力	小	大	中	小
	②不安定振動	大	小	中	小
	③回転寸法	小	小	小	大

図 4 各種ダンパ構成

まず、単一材質（例えば銅合金かアルミ合金）はダンパとしては構造が簡単で理想的だが、機械強度が低いことから実現が困難である。2層複合ダンパは接合法の開発が必要になるとともに、低電気抵抗ダンパ部（無酸素銅あるいは銅合金）にもかなりの応力が発生することを考慮して材質を選定せねばならない。サンドイッチ状3層複合ダンパは接合が容易になるとともに許容応力も高くとれる利点はあるが、高電気抵抗のダンパサポートにもうず電流損が発生することになる。

3.5 ヘリウム給排装置のシール法

ヘリウム給排装置において回転子への供給液体ヘリウム、排出ヘリウムガスおよび軸受冷却用オイル相互間の回転シール装置の開発が必要である。ヘリウム給排装置のシール機構に要求

される性能として次項が挙げられる。

- (1) シール効果の大きいこと
- (2) 冷媒（ヘリウム）が汚染されないこと
- (3) 長寿命であること

上記要件に対して図5に示すような各種シール法が考えられている。(A)、(B)方式は機械的接触をもつために冷媒汚染と長寿命化の対策が必要になる。(C)方式は冷媒汚染の心配がある。(D)の磁性流体シール

(1) ヘリウム給排装置

(2) 各種シール装置

図 5 ヘリウム給排装置とシール法

方式は上記3要件を満足するものとして最もよく検討されているが、シール径が大きくなったときのシール性能維持の実測確認が必要であろう。

3.6 回転子の振動特性

超電導回転子は液体ヘリウムを内蔵した多重円筒回転子となるので、多重円筒回転子の危険速度および内蔵液体が振動特性に及ぼす影響について述べる。

まず、定格運転は危険速度以上で行なわれることが予想される。そこで、危険速度を増加させるためのばね定数増加策および危険速度通過を容易にさせるダンピング定数の最適選定が必要になる。

次に、液体を内蔵した回転子が自励的な不安定ふれ回り運動を発生させる回転速度領域および危険速度の

計算結果の一例を図6に示す¹⁹⁾。計算にあたっては1自由度系横型回転子にモデル化し²⁰⁾、これが楕円のふれ回り運動を行なうと考える。図6において危険速度以上になると横、縦方向の振動に対応する不安定領域が現われる。そこで、この不安定振動の発生を防ぐ遮へい板等のそう入およびダンピング定数の最適選定が必要になる。

3.7 電機子巻線の冷却と支持法

電機子巻線はエアギャップ（空心）巻線になるためにうず電流損と循環電流損低減のための転位法、占積率と電流密度の向上をはかった冷却法と支持法の開発が必要になる。

エアギャップ電機子巻線法として図7に示す3方式

が考えられる。ダイヤモンド巻は従来方式であり、占積率増加のために胴部2層（あるいは1層）に対して端部は2倍の4層（あるいは2層）に巻かれる。スキュー巻²¹⁾はコイル両端間を180°程度スキュー（傾斜）する巻線法であり、端部構造が非常に簡単になる利点とともに巻線係数が減少する欠点をもつ。リング巻線²²⁾は環状固定子鉄心に電機子巻線をソレノイド状に巻く方式であり、巻線の支持が容易となり高圧化が可能となる利点とともに外部漏れ磁束の磁気シールド手段が必要となる欠点をもつ。上記3方式はそれぞれ固有の特徴をもっているが、大容量機用としてはダイヤモンド巻が有力と考えられている。

次に、うず電流損と循環電流損を減少させる転位法について見ると、一般に2重転位法が用いられる。これは1φ程度の素線を6, 7本束ねてツイストし、さらにこうして構成した導体に従来一般に用いられるレーベル転位を施すものである。

エアギャップ電機子巻線の支持法を表7に示す。巻線支持法、トルク伝達法ともに3方

図6 液体内蔵回転子の不安定振動特性
($\lambda=1.75$, $\mu=0.005$)

図7 各種電機子巻線法

表 7 電機子巻線の支持法

巻線支持法	(A) モールド支持方式	(B) バインド支持方式	(C) 絶縁ティース支持方式

特 徴	①部分的修理が困難 ②巻線の固定が強い	①部分的修理が困難 ②巻線の固定が強い	①部分的修理が容易 ②巻線の固定がやや弱い
トルク伝達法	(A) 端部固定方式	(B) キ ー 方 式	(C) 角形鉄心方式

特 徴	①伝達トルクが小さい ②磁束分布が均一	①伝達トルクが大きい ②磁束分布が不均一	①伝達トルクが大きい ②磁束分布が不均一

図 8 電機子巻線の冷却法

性能の高い水を使用する点はいいが、間接冷却による冷却効果の低下および金属パイプにうず電流損が発生する問題がある。

表 8 は各社のエアギャップ電機子巻線の設計例を示すものである。電機子電流密度は直接油冷、間接水冷ともに 10 A/mm^2 前後となり、支持法から定まる占積率により巻線全電流密度は $1 \sim 3 \text{ A/mm}^2$ になる。また、巻線冷却法として MIT (米国), WH (米国), 三菱—富士は直接油冷, GE (米国), シーメンス (独 国), アルストム (仏 国), BBC (スイス),

ソ連は間接水冷を考えている。

3.8 運 転

実用超電導発電機の運転にあたって、次の開発が必要になる。

- (1) 回転子の常温から低温への一様な冷却法とバランス法の確立
- (2) 冷凍機の信頼性向上と予備冷却法の確立
- (3) 回転子内高真空度の維持とヘリウム漏れの防止
- (4) 超電導コイルのクエンチ検出と保護法の確立

式が考えられているが、それぞれに長短がありどの方式が望ましいかは実測検討結果を待って決めることになる。

電機子巻線の冷却法としては図 8 に示すように直接油冷却法と間接水冷却法が考えられる。直接油冷却法は電機子導体を油漬けにするものであり、冷却効果はいいが油漏れおよび油の純度低下を防止する対策が必要である。間接水冷却法は電機子導体間に金属パイプ（一般に非磁性ステンレス鋼が用いられる）をそう入しそこに水を通流させるものである。この方式は冷却

表 8 各社の電機子巻線設計例

メーカ 項 目	MIT ⁴⁾ (米 国)	WH ²²⁾ (米 国)	GE ¹⁵⁾ (米 国)	三菱-富士 ¹⁷⁾ (日 本)
発 電 機 容 量	2 MVA	5 MVA	20 MVA	6 MVA
巻 線 法	ダイヤモンド巻	同 左	同 左	同 左
巻 線 支 持 法	バインド 法	バインド 法	—	バインド 法
トルク伝達法	端部固定方式	キ ー 方 式	—	—
巻 線 冷 却 法	直 接 油 冷	油 冷	間 接 水 冷	直 接 油 冷
導 体 素 線 径	0.9φ	1.0φ	1.3φ	0.9φ
全 電 流 密 度	2.5A/mm ²	—	2.5A/mm ²	1.0A/mm ²
転 位 法	2 重 転 位	同 左	同 左	同 左

4. 結 言

超電導発電機は多重円筒回転子と極低温技術の導入に基づく多くの開発問題点をかかえているが、0.5~2 GVA 程度の大容量機になると大幅な重量低減と効率向上の点から従来機よりも経済性が期待できる魅力ある発電機である。本稿はこの実用超電導発電機の基本構造、従来機との比較ならびにコンポーネントの開発問題点について例示した。

現在、米国を中心に世界各国で 0.5~3 GVA 機 の概念設計とそのコンポーネント開発ならびに数 MVA 試作機の製作と試験を通して、超電導発電機の開発研究が鋭意進められている。今後、数十 MVA 試作機さらに数百 MVA 実証機の製作へと順次ステップアップし、これら実用化検討を経て最終的に大容量実用機に結びつくと予想される。

参 考 文 献

1) B.W.Birmingham et al: ICEC-5 (1974) 157
2) T.M.Flynn et al: Cryogenic Engineering Conference (1973) M-4
3) J.Papamarcos: Power Engineering (1975) 30
4) J.L.Kirtley et al: IEEE PAS-4 (1973) 1282
5) J.K.Hulm et al: IEEE PES Winter Meeting (1973) C 73 259-9
6) J.H.Parker et al: IEEE Transactions on

Magnetics (1975) 640
7) J.L.Kirtley, M.Furuyama: IEEE PES Winter Meeting (1975) T 75 050-0
8) C.J.Mole et al: American Power Conference (1973)
9) M.J.Jefferies et al: IEEE PES Winter Meeting (1973) T-73 252-4
10) H.O.Lorch: PIEE (1973) 221
11) J.Carlier, J.L.Sabria: Entropie N°56 (1974) 57
12) G.Bogner, D.Kullman: Siemens Forschung. Entwickl (1976) 10
13) P.Komarek: Cryogenics (1976) 134
14) C.Kingsley et al: IEEE Transactions PAS-95 No.3 (1976)
15) G.Gamble et al: Joint Power Generation Conference (1975)
16) A Power Engineering Division Report of ERA: ERA 73-5101 (1974)
17) 岩本, 藤野: 低温工学 Vol.10 No.5 (1975)
18) 牧, 高橋, 古山: 第15回低温工学研究発表会 (1975) B 1-15
19) 高橋, 他: 第17回低温工学研究発表会 (1976) A 3-8
20) J.A.Wolf: J. Appl. Mech (1968) 676
21) 米国特許第3761752号
22) M.M. Steeves, J.L. Kirtley: IEEE PES Winter Meeting (1974) T-74 220-0
23) T.J.Fagan et al: IEEE PES Winter Meeting (1973) C 73 255-7