超 電 導 整 流 装 置

日 高 一 彦・関 根 武 弘
宮 田 博・品 田 耕一郎

電気試験所電力部 東京都田無市向台 5-4-1

(1968年12月20日 受理)

Superconductive Rectifier

Kazuhiko HIDAKA, Takehiro SEKINE, Hiroshi MIYATA
and Kōichiro SHINADA

Power Division, Electrotechnical Laboratory, 5-4-1 Mukodai, Tanashi City, Tokyo

(Received December 20, 1968)

The rectifier system where a small alternating current is fed into the dewar vessel, transformed and rectified into a large direct current may present a method to reduce the liquid helium vaporization during the operation of a superconducting magnet

Two kinds of superconductive rectifiers were tested. One of them has Nb Zr wires as its rectifier elements, whose S-N transition for rectifier operation is caused by pulse heating. The other is a contactor type rectifier with Indium-Tin contacts which are also superconductive.

The S-N transition type rectifier showed more vaporization of liquid helium than the counter flow leads in 100 mV operation, but this vaporization may be reduced comparable, if the design is optimized.

The contactor type rectifier was tested in the output of 500 mV and 150 A, and showed much less vaporization, which will mean the possibility of the superconductive rectifier of several volts and several thousand amperes.

1. 緒 言

超電導マグネット用直流電源は、普通室温部におかれ、入力導線を通じて液体ヘリウム中に浸たされた超電導マグネットに電流を供給する。このため、入力導線は室温部と超低温部を結ぶ熱の流入路を形成し、かつ導線自身のジュール発熱もあるため、液体ヘリウムを気化消耗させる。一方大形マグネットにおいては、所要のアンペア・ターンを得るのに、ターン数を増大するよりはアンペアを増大する方が、超電導体の特性上から有利となることが判明した結果、次第に大電流（数千アンペア）が用いられる傾向にある。したがって、入力導線を用いることによる液体ヘリウムの消耗

が問題視されることになった。

入力導線の太さに関しては、デュアビン内外の温度差による熱の流入と通電時のジュール熱を考慮すると電流の値に対応して最適の（断面積／長さ）が存在する。1959年 R. McFee¹⁾ はこの最適比を論じたが、流入熱およびジュール熱のすべてを、液体ヘリウムの気化潜熱に対応させたため、最適入力導線を用いてもばく大な液体ヘリウムを消費することを示した。その後、気化したヘリウムが入力導線を有効に冷却するように考慮した Counter Flow Lead²⁾ が開発され、AVCO 社の定格 500 A のものでは、500 A 通電時一對の入力導線当りの液体ヘリウムの気化量が 2.0 (立／時) 程度となっている。これは McFee の最適入力導

線の酸化量の約 $1/20$ である。Counter Flow Lead の出現により、事態はかなり改善されたが、大形超電導マグネットを実用する場合には、液体ヘリウム消費量のさらに少ない電源方式が要求されるであろう。

液体ヘリウムの消費量を少なくするアイデアとしては、(1)発電部を液体ヘリウム中において、入力導線を不用にする Flux Pump による直流発電機と、(2)液体ヘリウム中に超電導変圧器と整流器をおき、外部から細い導線を通じて交流小電流を供給し、内部で直流大電流に変換する交流整流方式とがある。Flux Pump は大電流には比較的良好に適應する反面、出力電圧が低く 2 mV 程度であり、交流整流方式では、これより高出力電圧のものが得られるが、従来発表されている GE 社のものでは、20 mV 程度が標準のようである。これらは数ヘンリー、数千アンペア級の超電導マグネットを充電するには、出力電圧が低すぎるので、むしろ従来のように外部より入力導線を用いてマグネットを充電し、永久電流モードとした後、入力導線を機械的に取り外すなどの操作を加えてヘリウム酸化量の減少をはかるとともに、永久電流の減衰補償用として、上述のいずれかの方式を用いようとする考え方が行なわれるようになった。しかし、「出力電圧がもっと高く（できれば数 V 程度）、しかも数千アンペア通電時の液体ヘリウム消費量が、Counter Flow Lead のそれより少ない電源方式」の要求は、上述の機械的取り外し操作の繁雑さを考えると依然として残る問題である。

我々は交流整流方式において、整流要素として従来

使用されている Nb の代りに、Nb Zr（常電導抵抗が不純物を含む Nb の数十倍）を用い、超電導→常電導転移をパルスの加熱で行なわせる方式（従来は磁界を用いている）で出力電圧数百 mV、出力電流 200 A のものを試作した。液体ヘリウム消費量は、現在の段階では Counter Flow Lead より大きいのが、諸元を最適化すれば、この程度の出力電圧ではほぼ同等のものが得られる見込みである。また整流要素として、インジウム錫を接点とする機械的コンタクターを用いるものを試作したが、この方式では出力電圧数 V のものが容易に得られ、かつ液体ヘリウム消費量も格段に少ないので、きわめて有望と思われる。

2. SN 転移形整流装置

2.1 装置

第 1 図は試作した整流装置の概念図である。装置は矩形波電源、超電導変圧器、超電導整流器、同期信号発生装置よりなり、マグネットコイルに電流を供給する。矩形波電源は SCR を使用した三相ブリッジコンバータ 2 組よりなり、一方が整流器動作のとき他方はインバータ動作となり、これを交互に交換して、超電導変圧器一次巻線に低周波矩形波電圧（零電圧期間をもつ）を供給する。超電導変圧器は一次巻線の小電流を二次巻線の大電流に変換する。超電導整流器（単相ブリッジ）は、矩形波電源に同期したヒータパルスを受けて、整流素子（Nb Zr 線）が SN 転移を生じ、抵抗を生じた素子は矩形波電源の電圧（整流器の逆方向

Fig. 1 Schematic diagram of superconductive rectifier.

電圧)によって常電導状態が維持される。超電導変圧器の二次側電圧が、矩形波電源の周期に従って零となると、常電導になっている素子は超電導に復帰し、整流素子の全部が超電導状態となり、コイルの永久電流を維持する。これらの状態をくり返すことによって整流動作が行なわれる。

同期信号発生装置の設計方針としては、(1)整流装置の出力電流が制限値以内である場合には、定電圧の矩形波を発生するようなパルス信号を出し、これに同期したヒータパルスを整流素子のN S転移の完了を待って発生する。(2)出力電流が制限値を超えると定電流制御に切換えて出力電流を制限する。(3)超電導変圧器の

鉄心が飽和すると二次電圧が降下し、一次電流が急増するのでこの現象を制御信号に利用する、などを考慮した。

仕様の概要は第1表のとうりであるが、このうち整流素子について若干触れておきたい。超電導線の一部にS N転移を起こさせると、冷却条件によって多少の影響を受けるが、極端な多層のコイル状にしないかぎり、超電導線の材質と太さによって大体定まるある一定の電流以上では常電導部が増大し、以下では常電導部が次第に消滅する。この電流を熱平衡電流と名付けている。したがって、常電導部に一定の電圧を印加すれば、 $(\text{印加電圧}) = (\text{常電導部抵抗}) \times (\text{熱平衡電$

Fig. 2 Rectangular wave generator, control unit, and dewar vessel.

Fig. 3 Inner part of dewar vessel

Table 1. Rating of superconductive rectifier

Rectangular wave source	20 V, 10 A, 0.2~40 sec/cycle	
Superconductive transformer	1 ry	3~15 V, 6.6 A
	2 ry	100~500 mV, 200 A
Rectifier element 2×20 milφ Nb Zr wire length 20 cm	inverse current	7 A
	normal state length	4 cm/150 mV
	N→S transition time after applied voltage becomes zero	0.5 sec
Heating energy	0.02 (J/pulse)	
Superconducting coil (load)	0.4 H, 200 A	

流)を満足する長さの常電導部が維持される。この長さは、超電導線の太さにはほぼ無関係に印加電圧に比例し、Nb 25% Zr では 100 mV 当り約 2.7 cm となる。したがって整流素子として用いる Nb Zr 線の長さはきわめて短いものですむ反面、整流素子の逆方向電流は、材質と素線直径ではほぼ定まってしまう。試作した整流素子では、太い素線 (20 mil ϕ) を使用したため、後に述べるように損失がかなり大きなものとなった。一方 GE 社などでは、材質として不純物を含んだ Nb を用い、S-N 転移を印加磁界で起こさせる方式を用いているが、Nb では、常電導時の固有抵抗は不純物の濃度で大幅に異なるけれども、Nb Zr の数十分の程度であり、整流素子の長さは、所要抵抗値を考慮するとかなり長いものとなる反面、長さの増大により性能を向上できる利点がある。しかし、現状では長さによる制限のため、整流器出力電圧が 20 mV 程度に止まっているようであって、我々の試作した装置の出力電圧 (設計 500 mV, 試用 150 mV) の方がかなり高い。

2.2 実験例

第 4 図は実験例を示すオシログラムである。一次電圧 3 V, 二次電圧 100 mV, 矩形波の周期約 40 秒で、超電導コイル (0.4 H) を充電し、540 秒後に 100 A に達し、その後電流を減じ、さらに 300 秒後に 20 A に減じている。コイル電圧は 100 mV が約 15 秒継続した後零電圧となり、5 秒後再び 100 mV になることを繰り返している。超電導変圧器の鉄心の飽和による二次電

圧降下の際、既述の定電流制御が行なわれている様子が観取できる。

3. コンタクター形整流装置

3.1 装置

第 1 図の装置において、超電導整流器をインジウム錫を接点とするコンタクターに代えたものである。第 5 図にコンタクターの構造図を示す。図には 2 個のプランジャーによって動作する 4 個の接触子を示してあるが、各接触子はそれぞれ並列接続の 2 個の接点

Fig. 5 Contactor type superconductive rectifier.

Fig. 4 Charging process of S-N transition type rectifier.

(インジウム錫—臨界温度7.2°Kの超電導体)を持っている。接触子はスプリングで常時閉路状態(図示の状態)にあり、励磁コイルを励磁した場合に、プランジャーの圧力で開路する。閉路時の接触子の圧力は、接触子当り約1 kg、接点の大きさは6 mmφの円形である。励磁コイルは10 milφ Nb Zr 線(Cu plating) 900ターンよりなり、励磁電流として1.2 Aを要する。

3.2 実験例

第6図は実験例を示すオシログラムであり、二次電圧333 mV 矩形波の周期約11.2秒で既述のコイルを充電し、160 Aに達した場合の特性を示している。接触子の接触抵抗を推定するため永久電流モードとした後、その減衰を測定したが、1時間程度では減衰が認められず、電圧降下より推定すると、接触抵抗は0.05 $\mu\Omega$ 程度と推定される。

4. 液体ヘリウムの気化

液体ヘリウム中に発熱体がある場合の気化量を n (立/時) とすると、

$$n = W / C_L \text{ (立/時)} \quad (1)$$

ただし W : 発熱体の電力 (ワット)

C_L : 液体ヘリウムの気化潜熱
= 0.723 (ワット時/立)

入力導線においては、気化の原因としてジュール熱

の他に、デュアびん内外の温度差による流入熱がある一方、冷却作用として気化潜熱の他に気化したヘリウムの接触効果がある。H. Sobol³⁾,あるいはJ. Williams⁴⁾によれば、気化ヘリウムの冷却効果を完全に利用し、導線の(太さ/長さ)を最適にした場合の気化量は、電流に比例し次式で表わされる。

$$n_{opt} = C \cdot I_{opt} \quad (2)$$

ただし、 C は入力導線の材質、熱伝導率などによって定まる定数であり、 I_{opt} は入力導線の(太さ/長さ)が最適値となる電流である。一方 AVCO 社の Cryogenic Power Lead の特性²⁾を参照すれば、近似的に次式を導びくことのできる。

$$n = A(I_{opt}) + B(I_{opt}) I^2 \quad (3)$$

(3)式において、 $I \rightarrow I_{opt}$ とすれば $n \rightarrow n_{opt}$ となり、(2)式と恒等的に等しくなるべきであることから、(3)式は(4)式ようになる。

$$n = A_0 I_{opt} + B_0 I^2 / I_{opt} \quad (4)$$

ただし、 A_0 , B_0 は C と同じ要素で定まる定数で、AVCO 社のデータによれば、

$$A_0 = 1.28 \times 10^{-3} \text{ (立/アンペア/時)}$$

$$B_0 = 1.5 \times 10^{-3} \text{ (立/アンペア/時)}$$

今、電流を零から I_{max} まで T 時間かかって直線的に上昇させる場合を考え、 $I_{opt} = I_{max}$ に選び、電流上昇期間中の全気化量を N_e (立) とすれば、

Fig. 6 Charging process of contactor type rectifier.

$$N_e = \int_0^T n \, dt = (A_0 + B_0/3) I_{max} \cdot T \quad (5)$$

$$= 1.61 \times 10^{-3} I_{max} \cdot T \quad (6)$$

ただし、(6)式は AVCO 社のデータによる数値例。

4.1 整流素子の発熱による液体ヘリウムの気化

超電導変圧器の二次電圧（零電圧期間を含む矩形波）の波高値継続時間を T_a 、零電圧継続時間を T_b とすれば、整流器の電力損失は、

$$W = K \frac{E^2}{R} \frac{T_a}{T_a + T_b} \text{ (ワット)} \quad (7)$$

ただし E ；超電導変圧器の二次電圧（ボルト）、 R ；整流素子 1 本当りの抵抗（オーム）、 K ；整流回路で定まる定数、 $K=2$ 全波整流、 $K=4$ 半波整流
整流素子の逆方向電流を I_b とすれば、

$$I_b = KE / (2R) \quad (8)$$

今、インダクタンス L （ヘンリー）の超電導コイルを、 I_{max} まで T 時間かかって充電するものとし、 I_{max} に対応する蓄積エネルギーを J_{max} とすれば、

$$J_{max} = L I_{max}^2 / 2 \quad (9)$$

$$E = (L I_{max} / T) ((T_a + T_b) / T_a) \quad (10)$$

となり、(7)～(10)式より

$$n = W / C_L = \frac{J_{max}}{C_L T} \left(\frac{4 I_b}{I_{max}} \right) \quad (11)$$

$$\frac{C_L N_e}{J_{max}} = \frac{C_L n T}{J_{max}} = \frac{4 I_b}{I_{max}} \quad (12)$$

一方、(5)式より入力導線において、(12)式に対応する式として(13)式を得る。

$$\frac{C_L N_e}{J_{max}} = 2 C_L \left(A_0 + \frac{B_0}{3} \right) / E \quad (13)$$

ただし $E = L I_{max} / T \cdots \cdots$ 充電電圧

(12)および(13)式はそれぞれ、蓄積エネルギー J_{max} のコイルの充電を行なう場合の、整流器および入力導線の気化損失率（気化電力量/蓄積エネルギー）を与える。両式より能率向上のためには、整流方式では逆方向電流を小にすること、入力導線方式では充電電圧をなるべく大にすること（上限はコイルの quenching、およびここでは無視した超電導ケーブルで作られた、コイルにおける常電導線への分流効果で抑えられる）が必要であることが分かる。

4.2 試作した S-N 転移形整流装置におけるヘリウムの気化

$L = 0.4 \text{ (H)}$ 、 $I_{max} = 100 \text{ (A)}$ とすれば、 $J_{max} = 0.555 \text{ (ワット時)}$ となり、 I_b の実測値として 7 (A) を用いるものとすれば、(12)式より

$$N_e = \frac{0.555 \text{ (ワット時)}}{0.723 \text{ (ワット時/立)}} \frac{4 \times 7 \text{ (A)}}{100 \text{ (A)}} = 0.216 \text{ (立)}$$

整流装置としては、上記の他にヘリウムの気化に関係するものとして、超電導変圧器一次電流用入力導線、超電導変圧器鉄損、一次および二次捲線の交流損失が考えられるが、一次電流は小さいこと（6 A 以下）、矩形波の周波数が低いこと（ $1/40 \text{ Hz}$ ）から、これらの諸原因による気化は、整流器による気化の 1 % 以下である計算値を得た。

4.3 試作したコンタクター形整流装置におけるヘリウムの気化

気化の原因となる要素としては、コンタクター励磁用の入力導線（1.2 A 通電）、励磁用鉄心の鉄損、コンタクターの接触抵抗などが考えられるが、いずれもその損失はきわめて少なく、100 A 充電時に合計 50 mW 以下充電時間 540 秒として気化量 $1.07 \times 10^{-2} \text{ (立)}$ となる（この方式では充電電圧をさらに高くできるので、気化量を半減以下にすることが可能）。

4.4 考 察

(i) 入力導線との比較 4.2 または 4.3 項と同条件で入力導線を用いて超電導コイルを充電した場合、(12)式を用いて充電中の気化量を計算すると、 $I_{opt} = 100 \text{ (A)}$ として $N_e = 0.034 \text{ (立)}$ を得る。また AVCO 社で実際製作している 500 (A) 用のものでは、そのデータから $N_e = 0.06 \text{ (立)}$ となる。これらの数値から、試作した S-N 転移形整流装置によるヘリウムの気化は、入力導線の 3.5～6.3 倍でありかなり大きい。コンタクター形はこれに反し、入力導線の $1/6 \sim 1/3$ 程度であり、きわめて気化量が少ないことが分かる。なお、上述の比較は充電中の気化量の比較であり、入力導線においては、機械的に引き外すなどの操作をしなければ、永久電流モードにした後もかなりの気化があることは既述の通りである。

(ii) S-N 転移形整流装置の改良 既述のようにこの方式の死命を制するのは (I_b / I_{max}) であり、しかも我々の方式では I_b （整流器逆方向電流）は熱平衡電流に等しく、また、 I_{max} は当然超電導線の臨界電流以下にしなければならないから、（熱平衡電流）/（臨界電流）を小にする必要がある。第 2 表に Nb 25% Zr の太さと熱平衡電流、臨界電流（印加磁界零の短いサンプル）の関係を示す。同表に示すように今回の試作では、太さの大きい線（20 milφ）を使用し、かつ I_{max} / I_c を小に選びすぎた結果、 $I_b / I_{max} = 7 \%$ となり損失が増えたと考えられる。もし 5 milφ の素線の束を

Table 2. Characteristics of rectifier element

wire size	I_b^* (A)	I_c (A)**	$(I_b/I_c) \times 100\%$	$(I_b/I_{max}) \times 100\%$	design factor
5 mil ϕ	0.27	60	0.45%	0.9 %	$I_{max}/I_c=0.5$
10 mil ϕ	0.9	180	0.5 %	1.0 %	//
20 mil ϕ	3.9	485	0.81%	1.62%	//
	3.9	485	0.81%	7.0 %	$I_{max}/I_c=0.11$ (present design)

* Current of thermal balance
** Critical current of short sample

使用し、 $I_{max}/I_c=0.5$ 程度にできれば、損失は今回の試作の約 $1/8$ となり、入力導線による気化と同程度になる。

5. 結 言

S N 転移形整流装置では、最適設計の整流素子の実験をしていないこと、コンタクター形整流装置では、長期使用による接点の劣化の検討をしていないこと、また両者とも数千アンペア級の実験をしていないことなど問題を残しているが、液体ヘリウム消費の少ない電源方式として、前者の方式では、出力電圧 100 mV 程度で入力導線と略同程度の性能が得られる見込みであり、後者の方式では、出力電圧を数 V 程度にしても

障害が予想されないし、また液体ヘリウムの気化に関しては格段に少ないものが得られる見通しとなった。コンタクター形の装置において、機械的な動作を伴うことによる欠点が致命的にならないかぎり、この方式はきわめて有望な超電導コイル充電用電源を提供することになるであろう。

参 考 文 献

1) R. McFee: Rev. of Sc. Inst., Feb. (1959)
2) AVCO Everett Lab: Advance Tech. Data Mar. (1966)
3) H. Sobol *et al*: Rev. of Sc. Inst., Apr. (1962)
4) J. Williams: Cryogenics, Dec. (1963)