整流形フラックスポンプ

伏見光造*・山本充義・高野直行
市川隼男・仲田享司・宇都宮申八

*電気試験所 東京都田無市向台町5-4-1

東芝総合研究所 川崎市小向東芝町1

(1970年2月16日受理)

Rectifier Type Flux Pump

Kozo FUSHIMI*, Mitsuyoshi YAMAMOTO, Naoyuki TAKANO,
Hayao ICHIKAWA, Ryoji NAKADA and Shinpachi UTSUNOMIYA

*Electrotechnical Laboratory, Tanashi, Tokyo, Japan

Toshiba Research and Development Center, 1 Toshiba-cho, Komukai, Kawasaki-shi, Japan

(Received February 16, 1970)

In this paper a detailed description is given of an integrated system of a Rectifier Type Flux Pump.

Solving a most significant problem occurred during a current exchange from one cryotron to the other, a maximum current of about 1,300 Amp is obtained and produced a field strength of about 30 kG in a small superconducting coil of $L=1.7$ mH.

Current charge, discharge and persistent mode operation is very easily performed by changing a phase shift of the control unit.

There considered to be no basic problems in the small magnet systems with Flux Pump. But in applying Flux Pumps to magnet systems storing many megajoules of energy, several problems had to be solved which were not directly related to the Flux Pump itself. One and essential of these is "Reliability" of the Systems.

1. ま え が き

超電導マグネットの励磁電流の供給は普通には口出線を通じて行っているが、マグネットの大型化に伴い、電流は益々増大し実用規模のマグネットでは数千A～数万A程度になることが予想される。このような大きな電流では、外部より口出線を通じての熱流入が著しく大となるので、口出線冷却のために莫大な冷凍電力を必要とすることになる。したがって、口出線を通じて僅かな電力を供給し、これを極低温内部で次第に蓄積して大電流に変換するフラックスポンプの開発が要望される。フラックスポンプには移動磁界形、整流形などいろいろのものがあがあるが、それぞれ一長一短がある。いずれも原理は同じであるが、励磁電圧を高

くすることが比較的容易な点を考慮して本研究では後者をとり上げた。

2. 整流形フラックスポンプの原理

Fig. 1 にフラックスポンプの原理図を示した。この回路は基本的には普通に使用されている全波整流回路と同一であるが、二次回路の電気抵抗が完全に零であり、また制御整流器 C_1 , C_2 の順方向抵抗が完全に零であるなどの点で普通の全波整流回路とは異なった動作をすることになる。なお図で T は鉄心入りの変圧器で一次巻線と二次巻線の巻数比が $1,000:1$ 程度になっている。 L は負荷になる超電導マグネット (インダクタンス: L)、 L_x は二次巻線の漏洩インダクタンスである。また変圧器鉄心内の磁束は $-\Phi_s$ から $+\Phi_s$

Fig. 1 Principle of flux pump.

まで変化し得るものとする。今時間 $t < 0$ としこのとき制御整流器 C_1, C_2 ともに非導通状態にあるとする。また便宜上一次電流 $I_1(t)$ を加減して鉄心内の磁束の状態が $-\Phi_s$ にあるとする。この状態を出発点として次の順序で動作を行なう。

(i) $t=0$ に C_1 を導通状態 (ON) にし (C_2 : 非導通状態 (OFF)) I_1 を増加させる。このとき二次巻線に誘起される電圧を $e(t)$ とする。二次回路について次の方程式が成立する。

$$L_x \frac{di_1}{dt} + L \frac{di}{dt} = e, \quad i_1 = i, \quad i_2 = 0 \quad (1)$$

$0 \leq t \leq t_1$ まで積分して

$$(L_x + L) \{i_1(t) - i_1(0)\} = \int_0^t e dt = \Phi(t) - \Phi(0)$$

初期条件 $i_1(0) = 0, \Phi(0) = -\Phi_s$ を代入して

$$i_1(t) = \frac{\Phi(t) + \Phi_s}{L_x + L}$$

$t = t_1$ に鉄心内の磁束が Φ_s になったとすると、

$$i_1(t_1) = \frac{2\Phi_s}{L_x + L} (\equiv I_0 \text{ とおく}) \quad (2)$$

(ii) $t = t_1$ に C_2 を ON にし一次電流 I_1 を減らす。二次巻線の誘起電圧は $-e$ になる。したがって二次回路について次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} L_x \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_2}{dt} &= -2e \\ L_x \frac{di_1}{dt} + L \frac{di}{dt} &= -e \\ i &= i_1 + i_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

したがって

$$\left. \begin{aligned} L_x \frac{di_1}{dt} &= -e \\ L_x \frac{di_2}{dt} &= e \end{aligned} \right\}$$

t_1 から t まで積分して

$$\left. \begin{aligned} L_x \{i_1(t) - i_1(t_1)\} &= -\int_{t_1}^t e dt = -\Phi(t) + \Phi(t_1) \\ L_x \{i_2(t) - i_2(t_1)\} &= \int_{t_1}^t e dt = \Phi(t) - \Phi(t_1) \end{aligned} \right\}$$

$i_1(t_1) = I_0, i_2(t_1) = 0, \Phi(t_1) = \Phi_s$ を代入して

$$\left. \begin{aligned} L_x \{i_1(t) - I_0\} &= \Phi(t) - \Phi_s \\ L_x i_2(t) &= -\Phi(t) + \Phi_s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$t = t_2$ で $i_1 = 0$ になるとすると、

$$\left. \begin{aligned} -L_x I_0 &= \Phi(t_2) - \Phi_s \\ L_x i_2(t_2) &= -\Phi(t_2) + \Phi_s \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ゆえに $i_2(t_2) = I_0$

(iii) $t = t_2$ になった瞬間に C_1 を OFF にする。この他は (ii) の状態を保つ。二次回路についての方程式は、

$$L_x \frac{di_2}{dt} + L \frac{di}{dt} = -e, \quad i_1 = 0, \quad i = i_2 \quad (6)$$

t_2 から t まで積分して

$$(L_x + L) \{i_2(t) - i_2(t_2)\} = -\Phi(t) + \Phi(t_2)$$

式 (4) から $\Phi(t_2) = \Phi_s - L_x I_0$, および $i_2(t_2) = I_0$ を代入して

$$\begin{aligned} i_2(t_2) &= I_0 - \frac{\Phi(t)}{L_x + L} + \frac{\Phi_s}{L_x + L} - \frac{L_x}{L_x + L} I_0 \\ t = t_3 \text{ に鉄心の磁束が } -\Phi_s \text{ になるとすると,} \\ i_2(t_3) &= I_0 + \frac{2\Phi_s}{L_x + L} - \frac{L_x}{L_x + L} I_0 \\ &= 2I_0 - \frac{L_x}{L_x + L} I_0 = I_0 \left(1 + \frac{L}{L_x + L}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

(iv) $t = t_3$ に C_1, C_2 ともに ON にし一次電流を増加させる。鉄心内の磁束は $-\Phi_s$ から正の方向に変化し二次巻線には $+e$ の誘起電圧が発生する。(ii) の場合と同様にして次の方程式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} L_x \{i_1(t) - i_1(t_3)\} &= \Phi(t) - \Phi(t_3) \\ L_x \{i_2(t) - i_2(t_3)\} &= -\Phi(t) + \Phi(t_3) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$t=t_4$ に $i_2(t_4)=0$ になるとすると、これを上式に代入して $i_1(t_4)=i_2(t_3)$ を得る。

(v) $t=t_4$ の瞬間に C_2 を OFF にしその他は(iv)の状態を続ける。回路の方程式は次のようになる。

$$(L_x + L) \{i_1(t) - i_1(t_4)\} = \Phi(t) - \Phi(t_4)$$

$$\text{ゆえに } i_1(t) = i_1(t_4) + \frac{\Phi(t) - \Phi(t_4)}{L_x + L}$$

$t=t_5$ に $\Phi(t_5)=\Phi_s$ になるとすると、式(8)から

$$\left. \begin{aligned} \Phi(t_4) &= \Phi(t_3) + L_x i_1(t_4) \\ \Phi(t_3) &= -\Phi_s \\ i_1(t_4) &= I_0 \left(1 + \frac{L}{L_x + L} \right) \end{aligned} \right\} \text{を代入して}$$

$$i_1(t_5) = I_0 + \frac{L}{L_x + L} I_0 + \left(\frac{L}{L_x + L} \right)^2 I_0 \quad (9)$$

(vi) $t=t_5$ で鉄心の磁束状態は(i)の手順が完了した状態に戻ったわけで、後同じような手順をくり返す。負荷コイルの電流はどの瞬間をとっても i_1 かあるいは i_2 あるいはその両方を通じて流れていることは明らかである。 $\frac{L}{L_x + L} \equiv a$ とおくと、以上の手順を無限回くり返した後の負荷電流 i_∞ は

$$i_\infty = I_0(1 + a + a^2 + \dots)$$

$$= I_0 \frac{1}{1-a} = I_0 \frac{(L_x + L)}{L_x}$$

$$I_0 \equiv \frac{2\Phi_s}{L_x + L} \text{を代入して}$$

$$i_\infty = \frac{2\Phi_s}{L_x} \quad (10)$$

となる。すなわち発生できる負荷電流の最大値は、変圧器鉄心内の利用可能な磁束に比例し、二次巻線の漏洩インダクタンスに反比例する。これまでの議論で Φ は鉄心内の磁束と考えてきたが、実際には二次巻線と鎖交する磁束であり、これは二次巻線の巻回数に比例する。しかし一方 L_x はこの巻回数の2乗に比例して増大するので二次巻線の巻回数を増せば最大電流はこれに反比例して減少することになる。

上に述べた手順の中で(ii)および(iv)は i_1 を i_2 に移し、あるいは i_2 を i_1 に移すもので、この手順がフラックスポンプの動作でもっとも重要なものとなる。この手順を経ずに電流を移そうとすれば、漏洩インダクタンス L_x に蓄積されているエネルギーの行き場がなくなり、回路の一部で熱となり消費されポンプ作用が失われる。あるいはそればかりではなくこの熱が波及し負荷コイルのクエンチに至ることになる。

3. 電源および制御回路

電源および制御回路は、1に述べた手順を行なうもので全体の構成を Fig. 2 に示した。電源の最終段は OTL 回路 (Out put Transformer Less 回路) になっていてフラックスポンプ変圧器の一次巻線に Fig. 3 に示した電圧が加えられる。1で述べた手順を直ちに実施することは増磁の場合にはそのままよいが、減

Fig. 2 Schematic diagram of flux pump.

Fig. 3 Voltage wave form supplied to primary winding of transformer.

磁の場合には全く手順が異なり制御が困難になるため、増磁、減磁を同一の手順で行なえるように多少変形したものになっている。1で述べた手順との対応は次のようになっている。まず $t=0$ に電圧 $V_1=E$ を加える。鉄心内の磁束は $-\Phi_s$ から正の方向に移動するが $+\Phi_s$ に達する前 ($t=t_1$) に $V_1=0$ とする。 $t_1 < t < t_2$ の間に C_2 を ON にする。この期間は鉄心内の磁束は一定に保たれ二次回路の電流の状態は変化しない。このような期間を設定したのは実際の制御整流器ではスイッチの ON-OFF に有限の時間が必要なためである。 $t=t_2$ に $V_1=-E$ を加える。制御整流器 C_1, C_2 ともに ON になっているため短絡電流が流れ t_3 に $i_1=0$ となる。この瞬間に C_1 を OFF にすると同時に $V_1=0$ とする。 $t_3 < t < t_4$ の間に C_1 は完全に OFF の状態になる。次に $V_1=E$ を加える。鉄心内の磁束は t_5 に $+\Phi_s$ に達する ($t_4 < t < t_5$ の間は負荷コイルの励磁電流は減少している)。 t_5 に V_1 を $+E$ から $-E$ に切り替える。鉄心の磁束は $+\Phi_s$ から負の方向に移動するが $-\Phi_s$ に達する前 ($t=t_6$) に $V_1=0$ とする。後は同じようにして短絡電流を利用して電流を移し替えた後、減磁、増磁をくり返す。このような制御方法では $[0, t_1]$ の期間と $[t_4, t_5]$ の期間の大小により増磁、減磁が簡単にできることになる。

この制御方法の特徴は電源が電圧制御になっている

(a) Winding of saturable reactor

(b) Characteristic of saturable reactor

Fig. 4 Saturable reactor.

点で超電導コイル両端の電圧を零にすればコイルに流れている電流を一定に保つことができることを利用したものである。Fig. 2 に示した演算増幅器はそのためのもので、設定電圧 V_s に等しい電圧で変圧器の一次電圧を制御できる。増幅度が非常に大きいため設定電圧を零にした場合の一次電流の変化はほとんど無視できる。短絡電流を流す場合の電圧を $\pm e$ と小さい値にしたのは、漏洩インダクタンス L_x が小さいため短絡電流が急激に増大することを考慮したものである。また Fig. 2 の回路で R_1, R_2 は電流が移り変わったことを知るためのもので飽和リアクトルの特性を利用している。電流の移り変わりは次のようにして知ることができる。

Fig. 4 に示したように飽和リアクトルの一次巻線に図の方向に電流 I が流れているとする。特性上では a 点にある。電流が減少して零になりさらに負になれば $abcde$ という経過をたどり負の飽和状態に達する

Table 1 Rating of flux pump power supply.

OTL out put	Rectangular wave form
	$0 \sim \pm 10V, \pm 5A, 0.1 \sim 15\text{sec}$
Cryotoron control	50V, 50A

Fig. 5 Flux pump power supply and control unit.

が、cd の区間では磁束が急激に変化し飽和リアクトルの二次巻線に電圧パルス p が発生する。cd の間の励磁電流は非常に小さくほとんど零と考えて差支えなく、パルス p の発生をもって電流の移り変わりを知ることができる。電流が負から正になるときも同様である。また磁束の変化領域を設定する Φ_s の値はできるだけ大きい方が望ましい点から、鉄心の飽和点に近い値に選んでいるため Φ_s に近づくに従って一次電流は急増する。この電流がある一定値を越えないように電流制限回路を設けて Φ_s 設定している。

制御整流器は実際には後述するようにクライオトロンを使用している。制御磁界用の電源は 10V-20A 程度のもので、約 10kG の磁界でクライオトロンを制御している。全体の制御は論理回路で構成しており、スイッチボタン一つで増磁、減磁、停止ができるようになっている。電源の定格を Table 1 に示した。またこの写真を Fig. 5 に示した。

4. フラックスポンプ本体

フラックスポンプ本体の構成は(1)変圧器、(2)クライオトロン、(3)飽和リアクトル、(4)負荷コイルの4要素から成り立っている。この節ではこれらについて説明する。

4.1 変圧器

4.2 クライオトロン

クライオトロンは鉄心で形成した磁気回路のギャップに Nb テープを挿入し、ギャップに発生する磁界で導通状態、非導通状態を作るものであるが、その非導通状態における抵抗値が全体の効率に大きく影響する。数種類の Nb の素材を用意しその特性を調べた。調査した Nb の試料条件は Table 6 に示したものでその特性を Fig. 8, 9, 10 に示した。

Fig. 6 H-I_c curve of 0.5 Nb-Ti-Hf wire.

Table 2 Source of electrical steels.

	JIS No.	name	thickness	annealing	Maker
Grain oriented Si steel	G11	Z11	0.35mm	800°C-4hr.	Yawata
	G11	RG11	"	"	Kawasaki
	G13	RG13	"	"	"
Non oriented Si steel	S12	H12	0.5mm	850°C-4hr.	Yawata
	S14	H14	"	"	"

(1) 鉄心 鉄心の良し悪しは全体の効率にかなり影響するもので、適当な素材を選び出してその特性を調べた。Table 2, 3, 4, 5 にそれを示した。

(2) 巻線

(a) 一次巻線 東芝製 0.5φ の鋼クラッド Nb-Ti-Hf 線でその H-I_c 特性を Fig. 6 に示した。

(b) 二次巻線 RCA 社製の Nb₃Sn テープ (R-60303) で幅 12.5mm, 厚さ約 0.16mm である。その H-I_c 特性を Fig. 7 に示した。

Table 3 Temperature dependence of B-H characteristic of electrical steels.
unit; Gauss

Name	300°K	77°K	4.2°K
Z11	18,300	18,600	18,900
RG11	18,000	18,400	18,700
RG13	18,400	18,400	18,400
H12	15,400	15,800	15,800
H14	15,300	15,700	15,800

Values are induction for magnetizing force 10 Oe.

Table 4 Temperature dependence of magnetic data of electrical steels.

name	Br (Gauss)			Hc (Oe)		
	300°K	77°K	4.2°K	300°K	77°K	4.2°K
Z11	2,900	3,500	3,500	0.035	0.04	0.05
RG11	3,400	3,600	3,800	0.07	0.075	0.075
RG13	3,000	2,600	2,700	0.045	0.045	0.045
H12	3,900	4,000	4,000	0.32	0.35	0.35
H14	3,800	3,900	4,000	0.31	0.35	0.35

Br; remanent induction for magnetization of 5,000G

Hc; coercive force for magnetization of 5,000G

Table 5 Temperature dependence of DC-Hysteresis loss of electrical steels.

unit; erg/cm ³ /loop			
name	300°K	77°K	4.2°K
Z11	1,463	1,772	1,948
RG11	2,968	2,957	3,161
RG13	2,101	1,784	1,829
H12	5,058	5,261	5,334
H14	4,940	5,251	5,341

maximum induction; $\pm 5,000$ G Fig. 7 H-I_c curve of Nb₃Sn tape.

4.3 飽和リアクトル

飽和リアクトルは信号検出用に使用するため、その磁気特性が矩形に近いものほど良い特性をもっているといえる。東芝で市販している3種類のパーマロイについてその磁気特性を調査した。Table 7, Fig. 11 がその特性である。

Table 6 Treatment condition of Nb.

purity	γ	diameter	treatment
98%	2.5	0.25mm	no
99	8	"	"
99.8	20.8	"	"
99.9	28.4	"	"
99.999	100	0.5	1,000°C-8hr.
99.999	500	0.5	1,700°C-10hr.

 γ ; Residual resistance ratio Fig. 8 Dependence of critical field H_{c2} for Nb purity.

4.4 負荷コイル

変圧器の二次巻線に使用した Nb₃Sn テープを 2 枚並列に巻いて負荷コイルを形成したものであるが、これまで説明してきた各要素の設計値をまとめて Table 8 に示した。またフラックスポンプ本体の組み立て写真を Fig. 12 に示した。

5. 実験例

Fig. 13 にフラックスポンプを実際に動作させたときの各部分の電圧、電流波形のオシログラムを示した。この図はコイル負荷電流の大きさが 600A のときの波形である。途中で一次電圧の位相を変えて励磁速

Fig. 9 H- I_c curve of Nb wire.

Fig. 10 Resistance of Nb.

Fig. 11. Magnetic characteristics of permalloys.

Table 7 Property of permalloys.

Catalog name	thickness	annealing
HPC	100 μ	1,200°C-2hr.
RNE	80	"
SPC	100	"

supplied by Tokyo Shibaura electric Co.

Fig. 12 Flux pump.

度を加減した様子が見られる。Reactor pulse にたくさんの雑音が混っているが、これは一次電圧の切り替え、クライオトロンの ON, OFF の際などに発生するもので、電流の移り変わりを知らせる信号は○印をつけたものである。波形の一周期は約 30 秒である。この内実際に増磁あるいは減磁に寄与する時間はその何割かである。一例として増磁の時間が一周期の約 $\frac{1}{2}$ の場合上記負荷コイルを 1,000 A まで励磁するのに約 20 分必要とした。増磁、減磁の様子を Fig. 14 に示した。負荷電流は発生磁界をホール素子で測定し逆算したものである。途中で動作を停止し永久電流モードにしたが、電流に多少の減衰は観測されるが測定できない程度であった。また最大発生電流は約 1,300 A であった。この点については後にふれることにする。

Table 8 Specification of flux pump

Transformer primary voltage and current secondary voltage and current core material core cross section area primary winding secondary winding	4V, 4A 4mV, 4,000A grain oriented Si steel Z11, 0.35t, 2.65kg 20cm ² Cu clad Nb-Ti-Hf 0.5 ϕ , 4,500turns Nb ₃ Sn tape, 3 turns
Cryotron core material exciting winding exciting current field strength of gap gap distance area of pole switch element	grain oriented Si steel Z 11, 0.35t, 1.2kg Cu clad Nb-Ti-Hf 0.5 ϕ , 320 turns 20A 10kG 10mm 30mm $\times$ 80mm 1.2mm width $\times$ 50 μ thickness $\times$ 60cm length Nb tape 64 parallel normal resistance 1m Ω
Saturable reactor core material cross section of core primary winding secondary winding	permalloy RNE, 110g 5mm $\times$ 10mm 1 turn 100 turns
Load coil winding material inside diameter outside diameter length of coil NO. of turns field strength inductance	Nb ₃ Sn tape 2 parallel 5cm 12cm 6cm 266turns 25G/Amp. 1.69mH

6. 考 察

フラックスポンプでは、移動磁界形、整流形を含めて問題点の一つに電流の移し方、一般的に言えば磁束の移し方がある。本研究で採用した短絡電流を利用する方法もその一つで基本的には解決されたといえる。基本的にというのはフラックスポンプが正常に作動している限りということで何かの雑音で動作が少しでも狂うと一次電流、二次電流の関係が大きく狂い制御不能におちいる。一たん制御不能になると一次電流と二次電流の位相関係を知るためにどちらかのクライオトロンを強制的に OFF の状態にし、あらためて出発することを行なったがそのためには漏洩インダクタンス

L_x の小さいことが要求される。またその際リアクトルからのパルスが発生しないことがあるが、これは負荷コイルの電流の大きさに同期したパルスが発生させどちらかのパルスを検出するようにして信頼性を高めた。また実験の結果発生できた最大電流が 1,300A に制限されたのは、とにかく負荷コイルかあるいはクライオトロンの電流容量が不足していたことであるが、個々の線材について直流の条件で調査したかぎりでは非常に考えにくい原因といえる。しかし実際の動作状態では、電流の移し替えなどで急速な電流の変化が生じており、このような動的な条件下では超電導の本質的な性質が大きく影響してくることも考えられる。その一つはフラックスジャンプであるが、これらの研究

Fig. 13 Wave forms of flux pump during operation.

Fig. 14 Exciting of coil by flux pump.

は超電導線の安定化の問題で現在精力的に進められているものである。

フラックスポンプは小さい『電力』から大きな『電流』を発生させるものであり、したがって大電圧、大電流の電源には向かないものであるが、最初の励磁は口出線を通じて行ない、永久電流モードにした場合の

電流の減衰を補うものとして使用すればかなり広い用途が開けるものと思われる。ただし、この場合にも負荷コイルが大きくなればなるほど電源の信頼性がきわめて高く要求されることになる。

7. あとがき

整流形フラックスポンプを制作しその問題点を明らかにしてきたが、現時点ではそれほど信頼性を要求しない、小形（蓄積エネルギーの少ない）、大電流の超電導マグネットの電源としては非常に有望といえる。また、大型のマグネット用としては永久電流モードにおける電流減衰を補う電源としての使い方がその特徴を生かしたものであり、その実現は一にも二にも装置全体の高い信頼性にあるといえる。