

超電導コイルの充・放電用としての多数並列接続 MOSFET 群を用いた低温用直流電源の試作

近藤 祐一^{*1}, 石郷岡 猛^{*2}, 二ノ宮 晃^{*3}

Cryogenic DC Power Source with Multi-Parallel-Connected MOSFETs for Charge/Discharge of Superconducting Coils

Yuichi KONDO^{*1}, Takeshi ISHIGOHA^{*2}, Akira NINOMIYA^{*3}

ABSTRACT : The authors have proposed a cryogenic low-voltage/high-current DC power supply using multi-parallel-connected MOSFETs for an excitation power source of superconducting coils. It has been confirmed that the power source can operate at 77 K in liquid nitrogen bath. The fundamental idea and some experimental results are presented. The experiment using 100 MOSFETs connected in parallel are carried out. The forward-direction voltage drop at 77 K has been measured. The excitation current of the superconducting coil can be increased and decreased arbitrarily. This time, a full-wave rectification circuit is tested. The experimental results show good prospect of this type of DC power source not only for the excitation of superconducting coils but also for the forced discharging of the coils.

Keywords : cryogenic DC power source, MOSFET, charge and discharge, superconducting coil

(Received March 23, 2009)

1. はじめに

一般に、超電導コイルの励磁には低電圧大電流直流電源が必要だが、それには極めて太いリード線を要する。そこからの熱侵入による冷却パワの増大を改善する方法として、低温への入力を交流小電流で行い、それを変圧器で大電流に変換した後に直流大電流に整流する手法を提案する。本研究では低温でも動作する整流素子として MOSFET に着目した。MOSFET の ON 抵抗は並列接続した個数に反比例して低減する。これを利用して、多数個の MOSFET を並列接続して順方向電圧降下を低減させた整流装置からなる低温用低電圧大電流直流電源を試作し、超電導コイルの充・放電を行った。また、本稿では、全波整流回路化を図り、励磁速度の上昇を試みた。それらの結果を報告する。

2. 実験装置

回路の抵抗を極力小さくするために低温領域での配線に可能な限り超電導テープ線材を用いることにした。しかし各構成要素を固定せず安易に超電導テープ線材で配線すると折れ曲がり等による劣化が生じやすくなることが予想される。そこで、図 1 に示すような、バークライトの固定板の上に、変圧器、多数並列接続 MOSFET、超電導コイルを固定して低温用直流電源を作製した。

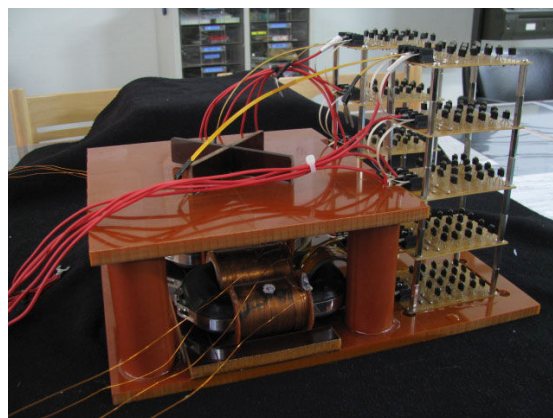


図 1 低温用直流電源全景

^{*1} : 電気電子工学専攻修士学生 (dm073205@cc.seikei.ac.jp)

^{*2} : 電気電子工学専攻教授 (ishigoka@st.seikei.ac.jp)

^{*3} : 電気電子工学専攻助教 (ninomiya@st.seikei.ac.jp)

2. 1 変圧器

常温から入力された高電圧小電流を低電圧大電流にするための変圧器を作製した。変圧器は2台作製し、一方を変圧器A、もう一方を変圧器Bとし、以降この表記を用いて説明する。変圧器の巻線は入力の一次巻線、超電導コイルへの出力の二次巻線、MOSFET ゲート信号出力の三次巻線の計3つである。変圧器の仕様を表1に示す。

表1 変圧器の仕様

Iron core(A)	
Material	Silicon steel
Diameter	27.5mm ϕ
Magnetic path length	265mm
Iron core(B)	
Material	Silicon steel
Diameter	28.4mm ϕ
Magnetic path length	260.4mm
Primary Winding	
Material	Copper(0.56mm ϕ)
Number of turns	1000
Secondary Winding for SC Coil	
Material	Bi-2223/Ag HTS tape
Number of turns	5
Tertiary Winding for gate-source circuit	
Material	Copper(0.56mm ϕ)
Number of turns	300

2. 2 多数並列接続 MOSFET

前述の通り、低温で動作する整流素子として MOSFET (東芝製 2SK2493)を使用した。MOSFET 群の ON 抵抗を小さくするため、1 ユニット当たり 100 個を並列接続して使用した。図2にその外観を示す。

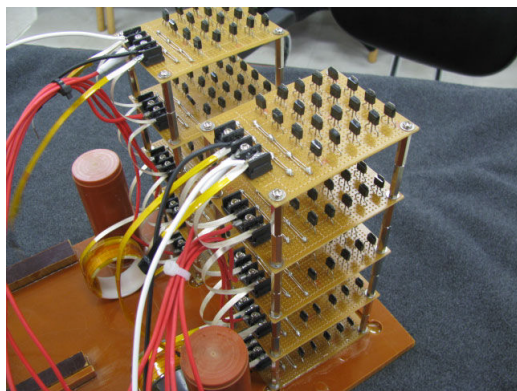


図2 多数並列接続 MOSFET ユニット

2. 3 超電導コイル

実験で使用した超電導コイルの仕様と外観をそれぞれ表2および図3に示す。超電導コイルの電流測定に通常の測定器を回路に挿入すると抵抗が増加してしまう。そこで超電導コイルの磁界をホールセンサーで測定し、そ

こから超電導コイルに流れる電流を算出する手法を採用した。

超電導コイルは2枚のベークライト板を十字に組み合わせたものを装置に取り付け、そこに嵌めることで固定している。十字板の高さは超電導コイルの高さの半分に設定しており、交差部が超電導コイルの中心部になるようにしている。ここにホールセンサーをセットすることで常にコイルの中心を確保でき、測定の正確性の向上と繰り返しの実験における再現性が得られるようにした。

表2 超電導コイルの仕様

Manufacturer	Sumitomo Electric
Material	CT-OP 22-110
Outside diameter	190mm
Inside diameter	118mm
height	45mm
Number of turn	360
Critical current	42.9A

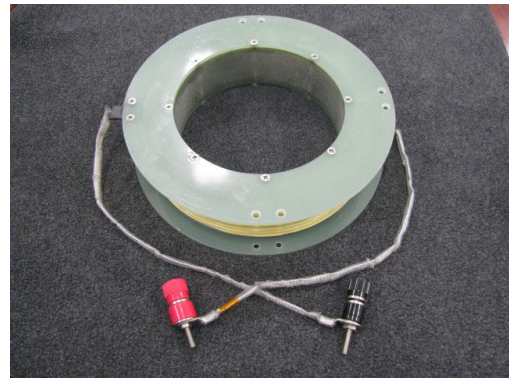


図3 超電導コイル

3. MOSFET 実験

3. 1 静特性

MOSFET を 20, 100, 200 個並列接続してその静特性を測定した。実験回路を図4に示す。実験はゲート電圧を 8V 一定で供給し、ドレインソース間電圧を変化させた時のドレイン電流の値を測定した。

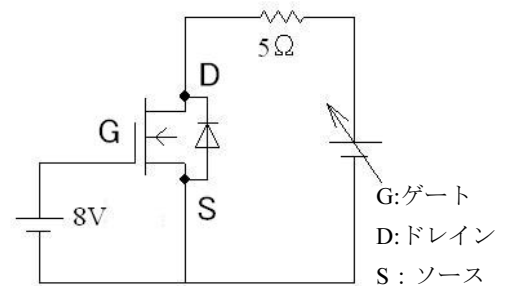
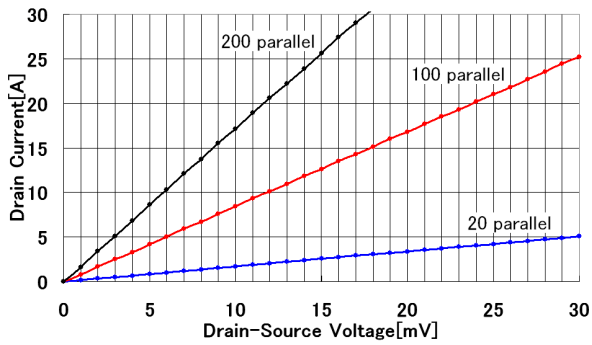
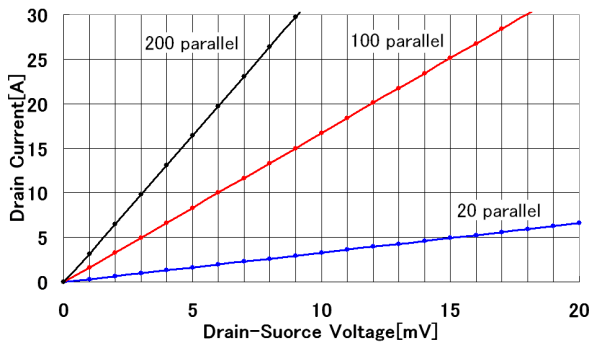


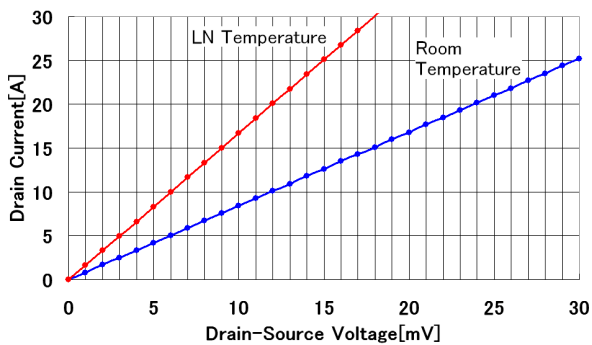
図4 静特性測定回路



(a) 常温特性



(b) 低温特性



(c) 常温と低温の特性の比較

図5 MOSFET 静特性

図5 (a)(b)はそれぞれ常温と低温における測定結果である。ドレインソース間電圧で見た時、個数倍に比例して電流が流れやすくなっていることがわかる。これは並列接続によって並列個数分の1に MOSFET 群の ON 抵抗が減少しているためである。

図5(c)は100個並列での常温と低温の特性の比較である。同じドレイン電流を流すのに必要なドレインソース間電圧が低温では常温の半分になっており、冷却による性能向上が確認できる。

以上より MOSFET が並列接続によって ON 抵抗が減少すること、低温で動作が可能であること、また冷却により性能が向上することが確認された。

4. 超電導コイル充・放電実験

4.1 半波整流

まず、半波による充電実験を行った。実験回路を図6に示す。実験は変圧器 A, B 両方について行った。

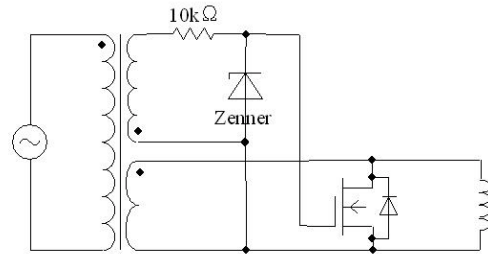
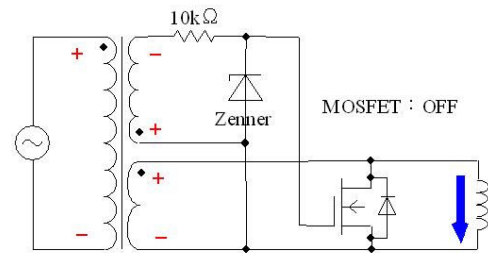
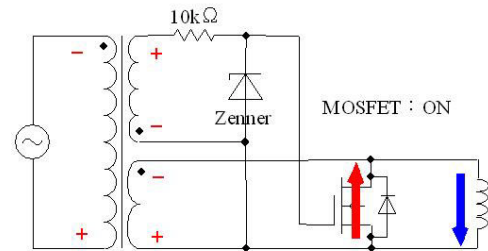


図6 半波整流実験回路

入力電源として、50Hz 単相 200V で出力 0~260V のスライダックを使用した。ゲート回路には、三次巻線から供給される正弦波を 8V の矩形波として整形しゲート信号に用いるためにツェナーダイオードを挿入した。定格は 0.5W で、保護抵抗として 10kΩ を接続している。



(a) 電源電圧が正の半波時



(b) 電源電圧が負の半波時

図7 半波整流の動作の説明図

回路の動作を図7に示す。図7 (a)では、MOSFET は OFF なので、二次巻線から超電導コイルに電流が送られて充電される。次に、同図(b)では、MOSFET が ON になるので本来充電を打ち消す方向に流れるはずの電流が MOSFET で短絡され、同図(a)で充電された超電導コイル電流は待機状態になる。

同図(a)と(b)との動作を繰り返して超電導コイル電流が増加していく。

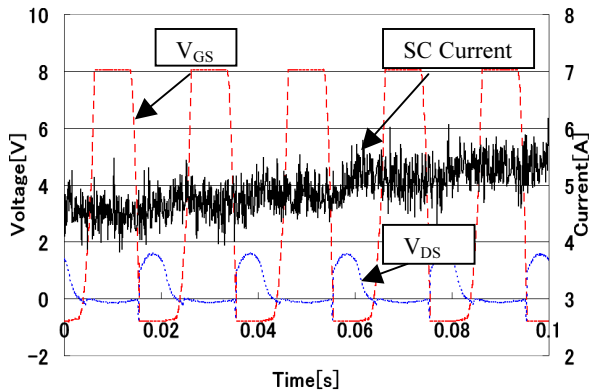


図8 半波整流時の充電電流増加の様子

図8は一次電圧190Vで実験を行った結果を0.1sの時間軸で見たものである。ゲート電圧によってドレインソース間電圧が制御されていることが確認でき、超電導コイル電流もMOSFETがOFFの時にのみ増加していることがわかる。また、0.1sでの電流増加量は1Aであった。

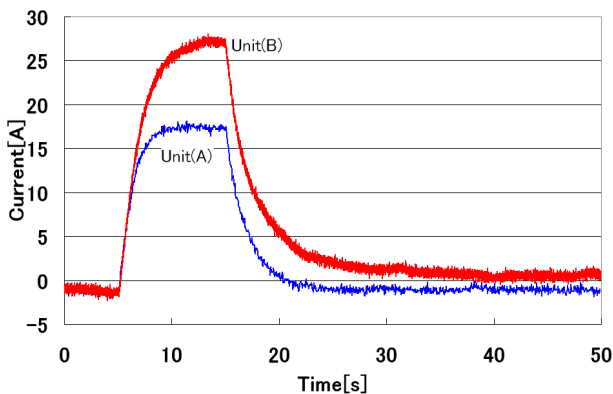


図9 ユニットAとユニットBの充電特性比較

図9は変圧器A, B(それぞれユニットAおよびユニットBに対応)での充電の様子を比較したグラフである。変圧器と多数個並列MOSFETを組み合わせたものを1ユニットとし、それをユニットA, Bとしている。

励磁開始直後は両者とも同じ増加量であったが、ユニットAはBよりも早い段階で電流が飽和してしまった。最大充電電流はユニットAで約18A、ユニットBで約28Aと10Aの差が生じた。

飽和電流に差が生じた原因として考えられるのは、回路中の残留抵抗の差である。低温領域の配線を超電導線材で行っているため、MOSFETを接続している半田等による微小な抵抗差が影響してしまったものと思われる。

4. 2 全波整流(充電)

全波整流による充電実験を行った。電源電圧は半波整

流と同様に190Vで行った。実験回路を図10に示す。同図で上部がユニットA、下部がユニットBである。

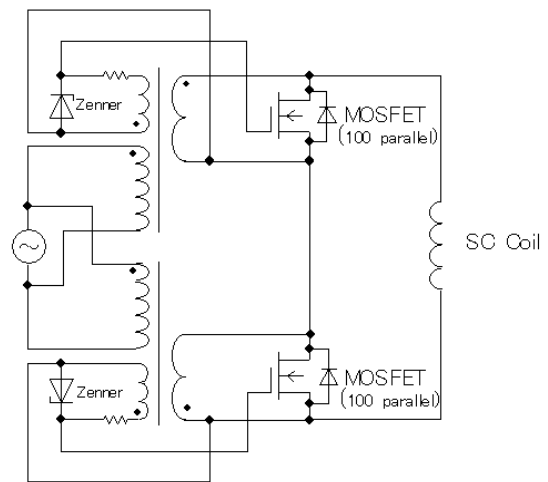


図10 全波整流回路

本回路において重要なのが変圧器三次巻線の存在である。過去の研究における半波整流回路ではゲート信号を一次電源から直接供給していた。しかし、全波整流回路では2台の多数並列接続MOSFETを交互にON/OFFする必要があり、そのゲート信号を電源から直接供給しようとするとゲート回路がショートしてしまうという問題が生じた。そこでゲート信号を変圧器によって電氣的に独立させることで問題の解決を試みた。

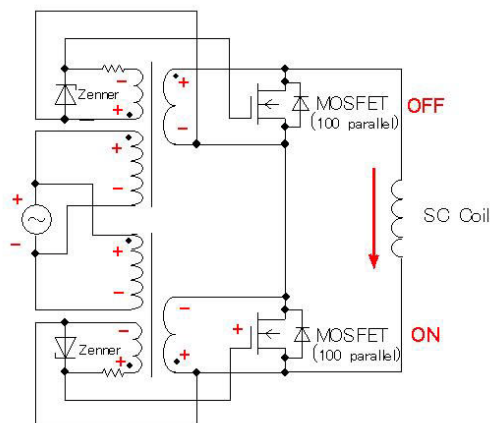
2台の変圧器の一次側は電源に並列に接続してある。これは直列接続に比べ、ユニットAとBとの相互干渉を防止する事にも役立つ。

図11は全波整流回路の動作の説明図である。

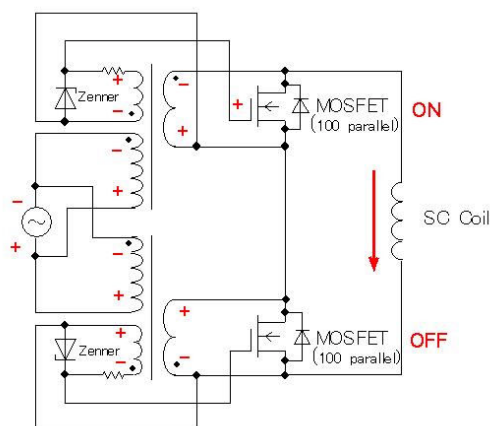
電源電圧が正の時、同図(a)に示すように、ユニットA(上側)ではMOSFETがONなので変圧器Aの二次側はMOSFETで短絡され、超電導コイルに電流は送られない。一方、ユニットB(下側)ではMOSFETがOFFなので変圧器Bの二次側から超電導コイルに電流が送られる。

電源電圧が負の時、同図(b)に示すように、ユニットA(上側)ではMOSFETがOFFなので変圧器Aの二次側から超電導コイルに電流が送られる。一方ユニットB(下側)ではMOSFETがONなので変圧器Bの二次側が短絡され、超電導コイルに電流は送られない。

同図(a)と(b)に示す動作共に超電導コイルに送られる電流の向きは同一なので、これを繰り返して充電が行われる。



(a) 電源電圧が正の半波時



(b) 電源電圧が負の半波時

図 11 全波整流動作の説明図

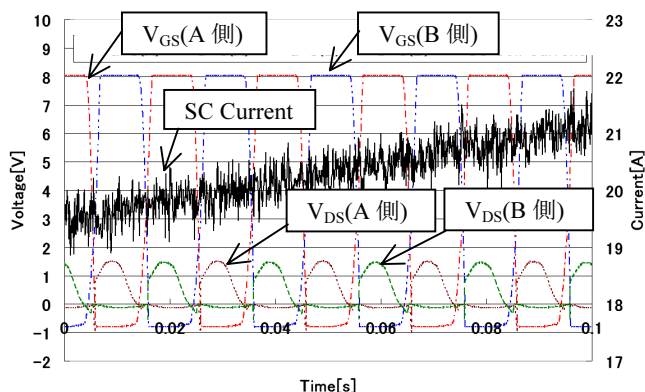


図 12 全波整流時の充電電流増加の様子

図 12 は 0.1s の時間軸で見た測定結果である。片方の変圧器が短絡しているとき、もう片方の変圧器から超電導コイルに電流が供給され、常に電流が増加していることがわかる。

0.1s での電流増加量は約 1.7A であることが読み取れ、半波整流のほぼ 2 倍の励磁速度が得られたことが判る。

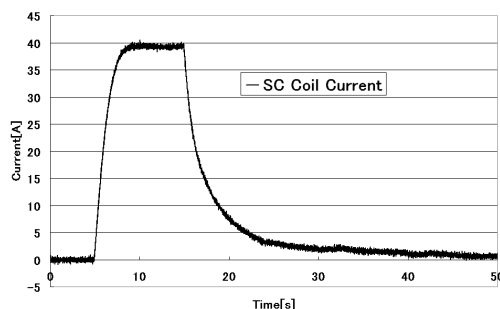


図 13 全波整流充電時の充電電流の変化

図 13 は 50s の時間軸で見た超電導コイル電流の変化である。充電開始から約 3 秒で約 39A まで到達して飽和している。コイルの臨界電流が 42.9A なので、ほぼ臨界直前まで充電することができたと言える。

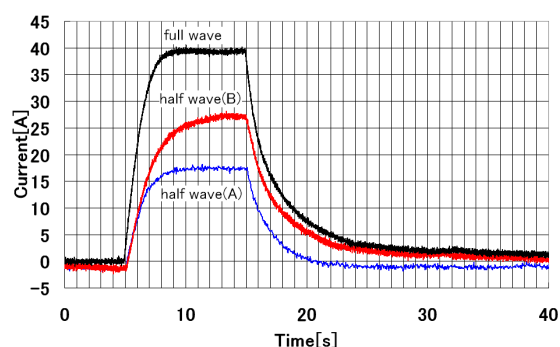


図 14 全波半波充電比較

図 14 は全波整流と半波整流の充電の比較である。全波整流が半波整流よりも高速かつ大電流までの充電が行えていることがわかる。全波整流は半波整流 A, B を足した回路なので、電流値も両者を足した値になるはずであるが、実測値は若干の差があった。これは 2 つの回路を接続した際の接続抵抗の増加による影響と考えられる。

4. 3 全波整流(放電)

全波整流回路による強制放電実験を行った。回路を図 15 に示す。スイッチングによりゲート信号を反転させて強制放電が行えるようにした。

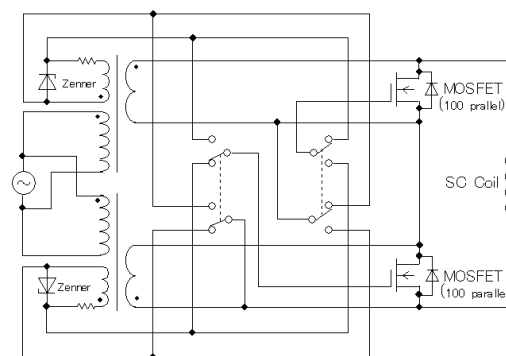


図 15 全波整流回路による強制放電実験回路

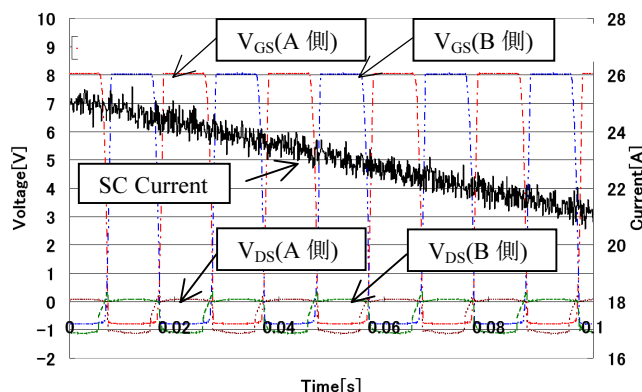


図 16 強制放電時の電流減少の様子

図 16 は強制放電を 0.1s の時間軸で測定したものである。ゲート信号の位相が反転することで、ドレインソース間電圧が反転しているのがわかる。また、反転したことによって寄生ダイオードが ON になっており、電圧波形が 1V までとなっていることが判る。

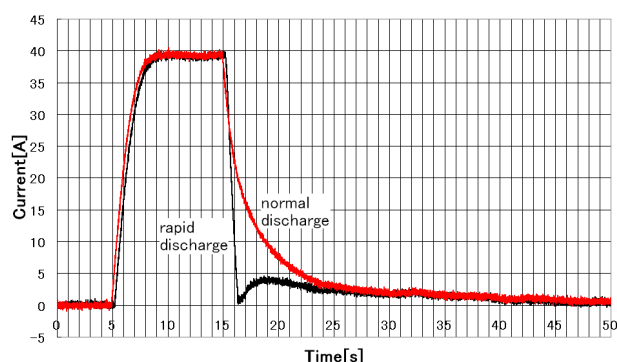


図 17 自然放電と強制放電の比較

図 17 は自然放電と強制放電を比較したものである。自然放電が指数関数的にゆっくり減衰しているのに対し、強制放電は約 1 秒で 0A まで直線的に放電している。しかし強制放電後に自然に 5A 近く電流増加してしまい、その後自然放電と重なる形で減衰をした。ユニット A, B の抵抗差の影響や、変圧器の漏れインダクタンスの影響と考えられるが、詳細を突き止めるには至らなかった。だが強制放電は緊急時に高速で放電を行うことが目的なので、0A 付近まで放電することが出来たと事はエネルギーの大半を回収できたという意味を持ち、超電導コイルの保護のためには十分な結果であると言える。

5. 結 論

実験結果より、以下のことが確認できた。

- 多数並列接続 MOSFET を用いた全波整流回路の実現。
- 半波整流から全波整流にすることで高速かつ大電流の充電が可能。
- ゲートの位相を反転させることで超電導コイルの強制放電が可能。

半波整流から全波整流に改善することによって、より効率良く超電導コイルを充電することが可能になる。また、もし超電導コイルがクエンチしても、強制放電によってエネルギーを放出して危険を回避することができる。

今後の改良案として考えられるのは、MOSFET の並列接続数の増加や、半田接続の改善による残留抵抗の低減等である。また、実際の超電導コイルのクエンチ時における強制放電の実証については、今後の実施をしたいと考えている。

参考文献

- 1) T. Ishigohka, S. Takahashi, and R. Kawanami, “Low Temperature Characteristics of MOSFET and its Application,” Proceedings of 70th Meeting on Cryogenics and Superconductivity, Cryogenic Society of Japan, p.216, May 2004.
- 2) R. Kawanami, T. Ishigoka “Low Temperature Characteristics of MOSFET Targeting Low-Voltage High-Current Power Source for Superconducting Magnets” MT-19, Genova.
- 3) 川浪 亮, 石郷岡 猛, 二ノ宮 晃「超電導マグネットの励磁のための MOSFET を用いた低温用低電圧大電流電源の試作と試験」第 73 回 2005 年度秋季低温工学・超電導学会 p.256
- 4) Takeshi ISHIGOHKA, Akira NINOMIYA, Yuichi KONDO, and Shohei FUKANO “Cryogenic DC Power Source using Multi-Parallel-Connected MOSFETs and Charge/Discharge Experiment of Superconducting Coil” Reprinted from the Journal of the Faculty of Science and Technology, Seikei University Vol.45 No.2, 2008