

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | 超伝導コイル用電源の極低温動作について   |
| Author(s)    | 伊瀬, 敏史; 村上, 吉繁  |
| Citation     | 大阪大学低温センターだより. 80 P.14-P.18   |
| Issue Date   | 1992-10   |
| Text Version | publisher   |
| URL          | <a href="http://hdl.handle.net/11094/12018">http://hdl.handle.net/11094/12018</a> |
| DOI          |   |
| rights       |   |
| Note         |   |

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

# 超電導コイル用電源の極低温動作について

工学部 伊瀬敏史 (吹田5243)

超伝導エレクトロニクス研究センター 村上吉繁 (吹田5241)

## 1. はじめに

超電導コイルを励磁するシステムでは、室温中で動作する電源（電力変換器）によって極低温に冷却された超電導コイルを励磁する構成をとるのが一般的である。高温超電導材料を用いた超電導コイルも開発されつつはあるが、現状では超電導コイルは液体ヘリウムで冷却されるため、超電導コイルと電力変換器とを結ぶ電流リードでは室温から4.2Kまでの温度勾配がある。また、超電導コイルの電圧・電流は比較的低電圧・大電流であるため、コイルと電力変換器とを結ぶ電流リードは一般的に太くなり、超電導コイルのクライオスタット内への侵入熱が液体ヘリウムを蒸発させ、システムの効率を悪化させる。そこで、超電導コイル、電力変換器および変圧器を含めてクライオスタット内で動作させてクライオスタットより室温部にいたる電流リードを高電圧・小電流で設計して侵入熱を低減し、さらに電力変換器の電力損失をも低減すればシステムの効率向上に寄与出来ると予想される。この目的のため、超電導スイッチを用いて変換器を構成する方法が検討されているが、現状では超電導スイッチのオフ時の抵抗があまり大きくなり、コイルに印加する電圧をあまり高くできないためコイルの充放電速度を速くできないなどの問題点がある<sup>1)~3)</sup>。ここでは、電力変換器で現在一般的に用いられており、オフ時の漏れ電流が少なく、スイッチング速度も速い半導体スイッチング素子によって極低温環境で動作する電力変換器を構成する方法を検討した結果を報告する<sup>4)</sup>。

## 2. 理想的な電力変換に求められるスイッチング素子

電力変換の過程、すなわち交流および直流の電力において、電圧、電流、周波数および相数のうち少なくとも1つの要素の大きさなどを制御して変換する過程において求められる理想的なスイッチング素子は以下のような性格を持ったものと考えられる。

- 1) オン状態での損失、すなわちオン電圧やオン抵抗が限りなく小さいこと。
- 2) オフ状態での漏れ電流が限りなく小さいこと。
- 3) 駆動電力が小さいこと。一般的に、サイリスタやバイポーラトランジスタのような電流駆動形の素子よりMOSトランジスタのような電圧駆動形の素子の方が扱いやすい。
- 4) 数kHzでのスイッチングが可能であること。
- 5) 千アンペア、千ボルト級の大容量素子が製作可能であること。

現在、これらの要素をできるかぎり高いレベルで満足する電力用半導体素子の開発が活発であり、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の開発やGTO (Gate Turn-Off Thyristor) の高性能化はその結果の現われである。インバータエアコンをはじめとするインバータ応用家電民生機器、新幹線の「のぞみ」形の車両をはじめとする交流電動機を利用した最近の新型電気鉄道車両にはこれらの素

子はその心臓部に利用されている。現在では電力機器は全て常温で動作するものばかりであり従って電力変換器も常温で動作させるのが常識である。ところが、将来の超電導応用電力機器の実用化を想定するとき、電力変換器の極低温動作や超電導電力変換器の開発などが考えられる。そこでは現在の半導体素子がほぼそのままの形で使用されるのか、それとも新しく超電導素子や超電導と半導体とのハイブリッド形の素子が使用されるのか現状では想像がつかない。ここで、現在広く使用されている半導体スイッチング素子と一部で開発されつつある超電導を用いたスイッチング素子の性能を比較すると表1に示すようにこれら両者は対照的な性格であることがわかる。

表1 電力用スイッチング素子の性能比較

|        | 半導体素子        | 超電導素子              |
|--------|--------------|--------------------|
| オン電圧   | 数V           | ほとんどゼロ             |
| もれ電流   | ほとんどゼロ       | 大(オフ抵抗数 $\Omega$ ) |
| ターンオン  | 容易           | 難                  |
| ターンオフ  | 難            | 容易                 |
| スイッチング |              |                    |
| 周波数    | 数k ~ 数百kHz   | 60Hz程度             |
| 電流容量   | 3000A程度      | 1000A程度            |
| 素子耐圧   | 4000~8000V程度 | ?                  |

すなわち、半導体素子はオフ状態では理想的な性質を示すのに対し超電導素子はオン状態で理想的な性質を示す。ターンオンおよびターンオフの難易性に関してもこの両者は対照的な性質を示す。スイッチング周波数に関しては超電導スイッチング素子は改良されつつあり、先日アメリカ合衆国のシカゴで開催されたApplied Superconductivity Conferenceでは、60Hzで使用可能な超電導スイッチング素子およびそれを用いた超電導コイル用の電源の開発に関する発表があった<sup>5)</sup>。オフ時の漏れ電流の減少や素子耐圧の向上が今後の電力用超電導スイッチング素子にとっての技術課題であり、これら問題点を克服するような高温超電導体の電界効果を利用したMOSトランジスタの開発も進められつつある<sup>6)</sup>。

### 3. 極低温動作電力変換器の構成とその特性

#### 3.1 極低温動作電力変換器の構成

図1に超電導コイルを励磁する変換器の主回路構成を示す。図1に示すようにチョップ回路をクライオスタート中で動作させた。ここでは極低温下で動作するチョップ回路による超電導コイルの制御特性の把握を主目的とし、交流回路との電力変換特性は今後の検討にゆずることとしたので、交直変換にはダイオード整流回路を用いた。交流系統へエネルギーを回生する場合は回生運転可能な回路を交直変換部に用いる必要がある。MOSFETは図2に示すようなオン・オフパターンで制御される。図にみるように、MOSFETのオン期間が $T/2$  ( $T$ はチョップの制御周期) より大きいとき超電導コイルは充電、 $T/2$ より小さいときは放電する。図において、2つのMOSFETがオンしている期間 ((a)図のIおよびIII) では超電導コイルにエネルギーの充電が行われ、2つのMOSFETがオフ、すなわち2つのダイオー

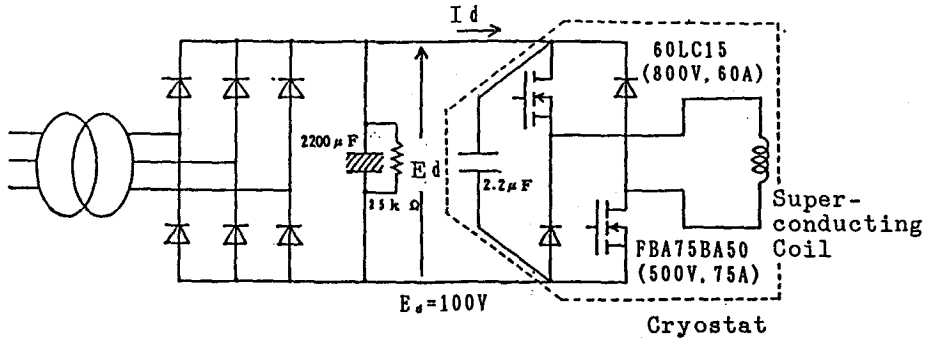


図1 主回路構成

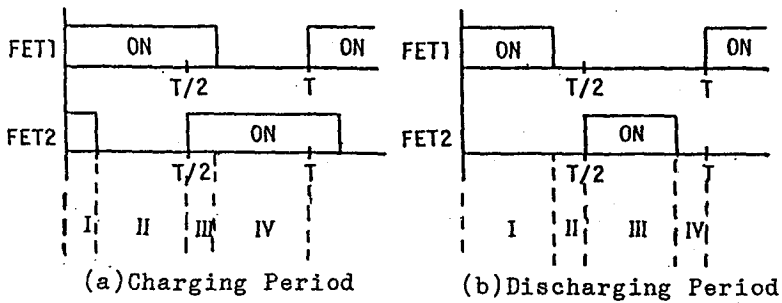


図2 パワー-MOSFETのスイッチングパターン

ドがオンしている期間 ((b)図のIIおよびIV) では超電導コイルからエネルギーの放電が行われる。他の期間では1つのMOSFETとダイオードを通してデューワー内でコイル電流が還流している。この還流期間が存在する分だけ常温部へ至る電流リードの電流実効値が小さくなり、電流リードを細く設計できる。

装置構成としては図3に示すように変換器回路を冷却するための液体窒素槽を別途設け、その内部にチョップ回路を置き、液体窒素で浸漬冷却することでMOSFETおよびダイオードを冷却する。変換器を液体窒素で冷却することにより液体ヘリウムの蒸発量を抑ええることができ、半導体素子の温度を一定に保つことも容易である。

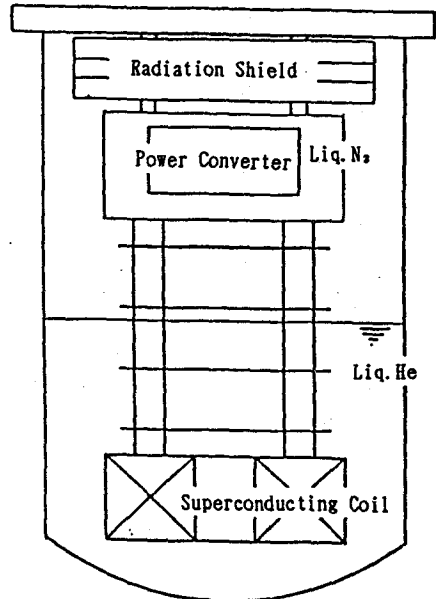


図3 実験装置の構成

### 3. 2 半導体スイッチング素子および変換器の極低温動作特性

変換器を構成するパワー-MOSFET、FBA75BA50(500V,75A)のオン抵抗の温度依存性を測定した結果を図4に示す。55Kから70Kの温度領域でオン抵抗が最小になっている。FBA75BA50の常温(25℃)でのオン抵抗は0.1Ωであり、一方、オン抵抗の最小値は0.028Ωであるので約1/3.5にオン抵抗が減少している。さらに温度が下がり、40K付近ではオン抵抗が急激に増加している。これは、キャリアの凍結により電流が流れにくくなるためであると考えられる。

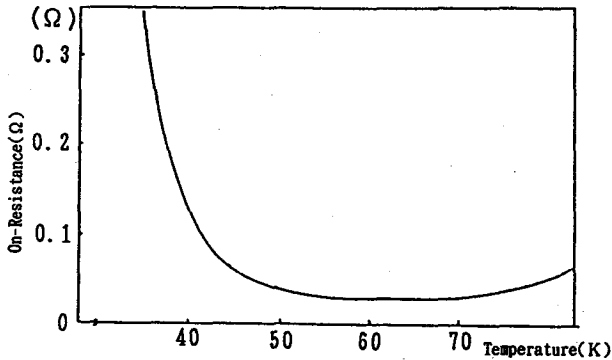


図4 パワー-MOSFETのオン抵抗の温度依存性測定結果

図5にダイオード60FC15(400V,60A)の極低温特性を測定した結果を示す。常温でのオン電圧が0.75Vであるのに対し、80Kでは1.15Vとなり1.5倍程度になっている。さらに40Kでは7Vと、急激にオン電圧が上昇する。

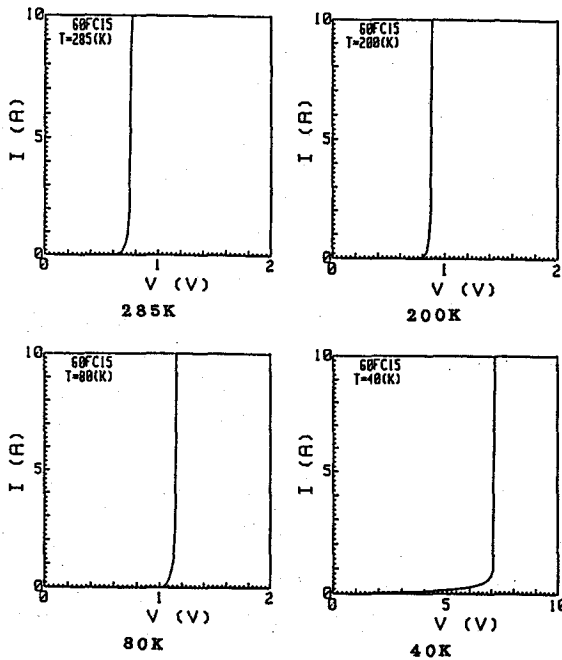


図5 ダイオードのオン電圧の温度依存性測定結果

コイルに30Aの電流を通電し、液体ヘリウムおよび液体窒素の蒸発量を測定した。その結果、液体ヘリウムの蒸発量は0.024Litters/min、液体窒素の蒸発量は0.025Litters/minであり、これらよりヘリウム槽および窒素槽での熱損失を計算するとそれぞれ1.04W、66.7Wとなる。これらを常温換算するにあたり、ヘリウムおよび窒素の液化機の成績係数をそれぞれ500および7とすれば、常温換算損失は987Wとなる。これとは別に電力変換器の電力損失があり、これは素子のオン抵抗およびオン電圧から計算すると84Wであり、システム全体の損失は1,071Wとなる。一方、変換装置を常温で運転したときの電力損失は140Wと計算され、これに冷却ファンの電力を入れてもシステム全体で200W程度の損失である。

#### 4. む す び

以上に述べたように、超電導コイルと電力変換器を一体化させてクライオスタット内で動作させると常温部からクライオスタット内への電流リードが細く設計でき、変換器の電力損失は減少し、さらに電力変換器をも含めた超電導コイルシステムの小型化が図れる。一方では、変換器を冷却するための電力を必要とし、現状では常温で変換器を運転する場合と比べてエネルギー的な観点では必ずしも得策ではないが、液体窒素温度程度の冷媒が容易に得られる場合、あるいはこのような冷媒がむだに消費されているような場合には本方式が有効であると考えられる。今後、低温領域でさらに低いオン抵抗を示す素子を開発し、デューア内の損失を軽減すれば本方式の有用性はさらに高まると考えられる。

なお、本研究には文部省科学研究費補助金一般研究(B)「極低温パワーエレクトロニクスの基礎的研究」、同補助金重点領域研究「エネルギー変換と高効率利用」ならびに関西電力(株)よりの補助を受けた。関係各位に謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) T.Ariga and A.Ishiyama, "A Two-Phase Full-Wave Superconducting Rectifier", IEEE Trans. Magnetics, Vol.25, No.2, pp.1815-1818 (1989).
- 2) G.B.J.Mulder, H.H.J.Ten Kate, et al., "Thermally and Magnetically Controlled Superconducting Rectifiers", IEEE Trans. Magnetics, Vol.25, No.2, pp.1819-1822 (1989).
- 3) T.Nitta, M.Tada, et al., "Off-On Characteristics of Magnetically Controlled Superconducting Switch", Proc. of 11-th International Conference on Magnet Technology, pp.455-460 (1989).
- 4) 伊瀬、村上「電力用半導体素子の極低温特性と極低温動作電力変換器の構成」、低温工学、27巻、2号、125-133 (1992)
- 5) G.B.J.Mulder, H.H.J.Ten Kate, et al., "Development of a 50 and 60 Hz Thermally Switched Superconducting Rectifier for Powering Magnets", 1992 Applied Superconductivity Conference, Chicago, LLD-10.
- 6) T.Kobayashi, K.Sakuta, et al., "New Planar-type YBaCuO-MISFET: Preparation, Device Characteristics and Energy-Band Diagram for Explanation of Transistor Action", ibid, ETA-2.