

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：74301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 年～2012 年

課題番号：23656388

研究課題名（和文）超伝導電力変換器実用化に向けた新規“軟”超伝導材料・素子の開発

研究課題名（英文）Development of novel soft superconducting material and device for application to power transformers

研究代表者

長村 光造 (OSAMURA KOZO)

公益財団法人 応用科学研究所 名誉教授

研究者番号：50026209

研究成果の概要（和文）：超伝導技術を用いることにより電力ロスを最小化した電力変換器の開発が可能である。そこでまず超伝導素子を用いてインバータ動作を実証し、それに基づき電力変換の効率を最大化できるようなスイッチング特性に優れた新規“軟”超伝導材料および素子の提案を行った。このような超伝導素子を用いて構成した太陽光発電用電力変換システムの省エネルギー性を検討した。

研究成果の概要（英文）：Superconductivity (SC) has unique properties. One of them is zero resistance at SC state and its device can deliver large capacity of current essentially without Joule heat. Such specific feature is very attractive for a kind of inverters used as power devices. In order to develop the optimized SC inverter, a novel soft superconducting material and device has been proposed. It was made clear that the present SC device can be efficiently applied to the inverter for solar cell power generation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：金属物性 5401

キーワード：超伝導

1. 研究開始当初の背景

将来のスマートグリッドに代表される電力供給システムや自動車用電気モータ等は省エネルギーのため理想的には全超伝導化が望ましいとされている。そこで利用されるインバータ、コンバータ等の電力変換器には現状では半導体素子が用いられており、電流が通過するオン状態で不必要な莫大なジュール熱が発生し、著しく効率が低下している。このような電力ロスを最小化する方策が求められていた。

2. 研究の目的

電力ロスを最小化したインバータ、コンバータ等の実現は、超伝導特性を活用することにより原理的には可能であり、申請者等はその原理について特許出願を行った。その代表的機器の一つである超伝導インバータをその原理に基づき試作するため、スイッチング特性に優れた新規“軟”超伝導材料および素子の開発を行い、その機器への適用性および実現性を検討することを目的とした。

3. 研究の方法

初年度は“軟”超伝導材料および素子の開発に注力した。完全超伝導状態から磁束フロー状態への遷移による抵抗発生は、磁束の移動速度 v_L に比例するが、 v_L は電流のべき乗 $(j)^n$ に従って非線形に増加するので、材料定数としてべき数 n 値を大きくすることが求められる。また磁場の印加により臨界電流 j_c は閾値 B_0 を越えると磁場の $(B-B_0)^m$ に従って減少する。従って定数について B_0 を低く、 m を大きくするような物質の選び方が必要となる。また本スイッチング素子には抵抗状態を高抵抗にすることが求められる。“軟”超伝導材料の比抵抗 ρ が決まると、素子抵抗は $R=(L/S)\rho$ で与えられる。すなわち形状効果 (L/S) により素子抵抗を大きくすることができる。形状効果が 10^3 以上になるような素子を実設計・製作する。そこで YBCO 薄膜およびテープ試料、BSCCO テープ試料を出発として上記条件に近い特性を持つ“軟”超伝導性材料および素子の開発要件を検討した。

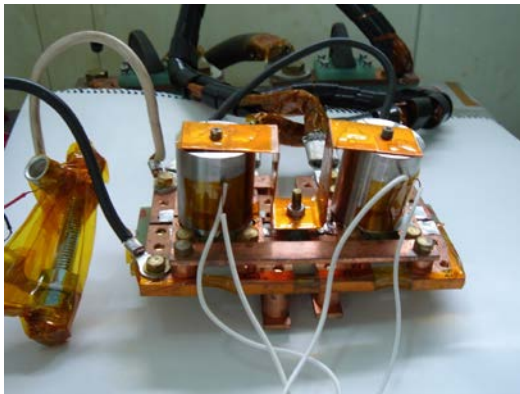


図1 超伝導素子を組み込んだインバータ動作を実証するためのブリッジ回路

そこで図1に示すブリッジ回路に所定の素子を組み込みインバータ動作の検証を行った。図にみられるように2個の電磁石により0.3 T 程度の振幅の交番磁場により、素子に交互に高い磁束フロー状態への遷移を起こ

させるようにした。発生磁場としては直流のバイアス磁場と交流磁場の組み合わせによりスイッチング特性の最適化を図った。一方では開発した回路シミュレーターにより、負荷に低抵抗体、超伝導線材を用いたときの超伝導インバータの直流/交流変換効率を最適にするスイッチング波形の探索、ノイズ成分の低減等のシステムの最適制御方法を開発した。

本研究では超伝導インバータの電力変換機への適用性について検討した。低電圧・大電流の特性を生かして、太陽電池セルの起電力を直接交流に変換し、その後昇圧トランスで100VAC/200VACの交流を得ることを検討した。

4. 研究成果

スイッチングには2通りの機構があり、(i)完全超伝導状態から磁束フロー状態への遷移、(ii)常伝導状態への遷移のいずれでもインバータ動作が起こる可能性がある。検討の結果、高い周波数で動作させるためには(i)の条件の機構によるインバータ動作が適していることを示すことができた。そこで完全超伝導状態から磁束フロー状態への遷移を利用した100A級のインバータにおける動作の高帯域化および高性能化を検討した。

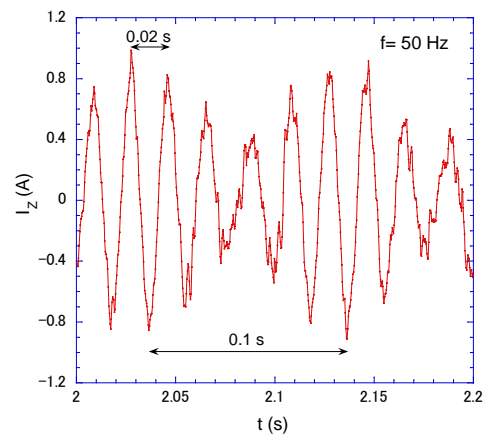


図2 超伝導インバータブリッジにより直流から交流に変換された交流波形

図1に示すブリッジに YBCO 超伝導薄膜を組み込みインバータ動作の検証を行ったところ図2に示す交流波形が得られた。種々の条件で得られた超伝導試料について実験を繰り返した。それにより(1)“軟”超伝導材料および素子の開発に関しては次のような研究成果を得た。完全超伝導状態から磁束フロー状態への遷移による抵抗発生の挙動を Fujikura 製の YBCO 薄膜を用いて調査した。図3に示すように超伝導素子に加えられる直流電流に対して変換された交流電流の変化には顕著な特徴がある。直流電流が20Aの範囲内ではインバータ動作は起こらない。すなわち交流の電流が得られていない。20Aを越えて30Aを最大にして交流電流が得られる。これは超伝導素子内に磁束フローにより電圧が発生していることに対応する。30A以上で交流電流が減少するのは全素子で磁束フローが発生しインバータ動作が消滅することによる。このように超伝導素子の臨界電流付近でインバータ動作が起こることを検証するとともに、さらに電圧は電流のべき乗 $(j)^n$ に従い増加し、磁場のべき乗 $(B-B_0)^m$ に従って減少するので、それらべき数の決定方法について評価方法を明らかにした。(2)スイッチング方式の改良に関しては磁場振幅を0.5~1T程度になるようにして高い磁束フロー状態および常伝導状態への遷移を起こさせるよう駆動用電磁石の設計を行った。回路シミュレーターにより負荷に低抵抗体、超伝導線材を用いたときの超伝導インバータの直流/交流変換効率を最適にするスイッチング波形の探索、ノイズ成分の低減等のシステムの最適制御方法を検討した。電力の次世代ネットワークについては、理想的には不必要な電力損失が最小になる超電

導技術を基幹とすることにより、大きな省エネルギー効果が達成される。そのためには発電機、送電経路、変圧器、限流器等々の個々の電力機器の超電導化と共に、それらを連係するインバータ、コンバータ等の電力変換器

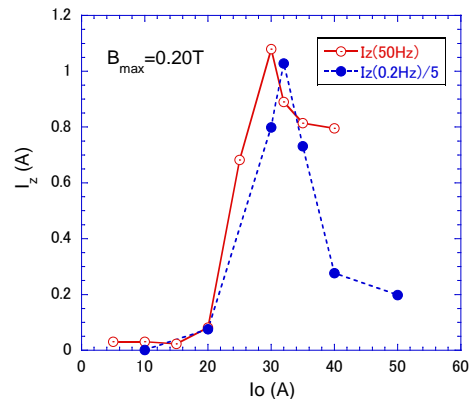


図3 変換された交流電流の初期直流電流依存性

の超電導化が必要不可欠となる。そこでインバータの基礎技術分野であるパワーエレクトロニクス用スイッチングデバイスの特性について考察した。現用の Si を素材とするスイッチングデバイスの代表例を Si-MOSFET とすると、次世代高効率電力変換器としての方向性は WGS(ワイドギャップ半導体)の代表である SiC を素材とした MOSFET の開発が大きなターゲットとなっている。その特性は極めて優秀で製造コストが下がれば高い動作周波数で大きな電力変換容量の必要な用途に使用されると考えられる。一方本提案の超電導スイッチングデバイスはオン抵抗が極めて低いので導通損失を大幅に低減でき、大電流の通電が可能であるという特徴を持っている。しかし現状の技術では耐圧を高くできない、高速スイッチングが難しいという欠点がある。これらの欠点を含んでも、現状の超電導の性能により商用周波数帯での種々の応用に適用することが可能である。すなわちパワーエレクトロニクス用スイッチングデバイスは現状、将来共に Si および WGS を

素材とするデバイスが主流を占めるが、低電圧、大電流、商用周波数帯での応用には超電導スイッチングデバイスが有利であり、省エネルギー、CO2 排出削減に大きく寄与することを明確にした。

このような立場から太陽光発電用インバータおよびデータセンター用直流/直流電圧変換器への適用性を考察した。

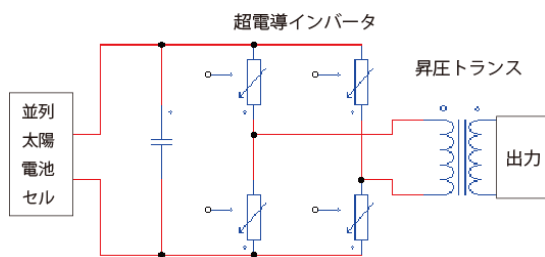


図4 超伝導インバータを用いた太陽光発電用電力変換器の提案

まず回路シミュレーターにより高効率な超伝導インバータの成立条件を検討した。実際の回路で使用する多くの定電圧電源についてシミュレーションを行った。定電圧電源からの直流を方形波の交流に変換する安定な条件を考察したところ、負荷に 100A の電流を流す条件についても変換効率の高い回路条件があることが明らかとなった。定電圧電源による直流/交流変換に関して、本超伝導ブリッジ回路においても電力消費効率 99% 以上の変換条件があることが明らかとなった。ブリッジ回路の最大電圧は 100 V 以下であることがわかり、超伝導インバータとして実現可能な条件であることが明らかとなった。

現用の半導体を用いた電力変換器では太陽光電池からの直流電力はインバータ（パワーコンディショナ）により交流電力に変換し、交流系統に接続された負荷設備に電力を供給すると同時に、余剰電力を系統に逆潮流する装置で構成されている。その機

能は最大電力追従機能(MPPT)、DC/AC 電力変換、系統連系の機能をそなえている。一例であるが太陽電池モジュールからの入力電圧 30V を昇圧チョッパで 250V にしてから、インバータに投入する。電圧型 PWM インバータにはダイオード内蔵 IGBT が使用される。その消費電力は 200 - 326 W とかなり大きな値となる。そのためインバータの効率は一般的に 94%程度といわれている。日本メーカーの太陽電池モジュールの性能を検討したところ例えば HIT-N230 モジュールは 72 枚のセルが 1580mm x 812mm のパネルに組み込まれている。1セルあたりの解放電圧は 0.5 ~ 0.7 V 程度である。モジュール化した場合には電圧は 12 ~ 50 V である。このように太陽電池は本来的に低電圧・大電流の機器である。太陽電池で発電した電力をインバータ回路で交流に変換する。インバータの効率を高くするため昇圧チョッパで電圧を高くすることが要求されている。この昇圧チョッパ、インバータ回路でのトランジスター、ダイオードによる電力損失が大きいことが問題となっている。

そこで本研究では図4に示すように超伝導インバータの低電圧・大電流の特性を生かして、太陽電池セルの起電力を直接交流に変換し、その後昇圧トランスで 100VAC/200VAC の交流を得ることを提案した。この超伝導インバータ回路で 2V, 500A の直流電力を変換した結果、4mΩ の負荷に 495A の方形波出力を得た。このときのブリッジ回路での消費電力は 2.6W であった。これは上記の半導体インバータの場合の約 1/10 の極めて小さい消費電力である。超伝導素子の冷却に必要な消費電力も含めても本設計の超伝導を用いた電力変換の効率は現用の半導体インバータに比べて有利であることを明らかにすることができた。

すなわち現状の太陽光発電では太陽光セルを直列に並べているため電圧が高く、セルの不均一さにより電圧の変動が起こりやすく、そのため MPPT のような機構が不可欠となる。一方太陽光セルを並列に配置する大きな利点は電圧が各セルの起電力 1V 以下で電圧変動が小さいことであり、そのため MPPT のような機構は不用になることである。また本研究で提案する冷凍冷却した超電導システムは大規模にするほど現状の半導体システムより省エネルギー性が優れていることを示すことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1)Kozo Osamura, Akira Sakai,
Taketsune Nakamura, Tetsuo Oka,
Shinji Fukuda, and, Sataro Yamaguchi:
“Prototype of SC Inverter”, IEEE
Transactions on Applied
Superconductivity (査読有), **21**
(2011)1445-1448

[学会発表] (計 2 件)

①長村光造;”大規模太陽光発電用超電導インバータの検討”, 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 14

②長村光造、酒井明、中村武恒、福田真治、山口作太郎;”超電導インバータの変換効率向上と数値計算”, 第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 192

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：超電導電力変換器
発明者：長村光造、国立大学法人新潟大学
権利者：長村光造、国立大学法人新潟大学
種類：特許

番号：特願 2010-518066 号

出願年月日：平 24.5.2

国内外の別：P C T

6. 研究組織

(1)研究代表者

長村光造 (OSAMURA KOZO)

公益財団法人 応用科学研究所 特別研究員

研究者番号：50026209