

ジェリーロール法による Nb₃Sn 超電導線材の作製条件と組織

Structures in Jelly Roll processed Nb₃Sn wires prepared by different procedures

太刀川 恭治, 安藤智紘(院), 金田尚也(学部), 柴山拓也(学部) (東海大・工); 竹内 孝夫(NIMS)
 K.Tachikawa, T.Ando, N.Kaneda, T.Shibayama (Faculty of Engr., Tokai Univ.); T.Takeuchi(NIMS)
 E-mail:tacsuper@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

Sn 基合金シートを用いて作製したジェリーロール(JR)法 Nb₃Sn 線材におけるシート組成、線径、熱処理条件等の諸条件の線材組織に対する影響について研究した。また、JR 法 Nb₃Sn 線材ではシート間の面と面で拡散することにより優れた特性がえられると考えられるので、新しく Sn 基合金の代わりに Cu シートと Sn-Ti 芯を用いて JR 法により線材を作製し、その組織についても研究を行った。

なお、従来の JR 法 Nb₃Sn 線材では T_c は offset~18.1K で、4.2K における B_{c2} は offset26.5T の遷移が得られている。

2. 実験方法

Sn-Ta, Sn-B 系及び Sn-Nb の混合粉末に少量の Ti を置換し、これに Cu を添加した混合粉末を熔融拡散し、ボタン状の Sn 基合金を作製した。これをプレスによりプレートとし、平ロール圧延により厚さ 80 μ m のシートに加工した。これを厚さ 100 μ m の市販の Nb シートと重ねて 1.2mm ϕ の Nb-3.3at%Ta 芯に巻きつけて JR 複合体を作製した。作製した Sn 基合金シート及び他の部材と複合体を図 1 に示した。

一方、Cu シートを用いた JR 法線材の作製は、厚さ 80 μ m の Cu シートと 100 μ m の Nb シートを重ね合わせ~2.5mm ϕ の Sn-Ti の芯棒に巻きこみ、さらに周りに厚さ 80 μ m の Sn 基合金シートを巻きつけた。これらの複合体をそれぞれ外径/内径 10.0/7.3 mm の Nb-3.3at%Ta シースに挿入して溝ロール加工後線引きして単芯線を得た。線材の熱処理後の断面組織を SEM 及び EPMA により観察し、また熱処理時間を変えて Nb₃Sn 層の生成過程を調べた。

3. 実験結果と考察

750 $^{\circ}$ C \times 10h の熱処理では Nb が Sn 基合金層に拡散し、NbSn₂ 層が均一に形成される。図 2 に線径 1.2mm の 4/1(Sn/Ta)-7Ti+2Cu シート線材の 750 $^{\circ}$ C \times 100h 熱処理後の線材断面の EPMA マッピングと Nb₃Sn 層の面積比を示した。この図から厚い Nb₃Sn 層が生成されていることが分り、また Nb₃Sn の面積比は~55%に達した。これは、線径を 1.2mm と従来より細くしたため Sn と Nb の拡散効率が向上したためで、線材の J_c 向上にも寄与すると考えられる。図 3 には図 2 のマッピングの線分析結果を示した。この線分析から、生成された Nb₃Sn 層は濃度勾配が少なく、化学量論比組成に近いことが分る。また、JR 部にも層状に Nb₃Sn 層が生成されている。

図 4 に Cu シートを用いた加工後の線材断面の顕微鏡写真と作製プロセスを示した。左の写真から、JR 層がほぼ均一に形成されている。なお、右の作製プロセスは従来の JR 法と比べて部材を変更ただけで手順はほとんど変わらない。線材は Sn と Cu を拡散させる 1 次熱処理と Nb₃Sn を生成させる 2 次熱処理を行い、その組織について報告する。

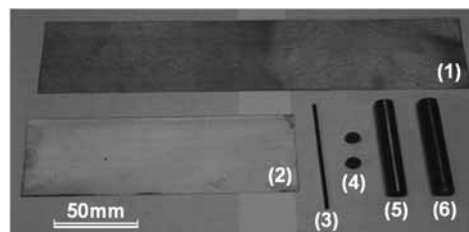


Fig.1 Components used in the JR composites. (1) Sn-based alloy sheet, (2) Nb sheet, (3) central core, (4) Cu plugs, (5) Nb-3.3at%Ta sheath, (6) assembled JR composite.

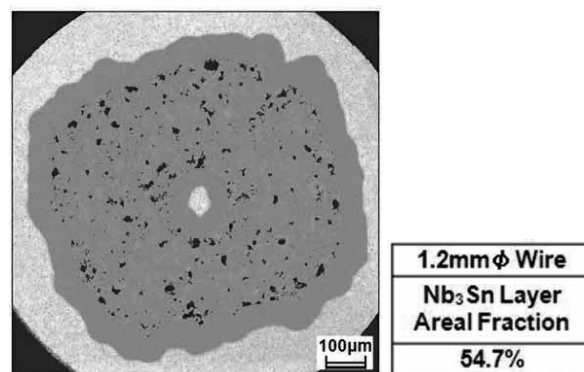


Fig.2 An EPMA mapping on the cross-section of 4/1(Sn/Ta)-7at%Ti+2wt%Cu sheet wire heat treated at 750 $^{\circ}$ C for 100h.

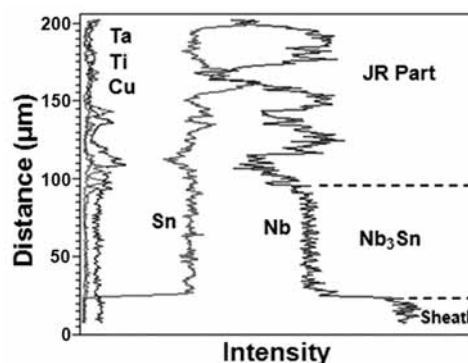


Fig.3 EPMA line scanning chart on the cross-section of the wire shown in Fig.2.

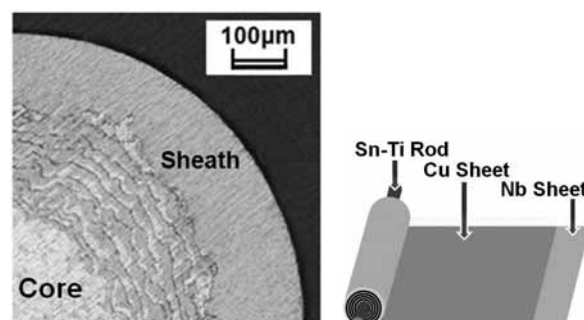


Fig.4 Cross-section of the JR wire using Cu/Nb sheets and a Sn-Ti central rod.

内部拡散法 Nb₃Sn 線材の開発

Development of internal Tin processed Nb₃Sn wire

大圃 一実, 和田山 芳英, 木村 守男, 中川 和彦, 宮下 克己(日立電線)

OHATA Katsumi, WADAYAMA Yoshihide, KIMURA Morio, NAKAGAWA Kazuhiko, MIYASHITA Katsumi (Hitachi Cable)

E-mail: ohata.katsumi@hitachi-cable.co.jp

1. はじめに

Nb₃Sn 超電導線材の製造方法として従来よりブロンズ法が広く用いられているが、ブロンズ中の Sn 濃度の固溶限(約 15.8wt%)により Sn 供給量が制限され、臨界電流特性もほぼ上限に達していた。内部拡散法は Sn 供給源として単体で Sn を複合化するので Sn 濃度の制約がなく、このため高い臨界電流特性が可能で、高磁場マグネットなどへの応用が期待されている。

我々は単芯の Nb 素線と Sn 素線を複合化する方法で内部拡散法多芯線材を作製し、超電導特性の測定評価を行っている。この方法では 1 回の多芯化で多芯線材を作製するため低コストであること、Nb フィラメントが Sn フィラメントと同サイズであるため伸線加工中や熱処理中に Nb フィラメントが移動しにくいなどの特長があると考えられる。本報告では上記構造の線材を試作し、伸線加工性、超電導特性などを評価して、本方式による長尺線材の作製の可能性について確認する。

2. 実験方法

線材の作製は、はじめに Cu 被覆した単芯の Nb 素線と、同じく Cu 被覆した単芯の Sn 合金製の素線を作製し、Fig.1 に示す断面模式図のように Sn 素線同士が隣接しないよう分散配置させた構造で複合化して多芯ビレットを作製した。芯数は、線材の基本的な特性を確認するための小型線材として 109 芯、および長尺化を目標に芯数を増加した 673 芯の多芯線材を作製した。最後にこれを押出および伸線加工により線径 ϕ 0.5~ ϕ 1.0mm の線材を作製した。

作製した線材の超電導特性を、12T~18T の磁場中で 0.1 μ V/cm の電界基準で臨界電流値を測定し、これを non-Cu 部の断面積で除して non-Cu Jc を求めた。

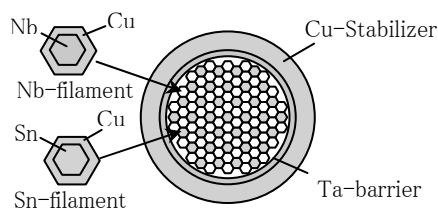


Fig.1 Schematic drawing of internal Tin wire.

3. 結果

Fig.2 に線径 ϕ 1mm に伸線した 673 芯線材の概観を示す。線径 ϕ 1mm で数 100m の長さまで伸線途中の断線もなく加工することができ、本構造の線材が良好な伸線加工性を有することを確認した。Fi.3 は同様に線径 ϕ 1mm の線材の断面形状を観察した結果である。規則的なフィラメント配列と、均一なフィラメント形状であることより、減面加工による断面形状の乱れも小さいことが、良好な長尺伸線を可能にしたものと考えられる。

Fig.4 に non-Cu Jc の磁場依存性測定結果を示す。109 芯の小型線材 (Φ 0.5mm) では、18T の磁場中でおよそ

320A/mm² の non-Cu Jc が得られた。これはブロンズ法のおよそ 1.5 倍に相当する値である。673 芯線材 (ϕ 1mm) でも同様に Jc 測定を行った結果、18T で約 340A/mm² が得られ、ビレットサイズを大型化した場合でも、Jc の値を維持して長尺化が可能であることを確認した。

以上のように、本構造の内部拡散法線材で、良好な伸線加工性と超電導特性が得られることが確認できた。

当日は、磁化率測定とフィラメントサイズ等との関係についても報告する。

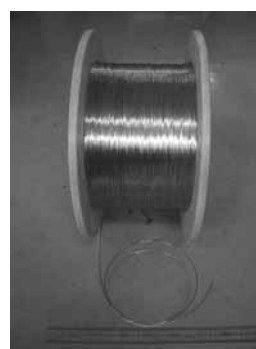


Fig.2 Outer view of 673-filament internal Tin processed Nb₃Sn wire after drawing (ϕ 1mm).

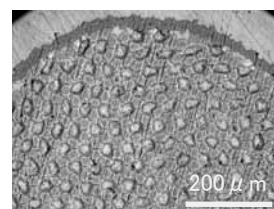


Fig.3 Cross-sectional view of 673-filament wire (ϕ 1.0mm)

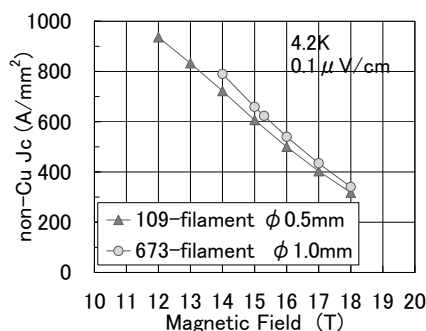


Fig.4 Jc-B properties of 109-filament and 673-filament wire.

内部拡散法 Nb₃Sn 線材の結晶組織と臨界電流特性

Microstructure and critical current properties of internal tin processed Nb₃Sn wire

和田山 芳英, 大園 一実, 木村 守男, 中川 和彦(日立電線)
 WADAYAMA Yoshihide, OHATA Katsumi, KIMURA Morio, NAKAGAWA Kazuhiko (Hitachi Cable)
 E-mail: wadayama.yoshihide@hitachi-cable.co.jp

1. はじめに

内部拡散法 Nb₃Sn 線材は高い臨界電流密度を得ることができる手法として数多くの研究開発がなされている[1][2]。この線材はブロンズ法と比較して高濃度の Sn を Nb へ供給できることが特徴であるが、Sn を配置する領域が必要なため、線材断面当りの Nb 占積率を高くすると Nb 芯間の距離が小さくなり、交流損失が大きくなりやすい課題がある。

本報告では、臨界電流密度と交流損失をバランスさせた線材を作製することを目的として、Nb と Sn の単芯を組合せた単純な構造の線材を試作し、その反応状態と臨界電流特性の関係を観察評価した。

2. 実験方法

(1) 供試線材

実験に用いた内部拡散法 Nb₃Sn 線材の主要諸元を表 1 に示す。線材は線径と断面構成が異なる 2 種類である。その内部には、Nb と Sn の単芯が規則的に多数配置されており、線材によって組込み芯数が異なる。Nb, Sn 単芯の直径はほぼ同等である。

Table 1 Specification of the Nb₃Sn wire.

	Wire A	Wire B
Wire diameter (mm)	φ 0.5	φ 1.0
Cu ratio	0.5	0.5
Nb core number	72	474
Nb core diameter (μm)	27	22
Sn core number	37	199
Sn core diameter (μm)	29	26

図 1 に線材断面における Nb 芯と Sn 芯の基本配置を示す。線材は Nb と Sn の各単芯からなる複合構造で、Sn 芯の周囲に Nb 芯が 6 本配置されている。線材の Nb/Cu/Sn の組成比、及び Nb 芯間の距離は、Nb, Sn 芯の直径と外周部に被覆した Cu の厚さにより制御した。

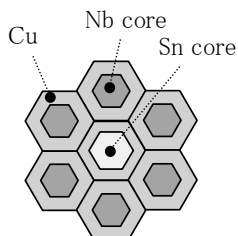


Fig.1 configurational base unit of sample wire.

直状の線材(L=120mm)を石英管に真空封入し、マッフル炉で熱処理した。熱処理温度は、210℃、400℃、650-750℃の 3 段階で、各々の保持時間を種々変化した。

(2) 臨界電流密度の測定方法

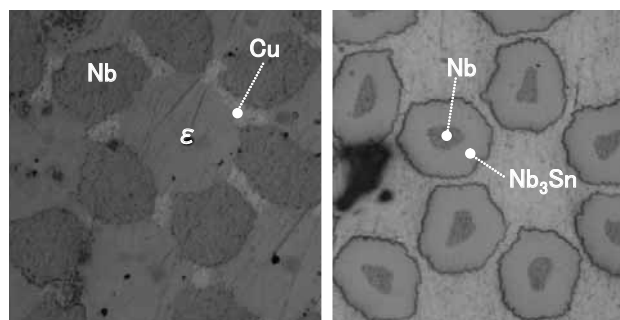
臨界電流密度 J_c(non-Cu) は、長さ 40mm の短尺サンプルを用いて直流四端子法で測定し 1.0 μV/cm の電圧が発生した

時の電流値を、線材の非 Cu 領域の断面積で除することで求めた。

3. 実験結果

(1) 反応生成相

本線材の熱処理過程では、①Sn 芯が周囲の Cu 被覆と反応して Cu-Sn 合金化した後、②Cu-Sn 合金の Sn が Nb 芯と反応して Nb₃Sn が生成する。図 2(a) は 210℃×25h と 400℃×12h のブロンズ化処理を施した線材 A の断面写真を示す。6 本の Nb 芯の中心部にある Sn 芯は、周囲の Cu 被覆と反応し Cu₃Sn(ε 相)が生成しているが、Nb 芯間の Cu 部には Cu(α 相)が残存している[1][3]。これは Sn 芯からの拡散距離が大きいこと、及び線材 A の Cu-Sn 組成が低 Sn 濃度(約 20at%)であるためと考えられる。これに対して、断面 Sn 濃度が約 25at%の線材 B では均質な ε 相であった。図 2(b)は 700℃×72h の Nb₃Sn 生成処理を施した線材断面である。この処理時間では未反応な Nb が大きく残存している。これに対して線材 B では残留 Nb がほとんど認められず、Nb 芯と反応する Cu-Sn 相の Sn 濃度が拡散速度に影響していた。



(a) 210℃×25h + 400℃×12h (b) 700℃×72h

Fig. 2 Cross-sectional view of wire A.

熱処理条件を変化させた線材 A, B の Nb₃Sn 生成厚さを測定し、その生成速度を評価した。その結果、Nb と反応する Cu-Sn の Sn 濃度が高い線材 A の方が Nb₃Sn 生成速度は大きく、ブロンズ化の熱処理条件の影響は小さかった。またブロンズ法線材[4]と比較すると、その生成速度は約 1 桁大きいものであった。

(2) 臨界電流特性

熱処理条件が異なる線材 A, B の臨界電流密度を測定した結果、J_c(non-Cu)は約 340A/mm² @18T であった。Nb₃Sn 層の生成と共に臨界電流密度が向上したが、詳細は当日報告する。

参考文献

- [1] I. Pong et al., J. Mater. Sci., 43, p. 3522 (2008).
- [2] P.Zhang et al., Supercond. Sci. Technol. 23, 034013(2010).
- [3] C.Scheuerlein et al., Appl. Phys. Lett., 90, 13520 (2007).
- [4] I.W.Wu et al., J. Appl. Phys., 54, (12), p.7139 (1983).

放射光を用いたNb₃Sn線材の残留ひずみ測定Residual strain measurement for Nb₃Sn wires by synchrotron radiation

小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 菅野 未知央(京大); 町屋 修太郎(大同大); 菖蒲 敬久(原子力機構);
長村 光造(応用科学研)

OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); SUGANO Michinaka (Kyoto Univ.);
MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); SHOBU Akihisa (JAEA); OSAMURA Kozo (RIAS)
E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々のグループでは、量子ビームを用いた実用線材の残留ひずみ測定を数多く行って来た[1, 2]。特に、ひずみに弱いNb₃Sn 超伝導線材に対して、中性子を用いた残留ひずみ測定を数多く実施している。中性子は透過力が強いので、厚い安定化銅に覆われた Nb₃Sn からの回折線を得ることのできる強力なツールとなるためである。これに対し放射光は、その透過力は中性子に比べて小さいが、分解能の面では圧倒的に優れている。放射光を利用した実験は、テープ状で透過距離の短い高温超伝導線材に対して既に行われており、高精度の実験が出来ている[3]。Nb₃Sn 線材に対しても、放射光の高い分解能を利用して、内部ひずみ測定を行うことができると、そのひずみの変化を精度よく調べることができる。

そこで今回は、Nb₃Sn 線材を放射光で測定することを試みた。得られた結果を用いて、Nb₃Sn 線材の引張りひずみ下での内部ひずみがどの程度の精度で測定でき、そこから何が分かるのかを議論する。

2. 実験方法

測定に用いる試料として、これまでに中性子等での測定経験のあるCuNb 補強 Nb₃Sn 線材を用意した。このため、結果の妥当性、放射光の有用性など中性子回折との比較をすることが可能となる。

測定は、SPring-8 の BL46XU で行った。測定を行うにあたり、Nb₃Sn 線材の安定化Cu層を透過して、Nb₃Snからの回折線を得るために必要なX線のエネルギーを算出した。すると、X線のエネルギーが50 keV以上のときに、50%以上の透過率を示すことが分かった。このため、実験は72 keVと58.5 keVの条件で行った。

測定時は線材に引張り荷重を印加した状態で、Nb₃Sn の320, 321 回折の測定を行った。いずれの回折線も、統計誤差を抑えるために、2000 カウント以上のカウント数が得られるよう時間をかけて測定した。

ひずみの算出には、ひずみゼロの Nb₃Sn の格子定数が必要であるため、線材から取り出したフィラメントの測定も行った。この測定結果から格子定数を求め、各面の面間隔から求めた格子定数との比較により、ひずみを計算した。

3. 実験結果と考察

線材の放射光を用いた測定結果を図1に示す。これに示すように、高エネルギーの放射光を用いることで、線材内部のNb₃Sn からの回折線を測定できることが分かった。ただし、使用するエネルギー以外のX線を完全に消すことができないため、黒丸で示したように、別のエネルギーのX線からの回折ピークが現れている。

測定結果から、Nb₃Sn に加わるひずみをそれぞれの回折面ごとに計算し、図2に示した。この結果から、測定された残留ひずみの値が、与えた引張りひずみの大きさに対応して、線材に変化する様子が高精度で観測できた。ここから、放射光を用いることで、Nb₃Sn 線材内部の Nb₃Sn に発生しているひずみの変化を、詳細に測定することが出来ることが分かった。

実験結果より、Nb₃Sn 321 面と320 面の軸方向ひずみを線形

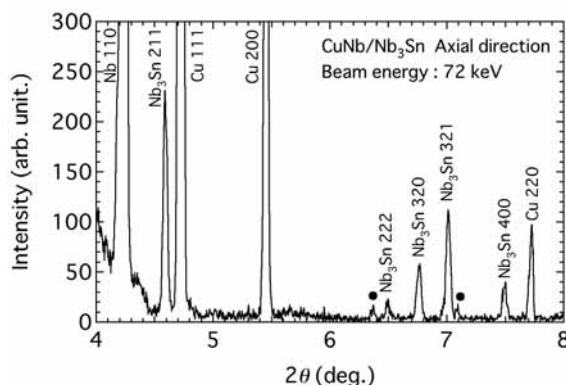


Fig. 1 The X-ray diffraction pattern of CuNb/Nb₃Sn wires.

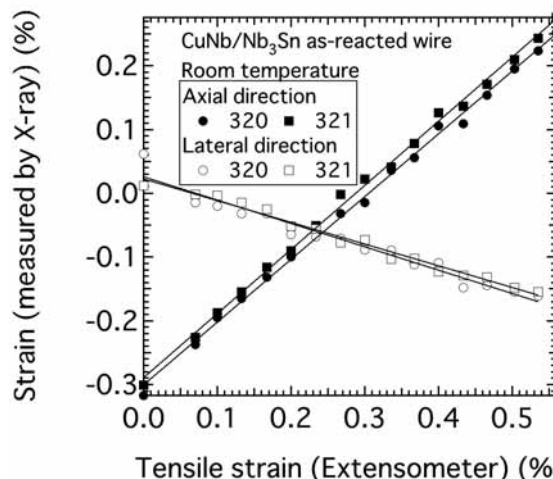


Fig. 2 Residual strains of Nb₃Sn wires as a function of tensile strain.

近似した時の傾きは、321 面では 1.004、320 面は 0.984 となった。この結果は、2 つの面におけるひずみの変化は、線材全体の引張り量と同じであることが分かった。また、横方向ひずみの軸方向ひずみに対する変化率(縦横比)は、321 面では 0.340、320 面は 0.366 となり、軸、横方向ともに違いが見られた。本質的には、各結晶面における回折ピークから算出した弾性定数には違いが見られる。今回の実験で各面のひずみ変化に違いが生じたのは、それぞれの面の弾性定数の違いから生じたものだと考えられる。

参考文献

- [1] H. Oguro et al.: J. Appl Phys. Vol. 101 (2007) 103913
[2] H. Oguro et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 025034
[3] M. Sugano et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 22 (2009) 015002

Nb₃Sn 線の曲げによる臨界電流値の劣化解析モデル Analytical Model of Critical Current of a Bent Nb₃Sn Strand

小泉 徳潔, 村上 陽之, 辺見 努, 中嶋 秀夫 (原子力機構)
KOIZUMI Norikiyo, MURAKAMI Haruyuki, HEMMI Tsutomu, NAKAJIMA Hideo (JAEA)
E-mail: koizumi.norikiyo@jaea.go.jp

1. はじめに

核融合炉等で使用される Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット(CIC) 導体は、運転時に導体に加わる巨大な電磁力によって、導体内部の素線が波状の曲げ変形を受けて、臨界電流性能が劣化する[1]。そこで、著者らは、素線の曲げ変形を考慮して、CIC 導体の性能評価を行うための解析モデルを開発した[1]。本モデルでは、計算時間の制約から、曲げを受ける素線の臨界電流値を解析的に計算することとした。

一方、素線の臨界電流値は、フィラメント間の横断抵抗が十分に低い(Low Transverse Resistance Model; LTRM)か、十分に高い(High Transverse Resistance Model; HTRM)両極端の場合にのみ解析的に評価できる。そこで、Ref.[2]では、分布定数回路モデルを用いて臨界電流値を数値計算し、横断抵抗の評価を試みた[2]。ただし、素線内の銅、ブロンズが焼きなまされていることから、これらの剛性は無視した。しかし、解析結果と試験結果の差は大きく、横断抵抗の評価は行えなかった。そこで、解析モデルの改良を試みることにした。

2. 新たな解析モデル

新たな解析モデルでは、銅、ブロンズの剛性(弾塑性)も考慮し、これらの応力-歪(SS)線図は、熱処理した銅線のそれ(Fig.1)と等しいと仮定した。ただし、Nb₃Sn 線の熱処理によって、銅、ブロンズに印加される熱歪も考慮した。従って、銅、ブロンズは、曲げ歪がゼロの場合でも塑性して、例えば、Fig.1 に破線で示す SS 線図(塑性歪が 0.2%のときの例)となる。

さらに、フィラメントは弾性変形するが、引張歪がある数居値(ϵ_{brk})を超えたところで断線して、剛性がゼロになると仮定した。

以上の仮定に加えて従来どおりハリア材は弾性変形すると仮定し、梁モデルを用いて曲げ歪を計算し、LTRM、HTRM に従って、素線の臨界電流値を計算することとした。

3. 解析モデルの検証と考察

解析モデルの妥当性を検証するために、解析結果を試験結果と比較した。素線に横荷重を加えることで素線を曲げて臨界電流値を測定する試験では、横荷重から曲げ歪を求める過程で誤差が生じる可能性がある。このため、素線を既知の曲率に予め曲げることで曲げ歪を印加する方法を採用した。すなわち、Fig.2 に示すように、直径の異なるボビンに素線を巻き付けて熱処理して、熱処理後に他のボビン(ITER ボビン)に素線を巻き直した後、臨界電流値を測定した。なお、試験で使用した素線は、中心ツノト(CS)モデル・コイル用に開発した直径 0.81mm のブロンズ法 Nb₃Sn 線である[2]。

Fig.3 に解析結果と試験結果の比較を示す。解析は $\epsilon_{brk}=0.5\%$ 及び 1.0% の場合について実施した。図より、新たなモデルで HTRM を仮定することで、解析によって試験結果を良く模擬できることが分かった。なお、試験した素線が HTRM に従うことは、ブロンズの比抵抗から妥当である[2]。

さらに、本モデルを用いて、一度曲げた素線を曲げ戻したときの臨界電流値も計算した。紙面の都合上詳細は省くが、最初の曲げによって銅、ブロンズが塑性変形(中立線が移動)して素線が伸び、曲げ戻した時には銅、ブロンズが弾性変形するため、伸びが保存することも分かった。これにより、臨界電流値が曲げ前に比べて向上する可能性がある。

4. まとめ

銅とブロンズの塑性変形、及びフィラメント断線を考慮した新たなモデルを考案し、一様に曲げたブロンズ法 Nb₃Sn 線の臨界電流値の測定結果と解析結果を比較した。両者は良く一致し、モデルの妥当性を検証することができた。

参考文献

1. N. Koizumi, *et al.*, *IEEE Trans. ASC*, **16**, 2006, p.831.
2. N. Koizumi, *et al.*, *Physica C*, **463-465**, 2007 p.1316.

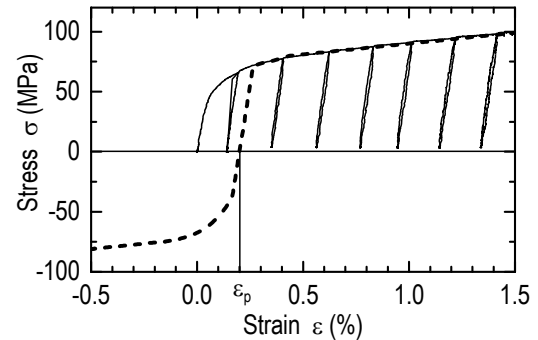


Fig.1 The strain-stress (SS) curve of an annealed copper wire, measured by A. Nyilas. The thin solid line is the measured SS curve with unloading. The stress of copper calculated when plastic strain, ϵ_p , equals to 0.2% is also shown as a thick, dashed line.

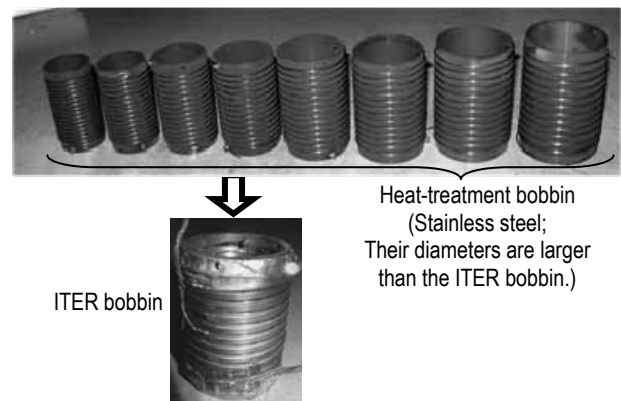


Fig.2 Nb₃Sn strands mounted on bobbins for heat treatment and an ITER bobbin. A Nb₃Sn strand is dislodged from the upper bobbin and wound on the ITER bobbin to apply a uniform bending strain.

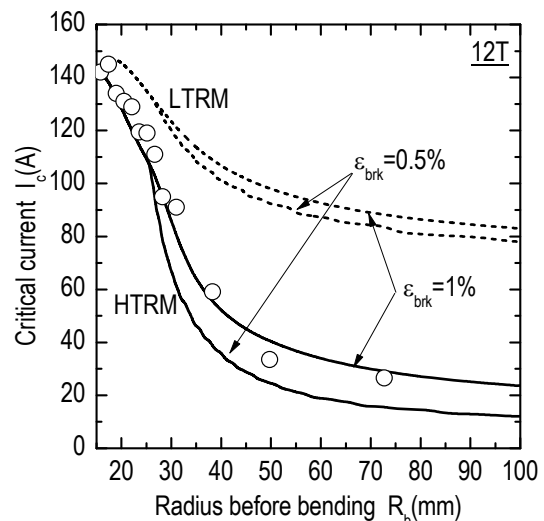


Fig.3 The measured and calculated critical currents of the CS model coil strand at 12T and 4.2K. The open circles are measured values. Solid lines are the calculated results assuming HTRM and $\epsilon_{brk}=0.5\%$ and 1.0% . Dashed lines are the ones assuming LTRM and $\epsilon_{brk}=0.5\%$ and 1.0% .

ITER TF コイル用 Nb₃Sn 素線の評価技術

Evaluation technique of Nb₃Sn superconducting strand for ITER TF coil

名原 啓博, 布谷 嘉彦, 磯野 高明, 小泉 徳潔, 濱田 一弥, 松井 邦浩, 辺見 努, 吉川 正敏, 宇野 康弘,
 押切 雅幸, 川崎 勉, 藤田 敦, 関 秀一, 関 正男, 海老澤 昇, 井口 将秀, 高橋 良和, 中嶋 秀夫(原子力機構)
 NABARA Yoshihiro, NUNOYA Yoshihiko, ISONO Takaaki, KOIZUMI Norikiyo, HAMADA Kazuya, MATSUI Kunihiro,
 HEMMI Tsutomu, YOSHIKAWA Masatoshi, UNO Yasuhiro, OSHIKIRI Masayuki, KAWASAKI Tsutomu, FUJITA Atsushi,
 SEKI Syuichi, SEKI Masao, EBISAWA Noboru, IGUCHI Masahide, TAKAHASHI Yoshikazu, NAKAJIMA Hideo (JAEA)
 E-mail: nabara.yoshihiro@jaea.go.jp

1. はじめに

国際熱核融合実験炉 (ITER) では、トロイダル磁場 (TF) コイル用に Nb₃Sn 素線を約 83,000km (日本分担分は 25%)、中心ソレノイド (CS) 用に約 26,000km (日本分担分は 100%) が使われ、原子力機構は日本の国内実施機関としてこれらの調達を行っている。大量に製作される素線の品質管理が重要となるため、まず ITER 参加国の各試験機関で臨界電流 (I_c) などのベンチマーク試験が行われ、測定 の妥当性が確認された [1]。しかしその後、日本で TF 用素線が大量生産される中、メーカーの I_c 値の妥当性を確認するために、原子力機構でダブルチェックの実施を進めたところ、原子力機構の方が高め の I_c 値になる傾向が見られた。本報告でその原因を述べ、 I_c 測定におけるセッティングの難しさについて得られた知見を示す。

2. サンプル準備方法

I_c 測定は IEC 規格を元に ITER 機構が定めた方法で行っている。 I_c 測定用の治具を Fig.1(a) に示す。素線を巻き付けるボビンは、素線との熱収縮差が小さい Ti-6Al-4V 製である。熱処理温度は ±5°C の均一度を保ち、真空中もしくは不活性ガス中で熱処理する。熱処理後、ボビンと素線の間に薄いシートなどを通し、素線がボビンに固着していないことを確認する。そして、素線をボビンに押さえた状態で、端部を上下の銅リングに半田付けする。通電方向は、素線がボビンに接近し圧縮方向の力がかかるか、ボビンから離れて引張り方向の力がかかるかのどちらかがあるが、後者の場合、 I_c 値によって歪みが変わることになってしまうため、通電方向は素線に圧縮方向の力がかかるようにする。

3. 臨界電流値の差異の原因

上記の方法で I_c のダブルチェックを進めるにつれて、原子力機構で測定した I_c が、TF 用素線を供給している A 社、B 社の測定値よりも 10A 前後高めになる傾向が見られた。その原因は下記のように推測される。

Fig.1(a) の一部を拡大した断面の模式図を Fig.1(b) に示す。図のように、素線を取り込む溝の深さは素線径よりも僅かに深く、素線のセッティング方法によって、素線とボビンの間に隙間が生じる場合 (実線円) もあれば、素線がボビンに接する場合 (破線円) もあり得る。素線が実線円のように溝の最も外側にある場合、破線円に比べて約 0.01mm 外側に位置する。破線円のように素線とボビンが接している場合、通電により素線に電磁力がかかってもボビンで支えられるため、素線に圧縮歪みは加わらない。原子力機構では指で素線をボビンに押さえて端部を半田付けしたため、この状態に近いと推測される。一方、実線円のように素線が溝の最外部にある場合、通電により素線はボビンに接触するまで圧縮歪みがかかり得る。A 社はカプトンテープで、B 社はシールテープで素線をボビンに押さえて端部を半田付けしたため、この状態に近いと推測される。このとき素線が受ける圧縮歪みは約 -0.065% と見積もられ、その分だけ I_c は低下し得る。

Fig.2 に A 社と B 社の素線の 12T, 4.2K における I_c の歪み特性を示す。初期ひずみが -0.25% 前後であるとすると、図の

ように -0.065% の圧縮ひずみは I_c を 10A 程度低下させることになり、これが原因で、原子力機構とメーカーの間に I_c の差異が生じたと考えられる。このことから、原子力機構と各社が同じセッティング方法を行い、 I_c 値が高めになる傾向がなくなった。

4. まとめ

Nb₃Sn 素線の臨界電流を測定する際に、僅かなセッティング方法の違いによって、測定値に差異が生じ得ることを述べた。規格の策定や、複数の試験機関で相互比較を実施する際には、手順の詳細な取り決めに注意する必要がある。

(a) Photograph of strand and holder for I_c measurement

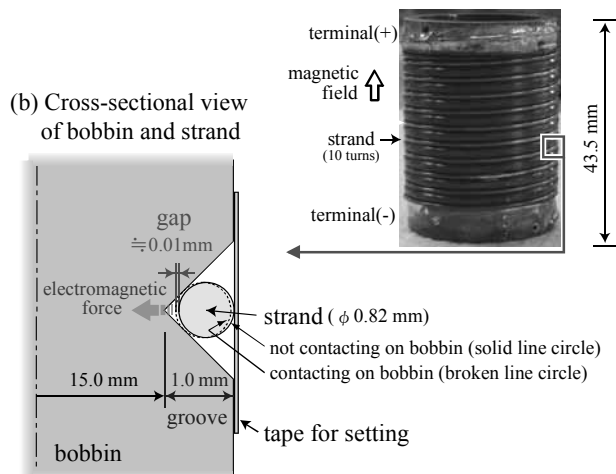


Fig.1 Holder to measure the critical current (a) and Cross-sectional view of bobbin and strand (b).

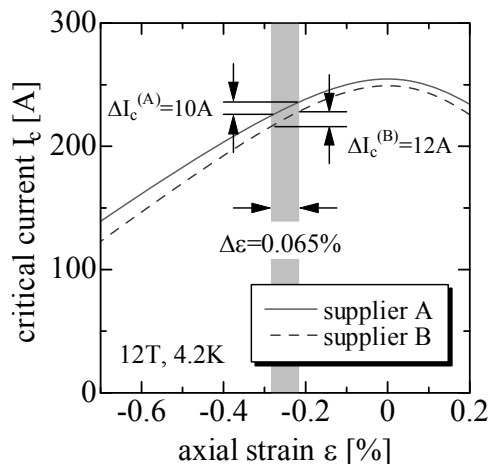


Fig.2 Critical current against axial strain on each supplier

参考文献

- Matthew C. Jewell, et al.: IEEE Trans. Appl. Sup., Vol. 20, No.3, (2010) pp.1500-1503

フライホイール電力貯蔵装置の構造解析と比較

Structural Analysis and Comparison of Flywheel Energy Storage System

ムハマド スブハン, 小森 望充(九工大)

MUKHAMAD Subkhan, KOMORI Mochimitsu (Kyushu Institute of Technology)

E-mail: komori_mk@yahoo.co.jp

1. はじめに

現在、データセンターや病院、鉄道、通信においては、瞬時電圧低下により機器や電力系統に影響を与えないための電力貯蔵が必要とされている。

これまでの構造では、回転時にロータに大きな振動が発生しており、フライホイール回転数の上昇は難しい。本研究では電力貯蔵量の増大するため、高速回転かつ安定回転のため重心を低くして永久磁石軸受と超電導軸受を用いた新しいフライホイール電力貯蔵装置を試作した。本研究ではヤジロベエ原理での構造解析、発電電動機の解析、さらに今までの構造との比較をする。

2. 装置構造

Fig.1 はチャンバー内の使用した電力貯蔵用フライホイールシステム構造を示す。冷凍台の上に銅製の土台と背板があり、上から永久磁石軸受、発電電動機、フライホイール、超電導軸受が取り付けられている。回転円盤(フライホイール)は超電導軸受の永久磁石の真上に取り付けられている。発電電動機の永久磁石もフライホイールに取り付けられている。ロータ上部は永久磁石軸受、下部は超電導軸受によって非接触支持される。変位センサはフライホイールの上部と下部付近に設置し、回転時のロータ振動を計測する。フライホイールの取り付けられたロータは、超電導体を磁場中冷却することによって浮上される。

回転数が向上するかつ安定高速回転できるように、構造ではフライホイールの重心が支点より低くすることにした。

3. 回転実験

Fig.2 に提案型永久磁石軸受と超電導軸受でのフリーラン特性結果を示す。Fig.2 におけるフリーラン時間は約 40 秒であり変化は見られない。回転時の振動は超電導軸受付近で $0.25\text{mm}_{\text{o-p}}$ 程度以下、永久磁石軸受付近で $0.30\text{mm}_{\text{o-p}}$ 程度以下に抑えることができた。振動特性においては、2,000~3,000rpm 付近で共振が発生している。

Fig.3 に負荷に瞬時電圧低下を生じさせたときのフライホイール放電状態を示す。フライホイールの回転数は 4,300rpm

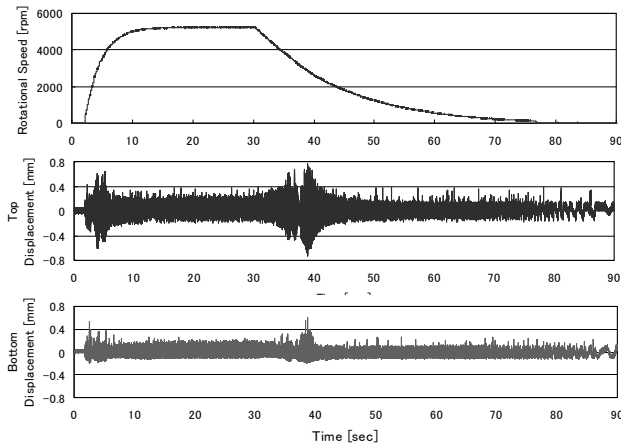


Fig.2 Rotational Speed and Vibration Characteristics

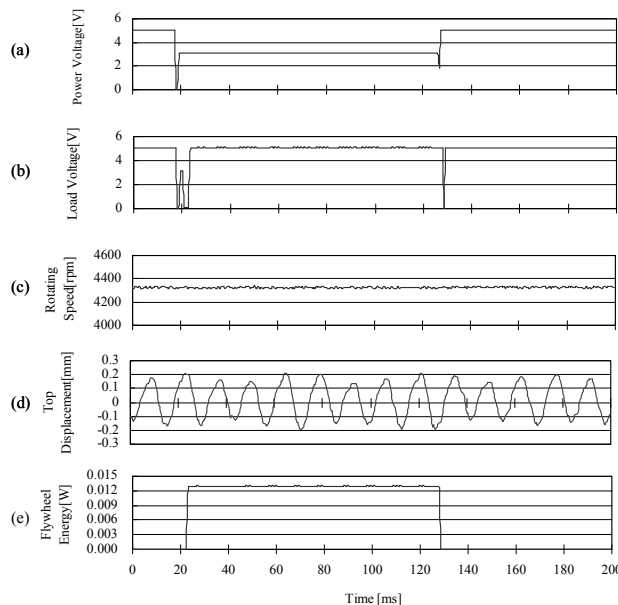


Fig.3 Characteristic at the time of momentary voltage drop

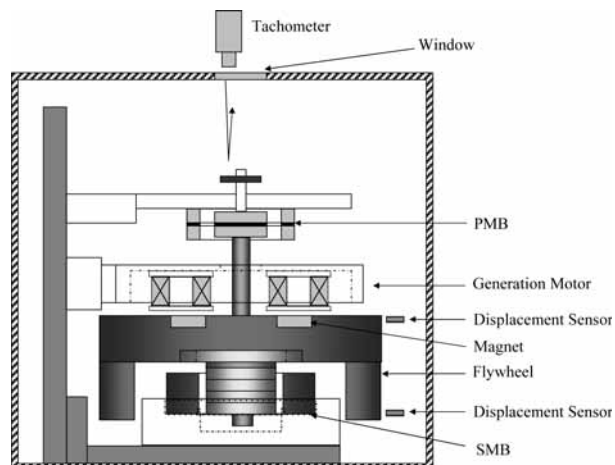


Fig.1 Energy Storage Flywheel System

であり、3V 約 100ms の瞬低を生じさせた。このときの電源電圧と負荷電圧、そしてフライホイール回転数の状況を示したものである。

4. まとめ

フライホイールの重心が支点より低くしようとしたが、現時点ではフライホイールの重心が軸受の支点よりまだ上にある。そのため、重心と軸受の支点との関係を検討する必要がある。そして、現在では構造の解析など十分なデータが取れていないため、これからヤジロベエ原理での構造解析、発電電動機の解析などについても評価、検討する。

参考文献

1. K. Murakami, M. Komori, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17 (2007) pp. 2146 - 2149

SMES 用 Y 系コイル開発 Coated conductor based coil development for SMES

式町 浩二, 玉田 勉, 成瀬 光人, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力); 淡路 智, 渡邊 和雄(東北大); 西島 元(物材研)
SHIKIMACHI Kouji, TAMADA Tsutomu, NARUSE Mitsuhito, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power);
 AWAJI Satoshi, Watanabe Kazuo (Tohoku Univ.); NISHIJIMA Gen (NIMS)
 E-mail: Shikimachi.Kouji@chuden.co.jp

1 はじめに

電力系統制御用 2 GJ 級 SMES[1]の要素技術開発において、高磁界・大電流コンパクトコイルの実現を目指し、フープ応力 600 MPa 以上、通電容量 2 kA 以上のコイル開発を進めている。今回、CVD-Y 系線材を用いてコイルを製作し、フープ応力試験や大電流通電試験を実施したので、その結果について報告する。

2 フープ応力試験

多層巻コイルのフープ応力耐性 600 MPa を達成するため、シングルパンケーキ(以下、SP という)型 69.5 巻の樹脂含浸コイル(内/外径: ϕ 200/ 251 mm)を製作した。用いた Cu メッキ IBAD/ CVD-GdYBCO 線材は幅 10 mm、厚さ約 280 μ m (ハステロイ基板厚さ 100 μ m)、 I_c 200 A 級(局所的に低 I_c のため 3 箇所パッチによる補修あり)である。11 T 外部磁界中で励磁した時のコイル全体(電極込)および補修箇所の I - V 特性をそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 1 より、最大電流 572 A 通電時においても、磁束フロー電圧は発生せず、劣化は観測されなかった。この時、最大フープ応力は、ハステロイ基板に対し、BJR による計算では 744 MPa、一体変形の Wilson の式[2]からは 854 MPa となる。同様の試験により、コイルは一体変形と想定される挙動を観察している[3]。また、Fig. 2 より、補修箇所においてもフロー電圧や劣化は観測されず、上記フープ応力値に対して補修技術が有効であることを確認した。

3 大電流通電試験

2 GJ 級 SMES に要求される 2 kA 以上の電流容量を確保するため、集合導体として AC ロス低減のため素線絶縁した Cu メッキ Y 系線材 4 本を並列に束ね、SP 型 33 巻の樹脂含浸コイルを製作した。コイルサイズは 2 GJ 級トロイド型 SMES コイルの主要諸元(11 T, 600 MPa)と同等となる 20 MJ 級トロイド型 SMES の要素コイルの外径 ϕ 650 mm 級とした。コイルは内側電極に、4 素線を 90° 等配で半田付けして巻き始め、90° 等配で配置された外側電極で巻き終わる形とし、回転対称の形状を確保するとともに、電極部における線材接続長を同一長 100 mm とすることで、4 素線のインダクタンス等の電気定数を合わせ、4 素線の均流化を図った。

液体ヘリウム中においてコイルに大電流を通電した時のコイル各素線の発生電圧を Fig. 3 に示す。横軸は導体電流を表している。コイルの全通電電流が 1 kA 付近までは各素線の発生電圧に大きな差異は観測されておらず、均流化が図られている。一方、1 kA 付近からの各素線に偏流が観測されているが、コイル外側各電極の電圧測定、近傍磁場測定の評価結果、各線材のフロー電圧を反映していると考えられる。

謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

参考文献

1. K. Shikimachi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19 (2009) pp. 2012-2018.
2. M. Wilson "Superconducting magnets", Oxford Sci. Pub., 1983.

3. S. Awaji, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) 2A-a12

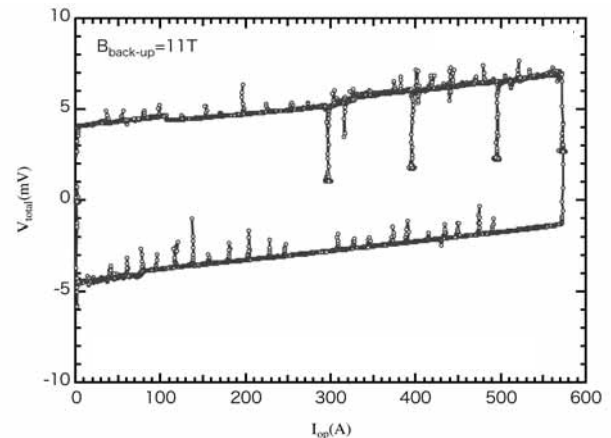


Fig. 1. I-V characteristics of the SP coil excited in 11 T outer magnetic field.

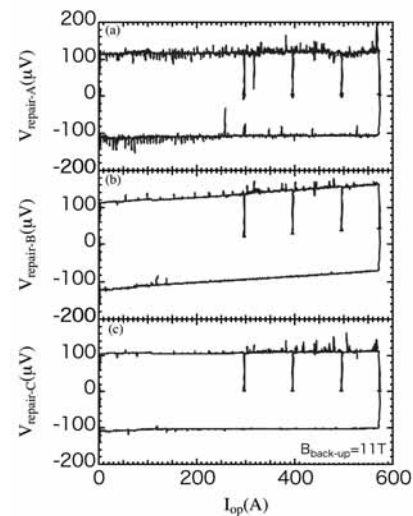


Fig. 2. I-V characteristics at three repaired portions of the SP coil excited in 11 T magnetic field.

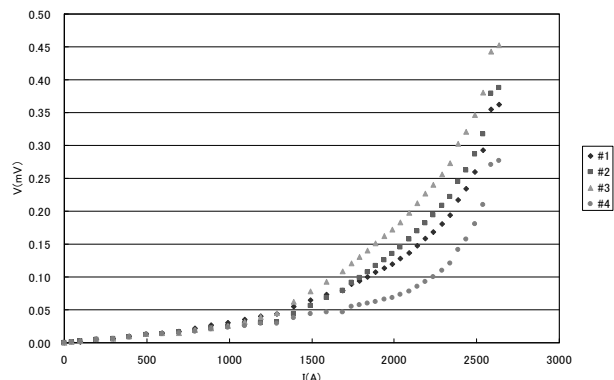


Fig. 3. I-V characteristics of the 4 bundled-tapes coil in liquid Helium.

自然エネルギーに用いる SMES 容量の最適化の検討

Study on optimization of SMES capacity for natural energy

中村 隆人, 天田 博仁, 中山 知紀, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大)

NAKAMURA Takahito, AMATA Hiroto, NAKAYAMA Tomonori, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)

E-mail: takahito@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

自然エネルギーは出力変動が著しいため、連系した電力系統に悪影響を及ぼす事が懸念されており、出力変動対策として系統に電力貯蔵装置を併設する方法が有力視されている。自然エネルギーの出力は 1 分程度の急激な変動成分と、ゆっくりと変化する平均成分に分けられるので、それぞれに対応した貯蔵装置を用いるのが望ましい。変動成分に対しては瞬間的に大電力の入出力が可能な SMES を、平均成分には水素-燃料電池、もしくは、電池を用いる。貯蔵装置の最適な容量を決定するには、自然エネルギーの出力を予測する必要があり、本論文では、移動平均平滑法とカルマンフィルタ予測を用いて風力発電の出力予測を行い、最適な SMES 容量を決定する手法を考案したので報告する。

2. 出力変動予測手法

変動の激しい時系列データを簡便に平滑化する方法として、移動平均平滑法がある。移動平均は、直近の N 個の時系列データの単純な平均である。現時点の値を $x(n)$ とすると、平均値 $y(n)$ は以下の式で定義される。

$$y(n) = \sum_{i=1}^N x(n-i) / N \quad (1)$$

しかし、移動平均は実際の動きから遅れて平滑化した上で追従するため、理論的な考察には有用であるが、現実的な手法としてはあまり用いられない。

モデルの更新を効率良く行う逐次計算アルゴリズムにカルマンフィルタがある。カルマンフィルタは現在までに与えられた値から 1 期先の予測を行い、次に現在の観測値を用いて、先に推定した値のフィルタリングを行い、モデルを逐次更新していくアルゴリズムであるため、高精度な解析ができる[1]。

3. 風力発電出力予測

今回、解析に用いた 1 日の風力発電の実測値と移動平均平滑法による平均予測値およびカルマンフィルタによる平均予測値を Fig.1 に示す。ただし、実測値は定格出力 6.5MW の 10 秒ごとのサンプリング発電波形である。Fig.1 によれば、2 つの平均予測値とも実測値の動きを概ね再現できていることがわかる。しかし、移動平均による平均予測値は数十秒程度遅れて追従しているのに対し、カルマンフィルタによる平均予測値は滑らかなトレンド(傾向)が得られている。

Table 1 に変動成分(=予測値-実測値)の基本統計量を示す。どちらの平均値もほぼ 0 となることから、実測値の平均値付近をとり、良好なトレンドがとれていることが確認できる。標準偏差も、カルマンフィルタ予測の方が小さい値となり、精度良く予測できている事を示している。

4. SMES 容量の決定

実際の風力波形に対して必要となる SMES 容量の分布を Fig.2 に示す。プラスは充電、マイナスは放電を意味する。どちらの予測手法を用いた場合も SMES 容量の分布の平均値はほぼ 0 となり、これは SMES の充放電が偏りなく行われる事を示している。また、Fig.2 の分布を正規分布と仮定すると、平均値を μ 、標準偏差を σ として、信頼区間 $\mu \pm 3\sigma$ (99.7%)で

の SMES 容量は、移動平均を用いた場合が 60MJ、カルマンフィルタを用いた場合が 50MJ 程度であることがわかった。

5. まとめ

1 日の 10 秒間隔サンプリング風力発電波形に移動平均平滑法とカルマンフィルタ予測を適用し、精度の良い予測値が得られた。特にカルマンフィルタ予測を用いることで、SMES 容量が最小となる事が確認できた。

ここでは、代表的な 1 日の風力発電波形の 1 つを解析に用いたが、カルマンフィルタ予測を用いる事で様々な風力発電波形の最適な予測ができると考えられる。また、風力発電だけでなく、風力発電同様に出力変動が激しい太陽光発電等にも適用可能である。

今後の検討課題として、予測に対する評価方法の検討や電力機器の特性を考慮した検討を行っていく必要がある。

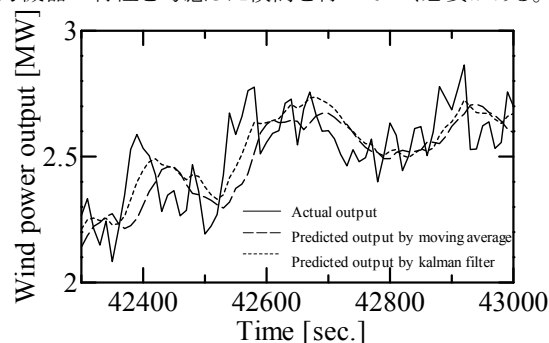


Fig.1 Actual and predicted output of wind power generation

Table 1 Statistic on the prediction error

	Average predicted value by moving average	Average predicted value by kalman filter
Average [MW]	-0.00065484	0.000221732
Maximum [MW]	0.6559	0.5499
Minimum [MW]	-0.6939	-0.5529
Standard deviation	0.1578	0.1291

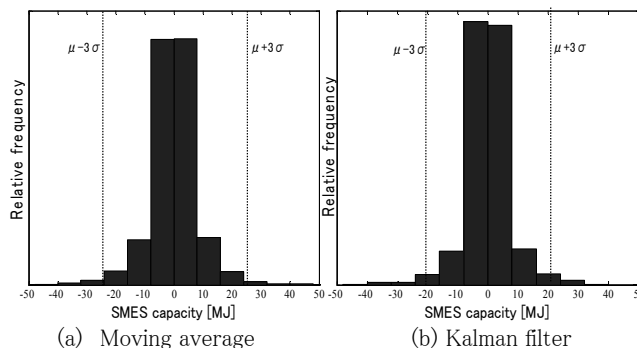


Fig.2 Distribution of SMES capacity for wind power generation

参考文献

1. T. Nakayama, T. Yagai, M. Tsuda, T. Hamajima. "Optimization of SMES Compensation Capacity for Stochastic Power Using a Kalman Filter", TEION K OGAKU 45(2010)

直列補償型サイリスタ変換器のSMES用電流型電力変換器システムへの適用 Series Compensated Thyristor Converters Applied to Current Source Power Conversion Systems for SMES

野村 新一 (明治大)

NOMURA Shinichi (Meiji Univ.)

E-mail: nomuras@meiji.ac.jp

1 直列補償型サイリスタ変換器

電流源である超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) には、電流型電力変換器の適用が望ましい。サイリスタ変換器は、10 kA を超える大電流の超電導コイル用電源として、経済的かつ技術的にも十分な実績がある。しかし、サイリスタ変換器は、遅れ位相により超電導コイルへの直流電力を制御するため、無効電力補償装置が必要になる。この問題の解決策として、図 1 に示すように、可変直列コンデンサの機能を有する電流スイッチを用いて進み位相で直流電力を制御する直列補償型サイリスタ変換器を提案する。

電流重なり角を無視した場合、サイリスタ変換器の制御角 α を、整流器動作時は 0 度に、インバータ動作時は 180 度に一定制御する。このとき、平均直流電圧 E_d は、電流スイッチの進み位相角 δ を用いて、

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V \cos \delta = 1.35V \cos \delta. \quad (1)$$

の関係で与えられる[1]。

大型超電導コイルシステムでは電力変換器も多重化構成とされることが考えられる。したがって図 1 のように、遅れ位相角 α で制御される通常のサイリスタ変換器と進み位相角 δ で制御される直列補償型サイリスタ変換器とを組み合わせることで、電力系統からみた力率を改善でき、従来必要とされる無効電力補償装置の容量も半減化される可能性がある。この概念は、SMES 用途だけでなく、核融合装置用途や加速器用途の大型超電導マグネット電源への適用の可能性も期待できるシステムとなる。

2 200 V-100 A 級試作機による実証実験

直列補償型サイリスタ変換器の可能性を実証するために、図 2 に示すような試作機を開発した。試作機では直列可変コンデンサの一例として、GCSC (gate-commutated series capacitor) と呼ばれる自己消弧形半導体電力変換素子で構成された電流スイッチを採用した。試作機の最大仕様は、交流最大入力電圧 (変換器用変圧器一次電圧) 200 V、直流出力電流 100 A である。GCSC のコンデンサ容量を 500 μF とし、負荷として液体ヘリウム冷却による自己インダクタンス 1.8 H の超電導コイルを使用した。

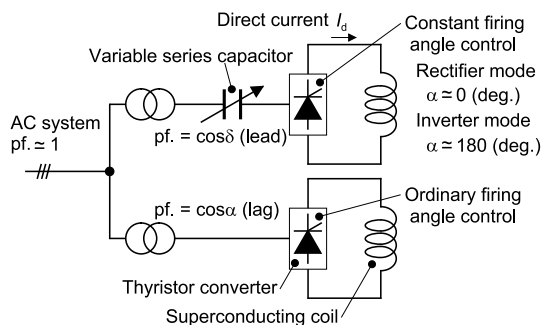


Fig. 1. Series compensation of thyristor converters for superconducting magnets with a variable series capacitor. α is a firing angle of the thyristor converter. δ is a leading angle.

図 3 は、平均直流電圧と電流進み位相角との関係を示している (変圧器一次側電圧 100 V、二次側 $V = 20$ V、超電導コイル電流値 $I_d = 75$ A)。式 (1) の理論値と比較した結果、直流電圧の実測結果は、 $\cos \delta$ の関数で近似できる。すなわち、超電導コイルへの直流電力が進み位相角で制御できることが実証された。また、通常のサイリスタ変換器と組み合わせることで、整流器動作およびインバータ動作ともに電力系統から見た力率がほぼ 1 の状態を保ちながら、超電導コイルの充電、貯蔵、放電の運転を可能にすることも確認されている。なお、直列補償型サイリスタ変換器の動作および試作機による実証実験結果の詳細については参考文献 [1] を参照されたい。

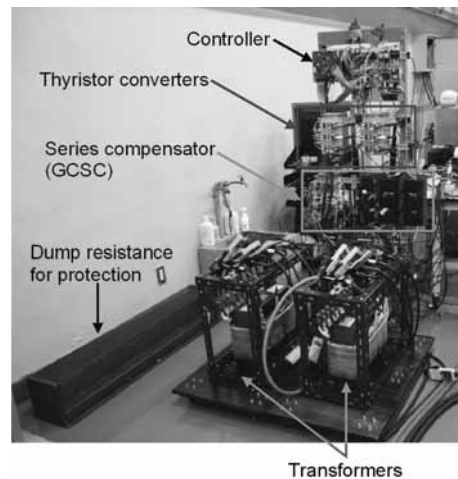


Fig. 2. Photograph of the prototype system for the demonstration of the series compensated thyristor converter.

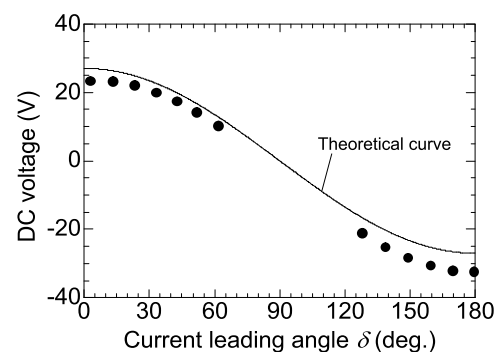


Fig. 3. DC voltage E_d dependence on the current leading angle δ of the series compensated thyristor converter prototype. The dots indicate the experimental results. The theoretical curve is calculated from (1).

参考文献

- [1] S. Nomura, J. Wiik, R. Shimada, "Series Compensation of Thyristor Converters for Superconducting Magnets," Proc. IPEC-Sapporo 2010, pp. 1534–1540.

超電導インバータの変換効率向上と数値計算

Simulation on the efficiency of superconducting inverter

長村 光造 (応用科学研)、酒井 明 (京大)、中村 武恒 (京大)、福田真治 (中部大)、山口作太郎 (中部大)
 OSAMURA Kozo (RIAS), SAKAI Akira (Kyoto Univ.), NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.),
 FUKUDA Shinji (Chubu Univ.) and YAMAGUCHI Sataro (Chubu Univ.)
 E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

現状の電力機器に用いられているインバータ用素子は半導体であるため電流が通過するオン状態でジュール熱が発生する。とくにパワーインバータにとりこのジュール熱発生は大きな損失であり、ジュール熱をゼロにするのがインバータにとって理想的な状態である。ジュール熱発生ゼロあるいは限りなくゼロに近いインバータの実現は、超伝導特性を活用することにより原理的に可能であると考えられる。そこでここで提案する超電導インバータが、パワーを必要とする電力変換機器として実用化が可能かどうかを実証するための研究を継続している。前回までの報告で超電導インバータ動作が可能であること、高効率化に必要な要素について検討してきた。

本講演では直流電源電流を I_0 として交流に変換された電流のピーク電流を I_z として、その比 $(I_z/I_0)*100$ を変換効率 η (%) としたとき、効率が高くなる条件を数値計算で再現することによりインバータ回路の諸条件の最適化を検討した結果を報告する。

2. 実験方法

用いた超伝導素子はサファイア基板上に YBCO 結晶を厚さ 300nm 成長させたもので、全体に表面に保護層として金が厚さ 100nm 付けられている。臨界電流は 77K で $I_c=32A$ であった。この素子 4 枚を前回の発表のように H ブリッジ回路の A, B, A', B' に配置し、負荷には抵抗 $R_z=50 \mu\Omega$ の金属抵抗を用いた。スイッチング動作をさせるため 2 個の電磁石(MA, MB)を用い、素子 A, A'あるいは素子 B, B'が同時に抵抗状態になるようにした。2つの磁石の位相差を θ_i として

$$B_i = B_{DC,i} + B_{max,i} [1 + \sin(2\pi ft + \theta_i)] \quad (1)$$

で表される磁場を発生させた。ここで $i=A$ or B である。周波数として $f=0.1$ Hz から 100 Hz の範囲を調べた。

3. 超電導素子の非線形性

インバータ動作に関する超電導素子には次のような非線形性を考える。印加電流に対しては通常の $V-I$ 特性を示すものとする。

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c(B)} \right)^n \quad (2)$$

臨界電流には次のように $B > B_0$ 以上の磁場で

$$I_c(B) = I_{co} \left[1 - k \left(\frac{B - B_0}{2B_{max} - B_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

の依存性があるものとした。ここで定数について、デファクトを $n=20$, $V_c=1\mu V$, $B_0=100$ G, $k=0.5$, $m=0.5$ として種々変化させ数値計算を行った。

4. 数値計算

Fig. 1 中の丸印は実験で得られた交流波形であり、実線は数値計算の結果である。(3)式に示すようにある閾値より磁場が高くなると臨界電流に影響することにより、またパラメータを選ぶことにより、より厳密な数値解が得られる。Fig. 2 は数値計算に必要なパラメータを最適化したあと、負荷抵抗 R_z と直流電流 I_0 の関数として、負荷 Z に流れる交流のピーク値

$I_{z,max}$ と効率 η を求めた。約 30% の効率を得るためには $R_{Amax}/R_z=3.3 \times 10^4$ であることが求められるが、この値は形状効果により素子の off 抵抗を高めて実現可能と考えられる。

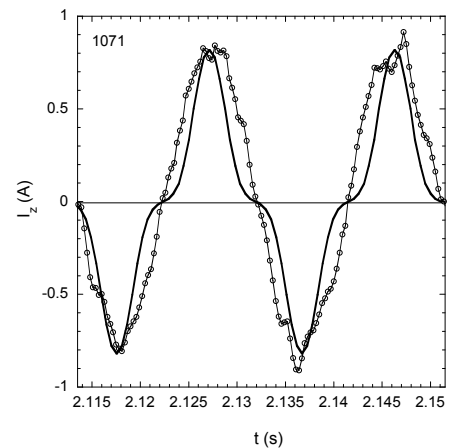


Fig. 1 Comparison of simulated results with the observed AC current.

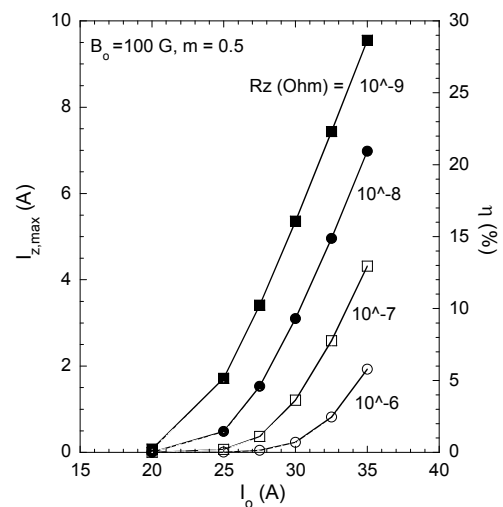


Fig. 2 Simulated results for AC current maximum and efficiency as a function of DC current

5. まとめ

1. H ブリッジ回路において負荷 Z に交流電流のみが流れる、いわゆるインバータ動作が確認できた。
2. 正弦波的な交流電流は超電導素子の電圧発生が外部磁場に対して非線形的な依存性を持つときに得られた。
3. ある実効的な閾値より大きな直流電流を流すと負荷の交流電流は非線形的に増加した。
4. $I_0=35A$ の直流から $I_z=10A$ の交流変換を行うとき、Hブリッジ回路のジュール発熱は 10mW 程度となる。
5. 電源の直流値 I_0 に対する負荷電流のピーク値を I_z の比 I_z/I_0 (%) を変換効率と定義すると、100%になる条件は $R_{Amax}/R_z > 10^{19}$ を満たすときである。

高調波電流印加時の DC リアクトル用 YBCO トロイダルコイルの 通電特性と交流損失

Transport Characteristic and AC Loss in an YBCO Toroidal Coil for DC Reactor with Harmonic Current

津田 理, 濱島高太郎 (東北大学); 古瀬 充穂, 淵野 修一郎 (産総研); 原田 直幸, 植田 清隆 (山口大学);
中島 高幸, 竹中 清 (DCC)

TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.); FURUSE Mitsuho, FUCHINO Shuichiro (AIST); HARADA Naoyuki,
UEDA Kiyotaka (Yamaguchi Univ.); NAKAJIMA Takayuki, TAKENAKA Kiyoshi (Denryoku Computing Center, Ltd.)
E-mail: tsuda@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我が国のコンビナートは、競争環境の激化により厳しい経営環境に直面しており、国際競争力に耐えられる効率的な生産体制を構築するには、企業の枠を越えて協力し、コンビナート全体の省エネ化や経費削減化に取り組むことが重要となる。以上を踏まえ、我々は、これまでに、放射状交流系統で構成されるコンビナート配電系統において、交流系統間を直流連系することにより、更なる省エネ化や高信頼化が可能となることを明らかにしてきた[1]。そこで、本研究では、直流連系の有効性を検証するために、平滑リアクトルとして YBCO テープ線から成るダブルパンケーキコイルで構成されるトロイダルコイルを用いた、直流連系電力シミュレータを製作した。そして、電力シミュレータで直流連系する際の、YBCO トロイダルコイルの通電特性ならびに交流損失特性について検討した。

2. 電力シミュレータと YBCO トロイダルコイル

放射状交流系統間の直流連系による省エネ性を検証するために、Fig.1 の様な、アナログ型 1kW 級電力シミュレータを設計・製作した。直流連系制御にはサイリスタ回路を使用し、平滑リアクトルとして、Fig.2 の様な、銅線と鉄心で構成される常電導リアクトルと、YBCO テープ線で作成されるダブルパンケーキコイル 8 個を直列接続したトロイダルコイルを採用した。コイルに使用した YBCO テープ線は、幅 4mm、厚さ 0.092mm で、表面に 0.02mm の安定化銅が施されている。このテープ線を用いて、内径 74mm、外径 140mm、ターン数 295、インダクタンス 10mH のダブルパンケーキコイル 8 個を製作した。

3. YBCO トロイダルコイルの通電特性と交流損失

Fig.1 の電力シミュレータを用いて、YBCO トロイダルコイルのインダクタンスが 50mH と 100mH の場合における、コイル電流 9A 時の電流・電圧波形を測定した。その結果を Fig.3 に示す。また、この電流波形の各周波数成分に対するパワースペクトルを Fig.4 に示す。YBCO コイル電流の高調波成分は、銅コイルの場合とほぼ同じであり、コイルのインダクタンス増加に伴って高調波成分が減少することが確認された。これより、従来の平滑リアクトルの設計方法が YBCO コイルにも適用可能であることがわかった。また、Fig.3 の電圧・電流波形より直流連系時(9A)の損失を評価したところ、銅コイルでは、50mH 時で 26.4W、100mH 時で 55.7W と、コイルのインダクタンス増加に対して損失が増加したのに対し、YBCO コイルでは、50mH 時で 1.7W、100mH 時で 0.5W と、コイルのインダクタンス増加に対し、損失が減少することが確認された。また、平滑コイルに YBCO コイルを採用することにより、損失を大幅に削減できることがわかった。今後は、高調波電流に対する YBCO コイルの損失発生メカニズムを明らかにしていく予定である。

参考文献

- M. Tsuda, et al.: The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, IEE Japan, PE-10-007, PSE-10-051 (2010) p.39

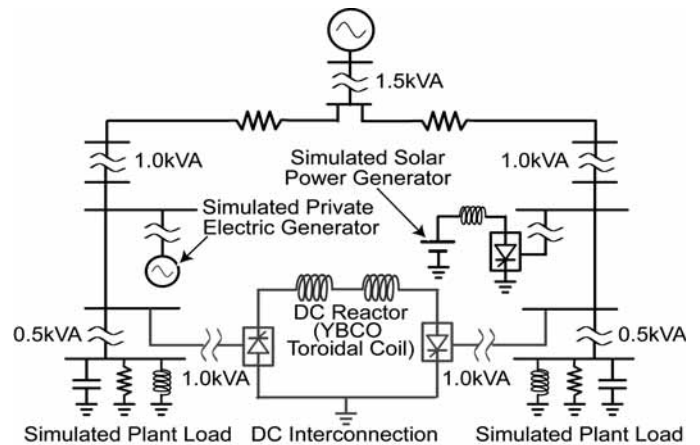


Fig. 1 Schematic drawing of a power system simulator with DC interconnection.



Fig. 2 DC model reactors composed of conventional copper coil and YBCO toroidal coil (8 double pancake coils).

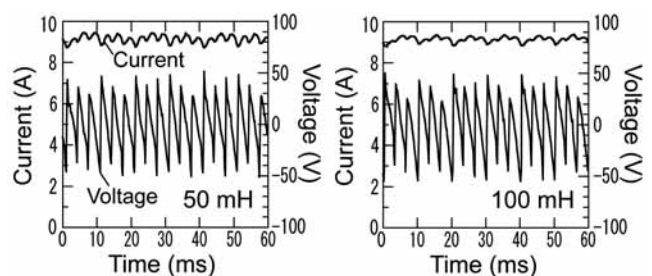


Fig. 3 Waveforms of voltage and current in YBCO toroidal coil at DC current of 9A and inductance of 50 mH and 100 mH.

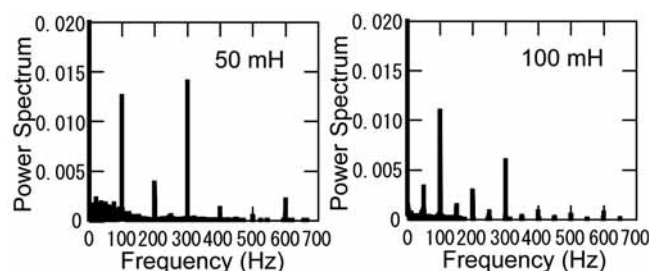


Fig. 4 Power spectrums of operating current with harmonic components in YBCO toroidal coil at 50mH and 100mH.