

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 1 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560278

研究課題名（和文） リップルを含んだ電流による超伝導体の通電損失に関する研究

研究課題名（英文） Study of transport current loss of superconductor with ripple current

研究代表者

小田部 荘司 (OTABE EDMUND SOJI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：30231236

研究成果の概要（和文）：リップル成分を含んだ電流を超伝導体に流したときに発生する通電損失を理論的に評価した。その際には自己磁場による臨界電流密度の低下を考慮に入れた。また有限要素法を用いて同様の検討を行い、任意形状の超伝導体について数値計算ができることを確かめた。この結果、リップル電流振幅が十分に小さければ、通電損失は十分に小さく実用上は問題ないであろうことを確かめることができた。

研究成果の概要（英文）：The transport current loss of superconductor with ripple current was theoretically estimated. In this calculation, the decrease of the critical current density by self-magnetic field was taken into account. In addition, finite element method was used for the estimation of transport current loss. As the result, it was confirmed that the transport current loss is enough small for the case of small ripple current amplitude.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2010 年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2011 年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2012 年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 年度 | 0 | 0 | 0 |
| 年度 | 0 | 0 | 0 |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：超伝導機器、超伝導材料、超伝導特性評価

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気有効利用、超伝導電力ケーブル

1. 研究開始当初の背景

超伝導技術による電力輸送ケーブルは既設の電力網との親和性により三相交流がこれまで検討され続けてきた。しかし最近になって直流送電の実験が進められ、急速に現実味を帯び始めた。超伝導体は交流では損失があるが直流ではほぼ無いからである。現実の電力網に超伝導直流ケーブルを入れようとすると図 1 にあるように、三相交流を直流に変換することになる。従来はほぼ直流にするために、リアクトルの容量が大きく、交直変

換にコストがかかった。

そこで、コストを下げるためにリアクトルの容量を小さくし、若干のリップルが残る電流をあえて超伝導ケーブルに流すことを考える。このときには若干の損失が発生すると考えられる。しかし損失は、完全な交流よりははるかに小さい。

これまで交流損失の理論や実験は盛んに研究されてきたが、直流に交流リップルが重畳された場合の損失については、研究がほとんど行われていない。したがって、リップル

による損失を理論および実験により確実に把握することが、システム全体のコストを下げるために重要である。

2. 研究の目的

本研究では、これまで行われていないリップルによる損失を理論および数値計算により定量的に理解することで超伝導直流ケーブルの実用に結びつけるということが目的である。

3. 研究の方法

(1) 理論予想

リップル電流が重畳した際の通電損失を理論的に求める。まずリップル電流を円柱超伝導体に通電した際に、どのような内部の磁束分布になるのかどうかを調べる。それには臨界電流密度が磁場の大きさに拘わらず一定である、ピンモデルと、磁場の大きさが大きくなるにつれて減少するという入江-山藤モデルとを使うことにする。ピンモデルの結果は直流電流が0である交流電流の場合と一致するので、これまで知られている所謂ノリスの式に一致する。一方で入江-山藤モデルにおいては直流電流の大きさが大きいときには、超伝導体表面における自己磁場の大きさが大きくなり、臨界電流密度が小さくなるので、磁場が超伝導内部により侵入して、大きな通電損失を発生することとなる。

実際に理論式を導き出し、この結果がこれまでの結果の拡張になっていることを確かめた。

(2) 有限要素法による数値計算

理論式では円柱状の超伝導体しか導き出すことができない。現在の電力ケーブルは層状構造をしており、円筒と見なすことができるので、理論式の予想を大部分はそのまま使うことができる。しかし将来は現在使われている形状とは異なる電力ケーブルの形態もありうる。したがって任意形状における予想ができる方が望ましい。

本研究では、有限要素法を用いてリップル電流が重畳した際の通電損失を数値的に求めることとした。超伝導体を、有限要素法を用いて取り扱うためには、超伝導体の電流-電圧特性の極端な非線形性を考慮する必要があるため、収束演算が必要であり、通常の電磁解析よりも格段に複雑な取扱が必要である。

4. 研究成果

(1) 理論結果

図1に円柱状超伝導体の場合の、さまざまな γ の値の時に、規格化した通電損失 Q_{ac} の臨界電流 I_c で規格化したリップル電流振幅 i_m 依存性を示す。 Q_{ac} は臨界電流

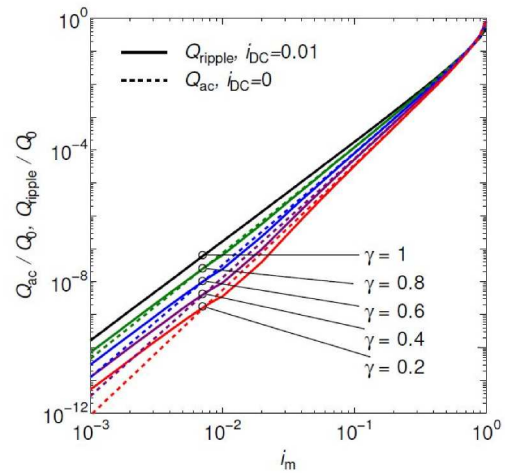


図1 円柱状超伝導体の場合の、さまざまな γ の値の時に、規格化した通電損失 Q_{ac} の臨界電流 I_c で規格化したリップル電流振幅 i_m 依存性。

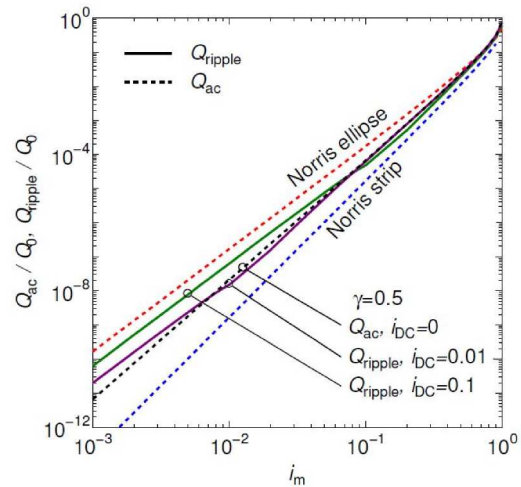


図2 円柱状超伝導体の場合の、さまざまな規格化した直流電流の大きさ i_{DC} における、規格化した通電損失 Q_{ac} の臨界電流 I_c で規格化したリップル電流振幅 i_m 依存性。ただし $\gamma=0.5$ である。

の時の値 Q_0 で規格化している。また i_{DC} は直流電流 I_{DC} を臨界電流で規格化している。 γ は入江-山藤モデルで用いられるピンニングパラメータであり、 $\gamma=1$ の時はピンモデルと一致する。 γ が小さくなると臨界電流密度の磁場依存性が大きくなる。つまり γ が小さくなると、直流電流による磁場により臨界電流密度が小さくなるので、直流電流による影響が大きく現われるようになる。また場合によっては直流電流があった

方が損失が小さくなる領域が存在することがわかる。ただしこの領域は直流電流よりも交流電流の振幅が大きい領域であるので、現実には使うことはないと考えられる。

さらに図2は円柱状超伝導体の場合の、さまざまな規格化した直流電流の大きさ I_{DC} における、規格化した通電損失 Q_{ac} の臨界電流 I_c で規格化したリップル電流振幅 I_m 依存性を示す。ただし $\gamma = 0.5$ である。赤い点線はノリスの楕円断面超伝導体の時の理論値であり、 $\gamma = 1$ のピンモデルを元にしてしている。また青井点線はノリスのストリップ超伝導体の時の理論値であり、同じく $\gamma = 1$ のピンモデルを元にしてしている。 $\gamma = 0.5$ の場合には通電損失はこれらの理論予想の間くらいにあることがわかる。

図1および2より、実際に想定される大きな直流電流に小さい交流電流を重畳した場合には、直流電流がないときに比べてやや通電損失は高くなることがわかる。しかし、その際の通電損失の絶対値はかなり小さく、問題となるケースはごく少ないと結論できる。

(2) 有限要素法による数値計算

最初に図では示さないが、有限要素法を用いて円柱超伝導体の時のリップル電流を通電した際の通電損失をもとめ、図1、2の結果と一致した数値計算結果を得ることができることを確かめた。このことにより任意形状の通電損失を数値計算により求めることができることを示した。したがって、電力ケーブルを設計する際にさまざまな形状を考えることができるようになる。

図3に有限要素法により計算した、ストリップ状超伝導体の場合の、さまざまな I_{DC}/I_c の値の時ににおける、規格化した通電損失 W の臨界電流 I_c で規格化したリップル電流振幅 I_m/I_c 依存性を示す。ただし、 $\gamma = 1$ である。赤の実線はノリスの理論式であり、 $I_{DC} = 0$ A の場合に相当する。これをみると有限要素法で計算した黒の実線と高い電流振幅のところを除いて一致せず、とくに電流振幅の小さいところで差が大きい。これについては理論的にストリップと有限の厚さを持つ平板との違いであるという指摘もある。いずれにしても、直流電流が高くなるにつれて通電損失も大きくなるので、注意が必要である。

図4に有限要素法により計算した、ストリップ状超伝導体の場合の、さまざまな I_{DC} の値の時ににおける、規格化した通電損失のリップル電流振幅 I_m 依存性を示す。ただし、 $\gamma = 0.5$ である。このときも図3と同じように、交流振幅が小さいところで直流電流が大きくなると通電損失は極端に大きくなる

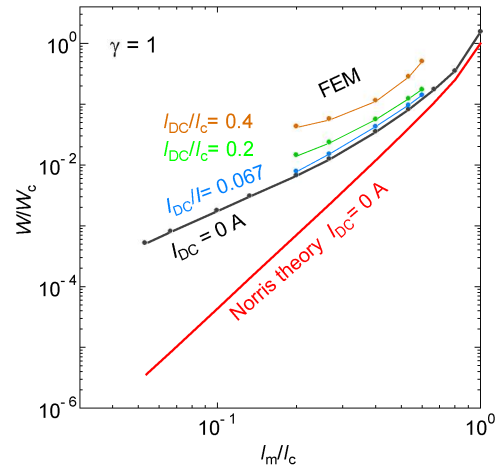


図3 ストリップ超伝導体の場合の、さまざまな I_{DC}/I_c の値の時ににおける、規格化した通電損失 W の臨界電流 I_c で規格化したリップル電流振幅 I_m/I_c 依存性。ただし、 $\gamma = 1$ である。

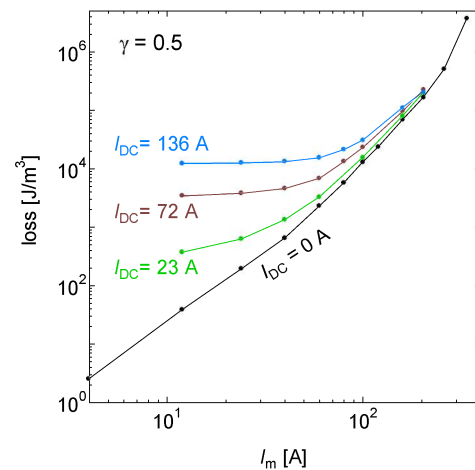


図4 ストリップ超伝導体の場合の、さまざまな I_{DC} の値の時ににおける、規格化した通電損失のリップル電流振幅 I_m 依存性。ただし、 $\gamma = 0.5$ である。

ことがわかる。

では、なぜストリップ状超伝導体の時には、通電損失が円柱状超伝導体の時に比べて極端に大きくなってしまっているのだろうか。この理由は、磁束の侵入がストリップ状超伝導体のエッジ部分から始まり、これが大きな通電損失になっているからである。一方で、円柱状超伝導体においては、磁束は超伝導体の広い面から侵入するために、侵

入が緩やかであり、通電損失が小さくなる。したがって、ストリップ状超伝導体を単独で使うのではなく、円筒状に配置して、エッジからの磁束侵入が小さくなる様にするにより、通電損失を小さくすることができる。

以上をまとめると、次の様になる。

- ・ 円柱状超伝導体において、直流電流と交流電流が重畳したリップル電流を通電した際の理論的な式を導き出した。
- ・ 有限要素法を用いた数値計算により、円柱状超伝導体の通電損失を求め、理論結果と一致することを確かめた。これにより任意形状の電力ケーブルの通電損失を求めることが可能となった。
- ・ さらに、ストリップ状超伝導体について通電損失を数値的に求めたところ、交流振幅の小さいところで大きな通電損失が発生することが分かった。
- ・ したがって、実際にストリップ状超伝導体を電力ケーブルに利用するときには、円筒状の配置になるようにして通電損失が小さくなる様にしなければならない。

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 2 件) (すべて査読有り)

- ① E.S.Otobe, S. Komatsu, V.S. Vyatkin, M. Kiuchi, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Numerical estimation of AC loss in superconductors with ripple current, Physica C accepted (2013).
10.1016/j.physc.2013.04.075
- ② E.S. Otobe, K. Ohashi, M. Kiuchi, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Estimation of AC loss in cylindrical superconductor with ripple current, Physics Procedia, vol. 27 pp. 248-251 (2012).
DOI:10.1016/j.phpro.2012.03.45

[学会発表] (計 4 件)

- ① E. S. Otobe, V. S. Vyatkin, M. Kiuchi, S. Yamaguchi, T. Kawahara, Numerical Estimation of AC Loss in Superconductor with Ripple Current, 25th International Symposium on Superconductivity WTP-43 (2012) Tokyo, Japan (Dec 3-5, 2012)
- ② E. S. Otobe, K. Ohashi, M. Kiuchi, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Estimation of AC Loss in Cylindrical Superconductor with Ripple Current, 24th International Symposium on

Superconductivity WTP-61 (2011), Tokyo, Japan, (Dec 5-8, 2011)

- ③ Jun-ya Tanigawa, Masaru Kiuchi, Edmund Soji Otobe, Teruo Matsushita, Hiroshi Okamoto, Takashi Saito, Teruo Izumi, AC magnetization losses in stacked GdBCO coated conductors, International Workshop on Coated Conductors for Applications, CCA 2010, Fukuoka, Japan (Oct 28-30, 2010)
- ④ 足立翔一郎, 牟田勇貴, 小田部 莊司, 木内 勝, 松下照男, 「交流リップルを重畳した直流電流通電時における超伝導体に生じる交流損失の数値解析」, 平成 22 年度電気関係学会九州支部連合大会 (第 63 回連合大会) 06-1A-09 (2010) 福岡 2010 年 9 月 25 日~26 日

[その他]

ホームページ等

<http://aquarius20.cse.kyutech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小田部 莊司 (OTABE EDMUND SOJI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号：30231236

(2) 研究分担者

木内 勝 (KIUCHI MASARU)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：90304758