

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560320

研究課題名(和文)高温超伝導回転機用巻線の交流損失低減手法とそれに基づく最適化設計の研究

研究課題名(英文) Study on Reduction Method of AC Loss and Optimization of HTS Coil for Rotating Machines

研究代表者

福井 聡 (Fukui, Satoshi)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70293199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温超伝導コイルの交流損失特性を精度よく測定するために、パワーメータ法と蒸発法を開発し、試作した小型コイルの損失測定を行った。また、線材の損失データからコイルの交流損失を解析するモデルを開発した。パワーメータ法及び蒸発法による測定データと理論解析結果は良く説明できた。この理論モデルをベースに、同期回転機の界磁巻線に高温超伝導巻線を適用した場合の最適なコイル構造を理論的に明らかにした。また、コイルの交流損失を低減する方法として、コイル端部を傾斜して巻線することにより垂直磁界を抑制する方法を開発し、実際に試験コイルを試作して、その低減効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：Power meter method and boil-off method were developed to measure the AC loss in HTS coils in this study. These methods were applied for the AC loss measurement of HTS model coil. The theoretical model to analyze the AC in HTS coil based on the AC loss data of the HTS tape was also developed. It was confirmed that the measured results of the AC loss in the model coils by the power method and the boil-off method were well explained by the theoretical model. The optimization of the HTS coil used in a rotational machines was theoretically investigated by using the model. The reduction method of the AC loss in the HTS coil by introducing the tilt-winding was proposed and the effect of AC reduction was experimentally verified.

研究分野：工学

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：高温超伝導コイル 交流損失 高温超伝導回転機

1. 研究開始当初の背景

近年、高温超伝導体の線材化技術の進展は著しく、これまでビスマス系銀シース線材及びイットリウム系薄膜線材（以下、それぞれBi系線材、Y系線材という）を中心に行われてきた。Bi系線材では線材製造基盤は確立されており、またY系線材でも国家プロジェクトの牽引により著しく線材技術が進歩してきていて、高強度且つ高磁界下で高臨界電流を維持できる線材が開発されつつある。このような線材化技術の進展に伴い、高温超伝導線材を高磁界巻線に適用することが可能になってきたことから、日米欧をはじめ中国、韓国など世界的に高温超伝導を適用した高磁界型の大容量回転機の研究開発が進められている。超伝導体は、交流で使用したり、変動磁界にさらされると交流損失が発生する。交流損失は例え絶対値が微小であっても、極低温冷凍の効率は悪い（極低温領域での損失を冷却するのに、その数十倍の冷凍機入力電力が必要）、機器の効率、経済的実現可能性を大きく左右する。よって、交流損失特性は超伝導機器開発における最も重要な特性の一つである。超伝導回転機の界磁巻線への応用では、負荷変動に対する励磁磁や電機子巻線を作る空間高調波磁界により巻線には時間的に変動する複雑な磁界が加わる。一般にこれらの機器の巻線では、超伝導適用のメリットを求めるために高磁界設計が必要であるので、巻線が曝される磁界は数～10T程度になる。従って、上記の変動分が例え定格値の10～20%程度であったとしても、その絶対値は1～2T程度になると考えられる。上記Bi系・Y系線材はともにテープ形状をしており、印加される変動磁界がテープ面に平行の場合では、現状でも変動磁界の振幅が比較的小さければ（概ね0.1～0.5T以下）交流損失は許容できるレベルに収まる。しかしながら、変動磁界の振幅が1～2T程度になると、交流損失は非現実的に大きくなると考えられる。このため、機器としての要求性能を満たし超伝導化の利点が発揮できる高温超伝導巻線を実現するには大幅な低交流損失化が必須である。

回転機の高磁界巻線に高温超伝導巻線を適用した場合、高温超伝導の複合コイル系が基本の構成要素となる。このようなコイル系巻線内の線材は自己磁界と他のコイルの作る磁界、更に電機子巻線の反作用磁界が複合した極めて複雑な電磁環境に曝されるので、同一の線材を使用しても、巻線の構成や形状により交流損失特性が大きく変わる。従って、回転機の高磁界巻線を想定した複合コイル系巻線の交流損失特性とその形状構成や運転状態と関係づけて定量化し、それに基づいて巻線としての交流損失を最小化できるような最適設計の手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、高温超伝導回転機の界磁巻線を構成する高温超伝導複合コイル系に焦点を絞り、交流損失メカニズムに基づいた損失最小化設計手法の開発に特化した以下の項目に注力する研究を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、以下の項目について研究を行った。

- (a) 高温超伝導巻線に発生する交流損失の評価法の確立
- (b) 高温超伝導多極複合コイル系の低交流損失巻線構成の解明
- (c) 高温超伝導多極複合コイル系の低交流損失化巻線構造設計法の明確化

4. 研究成果

- (a) 高温超伝導巻線に発生する交流損失の評価法の確立

高温超伝導コイルの交流損失の評価方法の確立を目指し、パワーメータを用いたHTSコイルの電気的測定法とフローメータを用いた蒸発法を開発した。また、損失データからコイル損失を解析する手法を開発した。

これらの妥当性を更に検証するために、2種類の小型HTSコイル（Coil A, Coil B）の交流損失をパワーメータ法及び蒸発法により測定した。コイルの諸元を表1及び表2に示す。各コイルの外観を図1に示す。パワーメータ法及び蒸発法により測定したCoil A及びCoil Bの測定結果を図2に示す。また、Coil Aに関しては理論解析の結果も比較して示す。これらの結果より、本研究で開発した測定方法（パワーメータ法・蒸発法）及び理論解析モデルはHTSコイルの変動磁界損失評価に対して有効な手法であることが検証できた。

表1 小型HTSコイル（Coil A）の諸元

HTS coil	
Inner radius (mm)	30
Outer radius (mm)	60
Height (mm)	100
No. of double pancake coils	10
No. of turns	1500 (75×2×10)
HTS tape	
Material	Bi2223/Ag
Width (mm)	3.8
Thickness (mm)	0.24

表2 小型HTSコイル（Coil B）の諸元

HTS coil	
Inner radius (mm)	80
Outer radius (mm)	140
Height (mm)	102
No. of double pancake coils	11
No. of turns	2200 (100×2×11)
Critical current (A)	32
Inductance (mH)	250
Center field constant (mT/A)	17.2
HTS tape	
Material	Bi2223/Ag
Width (mm)	4.3
Thickness (mm)	0.28

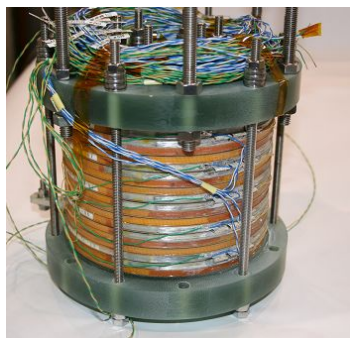
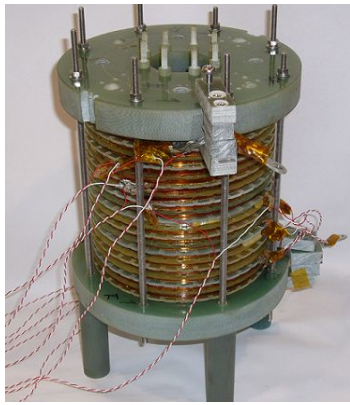


図1 小型 HTS コイル(上: Coil A 下; Coil B)の外観

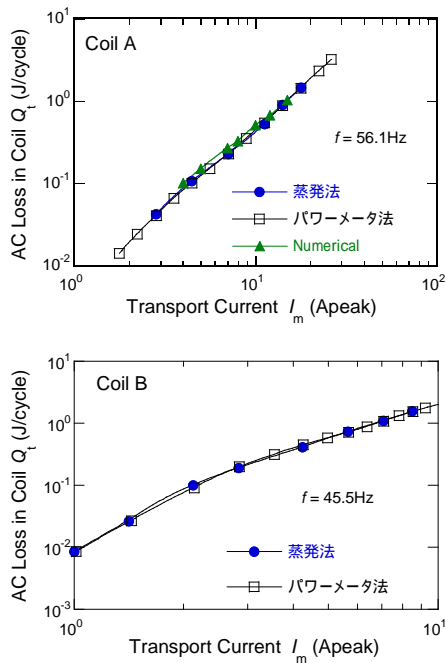


図2 Coil A 及び Coil B のパワーメータ法及び蒸発法による測定結果の比較

(b) 高温超伝導多極複合コイル系の低交流損失巻線構成の解明

低損失な界磁コイル構造について、理論的な検討を行った。本解析では、高温超伝導モータのある断面のみを考え、2次元軸対称モデルで考える(図3)。まずコイルの形状を決定し、線材に印加される磁界の大きさとテープ面に

対する角度を求める。得られた磁界分布から巻線内に発生する磁束流損失を計算し、これをコイル全体で積分し、コイル全体の磁束流損失(直流損失)を算出する。電動機に用いる HTS 界磁コイルは、出力一定(つまり発生磁界一定)の下で、なるべく低損失であることが望ましい。そこで磁束流損失をコイルの形状を設計変数とした目的関数とし、これを最小化する最適化問題として解くことができる。

表3及び図4に本解析で対象とする20MW同期電動機の諸元及び断面図を示す。この基本諸元から上記の最適化手法を用いて最適化した界磁コイル断面構造を図5に示す。最適化計算の結果を表4にまとめる。表4に示す結果から、界磁コイル断面を最適化することにより、損失を大幅に低減できることが分かった。

表3 20MW 高温超伝導同期電動機の界磁コイル断面最適化解析の基本諸元

Output power (MW)	20	
Rated revolution (rpm)	90	
Rated torque (Nm)	$2.12 \times 10^6$	
	Model-1	Model-2
<b>HTS field winding</b>		
Pole number	16	12
Rated current density ( $A/m^2$ )	$1.18 \times 10^8$	$1.18 \times 10^8$
Operating temperature (K)	20	20
Total winding cross section without spacer ( $mm^2$ )	$2.21 \times 10^5$	$1.92 \times 10^5$
Effective length (mm)	1.85	1.84
$B_{pr}$ (T) (analyzed by FEM)		
<b>Armature winding</b>		
Electric loading (A/mm)	650	650
Inner radius (mm)	1732	1732
Outer radius (mm)	1800	1800
Thickness of back yoke (mm)	200	200

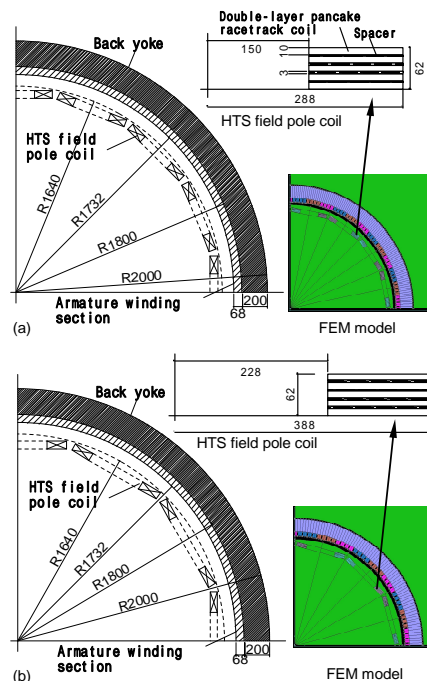


図3 20MW 高温超伝導同期電動機の界磁コイル断面最適化解析基本モデル (a) Model-1 (b) Model-2

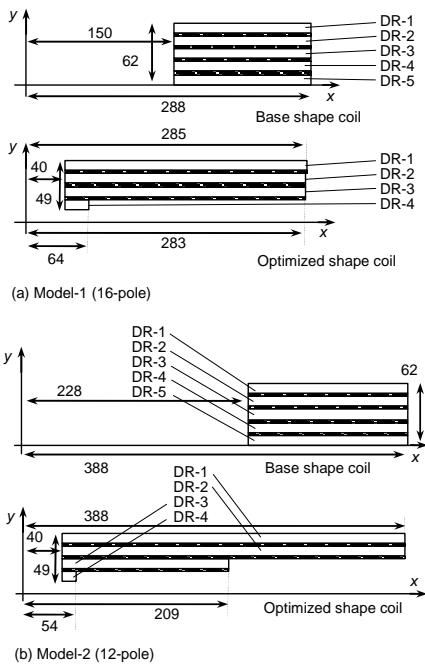


図4 界磁コイルの最適化形状

表4 界磁コイル断面最適化計算結果のまとめ

Model-1 (16-pole)		
	Base shape	Optimized shape
$d_{i,m}$ (mm)	150	40
$d_{o,1}$ (mm)	288	285
$d_{o,2}$ (mm)	288	283
$d_{o,3}$ (mm)	288	283
$d_{o,4}$ (mm)	288	64
$d_{o,5}$ (mm)	288	-
$B_{pr}$ (T)	1.85	1.84
$J_{c,coil}$ (A/m <sup>2</sup> )	$1.54 \times 10^8$	$1.67 \times 10^8$
$S_{fd}$ (mm <sup>2</sup> )	$2.21 \times 10^5$	$2.42 \times 10^5$
$W_{f,total}$ (W)	3.40	0.767
Model-2 (12-pole)		
	Base shape	Optimized shape
$d_{i,m}$ (mm)	228	40
$d_{o,1}$ (mm)	388	388
$d_{o,2}$ (mm)	388	388
$d_{o,3}$ (mm)	388	209
$d_{o,4}$ (mm)	388	54
$d_{o,5}$ (mm)	388	-
$B_{pr}$ (T)	1.85	1.84
$J_{c,coil}$ (A/m <sup>2</sup> )	$1.53 \times 10^8$	$1.69 \times 10^8$
$S_{fd}$ (mm <sup>2</sup> )	$1.92 \times 10^5$	$2.11 \times 10^5$
$W_{f,total}$ (W)	3.82	0.338

(c) 高温超伝導多極複合コイル系の低交流損失化巻線構造設計法の明確化

巻線構造の工夫により、線材に印加される垂直磁界を低減できれば、コイルの低損失化が可能になると考えられる。図5に示すように、高温超伝導コイルでは、コイル端部で線材に垂直な磁界が大きくなる。従って、端部のコイルのみ線材の巻き角度を工夫すれば、線材に加わる垂直磁界を低減できるので、交流損失を大幅に低減できる可能性がある。本研究では、高温超伝導コイル端部の巻線に巻軸に対して角度をつけて巻線し、垂直磁界を低減して低損失化を図る手法を提案する。コイル端部に傾斜巻線を施した小型の試験コイルと、同じターン数で傾斜巻

線を適用しないコイルの2種類を作成し、交流損失をパワーメータ法で測定し、交流損失の低減効果を検証する。

図6に作製した3種類の試験コイルの概略図を示す。図6に示すように、4個のダブルパンケーキコイルを積層し、それぞれ直列に接続した構造である。使用した線材はBi2223である。傾斜巻線を施したパンケーキコイルのターン数は320×2ターン、通常巻は340×2ターンである。Coil DはCoil Cの両端部のダブルパンケーキコイルを傾斜巻線を施したパンケーキに置き換えたものである。傾斜巻線部では、線材面と巻線軸が45°になるように巻線されている。このような構造とすることにより、線材に加わる垂直磁界を低減し、低損失化を狙う。また、Coil EはCoil Dの傾斜巻線部を反転した構造になっている。

Coil C, Coil D, Coil Eの交流損失の比較を図7に示す。このグラフの横軸に交流電流の波高値  $I_m$ 、縦軸に1サイクルあたりの交流損失  $Q_t$  を示している。Fig.3よりCoil DはCoil Cより交流損失が小さいことが分かる。また、Coil EはCoil Cより交流損失が増加している。本研究で得られた結果は、傾斜巻線の適用による高温超伝導コイルの交流損失低減効果を例証してきたと考えられる。

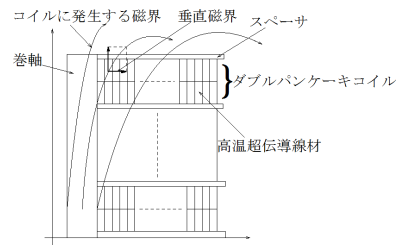


図5 コイル断面内の磁束線分布の概念図

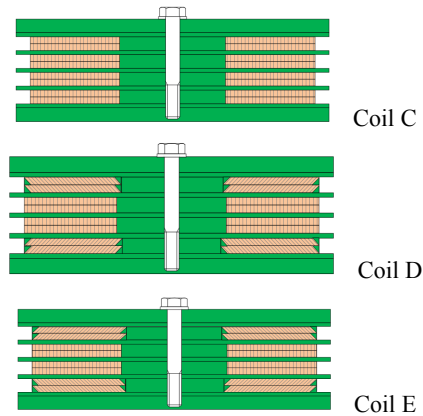


図6 試作したコイルの断面構造

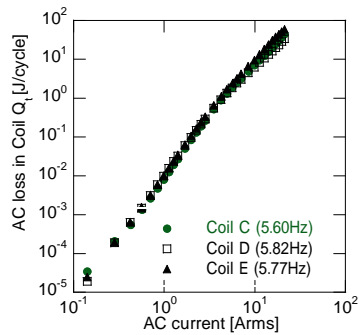


図7 傾斜巻線を導入したコイルの測定結果

## 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)

1. S.Fukui, M.Shibayama, J.Ogawa, T.Oka, T.Sato, T.Takao, O.Tsukamoto, "Measurement and Numerical Analysis of AC Loss in High Temperature Superconducting Coil", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.22, pp.470490, 2012. [査読あり]
2. S.Fukui, T.Kawai, M.Takahashi, J.Ogawa, T.Oka, T.Sato, O.Tsukamoto, "Numerical Study of Optimization Design of High Temperature Superconducting Field Winding in 20 MW Synchronous Motor for Ship Propulsion", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.22, pp.5200504, 2012. [査読あり]

[学会発表](計 1件)

1. 石井寛明, 塚本翔午, 中村航, 福井聡, 小川純, 佐藤孝雄, 塚本修巳, 「傾斜巻線部の導入による高温超伝導コイルの交流損失低減効果」, 2013年秋季低温工学・超電導学会, ウィンクあいち, 2013年12月4-6日.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

福井 聡 (FUKUI SATOSHI)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70293199

(2)研究分担者

(3)連携研究者