

高温超電導ケーブル用冷却システムの開発

— 冷却試験状況 —

Development of cooling system for high-temperature super conducting cable

: Results of cooling tests

大野 隆介, 植田 翔太, 小松 峻介, 仲村 直子, 工藤 瑞生, 矢口 広晴, 町田 明登(前川製作所);
本庄 昇一(東京電力)

ONO Ryusuke, UEDA Shota, KOMATSU Shunsuke, NAKAMURA Naoko, KUDO Mizuo, YAGUCHI Hiroharu,
MACHIDA Akito (Mayekawa Mfg.); HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company)

E-mail: ryusuke-ono@mayekawa.co.jp

1. はじめに

2012年10月に東京電力旭変電所で国内では初めてとなる超電導ケーブル実系統運転に成功し[1]、約1年間実証試験を行いシステムの信頼性を検証してきた。しかし高温超電導ケーブルの実用化には、冷却システムの大容量化、且つ高効率化の開発が不可欠である。そこで我々は、ブレイトンサイクル冷凍機の開発に着手し、ネオン(Ne)を冷媒とする5kW級冷凍機を開発・製作し、冷凍機単体での性能試験を進めてきた。昨年、超電導ケーブル冷却運転の事前検証として、弊社工場内に超電導ケーブル冷却を模擬した液体窒素(LN2)循環冷却設備を製作し循環運転を開始した[2]。本報では、LN2循環冷却システムの運転特性や健全性評価を中心に報告する。

2. 冷却システム概要

超電導ケーブル冷却を模擬したシステムのフロー図を fig.1 に示す。冷凍機は Ne を冷媒とし、3 段圧縮機と 1 段膨張機からなるターボブレイトンサイクルとした。冷凍機は、圧縮機ユニットとコールドボックスから構成され、膨張機、熱交換器をコールドボックス内に設置した (fig.2)。開発したブレイトン冷凍機は実証試験で採用しているスターリング冷凍機に比べ能力、保守ともに優れている。LN2 循環装置は、リザーバタンク、ポンプ(1 台予備)、流量計、模擬ヒータからなり、ポンプは予備機を設け、故障時にも切替可能な構造とした。リザーバタンクに貯液した LN2 は、ポンプで昇圧され、Ne/LN2 熱交換器(Hex2)で過冷却となり模擬ヒータを経てリザーバタンクに戻る。LN2 循環時における温度制御は、LN2 温度が一定になるように冷凍機のモータ回転数制御及び Ne 循環流量を調整する容量制御で行う。LN2 の循環運転条件は超電導ケーブルの実運用を想定し実証試験同様とした。

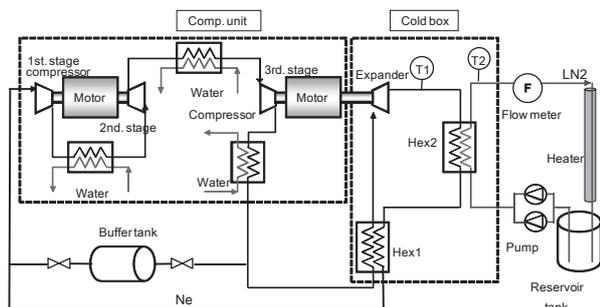


fig.1 Schematic of cooling system

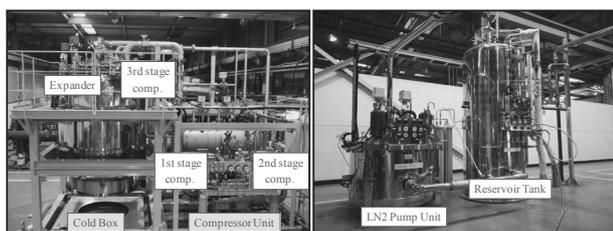


fig.2 Photos of refrigerator and LN2 circulation apparatus

3. 冷却システム連続運転

冷凍機による LN2 温度制御特性及び冷却システムの健全性を検証するため3週間の連続運転を行った。超電導ケーブル電流及び日負荷変動を考慮し、実系統運転を参考に模擬ヒータ負荷を時間毎に1、3週目:3100W(9時-18時)-2800W(18時-翌9時)、2週目:2400W(9時-18時)-2100W(18時-翌9時)と変化させた。尚、LN2温度(冷凍機出口温度)について1、2週目は、温度69K一定、3週目は+2K/日ずつ設定温度を上げ、冷凍機の動作確認や温度制御特性を検証した。

fig.3に冷却システムの運転特性を示す。LN2温度は、いずれのヒータ負荷変動に対しても制御範囲内で安定した追随性を示している。またヒータ負荷の大きさや変動に対し、冷凍機はモータ回転数制御あるいは Ne 流量を調整する容量制御により安定した LN2 温度で供給することが可能であり、超電導ケーブル実用化に向け制御の健全性を確認した。

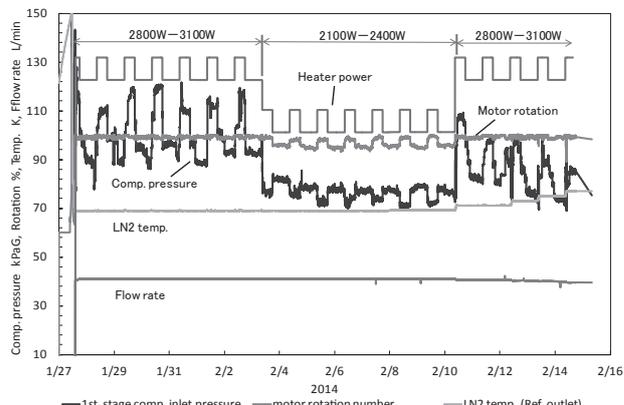


fig.3 Characteristics of cooling under heater control

4. おわりに

超電導ケーブル実用化を目指し大容量・高効率の冷却システムを開発した。超電導ケーブル連系前の運転確認として連続運転を行い、温度制御の追随性及び健全性を確認した。今後は冷却システム故障時を想定したポンプ予備機への切替運転の検証や異常時対応を検証する。

本研究は、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. R. Ono, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 p.160(2013)
2. R. Ono, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 p.215(2013)

高温超電導ケーブル用冷却システムの開発 —ブレイトン冷凍機の開発状況—

Development of cooling system for high-temperature super conducting cable : Development status of Brayton refrigerator

小松 峻介, 大野 隆介, 植田 翔太, 仲村 直子, 工藤 瑞生, 矢口 広晴, 町田 明登(前川製作所);
本庄 昇一(東京電力)

KOMATSU Shunsuke, ONO Ryusuke, UEDA Shota, NAKAMURA Naoko, KUDO Mizuo, YAGUCHI Hiroharu,
MACHIDA Akito (Mayekawa Mfg.); HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company)
E-mail: shunsuke-komatu@mayekawa.co.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブル実用化には、大容量、高効率、高信頼性、制御性が冷凍機の課題に挙げられ、これらの条件を満たすために、高性能冷凍機の開発を2011年2月より開始した。冷凍機の開発目標として、冷凍能力5kW、COP:0.1、メンテナンス間隔30,000時間と定めた。開発仕様をtable.1に示す。

2. ブレイトン冷凍機の開発(1)、(2)

上記の目標を達成するため、冷凍サイクルは逆ブレイトンサイクルとし、圧縮機・膨張機にはターボ型を採用した。ブレイトン冷凍機の仕様をTable.1に示す。

Table.1 Specifications

Items	Specification
Refrigerating cycle	Reverse-Bryton Cycle
Coolant	Neon gas
Compressor・Expander type	3stage Turbo Compressor Turbo Expander
Capacity control	Rotation・Pressure control

本ブレイトン冷凍機は圧縮機ユニット、コールドボックスからなり、圧縮機、膨張機の断熱効率、圧縮比を大きく低下させないため配管および熱交換器の圧力損失を考慮して設計を行った。

(1)圧縮機ユニット

圧縮機ユニットは主に一・二段目圧縮機、水冷却器三台、パuffアタンクから構成した。圧縮機ユニットの外観図をFig.1に示す。

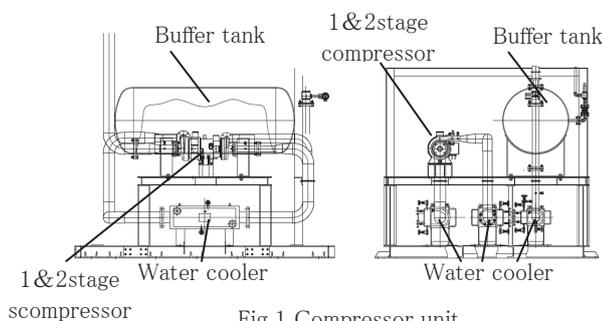


Fig.1 Compressor unit

(2)コールドボックス

コールドボックスの主な構成機器として膨張機・三段圧縮機、冷熱回収熱交換器、LN2クーラー、負荷用ヒーターからなり、極低温になる機器を真空容器内に納め真空断熱を行った。

3. ブレイトン冷凍機の容量制御と性能

一般的なブレイトン冷凍機ではターボ圧縮機・膨張機の回転数制御により冷凍能力の調整を行うが、この方法では循環流量と圧力比の2つが変化してしまい、回転数に比例してCOPが変化する。本開発で考案した圧力制御を用いた場合、ターボ圧縮機・膨張機を定格回転数で一定に保ちながら循環するガスの圧力を変化させて容量制御を行うため、COP一定での高効率運転が可能となることを確認した。

ブレイトン冷凍機出口の液体窒素温度77Kでの冷凍能力は約5.8kW、モータ入力電力基準のCOPは約0.1であり、開発目標を達成した。また、工場試験累計1,000時間以上の運転において冷凍機のトラブルはなく、ほぼ同型の空気冷凍機用ターボ圧縮機・膨張機の実績からもメンテナンス間隔30,000時間は達成出来る見通しを得た。

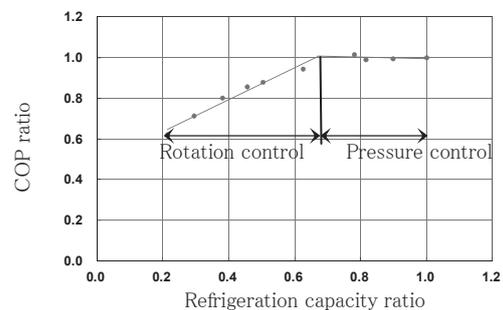


Fig.2 Results of control test

4. おわりに

本ブレイトン冷凍機の冷凍能力は約5.8kW、COP:0.1となり開発目標を達成した。

今後の課題として小型化が挙げられる、本装置は必要設置面積を大きく確保しなければならず、市場展開を見据えると小型化且つ設置場所を選ばない形状のパッケージの検討が必要となってくる。それに伴って熱交換器の小型化検討も行う。

また、圧縮機・膨張機の最適調整により性能の向上も期待できるため更なるスペックアップを行う予定である。

本研究は、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. R. Ono, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 p.160(2013)
2. R. Ono, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 p.215(2013)

高温超電導ケーブルの実系統運転成果及び評価

The result and evaluation of HTS cable system operation on real grid

下田 将大、仲村 直子、矢口 広晴、町田 明登(前川製作所)

丸山 修、中野 哲太郎、本庄 昇一(東京電力)

渡部 充彦、増田 孝人(住友電工)

Masahiro Shimoda, Naoko Nakamura, Hiroharu Yaguchi, Akito Machida (Mayekawa Mfg.)

Osamu Maruyama, Tetsutaro Nakano, Shoichi Honjo (Tokyo Electric Power Company, Inc.)

Michihiko Watanabe, Takato Masuda (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: masahiro-shimoda@mayekawa.co.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルは大容量低損失送電のメリットを生かし、次世代の送電ケーブルとして実用化が期待されている。日本国内においては 2007 年度より「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」が実施されている。本プロジェクトは、東京電力旭変電所内に 240m 級高温超電導ケーブルを構築し、66kV の実系統に接続して送電運転を行い、その運用性、信頼性、保守性等の検証を実施するものである。

2012 年 10 月 29 日に国内初となる実系統連系運転を開始し、系統運転状況の変化による負荷変動や機器の運転状態の監視および評価を行い、2013 年 12 月 25 日に 1 年以上の実系統連系運転を終了した。[1]

本報告では、実系統連系運転中の冷却システムの運用データを中心に運転特性評価の概要を報告する。

2. 冷却システム概要

超電導ケーブル冷却システムのフロー図を Fig.1 に示す。本システムは、冷凍機、循環ポンプ、リザーバタンク等で構成され、冷凍機は 1kW スターリング冷凍機を 6 台使用している。

安定したケーブル冷却を行うために、循環冷媒の温度・圧力・流量の制御を行っており、温度は、冷凍機 ON-OFF 制御で設定温度±1K、圧力はリザーバタンクでの加圧制御により 0.2MPaG、流量は循環ポンプのインバータの回転数の調整で 40L/min で制御されている。

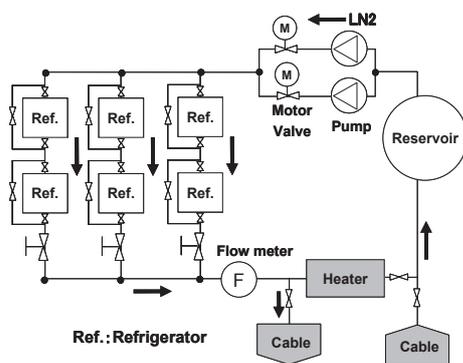


Fig.1 Diagram of LN2 cooling system

3. 運転特性

3-1 系統連系実証試験

実系統に接続しての高温超電導ケーブルの運用を 2012 年 10 月 29 日より、1 年以上行った。実系統運転中の冷却システムの主要制御項目であるケーブル入口温度、リザーバタンク圧力、循環流量と導体電流を Fig.2 に示す。

Fig.2 に示すように、運転開始から 2013 年 3 月までは、ケーブル入口温度を設定値 69±1K で運転を行い、導体電流変動による冷却負荷変動に対して、設定範囲内で温度、圧力、流量が制御可能であることを確認した。2013 年 3 月以降は制御温度設定値を 69±1K から除々に変更し、最高 75.5±1K で運転を行い、ケーブルシステムへの影響確認を行った。制御温度を上昇させた場合でも、温度、圧力、流量は設定範囲内で制御可能であり、ケーブル側にも問題は無かった。

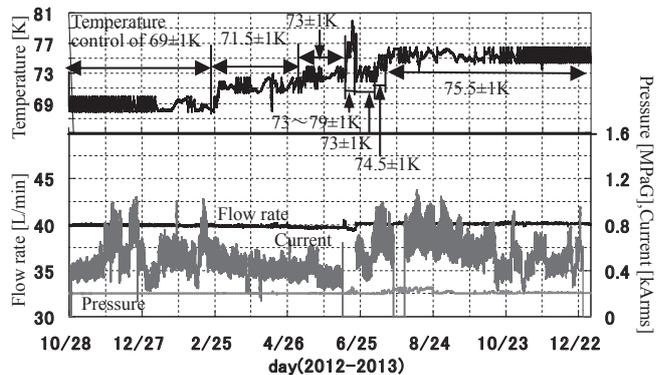


Fig.2 Results of operation

3-2 長期運転中の冷却システム対応

本システムに使用した冷凍機に関して、長期運転により冷却能力低下が発生しており、要因としては Table.1 に示すようなものが考えられる。

そこで、それぞれの要因に対して適切な対応を適宜行うことで、表中に示す数値分の冷却能力低下への影響がなくなり、能力維持が可能であった。ただし、メンテナンスに関しては運転時間や運転台数、予備機の関係、メンテナンス期間等を考慮した、細かいスケジュール管理が必要であった。

Table.1 Cause of cooling capacity decrease

Assumption Factors	Measures	Results
Working gas	Recharge of He gas	40W per unit
Decrease of He gas	gas	
Reduction of the vacuum	Vacuum	30W per unit.
Mechanical friction	Maintenance	200W per unit

4. おわりに

2013年12月25日に実系統連系運転を無事終了した。1年以上、無人運転状態で大きな異常なく運転を継続でき、想定より高い温度範囲でも安定した制御が行えたことから、制御性・信頼性に関しては問題ないことが確認できた。運転可能温度を高くできたことは、冷却システムの能力・効率面で有利となるため、有益な結果であった。しかし、冷凍機に関しては適切な対応により能力維持及び運転継続は可能であったが、実用化に向けては冷凍機の大型化、高効率化、メンテナンス間隔の長期化が課題である。

謝辞

本研究は、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. M Shimoda et al.: 2014 National Convention Record IEE Japan pp.197(2014)

冷却流路中に複数の接続部を持つ HTS ケーブルの圧力上昇評価

Pressure estimation of subcooled LN2 existing in the enclosed space between 2 serial joints in HTS cable

佐藤 勇輔, 我妻 洸, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学)

SATO Yusuke, AGATSUMA Koh, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

超電導ケーブルは電力輸送の高密度化と低損失化という特性を兼ね備えていることから、電力輸送システムの拡充という課題に対する最善の解決策として期待されている。

しかしその実用化に向けては短絡事故に対する影響評価が必要不可欠である。実用化が想定される 66 kV 系統では事故時最大で 31.5 kArms-2 s の過電流が流れることが想定されているが、我々はこれまでの研究でその際のケーブル内の温度・圧力上昇について評価を行ってきた。[1][2]

超電導ケーブルは実用時、変電所間の接続に用いられることが想定される。この時最短でも 2 km ほどの距離を繋ぐということになるが、現在のケーブル構造ではドラム巻の制限から条長 500~600 m ごとに接続が必要であり、接続部間に密閉された銅フォーマ部空間ができてしまうと考えられる。

本研究では、このケーブルに複数のジョイントを設けた際の圧力上昇を評価し、事故時の状況を推定するプログラムの構築を行ったので報告する。

2. 密閉状態における液体窒素の圧力解析

密閉された空間内での液体窒素の圧力解析を行った。温度上昇解析結果からケーブルは 100K 程度になると考えられ、90K から 5K ごと 120K までの温度について、その密度が膨張により小さくなった際の圧力を算出した。なお液体窒素の圧力計算は流体の物性値計算プログラム GASPAC を用いて行った。結果を図 1 に示す。

この結果を見ると密度の変化が圧力変化に大きく影響していることが確認できる。したがって圧力上昇に伴うケーブル内の体積変化の把握が重要であることが示唆された。

3. ケーブル内応力評価解析

事故時の密閉銅フォーマ部の圧力上昇に伴うケーブル内部にかかる応力解析を行った。モデルケーブルは熊取試験場で用いられた 30 m ケーブルを用いた。用いたケーブル構造を図 2 に示す。解析は短絡事故を想定し内部圧力が 0.1~10 MPa までに变化した際の、内部にかかる応力を計算した。

ケーブルの内部構造は銅フォーマに PPLP が巻かれた厚肉円筒とし、応力が最大になる最内部 ($r = r_2$) について以下の式から計算を行った。また解析では、比較のため、外径を 2 倍~4 倍まで変化させた際の応力計算を行った。 ($k = r_2/r_1$)

$$\sigma_r = -\frac{p_1}{k^2 - 1} \left\{ \left(\frac{r_2}{r} \right)^2 - 1 \right\} \quad \dots(1)$$

$$\sigma_t = \frac{p_1}{k^2 - 1} \left\{ \left(\frac{r_2}{r} \right)^2 + 1 \right\} \quad \dots(2)$$

$$\sigma_z = \frac{p_1}{k^2 - 1} \quad \dots(3)$$

この結果より、最内部での応力は主として周方向にかかることが確認された。したがってケーブルの安全性評価に当たっては、周方向応力が許容応力を下回る必要があるとされる。

そこで、許容応力の低いと考えられるフォーマ部に巻かれた PPLP® (Poly-Propylene Laminated Paper) を PET (Poly-Ethylene Terephthalate) としてそのヤング率 (77 K) [3] から推定されるひずみを計算した。ひずみの計算には、

$$\sigma = E\varepsilon \quad \dots(4) \quad \sigma: \text{応力} \quad E: \text{ヤング率} \quad \varepsilon: \text{ひずみ}$$

の式を用いた。結果を以下の表 1 に示す。

この結果より、少なくとも 10 MPa までの内圧に対しては応力に耐えられる構造であることが示唆された。

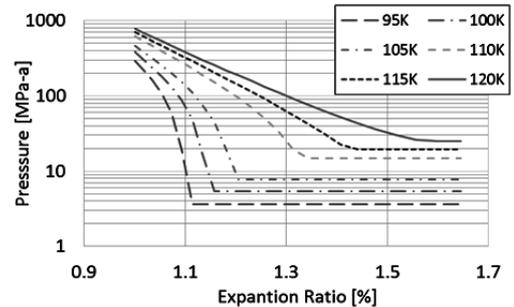


Fig.1 Calculation Result of LN2 in the Sealing up

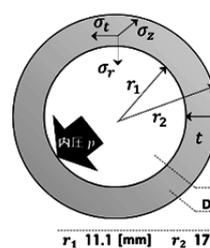


Fig.2 Cross Section View of Cable Structure

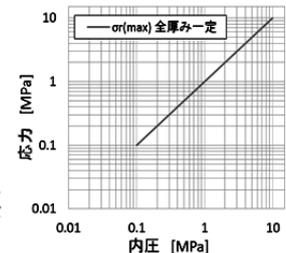


Fig.3 Calculation Result (Radial Direction)

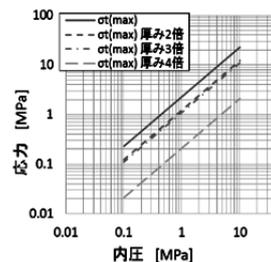


Fig.4 Calculation Result (Longitudinal Direction)

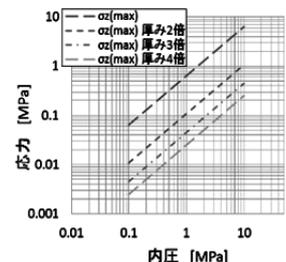


Fig.5 Calculation Result (Circumferential Direction)

Table.1 Stress to depend on a 30m cable

圧力 [MPa]	周方向応力 [MPa]	ひずみ	許容応力 [MPa]
1	2.273	9.43E-04	241
5	11.36	4.72E-03	
10	22.73	9.43E-03	

4. まとめ

本研究では接続部間で密閉されたケーブル内の挙動推定を行った。密閉状態の液体窒素について温度-密度と圧力の関係を算出した。またフォーマの周りに巻かれた PPLP® を PET と仮定した時、想定される圧力の範囲で実ケーブル内にかかる応力を計算し、密閉フォーマ部圧力が 10 MPa 程度までならケーブル破壊の危険性は示されなかった。

参考文献

1. Y.Sato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.24
2. M.Furuse, S.Fuchino, K.Agatsuma, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) p.1021
3. R.P.Reed, et al.: Cryogenics, 13 (1973) p.71

液体窒素冷却超電導テープ線材のフィンによる冷却特性の向上 improvement of recovery characteristics of REBCO wire with cooling fins

白井 康之, 原 佑規, 米田 和也, 塩津 正博(京都大学); 磯島 茂樹(住友電工); 野口 浩二(日新電機)
SHIRAI Yasuyuki, HARA Yuki, YONEDA Kazuya, SHIOTSU Masahiroi (Kyoto Univ);
ISOJIMA shigeki (SEI); NOGUUCHI Koji (Nisshin Electric)
E-mail: shirai@energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

液体窒素浸漬冷却の超電導線では、急な過電流通電時に核沸騰状態を経ずに膜沸騰状態に直接遷移し、大きな温度上昇となることが報告されている。また、抵抗型超電導限流器応用を考えた場合には、抵抗発生した限流動作状態から、事故電流が遮断された後できるだけ速く超電導に復帰し、待機状態に戻ることが期待される。本研究では、REBCO 線材にフィンを取り付け、冷却面積を増やすというだけでなく、過電流通電時の急速な加熱による非沸騰域からの直接膜沸騰遷移を防ぎ、また沸騰膜の生成、維持を阻害させて、温度上昇の抑制と速い超電導復帰を実現することを提案し、実験によりフィンの効果を確認した。

2. 試験サンプル

図1に試験サンプルの写真と取り付けたフィンの概略を示す。以前の行った、フィンを取り付けた SUS の円管や平板での熱伝達実験では、フィンの高さや間隔をパラメータとして、その効果が確認された[1]。その結果をもとに、今回は ReBCO 短尺線材に高さ3mm、間隔2mmとした2種類のフィンを半田付けしたサンプルで検討した。ReBCO 線は銅メッキしたものと、銅メッキのないもの[2]を用いた。

3. 実験結果と考察

図2は、銅メッキ REBCO 線の試験結果の一例である。電流を指数関数状に上昇させ(このケースでは時定数 τ は50ms)、臨界電流を超えると抵抗が発生している。ある設定抵抗値で電流を遮断した後、微小電流通電して抵抗測定した。遮断後はじめは膜沸騰状態で冷却が緩やかに進むが、抵抗が1.5mΩ程度で核沸騰に移行し冷却が加速される様子が観測された。膜沸騰状態での冷却はフィンをつけたものが速くなっているのが確認された。

同様の実験を、より大きな常電導抵抗を期待して銅メッキのないREBCO線で実施した。ただし、加熱による線材の劣化がみられたので、発熱量が指数関数状となるように通電電流を制御した。図3に一例を示す。 τ は30msである。条件をそろえるのが難しく、また膜沸騰域が短時間なので冷却効果の差違が明確ではないが、フィンの効果が期待される結果を得ている。

図4は、この実験結果をシミュレーションによって検討した結果である。図のような簡略化したモデルでも、フィンの近傍と離れた箇所での温度分布が現れ、熱伝達が一様でなくなって、結果として、膜沸騰からの離脱が速くなることが確認された。

4. まとめ

フィンの冷却特性向上効果は、期待通りに確認された。今後、長尺線に安定に容易に製作でき、同様の効果が期待できるフィンの材料、形状、設置方法などを検討する予定である。

参考文献

[1] Fujisaka et al., "Proc of ICEC24-ICMC2012, pp.51-54, ISBN978-4-9906959-0-3(2012)

[2] 原ほか、電気学会研究会資料超電導応用電力機器研究会、No.1、pp.1-5(2013)

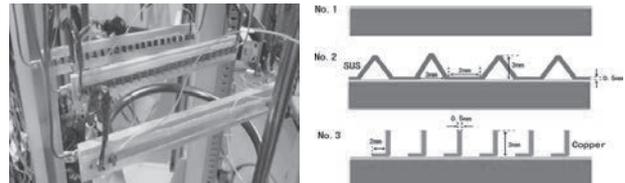


Fig.1 Photo and Schema of test superconducting tapes without (No.1) and with SUS triangle fin (No.2), Cu L-shape fin (No.3).

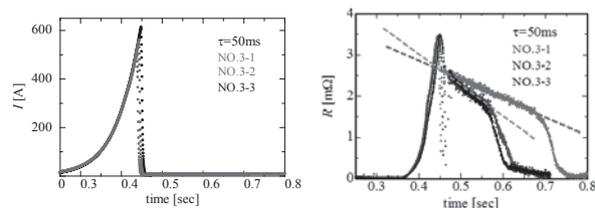


Fig.2 Experimental result: transport current (left) and resistance of each sample (right) for Cu coated REBCO sample.

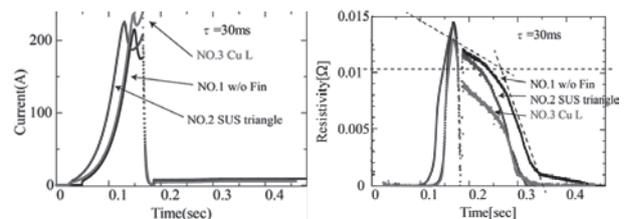


Fig.3 Experimental result: transport current (left) and resistance of each sample (right) for REBCO sample without Cu coating.

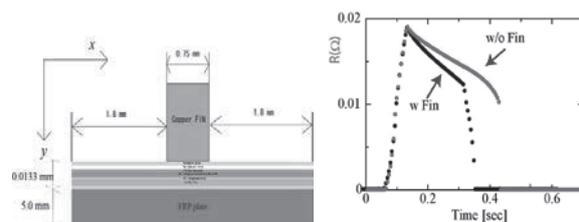


Fig.4 Simulation model of superconducting wire with fin (left) and simulation result of resistance change with exponential current as in Fig.1 (right).

高温超電導誘導同期回転機における冷却構造の検討 —積層珪素鋼板の熱通過率の異方性

Study on cryogenic structure of high temperature superconducting induction/synchronous machine—Anisotropy of coefficient of overall heat transfer in silicon steel core

渡邊 潤, 志村 拓俊, 中村 武恒, 小笠 卓郎, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝(イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)

WATANABE Jun, SHIMURA Hiroto, NAKAMURA Taketsune, OGASA Takuro, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);

ITO Yoshitaka (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への適用を目指した高温超電導誘導同期回転機の研究開発を実施している[1]。本研究では、回転子ならびに固定子鉄心に使用している珪素鋼板について、その熱通過率の異方性を実験的・解析的に検討するとともに、冷却構造について基礎検討を行ったので報告する。

2. 測定対象とシステム

本研究では、珪素鋼板の軸方向および径方向における冷却特性の測定を行った。Fig. 1(a)には、軸方向における冷却特性測定実験の模式図を示す。測定対象とした回転子コア(珪素鋼板、外径: 49.25 mm, 軸長: 96 mm)の上端面にGM冷凍機コールドヘッドを設置した。また側面二箇所に抵抗温度センサを取り付け、冷凍機を駆動させた時の温度変化を測定した。なお、実際の回転子コアには、シャフト用の穴があけてあり(内径: 24 mm), 当該部分の熱伝達を低く抑えるため、ネジ止めにはガラス繊維強化プラスチックを用いた。

Fig. 1(b)には、径方向における冷却特性測定実験の模式図を示す。本実験では、コールドヘッドと測定対象とした回転子コア(珪素鋼板、外径: 49.25 mm, 内径(シャフト径): 24 mm, 軸長: 29 mm)の円周部に銅薄板を巻きつけて、径方向への冷却を可能とした(軸方向冷却特性測定時は、上記薄板を外している)。

3. 実験結果と考察

Fig. 2(a)には、軸方向における冷却特性の測定結果(シンプル), および一次元熱伝導方程式(差分法)[2]によるフィッティング結果(実線)を示す。同図から明らかなように、軸方向の熱伝達は非常に小さく、このことは解析結果との一致からも検証された。

Fig. 2(b)には、径方向における冷却特性の測定結果を示す。実験方法や測定対象の諸元は異なるが、上記軸方向と比較して速やかに定常温度に達した。つまり、径方向における熱通過率は非常に大きな値になると予測される。熱通過率に大きな差が生じるのは、珪素鋼板が薄板を積み重ねた構造をしているため、各層間で接触熱抵抗が生じているからだと考えられる。

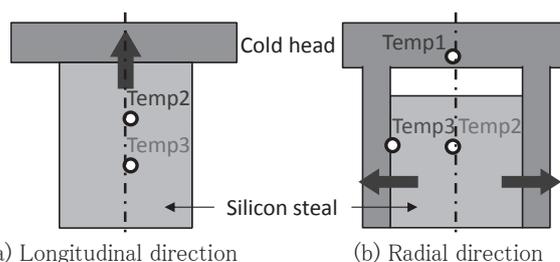
以上の結果から、回転子コアの軸方向冷却は殆ど期待できず、径方向について積極的に検討すべきであると考えられる。当該結果を受け、回転子鉄心表面のガス冷却特性改善などを検討したが、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B), 課題番号: 23360124)の援助を受けた。

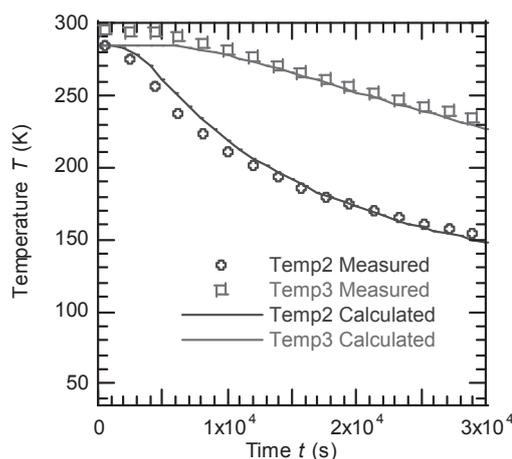
参考文献

1. 中村武恒 他: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582
2. 庄司正宏: 伝熱工学 (東京大学, 1995)

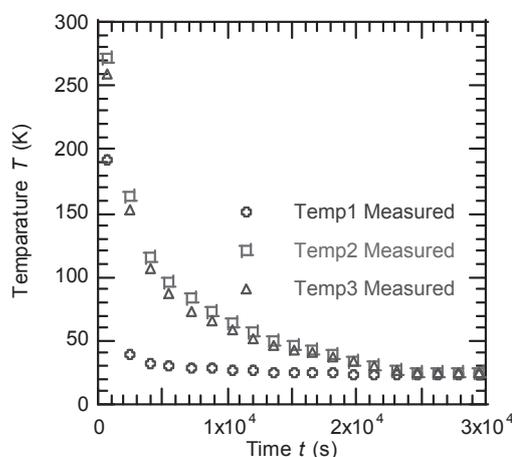


(a) Longitudinal direction (b) Radial direction

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for overall heat transfer in silicon steel core



(a) Longitudinal direction



(b) Radial direction

Fig. 2 Experimental and analysis results of overall heat transfer in silicon steel core

Current-carrying capacity of HTS single layer cable in parallel magnetic field

V. S. Vyatkin¹, K. Tanimura¹, M. Kiuchi¹, E. S. Otabe¹, T. Matsushita¹, M. Oya²

¹Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Fukuoka, Japan,

²Sumitomo Electric Industries, Ltd., Konohana-ku, Osaka, Japan,

E-mail: vyatkin@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. Introduction

Innovative DC superconducting cable with higher current-carrying capacity than in conventional cables was proposed [1–2]. The superior property is brought about by the parallel magnetic field that enhances the critical current density. In this work, the current-carrying capacity of a single layer composed from Bi-2223 tapes, which simulated the innermost layer of the inner conductor of superconducting cable, was measured in the parallel magnetic field to prove the feasibility of the proposed cable. The influence of the twisting of the cable was investigated for obtaining optimum structure of the cable.

2. Experiment

The innermost layer of the innovative multilayer cable with effect of enhancement of current-carrying capacity under longitudinal magnetic field was investigated experimentally. The samples of the 13 tapes in one layer are shown in the Fig. 1.

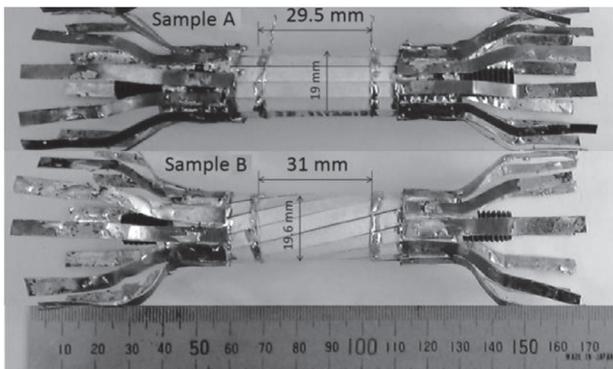


Fig. 1. One layer samples (a) without inclination and (b) 15 degree inclination. The number of tapes is 13.

The sample was inserted in the magnetic field parallel to the axis and voltage-current characteristics were measured. The value of critical current was obtained by the criterion 10^{-4} V/m from this dependence.

3. Results and discussion

Fig. 2(a) shows the external magnetic field dependence of current-carrying capacity of the Sample A with comparison with the one of single tape multiplied by 13. It was obtained that the cable structure increases the current-carrying capacity due to elimination of the normal field component to the tape surface.

The Sample B with twisting of 15 degree demonstrates the increasing of current-carrying capacity in longitudinal magnetic field (Fig. 2(b)). The critical current of Sample A is almost flat up to about 0.1 T of B_{ext} and then, decreases with increasing B_{ext} . On the other hand, the critical current of the Sample B has a peak at around $B_{ext} \sim 0.08$ T.

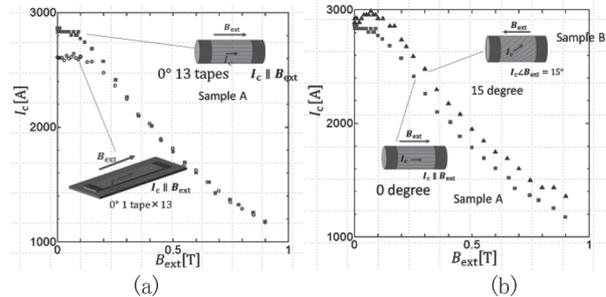


Fig. 2. The dependences of current-carrying capacity of the cable with comparing of single tape for (a) 0 degree and (b) 15 degree.

Inside of this layer the transverse self-field increases from 0 T from inner part till B_ϕ in outer part of the cable. The transverse magnetic field B_ϕ is:

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I_c}{2\pi R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2800}{2\pi \times 0.01} = 0.056 \text{ T}$$

$$\tan \varphi = \frac{0.056}{0.08} = 0.56 \quad \varphi = 35^\circ$$

Average angle (from 0 to 35 degree) is about 17 degree. In this condition of the peak I_c of 3000 A under $B_{ext} = 0.08$ T, the transverse self-field B_ϕ is about 0.056 T. The angle of magnetic field changes from 0 degree on the inner surface up to $\varphi = 35$ degree on the outer surface of the cable. The average inclination 17 degree is close to the inclination of the superconducting tapes (15 degree), and it is reasonable to obtain the peak I_c in this condition.

This result gives us a prospect to attain specially designed multilayer cables with high efficiency [1, 2] where the tapes in each layer are optimally arranged with respect to the field angle.

4. Conclusion

It was found that the critical current was increased by about 10% in the form of the cable due to the elimination of the normal field.

The critical current of the twisted cable had the peak at the longitudinal magnetic field of 0.08 T in which the current direction was approximately parallel to the mean field direction. It is expected to achieve significant enhancement of the current-carrying capacity for specially designed cables that realizes the longitudinal magnetic field effect in every layer.

Acknowledgements: This work is supported by Advanced Low Carbon Technology Research and Development Program (ALCA) of Japan Science and Technology Agency (JST).

References:

- [1] V.S. Vyatkin, K. Tanabe, J. Wada, M. Kiuchi, E.S. Otabe and T. Matsushita, Physica C 494 (2013) 135.
- [2] T. Matsushita, V.S. Vyatkin, M. Kiuchi and E.S. Otabe, AIP Conf. Proc. 1574, 225 (2014).

磁場回転型ドラッグデリバリーシステムに関する基礎的研究

Fundamental study on drug delivery system with rotating magnetic field

竹内 一将, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学 工学研究科)
 TAKEUCHI Kazumasa, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro
 (Osaka University Graduate school of Engineering)
 E-mail: takeuchi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

薬剤に強磁性を付与し、体外からの磁気牽引力によって薬剤を標的部位に送達する磁場印加型薬剤送達システム (Magnetic Drug Delivery System: MDDS) の研究が盛んに行われている[1]。しかし、体外の一方向から磁場を印加する従来の MDDS の手法では、薬剤は体表面に集積するため、体内深部に効率的に薬剤を送達することが困難である。そこで、本研究では磁場を回転させる手法について検討した。磁場の回転軸付近では、強磁性薬剤を血管内壁に沿って円運動させ続けることで集積させる。一方回転軸から離れた箇所では、磁場の大きな変動により、強磁性薬剤は血管内壁に沿った円運動を続けることができず血管内壁から離れ、血流に押し流されることにより、集積を防ぐ (Fig1)。このような磁場回転型 DDS (Drug Delivery System with Rotating Magnetic Field) [2] の技術を開発するため、磁場に関する基礎的な制御について検討した。

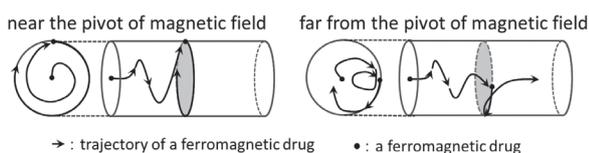


Fig1. The trajectory of a ferromagnetic drug in a blood vessel when rotating magnetic field is utilized

本研究では、磁場発生源に電磁石を採用することで、磁石や患者を回転させることなく電流の制御により、磁場発生源を固定した状態で生体内に印加する磁場を回転させる手法を検討した。ここでは、磁場回転型 DDS の基礎的な技術を確認するという目的のもと行った、電磁石の設計および模擬実験の結果について述べる。

2. 実験方法

マウスを用いる生体実験の規模で、電磁石先端から 15 mm 離れた場所で粒径 30 μm のマグネタイト粒子 (磁性薬剤を模擬) を牽引することができる条件の電磁石を設計し、これを 4 基製作した。これら電磁石の先端が直径 3 cm の円周上で等間隔になるよう配置し、電流の切り替えにより各電磁石に 1 A の電流を順次通電することで、回転磁場を模擬した。この円の中心を、磁場の回転軸とする。内径 4.76 mm の模擬血管中に、マグネタイト粒子懸濁液を鉛直上向きに流速 2.5 cm/sec で流し、1 Hz の回転磁場を印加したときの粒子の挙動を、以下の 2 つの条件で観測した。Fig2 に実験系の主要な部分を示す。

- i. 磁場の回転軸から 5 mm 離れた箇所に模擬血管を配置
- ii. 磁場の回転軸上に模擬血管を配置

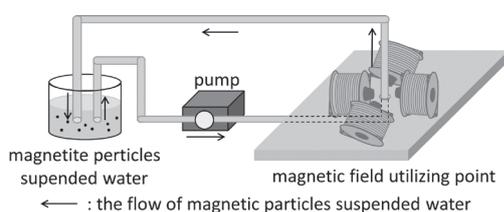


Fig2. Experimental system

3. 実験結果・考察

回転磁場を継続的に印加したときのマグネタイト粒子の挙動を Fig3 に示す。上図が i、下図が ii の条件での集積の様子であり、各図中の矢印は、懸濁液の流れの方向を表す。まず i. において、粒子は回転磁場印加領域において一旦集積するものの、少しずつ流され、6 分後全ての粒子が流された。一方 ii. において、粒子は集積され、6 分間経過した後も模擬血管内壁に沿って、磁場の回転周波数で円運動を続けた。以上の観測結果から、磁場の回転軸から離れた箇所にある血管では強磁性薬剤の集積を防ぎ、回転軸上にある血管のみに集積させる技術の実現の可能性が示された。

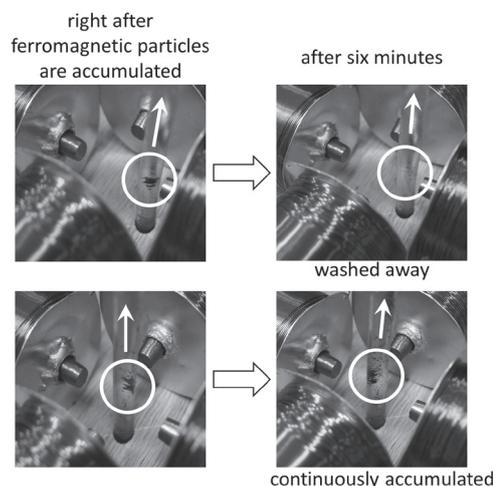


Fig3. The behavior of ferromagnetic particles (upper : i, lower : ii)

4. 今後の展望

以上の結果をふまえ、Fig4 のように、対向する 2 基の電磁石を接続することで対し、各対の電流を個別に制御することにより、各対の間に印加する磁場の合成磁場を回転させる手法を検討している。この手法によって、より精密な磁場制御が可能になると考えられる。また、本研究により基礎的な技術が確立されたので、超電導ソレノイド磁石を用いた磁場回転型 DDS 装置について、今後検討を進める予定である。

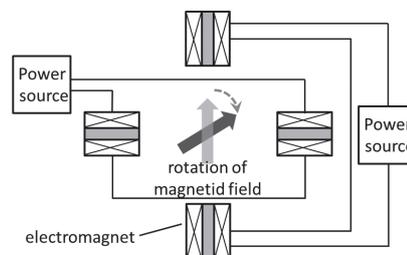


Fig4. Next step of controlling magnetic field

参考文献

1. 城潤一郎ら, Drug Delivery System 22-5, pp.558-568, 2007
2. M.Chuzawa, et al.: Physica C: Superconductivity, Volume 484, pp.120-124, 2013

自然エネルギー出力変動補償用 SMES の通電電流を考慮した 入出力制御法の検討

Investigation of an input/output control method considering SMES coil current for compensating for fluctuating output of natural energy

佐藤 裕貴, 佐藤 諒亮, 石田 なつみ, 宮城 大輔, 津田 理, (東北大学); 濱島 高太郎 (八戸工業大学); 新富 孝和 (日本大学); 横田 康博 (高エネルギー加速器研究機構); 高尾 智明 (上智大学); 岩城 勝也 (岩谷産業)

SATO Yuuki, SATO Ryosuke, ISHIDA Natsumi, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku University); HAMAJIMA Takataro (Hachinohe Institute of Technology); SHINTOMI Takakazu (Nihon University); MAKIDA Yasuhiro (High Energy Accelerator Research Organization); TAKAO Tomoaki (Sophia University); IWAKI Katsuya (Iwatani Corporation)
E-mail: styk@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 化石エネルギーの代替エネルギーとして, 自然エネルギーを利用した発電方法が注目されている。しかし, 発電出力の変動は急峻で大きく, 系統に大量導入するには予備力の確保や周波数変動への対策が必要となる。そこで, 我々は, 燃料電池(FC)と電気分解装置(EL)から成る水素システムと超電導磁気エネルギー貯蔵(SMES)システムという 2 つの特徴の異なる電力貯蔵システムを組み合わせた「先進超電導電力変換システム(ASPCS)」を提案している[1]。ASPCS を安定して継続運転させるには, それぞれの貯蔵システムに適した制御方法を確立する必要がある。そこで, 本研究では, 小型モデル装置を用いて SMES の残存容量(通電電流)を考慮した, SMES の入出力制御法について検討した。

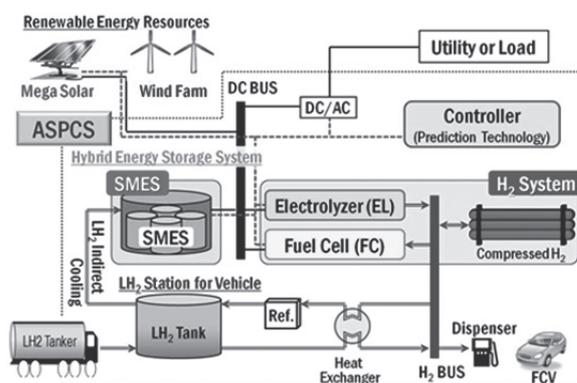


Fig. 1 Schematic view of ASPCS

2. システム構成と変動補償方法

本研究で提案している ASPCS の概念図を Fig. 1 に示す。ASPCS は自然エネルギー電源, SMES と水素システムを組み合わせたハイブリッド貯蔵システム, 燃料電池自動車用の液体水素ステーションで構成される。自然エネルギーの出力変動補償は, Kalman filter によるトレンド予測によって抽出された長周期成分を水素システムが, 残りの短周期成分を SMES が行う。SMES はエネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵するため, 応答性や耐久性に優れている。しかし, 経済性の観点から, 容量を可能な限り小さくすることが望ましく, かつ, SMES の容量を有効に使用するため, コイルの運転電流を考慮した入出力制御が重要となる。

3. 入出力制御方法の検討

ASPCS の運転中に SMES が過充電/過放電となり制御不能となると変動補償を継続できなくなるため, SMES の通電電流を常に監視し, 適正な範囲内に収める必要がある。そこで, 本研究では, SMES コイル電流が基準値以上または以下になると基準値に戻るよう補正する残存容量フィードバック(SOC-FB)制御を採用した。そして, SMES と水素システムの EL を模擬した電子負荷で構成された小型モデル装置を用いて, SOC-FB 制御を適用した場合と適用しない場合について変動補償試験を行い, SMES コイル電流の時間変化を測定した。その結果を Fig. 2 に示す。また, SOC-FB 制御適用時における 10 分間の変動補償試験結果を Fig. 3 に示す。Fig. 2 より, SOC-FB 制御を適用しない場合には, 途中で SMES のコイル電流がゼロとなり, 出力変動補償を継続できなくなったのに対し, SOC-FB 制御を適用した場合には, コイル電流がゼロになることなく運転を継続することができた。また, Fig. 3 より, SOC-FB 制御を適用した場合に, 出力電力の変動率が $\pm 10\%$ 以下に抑制することに成功した。なお, 本研究の一部は, JST(ALCA)からの委託により実施したものである。

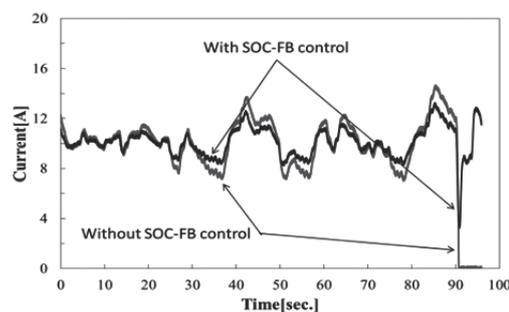


Fig. 2 Experimental results of SMES coil current with/without SOC-FB control

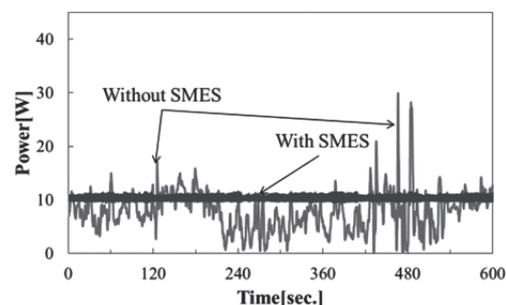


Fig. 3 Experimental results of output power compensated by SMES and hydrogen systems

参考文献

- [1] T.Hamajima, et al. "Application of SMES and Fuel Cell System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy Control", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.22 No.3, 5701704 (2012)

冷凍機 COP を考慮した高温超電導誘導同期回転機システムの の定常駆動特性解析

Steady-state driving characteristics analysis of high temperature superconducting induction/synchronous machine taking account of COP of cryocooler

中村 武恒, 志村 拓俊, 西村 立男, 小笠 卓郎, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝(イムラ材研);
大橋 義正 (アイシン精機)

NAKAMURA Taketsune, SHIMURA Hiroto, NISHIMURA Tatsuo, OGASA Takuro, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);
ITO Yoshitaka (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への適用を目指した高温超電導誘導同期回転機 (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) システムの研究開発を実施している[1]。本システムの実現可能性を明らかにするためには、その超電導回転機&冷凍機システムが既存の常電導回転機&トランスミッションシステムに比較して駆動効率の観点から優れていることを実証していかなければならない。

本報告では、HTS-ISM&冷凍機システムについて非線形等価回路による効率コンター図を作成し、上記既存システムに対する優位性を検討したので報告する。

2. 対象とした回転機と解析方法

Fig. 1には、検討対象とした50 kW級全超電導誘導同期回転機の2次元有限要素法解析モデルを示す。同モデルにおいて、固定子巻線の交流損失は非線形等価抵抗に置き換えることとし、先行研究[2]から $0.25 \mu\Omega/\text{AHz}$ @78 Kと仮定した。

上記回転機について、仮想的無負荷試験および回転子拘束試験を電磁界解析によって実施し、等価回路定数を決定した。また、同回転子におけるHTSロータバーの非線形抵抗[3]も別途反映している。解析時の制約条件としては、最大トルク1600 Nm, 最高回転数1800 rpm, 線間実効最大電圧400 Vとした。

3. 解析結果と考察

Fig. 2には、上記開発した等価回路解析結果と試験結果の比較を示す。同図に示すように、温度70 Kと77 Kについて両者が良く一致しており、即ち等価回路解析コードの妥当性が示された。

次に、上記解析コードを用いて、定常駆動時効率マップを作成した。Fig. 3にその結果を示す。同図に示すように、HTS-ISMは広範なトルクと回転数の範囲にて高効率を実現できている。さらに、将来的な冷凍機COPを0.1と仮定すると、例えば(トルク, 回転数)=(300 Nm, 500 rpm)といった使用頻度の高い走行条件においてシステム効率が90%近くに達する結果を得た。同様の出力特性を有する従来型(常電導)永久磁石モータの最高効率は94%程度であるが[4]、トランスミッションのギア損を考慮すると75~80%程度にまで低下すると推測される。詳細は、講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. 中村武恒 他: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582
2. 三澤慎太郎: 京都大学大学院工学研究科修士論文 (2014)
3. 木須隆暢 他: 低温工学, Vol. 34, No. 7 (1999) pp. 322-331

4. R. H. Staunton et al., “Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System”, U.S. Department of Energy Report (DE-AC05-00OR22725), 2006, p. 34

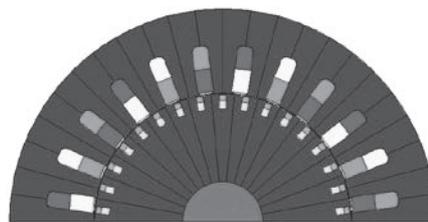


Fig.1 2D FEM model of 50 kW class fully superconducting HTS-ISM

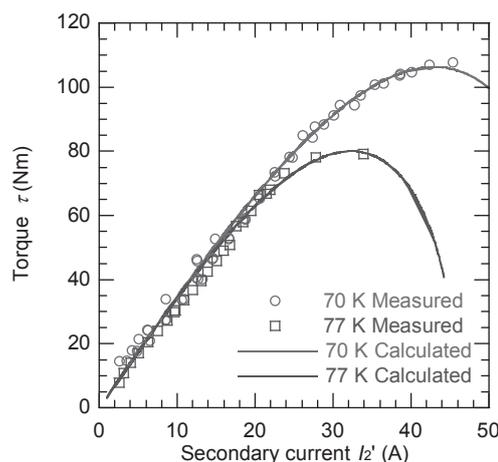


Fig. 2 Example of comparison between tested results and analysis results obtained from nonlinear electrical equivalent circuits

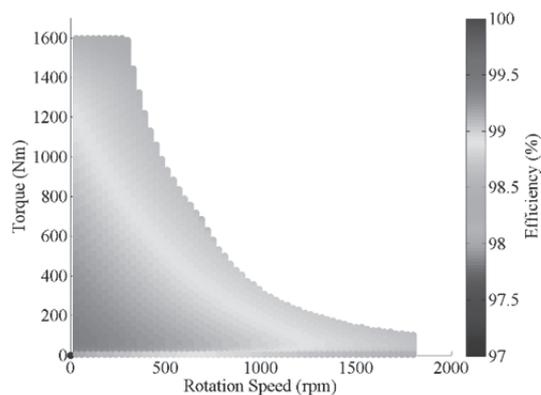


Fig. 3 Analysis results of efficiency contour of 50 kW class HTS-ISM operated at 78 K

高温超電導誘導同期回転機の最適可変速制御コードの開発 — 回転条件分割型磁束一定制御の提案と基礎検討

Development of optimal variable-speed control code of high temperature superconducting induction/synchronous machine—Proposal of fixed magnetic flux control depending upon rotating condition and its fundamental study

村中 啓太郎, 中村 武恒, 西村 立男, 志村 拓俊, 小笠 卓郎, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝(イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)

MURANAKA Keitaro, NAKAMURA Taketsune, NISHIMURA Tatsuo, SHIMURA Hirotooshi, OGASA Takuro, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)
E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への適用を目指した高温超電導誘導同期回転機 (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)の研究開発を実施している[1]。本研究では、可変速時における同期回転状態維持範囲の拡大を目指し、特定の回転数とトルクの領域に分割して磁束一定を制約条件とした最大効率制御コードを提案する。また、当該コードを 20 kW 級プロトタイプ機に適用して Matlab/Simulink[®]解析を実施し、提案したコードの妥当性を検証したので報告する。

2. 回転条件分割型磁束一定制御の考え方

HTS-ISMは、かご型誘導機と同様の簡易な構造ながら同期定常回転が実現される特長を有する[1]。しかしながら、可変速時や要求負荷トルク変化時には、かご型巻線に捕捉した磁束を一旦解除して別途値の磁束を捕捉する必要性が頻繁に生じ、その際はすべり回転状態(磁束フロー状態)に移行することから損失が発生してしまう。従って、HTS-ISMに要求される運転範囲(回転数とトルク)に対して、それを特定の領域に分割して、当該範囲における磁束一定制御を提案する。

Fig. 1には、回転機に要求される一般的トルク-回転数特性を示す。同図に示すように、回転機の最大トルクは低速時に定トルク特性として、またある回転数以上では定出力特性として制約される。上記特性をメッシュ状に分割し、例えば色塗りの領域において、磁束を $\Phi'_{s,ij}$ 一定とした制御を実施することになる。

3. 解析対象とした回転機

上記提案した制御方法の妥当性を検証するために、Matlab/Simulink[®]を適用したシミュレーションを行った。Fig. 2には、解析対象とした20 kW級HTS-ISMの外観写真を示す。同回転機は、固定子に銅巻線が、また回転子にHTS巻線(BSCCOテープ材)がそれぞれ使用されている。

4. 解析結果と考察

Fig. 3には、回転数を一定(900 rpm)として、縦軸をトルク、横軸を一次電圧とした効率マップを示す。同図は、あるトルクおよび回転数に対して最大効率値をプロットする一般的な効率マップとは異なる。即ち、回転数一定の制約条件下で、要求トルクに対して電圧を変化させ、最大効率を実現する磁束の条件から外れた特性まで調べたマップである。同図より、ある要求トルクおよび回転数に対して、高効率特性を実現する磁束の範囲が広いことが分かり、回転条件分割型磁束一定制御の妥当性が確かめられた。その他、トルクを一定とした効率マップの検討も行っており、詳細な内容は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. 中村武恒 他: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582

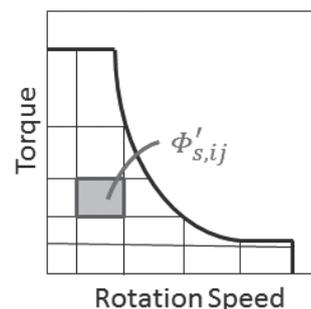


Fig.1 Schematic diagram of torque (τ) vs. rotating speed (Λ) characteristic and concept of fixed magnetic flux control.



Fig. 2 Photograph of a 20 kW class HTS-ISM considered for analysis.

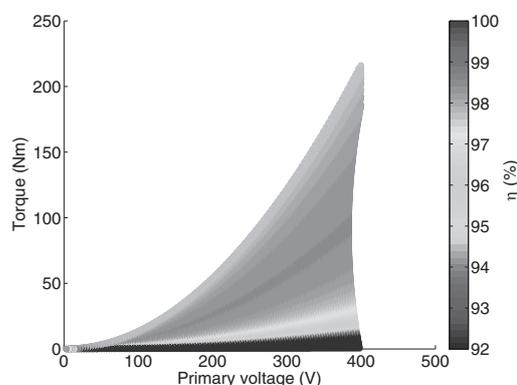


Fig. 3 Example of analysis result. Efficiency (η) contour is obtained for different values of torque and primary voltage at 900 rpm.