

高温超伝導材料の回転機応用
—非線形通電特性を利用したブレークスルーを目指して—
Rotating machine application of high- T_c superconducting materials
-for the breakthrough with the aid of nonlinear current carrying property-

中村武恒

京都大学大学院工学研究科

Taketsune Nakamura

Graduate School of Engineering, Kyoto University

In this report, the performance of high T_c superconducting induction/synchronous machine (HTS-ISM) is discussed based on the analysis and experiment. Although the structure of the HTS-ISM is the same as that of the conventional (normal conducting) squirrel-cage induction machine, it possesses excellent characteristics such as co-existence of slip and synchronous modes, almost constant torque vs. speed curve etc., with the aid of nonlinear current carrying capability of HTS materials. The detailed mechanism, the performance and the merit of the HTS-ISM are to be explained and discussed.

1. はじめに

筆者の研究室は、京都大学大学院工学研究科電気工学専攻電磁工学講座に所属し、スタッフとして筆者1名、ポスドク1名、修士課程学生4名、卒論生4名で構成されている。研究テーマとしては、主として高温超伝導材料を対象とし、同材料の基礎特性評価法の確立、高機能ハイブリッド固体蓄冷媒の提案と同冷媒を適用した高安定・高信頼冷却法の開発、パワー応用機器の開発(回転機, エネルギー貯蔵用コイル (SMES), 磁束ポンプ 他), 同導入効果などについて検討している。さらに近年では、省エネルギーや環境対策, CO₂ 排出量削減などをキーワードとして、既存機器とのハイブリッド化を含む高温超伝導機器の最適導入など、電力システムにまで拡大した検討を行っている。当研究室で筆者が掲げているモットーは、物理モデルに立脚した材料評価を行い、かつそれをパワー応用にまで展開する総合的な研究の実施であり、高温超伝導材料を単に抵抗ゼロのブラックボックスとして扱うのではなく、パワー応用機器が要求する仕様を満たすべく、そのポテンシャルを最大限生かす応用を検討している。本稿では、回転機を取り上げ、上記方針の成果として当研究室が世界的に先導している高温超伝導誘導/同期機の研究開発現状の一端を紹介する。

2. 高温超伝導誘導/同期機の基礎特性について

2.1 かご型誘導機について

回転機を駆動原理に基づいて分類すると、大雑把には直流機, 誘導機, 同期機に分けられる。また、回転機は発電機あるいは電動機として使用されるが、現在電動機として最も広範に使用されているのはかご型誘導機である。このことは、同機の単純な構造, 安価, 保守の容易性, 長寿命, 大量生産向き他の特長がユーザから見ると重要であることを示しているものであり、駆動原理上2次巻線に電流を誘導する必要から効率や力率があまり高く無いにもかかわらず、分数馬力モータから鉄道車両用主電動機に至るまで広く使用されている。例えば、現在国内におけるインバータ駆動鉄道車両は全てかご型誘導機を適用している。

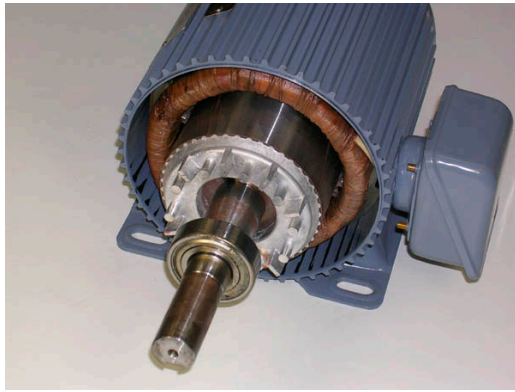


図1 対象としたかご型誘導機の外観写真.

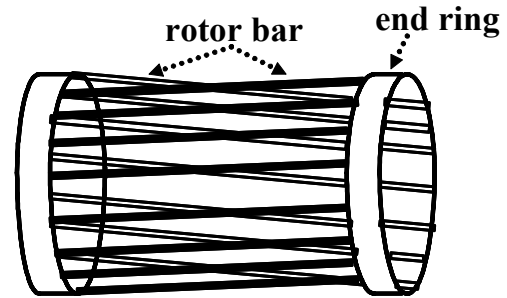


図2 かご型2次巻線の概略図.

2.2 回転機の高温度超伝導化について

回転機の高温度超伝導化としては、一部単極直流機について検討されている（いた）ものの、現状は従来型同期機構造を対象としたものがほとんどである。このことは、従来機としては誘導機が汎用されているにもかかわらず、筆者の学会等での経験から批判を恐れず述べるならば、誘導機は原理上すべりを伴うことから効率が悪いという「固定観念」もあり、我が国をはじめ世界的な認識と考えられる。

一方、高温超伝導回転機を産業界に船出させようとする場合、特殊応用を除けば、超伝導材料を過保護に扱っても相手にされにくく、既存技術を真摯に見習いかつ本当の意味で競わせる必要がある。即ち、本稿で紹介する回転機は、上記発想の転換の結果生み出されたものであり、誘導機が広く使用される歴史的とも言える上記メリット（2.1節参照）を生かし、その中で超伝導の利点を最大限発揮させるという立場から研究されている。

筆者らは、以上の観点に立って検討を行い、誘導機のメリットを尊重しつつ高温超伝導材料を導入することで、同期回転を初めとする高性能化ならびに高機能化が達成可能であることを理論的・実験的に明らかにしてきた [1-5]。また、本回転機を高温超伝導誘導/同期機 (High T_c Superconducting Induction/Synchronous Machine: 以下 HTS-ISM) と名付け、世界に向けて発信している。HTS-ISMの考えは、最近になって少しずつ認めて頂けるようになっており、例えば筆者が2007年8月27-31日にPhiladelphia (Pennsylvania州, 米国)にて開催された20th International Conference on Magnet Technology (MT20)でOral講演した際には、Siemens社（本社：ドイツ）の研究開発者他から高い評価を受けた。尚、超伝導かご型誘導機の先行研究や他研究現状については筆者の解説記事[6]を参照頂きたい。

2.3 高温超伝導誘導/同期機の駆動原理および特長

図1には、検討対象としたかご型誘導機の外観写真を示す。同図は、市販機（3相、4極、200 V、定格出力: 1.5 kW）について、前面のブラケットを外して内部の回転子を抜き出した状態である。また、図2には回転子から2次巻線のみを取り出した概略図を示す。同図中、ロータバーは鉄心のスロット内に収められ、これに誘導される起電力を短絡電流として流すためにエンドリングが接続されている。この巻線を、固定子を作る回転磁場中に置くことにより、同磁場と誘導電流との相互作用によってトルクが発生することになる。つまり、従来型（常伝導）誘導機では、回転子がギャップ回転磁場に対して相対速度を持って回転する必要がある。この相対速度の大きさは通常すべり (slip) s として表され、以下の式で定義される。

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (1)$$

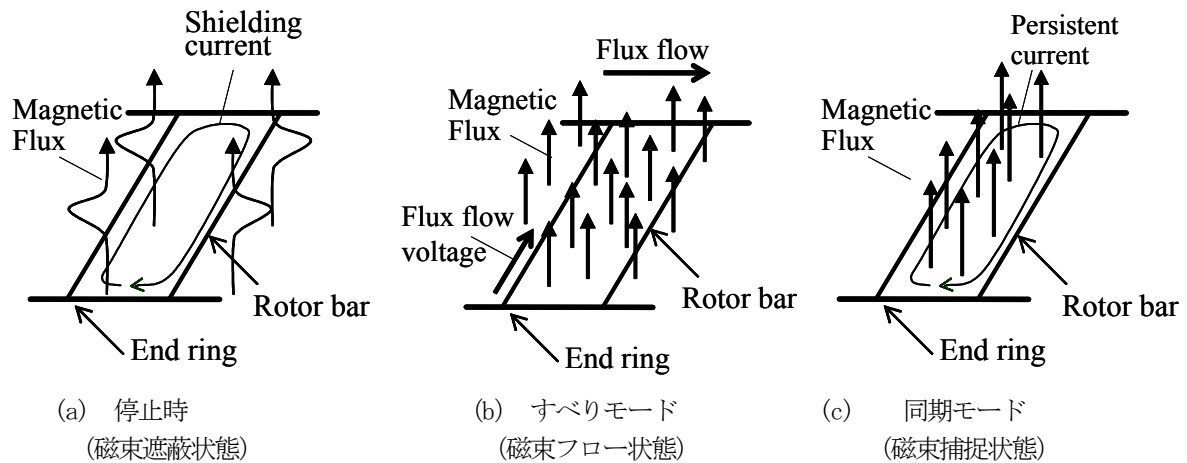


図3 HTSかご型回転子巻線における電磁現象の説明図.

ここで、 N_s はギャップ磁束の回転数（同期回転数）であり、 M は回転子の回転数である。つまり、モータが停止している時は $s=1$ ，同期回転している時は $s=0$ となる。

筆者らは、上記かご型誘導機のかご型巻線（図2）を高温超伝導化することを考えた。この時、かご型巻線を構成するための高温超伝導線材は短尺でよく、比較的簡単に製作することができる。ただし、上記単純なリブレースにもかかわらず、次のような従来型回転機では実現できない高性能化ならびに高機能化が実現可能であることを理論的かつ実験的に明らかにしている。以下に、本回転機の駆動原理について簡単に説明する。

図3は、図2のかご型巻線について、簡単のためワンループ分を模式的に示したものである。本研究では、ロータバーおよびエンドリングともにHTS線材で作製することから、同線材がいわゆる不可逆曲線（irreversibility curve）未満の温度領域において、臨界電流（形式的にゼロ抵抗を維持できる最大の電流値）以下の誘導電流ではゼロ抵抗状態である（HTSロータバーは鉄心中に収められることから、定常状態では漏れ磁場としての自己磁場以外は線材に印加されない）。この状態で誘導機の入力電圧（起磁力）を上げていき、HTSかご型巻線の電磁現象を考える（機器的には、これを部分電圧始動と言う）。上記電磁現象を理解するには、次式に示すKirchhoffの電圧則が便利である。

$$\frac{d\phi}{dt} - Ri = 0 \quad (2)$$

ここで、 ϕ はHTSループの鎖交磁束であり、また R および i はそれぞれ抵抗、誘導電流である。

まず、停止しているHTS-ISMに電圧を印加していくと、(2)式において $R=0$ であることから、磁束はかご型巻線を鎖交できず、つまり同巻線ループに流れる遮蔽電流によって ϕ はゼロとなる。この状態では、トルクを発生することができず、つまり始動することができない（図3(a)）。一方、次第に起磁力を上げていくと、遮蔽電流が大きくなり、ロータバーの臨界電流を超えたところで磁束フロー状態に遷移し、磁束が鎖交して始動することになる（図3(b)）。この時の電圧を「最小始動電圧（minimum starting voltage）」と呼んでおり、その妥当性は理論的[1]に予測し、その後実験的[2]に確認した。さらに電圧を上げていくと、加速に伴って一次側回転磁場と回転子の相対速度が小さくなり（つまり s が小さくなり）、対応する磁束フロー電流（電圧）も小さくなっていく。そして、最終的には同電流が臨界電流以下になることでゼロ抵抗状態に復帰し、その時鎖交していた磁束を捕捉することになる（図3(c)）。この時、HTS-ISMはあたかも永久磁石回転機的特性を示すことになり、つまり同期回転が可能となる。即ち、本回転機は誘導機で

ありながら、すべり（非同期）ならびに同期回転の両者を実現することが可能であると期待される。このような特性は、従来型（常伝導）回転機では原理的に実現不可能であり、超伝導化によって始めて実現される。また、上記高温超伝導機の特長は、駆動原理に基づく回転機の分類に一石を投じるものであり、新しい概念に基づく回転機駆動法の開拓が期待される。

上記が、HTS-ISM特性の駆動原理に基づく説明であるが、その後の検討の結果、様々な利点を有することが明らかになっている。以下、本HTS回転機の特長を列記する。

機器的観点

(1) 同期トルクと非同期トルクの両立性

従来型誘導機は非同期（すべり）トルクしかもたず、従来型同期機は同期トルクしかもたない。一方、上記したようにHTS-ISMは両者を有しており、回転機としての性能に大きな広がりがある。

(2) 同期定常運転に伴う高効率化

HTS-ISMの定常運転はあくまで同期回転を考えている。従って、誘導機の構造的利点を兼ね備えつつ、高効率な回転機が実現される。

(3) 自己始動特性

HTS-ISMは、HTS材料の非線形通電特性に伴って大きな始動トルクを有し、かつ何らの制御も必要なく加速ならびに同期引き入れが可能である。即ち、言わば2次抵抗自己制御型のインテリジェントな始動が実現される。このことは、HTS材料のゼロ抵抗状態だけでなく、その非線形通電特性（磁束フロー特性）をも機器特性に積極的に取り入れた発想に基づく特長である。

(4) 定トルクに近い垂下加速特性

従来型誘導機のトルク-すべりカーブは、あるすべり値 s_m で最大値（これを停動トルクという）を示し、定常的には $0 < s < s_m$ のすべり範囲でしか使用できない。しかしながら、HTS材料の急峻な通電特性（電界-電流密度特性）を利用することにより、定トルクに近い垂下加速特性を有することが分かっている（実際にはやや複雑な現象も起こっているが、紙面の都合により割愛する）。このことは、HTS-ISMが $0 < s < 1$ の広範なすべり領域に亘って安定に動作することを示している。

(5) 過負荷に対するロバスト制御性

従来型同期機では、ある限界の過負荷がかかると不安定（乱調）となったり止まったり（脱調）してしまう。一方、HTS-ISMはすべりモードへ移行してほぼ定トルクで運転状態を継続することが可能であり、かつ除荷されれば速やかに同期モードへ復帰する。即ち、HTS-ISMは機器特性として過負荷に対するロバスト性を兼ね備えている。

(6) 高出力密度化・小型軽量化

HTS材料には、従来機の巻線材料（アルミや銅）に比較して非常に大きな電流を無損失で流すことが可能となる。従って、一次側起磁力の大きさによって制約があるものの、同じ回転機の体格で出力を大きくすることが可能となる。このことは、別の言い方をすると、同一の出力では小形・軽量化が可能であることを示している。

(7) 究極の誘導機

HTS-ISMは、同期トルクを有することを示したが、駆動原理はあくまで誘導機であり、いわば2次巻線抵抗をゼロにした究極の誘導機であると言える。従って、同期機で問題となる例えば電機子反作用（armature reaction）などの問題は起こらない。

材料的観点

(1) 自己磁場応用

HTS-ISMでは、HTS材料が鉄心中に収められることから、ギャップ磁束のほとんどは鉄心を通り抜ける。つまり、HTS材料には漏れ磁場としての自己磁場以外は印加されず、通電特性の磁場依存性を考慮する必要が無い。現状のHTS材料における臨界電流は、外部磁場（正確には、HTS材料の結晶c軸に平行な磁場成分）によって低下してしまう。従って、本回転機は、例えば77 K程度の高温領域においても優れた特性を実現可能である。

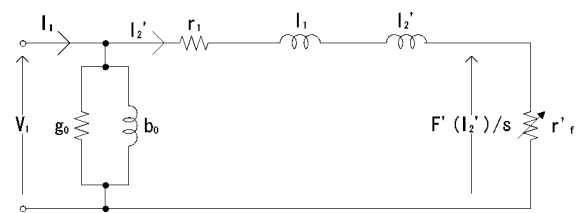
(2) 直流応用

HTS-ISMは定常的には同期運転されることから、HTSかご巻線には直流電流が流れている。つまり、定常運転状態では交流通電時に問題となる交流損失を考える必要が無い。なお、始動および加速時のすべり領域では交流電流が流れるが、これに伴って発生する電界は、速やかに同期運転状態に移行させる加速剤としての役目を果たすと期待され、つまり交流損失をも積極的に回転機全体のパフォーマンスに寄与すると期待される（この検証は、現在検討中である）。

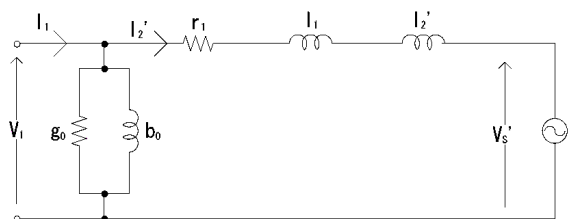
3. 解析方法

本回転機は、誘導機の鉄心構造をそのまま適用していることから、従来型（常伝導）回転機の解析方法を利用することが可能となる。換言すると、HTS-ISMと従来型誘導機の理論的特性比較を同じ土俵で行うことができ、その優位性を明らかな形で示すことができる。HTS同期機の開発の主流が高磁場発生に伴う無鉄心化に向かっている趨勢の中で、比較的小容量の本回転機においても将来的に鉄心の存在をどう考えるかは課題であるが、少なくとも上記メリットなど、超伝導の発見よりもはるかに長い回転機開発の歴史の中で培われた鉄心使用の利点がある程度尊重する意義はあると考える。鉄心を適用した回転機では、強力な磁気回路が形成されることから、通常は電気等価回路で特性評価が行われている。

図4には、HTS-ISMの解析に適用している定常等価回路を示す[1]。すべり状態と同期状態では、かご型巻線中の磁束の状態が異なるため、異なった等価回路で示している。また、プライム (') が付いているパラメータは、回転子（2次）側パラメータを一次側に換算したものであることを示している。図中、 r_1 は一次巻線抵抗であり、 g_0 および b_0 はそれぞれ励磁コンダクタンス、励磁サセプタンスと呼ばれている。パラ



(a) 非同期（すべり）時



(b) 同期時

図4 定常状態におけるHTS-ISMの一相分等価回路[1].

メータ l_1 および l_2' は、一次側および二次側の漏れインダクタンスである。なお、すべり $s \rightarrow 0$ の極限で両回路は解析的につながることは保証している[1]。図4(a)において、 $F'(I_2')$ は高温超伝導かご型回転子の非線形抵抗を表している（本研究では、九州大学の山藤（現 福岡工業大学長）・木須らが提案しているパーコレーションデピニングモデル[7]に基づいてWeibull関数を適用しているが、具体的な導出はやや複雑なので、参考文献[1]を参照頂きたい）。この、すべり領域におけるトルクは次式で与えられる。

$$\tau_a = 3 \frac{p}{2\omega} \frac{F'(I_2')}{s} I_2' \quad (3)$$

ただし、 p は固定子の極数である。また、同図(b)

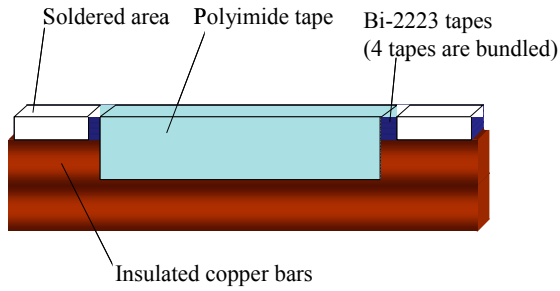


図 5 ロータバーの構成図.



図 6 HTSロータの外観写真.

の電圧源 V_s' は、捕捉磁束に伴うものであり、次式で表される.

$$V_s' = \sqrt{V_1^2 - [\omega(l_1 + l_2')I_c']^2} - \eta I_c' \quad (4)$$

ここで、 ω は電源の角周波数である. さらに、同期トルクの最大値は次式で与えられる.

$$\tau_{sm} = 3 \frac{p}{2\omega} V_s' I_c' \quad (5)$$

上式から明らかなように、最大同期トルクはHTSかご型ロータバーの臨界電流一次側換算値 (I_c') によって決定される.

4. 実験方法

4.1 HTS-ISMの試作

図5には、HTSロータバーの構成図を示す. 市販のビスマス系(Bi-2223)高温超伝導テープ材(幅: 2.0 mm, 厚み: 0.2 mm, 臨界電流平均値: 25 A@77 K & self-field)を4枚バンドル後、その両端をハンダ接続した. つまり、ロータバー1本辺りの臨界電流は100 A (25×4 A)である. また、同一のロータバーを44本作製し、ロータスロット内に挿入後、それらの両端をBi-2223テープ材でハンダ接続して回転子を完成した. 図6には、試作したHTS回転子の外観写真を示す. 同回転子を、図1の固定子中に挿入して各種試験を実施した.

4.2 試験システム

図7には、最近開発した試験システムの概略図を示す. 試作したHTS-ISMは、メタルクライオスタット(SUS306)に設置後、液体窒素浸漬冷却状態とした. モータシャフトは、フェロシールを介してクライオスタット外部の非接触トルク変換機および他励直流機に接続し、各種試験を実施できる構成としている.

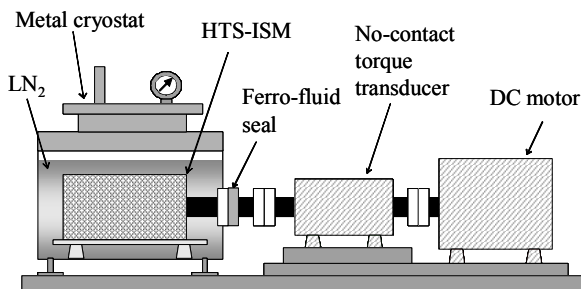
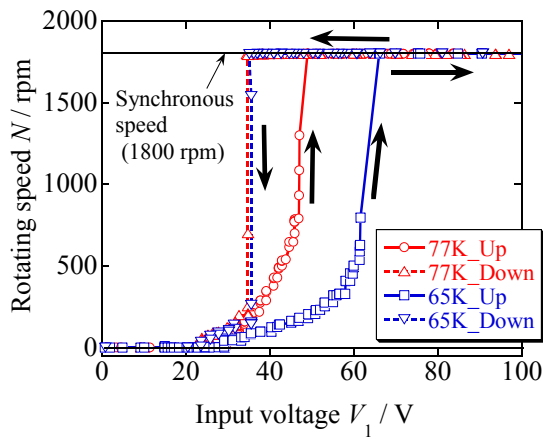


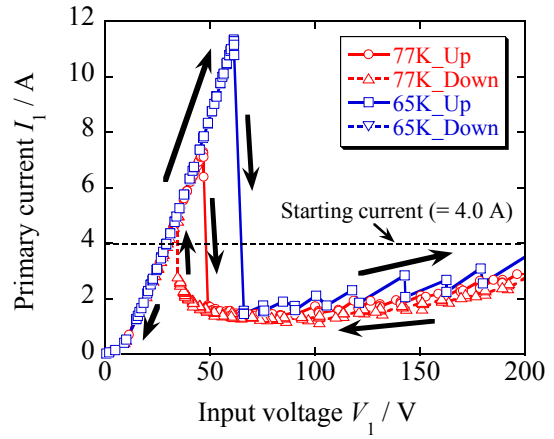
図 7 試験システム構成図



図 8 試験システム外観写真



(a) 回転数(N) vs. 入力電圧(V_1)特性



(b) 一次電流(I_1) vs. 入力電圧(V_1)特性

図9 温度65 Kならびに77 Kにおける無負荷試験結果[4]

なお、フェローシールは、低温では凍り付いてしまうため、同シールと液体窒素が接触しないための特別な工夫を施している。なお、本試験は全て駆動周波数60 Hz、液体窒素浸漬状態で実施した。液体窒素浸漬状態では、HTS-ISMが液体をかき回すことになる。従って、同液体の粘性トルクは回転数の2乗に比例することから、大きな損失となっている。現在は、この損失を克服するための冷却法を検討している。

5. 試験結果と考察

5.1 無負荷試験

まず、無負荷の状態ではHTS-ISMを励磁し、回転数ならびに一次側情報（電圧、電流、力率、入力電力他）を測定した。図9には、試験結果の一例を示す[4]。同図中、温度65 Kのデータは、液体窒素入メタルクライオスタットをロータリー真空ポンプにて減圧し、定常状態到達後の測定結果である。同図から明らかのように、入力電圧30V程度で始動後にすべりモードで回転し、ある電圧で見事に同期回転数(1800 rpm)に引き入れられている。また、同期に引き入れられる入力電圧値は、65 Kの場合に大きくなっていることが分かる。これは、後述するようにビスマスかご型巻線の臨界電流が向上するためであると考えられる。一方、

入力電圧を200 Vまで印加後、逆に下げていくと、引き入れポイントより低い電圧においても同期回転数を維持している。つまり、無負荷回転特性は電圧の印加過程に対してヒステリシスを有しており、このことはかご型巻線ループに実効磁束を捕捉しているエビデンスと考えている。

また、図9(b)には対応する一次電流特性を示す。同図に示すように、同期引き入れポイントまでは漏れリアクタンスが特性を支配するため、線形の特性を示しているが、同期引き入れ後は I_1 が急激に低下している。なお、HTSかご型巻線における臨界電流平均値(100 A@77 K&self-field)の一次側換算値は3.8 A程度である。即ち、同期化後は I_1 が臨界

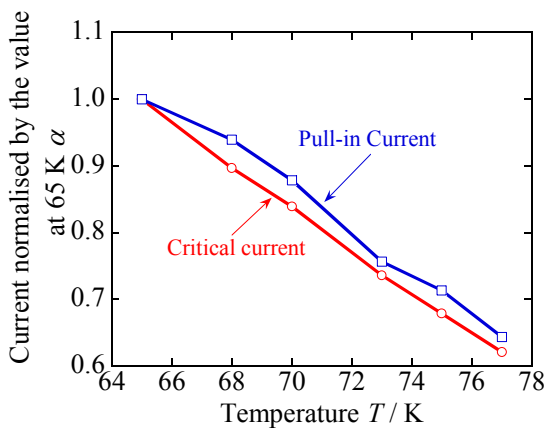


図10 同期引き入れ時電流と臨界電流の温度依存性 (いずれも65 Kの値で規格化している) [4].

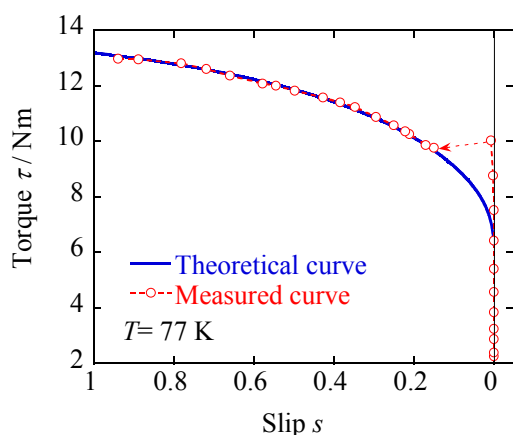


図11 77 Kにおける負荷試験結果の一例
(理論曲線は、図 4 から得られた) [5].

図11には、温度77 Kにおける試験結果の一例を示す[5]. 同図中、赤い○印は測定結果であり、また青い理論曲線は図 4 の等価回路から得た.

まず、本研究で試作したHTS-ISMは、約10 Nmの最大同期トルクを有していることが分かる(厳密には、トルク値10 Nmでは極めて僅かのすべりが存在する). また、上記トルク値以上の過負荷を印加した場合にはすべりモードに移行しているが、定トルクに近く、かつすべりが大きくなるほど非同期トルクが上昇する垂下特性を有している. このことは、広いすべり領域においても回転数によらず安定したトルクが得られることを示しており、理想的である. なお、すべりが1近くまで負荷印加後、除荷した試験も行っているが、あるすべりに達した時に速やかに同期回転に復帰することを確認した(紙面の都合で、データの紹介は割愛する). 即ち、過負荷に対しても、機器の本質的特性としてロバスト性を有していることが分かった[5]. さらに、説明が専門的に過ぎるので詳細は省略するが、理論曲線は広範なすべり領域において測定値と良く一致している. 現在は、同期回転数付近の両者のずれについても検討しており、近いうちにHTS-ISMの設計に耐えられる評価法を確立できそうな状況である. 以上、理想的なトルク特性を世界で初めて実証した.

6. まとめ

以上より、HTS-ISMの同期トルクを含む優れた特性を明らかにした. 一方、このことは、HTS-ISMに無効電力を供給すれば同期発電可能であることを示唆している. 既に、HTS-ISMの同期発電特性の予備検証には成功しており、現在論文投稿中である[8]. 一方、HTSロータバーの非線形通電特性には特徴的に3倍高調波を含むことが知られているが、この非線形性はモータ特性には現れず、図11のような理想化した機器特性として具現されることも明らかにしている[8]. また、HTSロータバーの電流輸送特性の不均一性とモータ特性の関係や、現状HTSロータバーとHTSエンドリングをハンダ接続していることに伴う接触抵抗の影響なども明らかにしつつある. さらには、本稿では紹介しなかったが、HTS-ISMは、住友電気工業(株)電力・エネルギー研究所[9]ならびに(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所(ISTEC-SRL)[10]との共同研究を通じて、異なった高温超電導線材についても検討を行っている. 特に、住友電工殿との共同研究では、高出力密度化の実証に始めて成功した. 詳細は、文献[9]を参照頂きたい.

最後に、本稿第2章では、高温超伝導機といえども産業応用に供しようとする場合に既存技術と競わせる

電流未満となっており、つまり超伝導(ゼロ抵抗)状態であることを示している.

図10には、同期引き入れ時の電流、およびHTSロータバーの臨界電流平均値を、温度の関数としてプロットした図を示す. なお、臨界電流はIEC(International Electrotechnical Commission)の基準値($1 \mu\text{Vcm}^{-1}$)を採用した. 両者はほぼ一致しており、つまり同期引き入れポイントの温度依存性が臨界電流の特性として議論できることを示している.

5.2 負荷特性

次に、負荷試験を実施した. まず、HTS-ISMを無負荷状態で同期引き入れ後、直流機ならびに抵抗器を用いて負荷印加および徐荷試験を実施した.

必要があると述べた。しかし、通常は「超伝導」を使っているというだけで「冷やさなければならないね」と返ってくるのが常である。つまり、冷やすストレスは、既存技術と競わせる場合に非常に大きな障害になることは周知の事実と思われる。この課題の解決に関して、筆者は、世界的に全く新しいアイデアに基づく機器を提案しようと検討している。現状は、知的財産権の獲得のために内容を述べられないが、次の機会にご報告させて頂きたい。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果は、牟田一彌先生（京都大学名誉教授、佐賀大学名誉教授）をはじめ、森田岳氏（現（財）鉄道総合技術研究所）、三宅央倫氏（現 石川島播磨重工業（株））、小蒲義夫氏（現 関西電力（株））、長尾和昌氏（M1）、および西村敏治氏（B5）と共同で行った成果をまとめたものである。また、研究推進に際しては、「研究拠点形成費補助金」21世紀COEプログラム（課題番号：14213201）に支援を頂いた。

参 考 文 献

- [1] G Morita, T. Nakamura and I. Muta, Superconductor Science and Technology, **19**, 473 (2006)
- [2] T. Nakamura, H. Miyake, Y. Ogama, G. Morita, I. Muta and T. Hoshino, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **16-2**, 1469 (2006)
- [3] T. Nakamura, Y. Ogama and H. Miyake, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **17-2**, 1615 (2007)
- [4] T. Nakamura, Y. Ogama, H. Miyake, K. Nagao and T. Nishimura, Superconductor Science and Technology, **20**, 911 (2007)
- [5] T. Nakamura, Y. Ogama, H. Miyake, K. Nagao and T. Nishimura, to be submitted
- [6] 中村武恒, 超電導Web21(ISTEC), **3**, 7 (2007)
- [7] K. Yamafuji and T. Kiss, Physica C, **258**, 197 (1996)
- [8] T. Nakamura, Y. Ogama, K. Nagao and T. Nishimura, in review
- [9] T. Nakamura, K. Nagao, T. Nishimura, Y. Ogama, M. Kawamoto, T. Okazaki and N. Ayai, in review
- [10] K. Nagao, T. Nakamura, T. Nishimura, Y. Ogama, N. Kashima, S. Nagaya, K. Suzuki, T. Izumi and Y. Shiohara, in review



中村武恒(Taketsune NAKAMURA) 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻 准教授

略歴 平成5年九州大学工学部電子工学科卒業。平成10年同大学院システム情報科学研究科博士後期課程(電気電子システム工学専攻)修了。同年京都大学勤務。平成17年助教授,平成19年准教授。主として、高温超伝導材料の基礎特性評価と電力応用,超伝導磁束ポンプ,固体蓄冷媒,分散電源の研究に従事。電気学会,低温工学協会,応用物理学会,日本地球惑星科学連合会員。博士(工学)。