

# 高温超電導誘導／同期機の発電特性に関する基礎研究

## Fundamental Study on Generation Characteristics of a HTS Induction/Synchronous Machine

中村 武恒, 小蒲 義夫, 松村 一弘, 西村 敏治 (京大); 鹿島 直二, 長屋 重夫 (中部電力)

NAKAMURA Taketsune, OGAMA Yoshio, MATSUMURA Kazuhiro, NISHIMURA Toshiharuo (Kyoto Univ.);

KASHIMA Naoji and NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

### 1. はじめに

近年、高温超電導線材の性能向上を背景に、同線材を適用した巻線形同期機の研究開発が進められている。特に、環境問題意識の高まりの中で、10 MW を超える大容量ダイレクトドライブ風力発電用高温超電導回転機の研究開発が国内外で精力的に実施されている[1-5]。また、モータ応用においても、システムの総合効率改善の観点から、回生の利用は極めて有効と考えられ、即ち高効率発電動作の検討は重要な技術開発課題である。高温超電導回転機を開発する際のターゲットは、冷却コストを補って余りあるだけの高性能化ならびに高機能化である。このことに関しては、大容量機を指向することにより、冷却損失を含めてもスケールメリットを生かした高効率化が達成可能と考えられる。さらには、高磁界発生と無鉄心化に伴う小型軽量化や同期リアクタンス低減などが期待されている。

回転機を駆動原理に基づいて教科書的に分類すると、大きく直流機、同期機、誘導機に分けられる。近年では、永久磁石界磁の回転機も開発されており、制御法の進展に相俟って上記分類がやや不明瞭になっているが、小形機応用を中心として我々の生活に浸透しており、今後のさらなる進展が期待される応用分野である。一方、現在の汎用回転機(特にモータ)として最も広く使用されているのは誘導機(特にかご形誘導機)である。同回転機は、構造が簡単、保守が容易、大量生産向き、安価他の理由により、分数馬力モータから鉄道車両用主電動機、比較的小容量の風力発電機など多様な分野において使用されている。このことは、回転機開発の歴史の中で、誘導機の上記メリットが重要であることを明らかに示しているものである。従って、超電導回転機開発においても、特殊応用を除いてある程度の汎用性を指向するならば、このことを最大限考慮した研究開発が望まれる。

我々は、かご形誘導機を対象とし、そのメリットを最大限に尊重しつつ、高温超電導材料によってさらなるブレークスルーを達成すべく検討を進めている。これまでの理論的かつ実験的検討によって、基本的にかご形誘導機の2次側巻線を高温超電導化するだけで、

- ① すべりならびに同期回転の両立性、
- ② 同期運転に伴う高効率化、
- ③ 大きな始動ならびに加速トルク、
- ④ 高出力密度化
- ⑤ 過負荷に対するロバスト性

他の優れた特性が得られることを理論的ならびに一部実験的に明らかにしてきた[6]。これらの特性は、既存(常伝導)回転機では達成不可能であり、真に高温超電導材料の観点からのブレークスルーと考えられる。我々は、上記回転機を高温超電導誘導／同期機(High  $T_c$  Superconducting Induction/Synchronous Machine: 以下 HTS-ISM)と呼んでおり、さらなる高性能化・高機能化を達成すべく検討を進めている。また、他研究機関との共同研究を通して、応用研究を行っている。

本講演では、HTS-ISM を発電機として運転した場合の基礎特性を検討した。即ち、HTS-ISM の同期回転モードを利用すれば、エネルギーの逆変換として高効率な同期発電も可能と期待される。本報告では、上記発電の概念と基礎的実験結果を示し、今後の可能性を議論する[7]。

### 2. 高温超電導誘導／同期機の原理

Fig. 1 には、HTS-ISM のトルク( $\tau$ ) vs. すべり( $s$ )特性を模式的に示す。ここで、 $N_s$ を同期回転数、 $N$ を回転子回転数とすると、すべりは  $s=(N_s-N)/N_s$  と定義される。つまり、 $s=1, 0, -1$  は、それぞれ回転子が停止、同期回転、および同期回転数の2倍で回転していることを表している。同期機は、 $s=0$  の軸上でのみトルクが定義される。それに対し、破線は既存(常伝導)誘導機特性であり、 $s=0$  以外のすべり領域でのみトルクを有する。同図に示すように、 $0 < s < 1$  では電動機動作、 $-1 < s < 0$  では発電機動作となる。従って、発電モードで運転するためには、同期速度を超える回転数で回転させ、かつ一次側を励磁する必要がある。

一方、HTS-ISM では、同図に示すように誘導ならび同期トルクの両者を有している。また、漏れリアクタンスや一次巻線抵抗との兼ね合いにもよるが、かご形巻線の作製条件によっては図に示す定トルクに近い垂下加速特性が得られる。上記特性は、既に理論的・実験的に実証されている。従って、HTS-ISM の上記同期回転特性を利用すれば、発電動作が可能と期待される。即ち、HTS-ISM に機械的入力を与え、Fig. 1 における負の同期トルク領域を利用することによって、同期発電機として使用可能と考えられる。

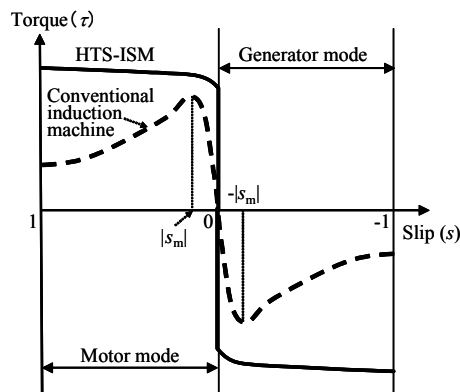


Fig. 1 Schematic illustration of the torque ( $\tau$ ) vs. slip ( $s$ ) curve of HTS-ISM. The curve of a conventional (normal) conducting machine is also shown for comparison [7].



Fig. 2 Photograph of the HTS rotor fabricated with Bi-2223/Ag tape conductors [7].

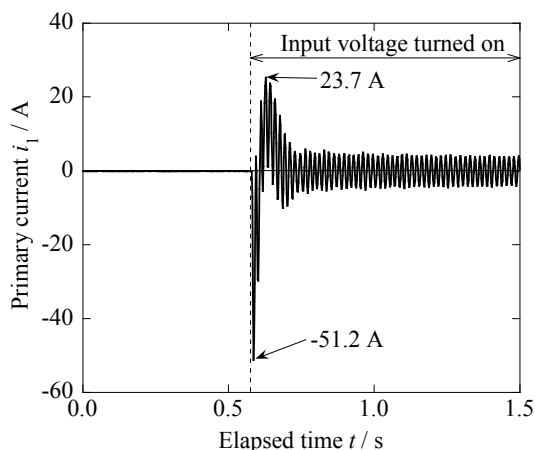


Fig. 3 Primary current waveform ( $i_1$ ) for the sudden application of the rated line voltage ( $V_1=200$  V) [7].

なお、上記議論は HTS 巻線が理想的なゼロ抵抗ループであることを前提とした議論である。しかしながら、現状ロータバーとエンドリングをハンダ接続しており、若干の接続抵抗が存在する。ただし、本回転機は、一次側から常に起磁力が供給されてかつかご形巻線中の正味の磁束が一定であれば同期回転可能であることが分かっている。

### 3. 実験方法

Fig. 2 には、試作した HTS 回転子の一例を示す。本回転機は、Bi-2223/Ag テープ材 ( $2.0\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}^2$ ) を使用しており、77 K・自己磁場における臨界電流は 25 A 程度である。上記テープ材を所望の電流容量が得られるよう複数枚束ね、ロータバーとした。また、各ロータバーには冷却と補強を兼ねて銅帯 ( $2 \times 3\text{ mm}^2$ ) を 2 本バンドルしている。HTS ロータを試作後、シャフトのベアリングオイルをアセトンで除去し、冷却に伴う凍結防止を図った。

なお、固定子には既存の銅巻線 (3 相 4 極, 200 V) を使用し、液体浸漬冷却後に各種試験を実施した。

### 4. 結果と考察

#### 4.1 定格電圧直入時の発電特性

Fig. 3 には、直流機によって HTS-ISM を同期回転させ、その後定格電圧 (200V) を直入れ ( $t = 0.580\text{ s}$ ) した場合の一次電流 ( $i_1$ ) 変化を示す。同図から明らかなように、一次電流は第一波 ( $t = 0.586\text{ s}$ ) で  $-51.2\text{ A}$  にまで達し、その後も  $t = 0.642\text{ s}$  において  $23.7\text{ A}$  となっている。これらの値は、HTS ロータバーに実際に流れている電流値に換算すると、それぞれ  $-1,367\text{ A}$ ,  $633\text{ A}$  であった。即ち、HTS ロータバーの臨界電流値が  $100\text{ A}$  程度であることを考慮すると、短時間ながら極めて大きな電流が流れていることになる。また、同様の試験を 3 回程度連続して実施したが、HTS-ISM には全く異変は見られなかった。従って、少なくとも本試験条件では、たとえ定格電圧を直入れしたとしても、HTS-ISM が健全であることが示された。

#### 4.2 高出力化の検討

Fig. 4 には、発電試験結果の一例を示す。同図において、横軸は DC モータの機械入力であり、縦軸は高出力 HTS-ISM の固定子巻線における出力電力であるが、両者はほぼ比例して増加している。この時、HTS-ISM は常に同期回転数 (1,800 rpm, すべり 0) で回転していた。つまり、本試験結果から、HTS-ISM の同期発電特性が明確に実証された。

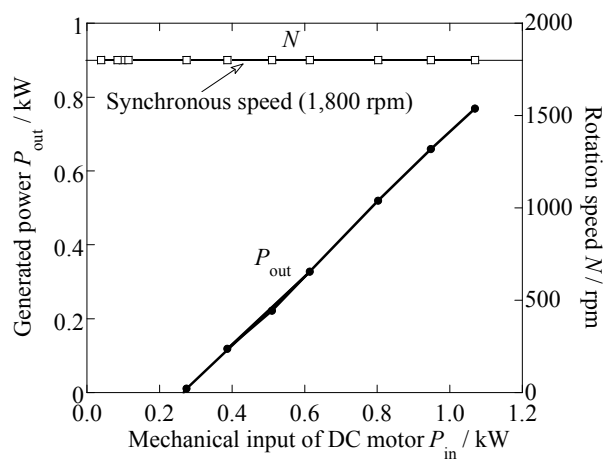


Fig. 4 Typical test result of synchronous generation characteristic of a high-output HTS-ISM at 77 K. The rotating speed is set at 1,800 rpm [7].

### 5. 結論

本研究では、京都大学のグループが開発している HTS-ISM を発電動作させた場合の基礎特性について、その原理的考え方と基礎試験結果を報告した。まず、HTS-ISM の駆動原理とメリットを説明したあと、高効率な同期発電の考え方と可能性をトルクすべり特性に基づいて議論した。また、例えば風力発電における AC リンクを想定し、HTS-ISM への不連続的励磁と突入電流の関係を実験的に検討し、少なくとも液体窒素浸漬冷却条件下では健全に動作可能であることを明らかにした。さらには、HTS-ISM の同期発電特性を実証することに成功した。

今後は、さらなる高出力化はもとより、低速回転時の特性検証、冷却法の検討、最適設計手法の確立や制御法を含めて、システムとしての成り立ちを明らかにしていきたい。

### 謝辞

本研究の一部は、カシオ科学振興財団ならびに科学研究費補助金 (No. 20560268) の援助を受けた。また、出版に際しては、電気事業連合会委託事業「パワーアカデミー研究マップ拡充・発展のための調査研究」の援助を受けた。

### 参考文献

- [1] N. Maki, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 97 (2008) 012155
- [2] H. Ohsaki, Y. Terao and M. Sekino, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 234, (2010) 032043
- [3] 福井聡, 荒川研人, 小川純, 佐藤孝雄, 塚本修巳, 鹿島直二, 長屋重夫, 第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2010) 131
- [4] C. Lewis and J. Müller, Power Engineering Society General Meeting, IEEE (2007) 1
- [5] P. J. Masson, J. Lammers and V. Prince, Applied Superconductivity Conference 2010, Washington D.C. (2010) 1LA-04
- [6] T. Nakamura, Y. Ogama, H. Miyake, K. Nagao and T. Nishimura, Supercond. Sci. Technol. **20** (2007) 911
- [7] 中村武恒, 小蒲義夫, 松村一弘, 西村敏治, 長尾和昌, 鹿島直二, 長屋重夫, 低温工学, vol. 44, no. 3 (2009) 112