高温超電導体を使用した低速用超電導モータ

杉本 英彦

High-temperature Superconductor Motor for Low-speed Applications

Hidehiko SUGIMOTO

Synopsis: The research and development of superconductor motors using high-temperature superconductors is being carried out all over the world for the purpose of miniaturizing and efficiently upgrading motors. However, the practical applications of the motors have not been covered yet. In this explanation, the elements which constitute the high-temperature superconductor motor are described; namely, a high-temperature superconductor, cooling, and a synchronous motor. Specific examples of high-temperature superconductor motors for low-speed applications are also described.

Keywords: high-temperature superconductor, cooling method, synchronous motor

1. はじめに

モータの小形軽量化・高効率化を目的として、世界中で高温超電導体を使用した超電導モータの研究開発が活発に行われている。同期モータ、単極モータ、誘導モータ等いろいろな常電導モータがあるように、高温超電導体を使用したいろいろな超電導モータが研究開発されている。論文等で公表されていても解析だけのもの、試作され公開されていてもモータとして必要な特性が開示されていないものもある。実用化もこれからという状況であるので、それが近いと考えられている高温超電導体を使用した超電導同期モータについて解説する。

常電導同期モータの巻線界磁に使用されている銅線あるいは永久磁石界磁の永久磁石を高温超電導線や高温超電導バルクに代えた高温超電導同期モータ、電機子巻線に使用されている銅線を高温超電導線に代えた高温超電導同期モータ、界磁が永久磁石、電機子巻線が高温超電導線という高温超電導同期モータ等が報告されている。同期モータで解説するが、同期ジェネレータも同様である。

超電導同期モータでは界磁磁束密度を高くできることから界磁磁極や電機子歯に高透磁率材を使用しないコアレス構造を特徴として挙げることが多いが、あえて言えば常電導同期モータでもコアレス同期モータと呼ばれるものがあり、コアレス同期モータが超電導特有ということではない。

永久磁石界磁常電導コアレス同期モータは実用に供されている。

本解説では、現時点で実用化が近いと思われる船舶推進等に用いる低速用高温超電導モータを主に取り上げることにし、高温超電導モータシステムの基本構成、高温超電導体の種類と特性、高温超電導体の冷却法、同期モータの体積決定要因、高温超電導同期モータの具体例等について述べる。

2. 高温超電導モータシステムの基本構成及び高温超電導体と常電導体の違い

高温超電導同期モータシステムは **Fig. 1** に示す以下に述べる要素で構成されている。

(1) 界磁、電機子巻線のいずれか或いは両方に高温超電導体を用いた高温超電導同期モータ（高温超電導体は真空断熱冷却容器（クライオスタット）に収納されている。）

(2) 高温超電導体を冷却するための冷凍機

(3) 界磁巻線、電機子巻線に制御された電流を流す電源

高温超電導同期モータは、常電導同期モータの界磁巻線、電機子巻線のいずれか或いは両方を常電導線（主に銅線）から高温超電導線に、または、永久磁石を高温超電導バルクに代えたものであり、同期モータとしての原理は同じである。しかし、高温超電導といっても現状では液体窒素温度の 77.3 K 以下に冷却して使用するから冷却方式が常電導同期モータのそれとは大きく異なる。また、常電導線・永久磁石と高温超電導線・高温超電導バルクの特性には大きな違いがある。超電導体はそれを貫通する磁束があると常電導線に比べれば小さいが電気抵抗が 0 Ω でなくなるだけでなく、その貫通磁束の密度が超電導体の温度で決ま

Received September 29, 2008

福井大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻
〒910-8507 福井県福井市文京 3 丁目 9 番 1 号

Electrical and Electronics Engineering Course, Graduate School
of Engineering, University of Fukui, 3-9-1, Bunkyo, Fukui
910-8507, Japan

E-mail: sugimoto@fuee.fukui-u.ac.jp

Fig. 1 Basic configuration of the HTS motor system.

っているある値以上になると超電導でなくなってしまう大きく発熱する。さらに、その貫通磁束が変化するとヒステリシスループに起因する交流損失が発生する。このような交流損失は常電導線にはない。同期モータは界磁が作る磁束と電機子電流が作用しあってトルクを発生する。電機子電流も磁束を発生する。高温超電導体を同期モータに使用するにあたっては磁束、特に、交流磁束に対する検討が重要である。直流である界磁磁束も電機子巻線に対しては交流として作用する。また、電機子電流が作る交流磁束は、電機子巻線に対してはそのまま交流磁束として作用し、界磁に対しては多相の電機子電流が作る交流磁束がベクトル合成されて電機子反作用として作用し、その内の高調波分が交流磁束として作用する。

3. 高温超電導体の種類と特性

いろいろな高温超電導体（本稿で取り上げているものは銅酸化物超電導体である。）がある。現在も研究開発、探索が行われている最中であり劇的な変化が起こるかもしれない。ここでは、現時点で商品化されていて同期モータに使えるもの及び近い将来商品化され同期モータに使えると見込まれているものを取り上げ、その特性について述べる。

(1) ビスマス系（2223 相） $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ：銀被覆法で作られる線材で、既に商品化されている。現在も日々特性向上のための研究開発が続けられている。

(2) イットリウム系（123 相） $\text{RE}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ （RE は Y, Ho, Gd）：線材は金属基板上に薄膜を形成させて作るのが一般的である。商品化されたといえる線材もあるが、一般的には現在も製造法を含めた研究開発が続けられている段階であるといえよう。ビスマス系に比べて液体窒素温度での臨界電流が大きく交流損失が小さいのが特徴で、早い商品化が待たれている。バルクもあり、それは熔融法で作られている。RE としてガドリニウム（Gd）を用いるものが商品化されている。バルクを加工して渦巻コイルにしたものもある。

(3) 磁束流状態にある高温超電導体に電流を流すと電圧

Fig. 2 Current voltage characteristics of a bismuth-based wire.

Fig. 3 Temperature, magnetic flux density and critical current characteristics of a bismuth-based wire.

降下が生じ通電損失が発生する。Fig. 2 は臨界電流 I_c が液体窒素温度で 64.3 A であるビスマス系線材 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ （以下単にビスマス系線材という。）の電流 - 電圧特性の例である。1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧降下のときの電流を電圧基準による臨界電流 I_c と呼んでいる。高温超電導線材に外部から磁束を貫通させると電圧降下がさらに大きくなる。

(4) 高温超電導体は低温にするほど臨界電流 I_c を大きくできる。Fig. 3 はビスマス系線材の各温度における貫通磁束密度 - 臨界電流特性の例である。貫通磁束密度が高温超

電導線に対して垂直な場合の臨界電流は、平行な場合のそれに対してかなり小さくなる。これは高温超電導体の結晶の異方性により貫通磁束のピンニング力に差が生じるからであって、ピンニング力が弱いと常電導体部分を通る電流が増加して臨界電流が小さくなる。ビスマス系に比べてイットリウム系は異方性の程度が小さくピンニング力も強い。Fig. 3 からわかるようにビスマス系線材を液体窒素温度で使用するには、線材を貫通する垂直磁束密度を低く抑える技術を採用する必要がある。使用中に実際に流すことができる電流の最大値は臨界電流 I_c の 75% 程度といわれている。サーボモータ等に用いる常電導線においては短時間ではあるが連続定格電流の 500% 程度を流す使い方がある。このような使い方は高温超電導線には適していない。

(5) 高温超電導体はそれを貫通している磁束が変化すると、主な損失がヒステリシス損である交流損失が発生する。ヒステリシス損は周波数に比例する。そして、貫通している磁束密度の最高値の影響を受ける。ヒステリシスループの形が貫通している磁束密度の最高値によって変わるからである。最高磁束密度の増加に対する交流損失の増加の程度は最高磁束密度が低いところでは急で、高いところでは緩やかであり、線形増加になる。Fig. 4 はビスマス系線材の貫通磁束密度 - 交流損失特性の例である。これも貫通磁束が垂直か平行かで変わり、貫通磁束密度が高温超電導線に対して垂直な場合の交流損失は、平行な場合のそれに対してかなり大きい。線材を貫通する垂直磁束密度を低く抑える技術を採用する必要がある。2 章で述べたように高温超電導体を界磁として用いるときも電機子反作用磁束の高調波分が界磁に用いた高温超電導体（線材、バルクの区別はない。）に作用するのでそれを抑える技術を採用する必要がある。

(6) 上記 (4), (5) 項に述べたように磁束ピンニングに関係して 2 つの損失が発生する。高温超電導体を使用する際の重要事項であるのでまとめておく。

- ①一つは電気抵抗損である。高温超電導体を貫通する磁束は量子化されてピンニングされているが、その部分は常電導体である。高温超電導体の温度が上がると熱活性化運動によって磁束ピンニングされている量子化磁束が動き、常電導体部分を通れる電流が存在するようになり、電気抵抗損が発生する。同じ温度では外部磁界が強いほど電気抵抗が大きくなり、電気抵抗損も大きくなる。
- ②他の一つは交流損失である。磁束ピンニングはピンニングされている量子化磁束が外部磁界の変化を妨げるように働く。従って、高温超電導体の磁化過程が不可逆になり、高温超電導体に交流磁界が加わると磁化曲線がヒステリシス特性を示し交流損失が発生する。

Fig. 4 Magnetic flux density and AC loss characteristics of the bismuth-based wire.

(7) 交流損失を抑えるためにビスマス系線材を用いたツイスト線も商品化されている。

(8) バルクは永久磁石界磁の代わりに使うことができる。

Fig. 5 にその外観写真と磁束密度分布例を示す。同期モータの界磁磁極の磁束は 4 章で述べるように、界磁と電機子巻線の間に相対的回転角速度があるとき、電機子巻線に交流起電力を誘導するが、同期モータを小形軽量化・高効率化するためにはその基本波の振幅を大きくできることが重要である。交流誘導起電力波形は電機子巻線の巻き方の影響を受けるので単純ではないが、一般的に誘導起電力の振幅は界磁が作る平均磁束密度に比例する。バルクの磁束密度分布は円錐状であり、平均磁束密度は最高磁束密度の三

Fig. 5 HTS bulk.

分の一程度になる。また、バルクは普通円形であるが、円形は空間を占める割合が四角の 71%で高くなく、平均磁束密度を大きくするという観点では望ましい形状とはいえない。このように最高磁束密度が高いことがそのまま誘導起電力の振幅を大きくすることにならないこと、さらには、前述したように電機子反作用磁束の中にはバルクに変動磁束として作用して交流損失を発生させるものがあることを把握したうえで使用しなければならない。バルクは着磁することでバルク内に循環電流を流して永久磁石として用いる。着磁方法に以下の 2 つがある。

①**静磁場着磁法**：温度が臨界温度以上であり超電導状態になっていないバルクに外部から磁束を貫通させた状態でバルクの温度を臨界温度以下に下げて磁束を捕捉（着磁）させる方法。温度を低くする程高い密度の磁束が得られる。同期モータの永久磁石界磁の代わり用いるバルクの着磁法として用いることは容易ではない。

②**パルス着磁法**：超電導状態になる臨界温度以下に温度を下げたバルクにマイスナー効果が破れる以上の磁場をパルスのかけて着磁する方法。パルスの変化する貫通磁束で着磁するので交流損失が発生する等の理由で、静磁場着磁法の半分程度の密度の磁束しか着磁できない。同期モータの常電導電機子巻線に大きなパルス電流を流して着磁する方法等が文献¹⁾他多数の関連文献に報告されている。

(9) バルクを薄くスライスしたうえでサンドブラストして香取線香のような渦巻状にした後、それをいくつか積み重ねるとともに直列接続したコイルも作られている。高温超電導体そのもので作られているので、高い電流密度の大電流を流すことができる。大きな直径のバルクを作製することは容易でない。従って、大きな径のコイルを作成することは難しい。φ 160 mm のバルクは作製されたことがある。

(10) ビスマス系線材は銅酸化物であるので引張りや曲げに対して強いとはいえない。巻線を巻くとき注意が必要で、許容曲げ直径（例えば 70 mm）でも臨界電流が 95%に低下する。高強度タイプのステンレススチールをラミネートしたもので臨界電流が 95%に低下する許容曲げ直径は 50 mm である。従って、コイル形状は、パンケーキ形、レーストラック形等単純なものが多く、それらを FRP 製の巻き枠に巻いて作製する。常電導同期モータの電機子巻線に採用されているような複雑な形状のコイルの作製は困難である。

(11) 現有のビスマス系線材のサイズは限られている。従って、流すことができる電流値も線の温度や線を貫通する磁束密度で異なるものの限られている。界磁巻線はアンペアターン数を確保すればよいので巻数調整で対応できるが、電機子巻線は同期モータの出力容量と電機子電圧でターン数と流す電流値が決まるので、それに用いる高温超電導線は並列接続が避けられない場合がある。並列接続した各電

機子巻線の電流分配や交流損失が適当になるようにしなければならないが、超電導線であるが故に電気抵抗による並列接続した電機子巻線に流れる電流の均等化作用はない。えに、(10) 項で述べたように高温超電導線の許容曲げ直径は大きく、ひねり等の加工も容易でない。常電導線を用いた大容量同期モータの電機子巻線に採用されているレーベル転位を施すこと等は困難である。電機子巻線は空間的に広く配置されているうえにそれを含む磁路中にギャップがあるので、並列接続される各高温超電導電機子巻線の誘導起電力が同じではないし、それを貫通する磁束の密度も異なる。従って、電機子巻線に高温超電導線を用いるためには工夫が必要で、電流分配機能を備えた電源を用いることや上記 (5) 項で述べた貫通磁束を抑える技術が必要である。

(12) 高温超電導線の絶縁としてビスマス系線材ではポリイドフィルム（カプトンはデュボン社の登録商標名）で絶縁されているものも商品化されている。コイルにしたときの FRP 製の巻き枠も絶縁の役目を果たしている。電機子巻線は 6000 V 以上の高電圧で使うことがある。この場合、常電導同期モータでは接地されている鉄心との間でコロナ放電が起きないように絶縁処理を強化する必要があるが、高温超電導線の場合、電機子巻線が FRP 製の真空断熱冷却容器内に配置され、鉄心との間隔は十分広いのでその問題は少ないと考えられる。

(13) クライオスタット内に配線から熱が侵入するために用いる電流リード用に銀被覆に熱伝導度が低い金を混ぜたビスマス系線材が商品化されている。高温超電導バルクの熱伝導度が低いことを利用した電流リードもある。

4. 高温超電導体の冷却法

高温超電導体は、高温といっても液体窒素温度の 77.3 K 以下の温度に冷却して使用する。従って、冷却が必要である。このことに関して以下に述べる。

(1) 高温超電導体は、冷却温度を保持するために真空度が $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr 程度の真空断熱冷却容器（クライオスタット）内に収納して使用する。

(2) クライオスタットは、それが高温超電導同期モータの界磁や電機子が発生する磁束の変化に曝される場合は、渦電流損が発生しない絶縁体で機械的強度がある FRP 等で作製する。磁束の変化に曝されない場合は、液体窒素温度以下の低温で機械的強度を保つことができるステンレス等を用いる。

(3) 高温超電導体を冷却する方法には以下に述べる方法がある。

①**冷媒浸漬冷却法**：高温超電導体を冷媒に浸漬させて冷却する方法

②**強制冷却法**：高温超電導体を入れた容器に気化させた冷媒（例えばヘリウムガス）を循環させて強制冷却す

る方法

③伝導冷却法：冷媒で冷却された熱伝導体と高温超電導体を接触させて冷却する方法

④冷凍機冷却法：冷凍機の冷却ステージと高温超電導体を熱的に結んで冷凍機のみで冷却する方法

(4) 高温超電導体を液体窒素温度に冷却する場合は冷媒浸漬冷却法を用いる。伝導冷却法や冷凍機冷却法を用いるときは、高温超電導体を接触させる金属製の冷却部に高温超電導同期モータの界磁や電機子が発生する磁束の変化によってその冷却部に渦電流損が発生しないよう注意を払う必要がある。

(5) 同期モータであるから界磁、電機子のいずれかが回転する。界磁電流は電機子電流に比べて小さい。ブラシとスリップリングを小形化するという観点から界磁を回転側にすることが多い。界磁に用いる高温超電導体を回転させるとクライオスタットも回転させる必要がある。冷媒を冷やす冷却機は固定されているから、回転部と固定部の間を冷媒が行き来する。回転部における冷媒の通路は回転軸を中空にして作る。回転部と固定部の接触部分から冷媒が漏れないようにするために磁性流体等を用いてシールする必要がある、ロータリージョイントも開発されている。

(6) 冷却には直接関係ないが(5)項に関連して説明を加える。界磁電流の給電を常電導同期モータでも採用されているインバータ給電常電導回転変圧器と整流器を組み合わせを行いブラシレス化するものも文献²⁾他多数の関連文献に報告されている。

(7) 冷媒を冷却するには冷凍機が必要である。冷凍機は圧縮機、膨張機、熱交換器の三要素で構成されている。冷凍機は冷凍能力／消費電力が大きいことが望ましい。種々の冷凍サイクルがあるが、高温超電導同期モータシステムに用いられている冷凍機はギフォード・マクマホンサイクルが多い。スターリングサイクルも採用されている。

(8) 冷凍機で消費する電力は1 W 相当の冷凍能力を得るのに、現状では、液体窒素温度程度(77~65 K)の温度で15~20 W 程度であり、液体ネオン温度程度(約30 K)の温度で75~100 W 程度である。このように冷凍機は大きな電力を消費するので、発熱や侵入熱の低減は重要である。実使用状態で高温超電導体を液体ヘリウム温度まで冷却することは行われていないようである。

5. 同期モータの体積決定要因

高温超電導体は同期モータの小形軽量化・高効率化を実現するために用いるので同期モータの体積がどのように決まるか概観する。ラジアル及びアキシシャルギャップ形同期モータの基本構成例をFig. 6, Fig. 7に示す。

まず最も重要なトルクと体積の関係について述べる。

同期モータのある瞬間の出力は、常電導及び高温超電導同期モータの区別なく、また、ラジアル及びアキシシャルギ

Fig. 6 Basic configuration of a radial gap-type synchronous motor.

Fig. 7 Basic configuration of an axial gap-type synchronous motor.

ャップ形同期モータの区別なく、その瞬時に各相電機子巻線に誘導される誘導起電力と各相電機子巻線に流れている電流の積を相数分加算したものとして表される。そして、定常状態における出力は交流の一周期の平均として求められる。各相誘導起電力波形は高調波成分を含むが、その場合でも電機子巻線にそれと同一波形の電流を流せば定常状態の出力発生に寄与する。しかし、各相誘導起電力波形と各相電機子電流波形を同一にするということは容易なことではないので、誘導起電力波形をできるだけ正弦波に近づけるようにするとともに、電機子巻線に誘導起電力と同相の正弦波電流を流すことが行われている。このとき同期モータの出力 P は以下の式で表される。

$$P = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{2} \times 2p\Phi_1 \right) \times \left(\frac{1}{2} \times 2NmI \right) \times k_w \times \frac{2\pi}{60} \quad (1)$$

ここで、 $2p\Phi_1$ は磁気装荷といい、 $2p$ は界磁の極数、 Φ_1 は1極当たりの界磁が作り電機子巻線に誘導起電力を誘導する磁束の基本波の最大値である。 Φ_1 は界磁巻線や永久磁石で作る。 S_g を Φ_1 が通るギャップの $2p$ 極分の面積、 B_{m1} を Φ_1 の密度の最高値とすると、 $2p\Phi_1 = 2B_{m1}S_g/\pi$ である。一方、 $2NmI$ は電気装荷といい、アンペア導体数の総量を表している。 N は各相電機子巻線の直列巻数($2N$ はその直列導体数)、 m は電機子巻線の相数、 I は各相電機子電流の実効値である。 m は普通3である。 k_w は巻線係数で、電機子巻線に誘導される誘導起電力波形を正弦波に近づけるために行う分布巻の分布係数と短節巻の短節係数の積であり、集中巻・全節巻の電機子巻線に誘導される誘導起電力の基本波に対する分布巻・短節巻の電機子巻線に

誘導されるその割合に等しい。 k_w は0.9程度である。 n は毎分回転数である。なお、各相電機子巻線に誘導される誘導起電力の実効値 E は

$$E = \frac{p\Phi_1 N k_w}{\sqrt{2}} \times \frac{2\pi}{60} \quad (2)$$

である。また、同期モータのトルク T_e は次式で表される。

$$T_e = \frac{p\Phi_1 N m k_w}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

前出の磁気装荷 $2p\Phi_1 = 2B_{m1}S_g/\pi$ 中の S_g は、ラジアルギャップ形同期モータでは Φ_1 の磁束が通るギャップの直径を D_g 、軸向長さを L とすると $S_g = \pi D_g L$ である。また、アキシアルギャップ形同期モータでは Φ_1 の磁束が通るギャップの外側の直径を D_{go} 、内側の直径を D_{gi} 、ギャップ箇所を軸方向の両面とし2とすると $S_g = 2\pi(D_{go}^2 - D_{gi}^2)/4$ である。なお、ラジアル或いはアキシアルギャップ形コアレス同期モータでも Φ_1 を電機子巻線に誘導起電力を誘導する1極当りの磁束という観点で上記と同様に求めることができる。

一方、前出の電気装荷 $2NmI$ は、ラジアルギャップ形同期モータでは $k_{er}\pi(D_g + d)d\sigma$ と表すことができる。ここで、 σ は電機子巻線導体の電流密度（実効値）、 $k_{er}\pi(D_g + d)d$ は電機子巻線の断面積で、回転軸方向と直角な面におけるギャップ直径 D_g と電機子巻線を配置する径方向外径 $D_g + 2d$ で囲まれた面積と、その中で電機子巻線導体の占める割合、即ち、占積率 k_{er} （コア付き及びコアレス同期モータの両方を表現できる）の積となっている。なお、一般的に d は D_g が大きくなるに伴いある程度大きくできる。しかし、 D_g から離れたところでは電機子巻線に誘導起電力を誘導させる Φ_1 が減少するので、 d を D_g に比例して大きくすることはしない。特にコアレスでは電機子巻線配置空間に高透磁率材の電機子歯がないので大きくする程度が小さくなる。また、アキシアルギャップ形同期モータでは電気装荷 $2NmI$ は $k_{ea}\pi D_{gc}l\sigma$ と表すことができる。ここで、 σ は電機子巻線導体の電流密度（実効値）で、 $k_{ea}\pi D_{gc}l$ は電機子巻線の断面積で、電機子巻線を配置する回転軸方向の長さ l と円筒の周長 πD_{gc} で形成された面積と、その中で電機子巻線導体が占める割合、即ち、占積率 k_{ea} （コア付き及びコアレス同期モータの両方を表現できる）の積となっている。 D_{gc} は Φ_1 の磁束が通るギャップの外側の直径 D_{go} と内側の直径 D_{gi} の間の面積を等分する、即ち、 D_{go} と D_{gc} が作る面積と D_{gc} と D_{gi} が作る面積が等しくなる直径で、トルクが作用する直径であるとみなして導入したものである。なお、一般的に l は D_{gc} が大きくなるに伴いある程度大きくできる。しかし、ギャップ面から離れたところでは電機子巻線に誘導起電力を誘導させる Φ_1 が減少するので l を D_{gc} に比例して大きくすることはしない。特にコアレスでは電機子巻線配置空間に高透磁率材の電機子歯がないので大きくする程度が小さくなる。

上で述べたことをまとめると、同期モータの出力やトルクに関係する体積は、磁気装荷 $2p\Phi_1$ 、電気装荷 $2NmI$ により決まり、それらはラジアルギャップ形では(4)式、アキシアルギャップ形では(5)式で表される。

$$2p\Phi_1 = 2B_{m1}S_g/\pi = 2B_{m1}D_gL, \quad 2NmI = k_{er}\pi(D_g + d)d\sigma \quad (4)$$

$$2p\Phi_1 = 2B_{m1}S_g/\pi = B_{m1}(D_{go}^2 - D_{gi}^2), \quad 2NmI = k_{ea}\pi D_{gc}l\sigma \quad (5)$$

上記したことからわかるように、同期モータは、ラジアル、アキシアルギャップ形の区別なしに、或いはコア付き、コアレスの区別なしに、トルク発生に寄与するギャップ径と回転軸方向長さが同じであれば、 B_{m1} が高く、 σ が大きい方が、大きい出力或いは高いトルクを発生することができる。コアレス高温超電導同期モータでは電機子巻線が常電導線であるので B_{m1} を高くすることに注力されている。

同期モータの全体積は上に述べたことだけで決まるわけではなく、小形軽量化を阻害する次に述べる事項も考慮する必要がある。

(1) 界磁磁束が電機子巻線に作用しやすくするため及び同期モータの外に出ていく界磁磁束や電機子磁束をシールドするためには、界磁磁極や電機子歯に高透磁率材を使用しないコアレス構造においても界磁磁束が通り電機子磁束がモータ外部に漏れないようにするための高透磁率材、即ち、ヨークが必要である（電機子鉄心は電機子側ヨークと電機子歯を合わせたものである）。前出の B_{m1} を高くするとこのヨークの厚みが厚くなる。

(2) アキシアルギャップ形同期モータでは回転軸方向にある界磁がある。界磁が軸方向両側にあるときは界磁側にヨークが必要である。ただし、この場合(1)項で述べたヨークは必要ない。ラジアルギャップ形回転界磁同期モータでは界磁は電機子の内側にある。

(3) 電機子巻線にはコイルエンドと呼ばれるトルク発生に寄与しない部分が不可欠である。ラジアルギャップ形同期モータでは極ピッチが広いと電機子巻線のコイルエンドの長さが長くなる。アキシアルギャップ形同期モータのコイルエンドの長さは短い。

(4) 高温超電導体を収納する真空断熱冷却容器の大きさや上記の高透磁率材で発生する鉄損や電機子巻線に常電導線を用いると発生する銅損による温度上昇を抑えるための冷却に必要な体積も考慮する必要がある。

以上のことから同期モータの体積を決める主な要因は前出の磁気装荷、電気装荷で決まる空間であるが、ヨーク、コイルエンド等が占める空間も小さくない。

6. 高温超電導同期モータの具体例

高温超電導モータの報告例は多いが、アイデア段階のも

のや部分的評価だけのものも多いこと、実用化された高温超電導モータがないこと、また、先行した低温超電導回転機の開発も実用化に至ったものがなかったことを考慮して、実用化可能性が高いと思われる高温超電導同期モータの例を紹介することにする。いずれのモータも2章～5章で述べたことが基礎になっている。

(1) AMSC 社が開発した出力 5 MW、毎分回転数 230 rpm、6 極の船舶推進用高温超電導同期モータ

文献²⁾ 他多数の関連文献で紹介された最もよく知られた高温超電導同期モータといえる。開発された多くの高温超電導同期モータの構造はこれと概略同じである。

- ① Fig. 8 にその構造を示す。
- ② ラジアルギャップ形、ブラシレス励磁回転界磁形高温超電導同期モータである。
- ③ 界磁巻線はレーストラック状でステンレススチールがラミネートされたビスマス系線材 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ を用いて作製されている。
- ④ 電機子巻線は銅線である。
- ⑤ コアレスである。
- ⑥ 冷媒は液体ネオンで、界磁巻線が取り付けられている回転軸中也設けられた穴に配管を通して循環させている。
- ⑦ 上記の配管は冷却板を冷却する。冷却板に界磁巻線が取り付けられている。
- ⑧ 冷媒は固定部と回転部を行き来するので、その接合部は冷媒が漏れないようなシール構造になっている。
- ⑨ 電機子巻線が作り界磁巻線に作用しようとする磁束の中に交流分があるので、それを抑えるために電機子巻線と界磁巻線の中間の回転側に EM シールドを設けている。これによって界磁巻線の交流損失の発生を抑えている。
- ⑩ 界磁電流は回転変圧器、整流器、電流リードを通してブラシレスで界磁巻線に給電されている。
- ⑪ 界磁巻線は電機子巻線内側表面に常電導同期モータに

Fig. 8 Structure of a HTS synchronous motor made by AMSC.

比べて高い磁束密度を発生している。従って、界磁鉄心や電機子歯がないコアレスになっている。界磁側のヨークはない。電機子歯がないコアレスなので銅線の電機子巻線空間を広く取れるが、電機子巻線外側のヨークまで界磁磁束を通すことが容易ではなく、電機子巻線の径方向厚みをコア付きに比べて広くすることは難しい。ヨークは磁気飽和しない範囲で用いる。

⑫ 同じトルク、即ち、同じ磁気装荷×電気装荷を得るのに電機子巻線外側の体積 $\pi(D_g + d)^2 L/4$ は常電導同期モータの三分の一程度である。電機子巻線外側のヨークの径方向厚みやコイルエンドは小さくできないから同期モータの電気磁気部分全体の体積は常電導同期モータの二分の一程度と考えられる。

⑬ 常電導同期モータでは風冷、油冷などの冷却装置もモータに取り付けられていることが多く体積の中に含まれているが、高温超電導同期モータの冷凍機等は分離して置かれていることが多い。

⑭ AMSC 社は出力 36.5 MW、毎分回転数 120 rpm の船舶推進用同期モータも製作した。これは冷媒としてヘリウムガスを用いているとのことである。

(2) IHI 社等のグループが開発した出力 365 kW、毎分回転数 250 rpm、8 極の船舶推進用高温超電導同期モータ³⁾

電機子巻線が液体窒素冷却ビスマス系線材 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ であることを特徴とする同期モータである。

- ① Fig. 9 にその構造を示す。
- ② アキシアルギャップ形永久磁石回転界磁形高温超電導モータである。
- ③ 電機子巻線に高温超電導線を用いることで小形軽量化、高効率化を図ったモータである。
- ④ 電機子巻線は液体窒素温度で使用する所以その臨界電流が小さいこと及び電機子巻線には界磁磁束が交流磁束として作用するとともに電機子巻線自身に流れる電流が作る磁束も交流磁束として作用するから、高温超電導線を貫通する磁束の密度を抑えることが重要で、電機子鉄心付きになっている。

Fig. 9 Structure of a HTS synchronous motor made by IHI, et al. (permanent magnet field).

⑤FRP 製クライオスタット内に収納された電機子巻線とクライオスタット外にある電機子鉄心の距離は真空断熱層もあることから近くない。従って、上記の電機子鉄心だけでは高温超電導線を貫通する磁束の密度を十分低く抑えることが難しい。そこで、電機子巻線を構成するパンケーキ状コイル間に鉄損が小さい高透磁率材を配置している。これによって銅線の 10 倍程度の電流を小さな交流損失で流せるようにしている。クライオスタットを含めてもその空間は常電導電機子巻線空間に比べて二分の一程度である。

⑥アキシアルギャップ形モータの電機子巻線は鉄心に直接的に巻くのでコイルエンドにより体積が大きくなることは少ない。

⑦永久磁石界磁アキシアルギャップ形モータでは永久磁石形状、界磁磁極数と電機子鉄心数を適当に選ぶことにより磁気装荷を大きくできる。ここで述べているモータの場合、永久磁石の形状を扇形、界磁磁極数を 8、電機子鉄心数を 6 に選ぶことにより永久磁石配置空間を有効に利用し、磁気装荷を大きくしている。

⑧クライオスタットが固定されているので、冷凍機とクライスタットの間を行き来する冷媒の通路を簡単にできる。

⑨高温超電導モータを構成するために回転軸の中を利用していないので、船舶推進を高効率に行うための 2 重反転プロペラを実現するために利用できる。

⑩ラジアルギャップ形の常電導同期モータの二分の一程度の体積で実現できている。

(3) トルク・トルク／体積の比較

Fig. 10 は上記 (1), (2) で述べた高温超電導同期モータ等のトルク・トルク／体積の関係を示したもので、ほぼ単純な曲線の上にある。モータ外部にある冷凍機等は含んでいない。図に載せていない高温超電導モータも多く報告されているが、代表的なものに限定した。AMSC 社の出力 36.5 MW、毎分回転数 120 rpm の高温超電導同期モータは参考値である。トルクが大きくなるに伴いトルク／体積が大きくなっているが、このことは常電導同期モータでも同じような傾向にあり、5 章で述べたことからわかる。高温超電導線の冷却温度は IHI 社等のグループが開発したものは液体窒素温度、他は液体ネオンやヘリウムガスを冷媒に使い 30 K 程度である。

7. おわりに

少しばかり高温超電導モータの研究開発にかかわったことでこのような解説を書くことを依頼された。高温超電導モータの研究開発は活発に行われているけれども実用化例

Fig. 10 Comparison of the torque densities of HTS synchronous motors.

はなく、解析だけのもの、部分的な試験だけのものも多くみられた。従って、高温超電導同期モータの具体例は思い切って絞り込んだが、浅学なものが書いた解説であり、おおめに見ていただければ幸いである。また、少しでもお役に立てるところがあれば幸いである。

本解説を書くに当たって高温超電導モータの研究開発を共同で行っている株式会社 IHI の方々にお世話になった。また、高温超電導線材のことについて住友電気工業株式会社の方々から情報をご提供いただいた。ここでお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) H. Matsuzaki, Y. Kimura, E. Morita, H. Ogata, T. Ida, M. Izumi, H. Sugimoto, M. Miki and M. Kitano: "HTS bulk pole-field magnets motor with a multiple rotor cooled by liquid nitrogen", IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 1553-1556
- 2) G. Snitchler, B. Gamble and S. Kalsi: "The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor", IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 2206-2209
- 3) H. Sugimoto, T. Morishita, T. Tsuda, T. Takeda, H. Togawa, T. Oota, K. Ohmatsu and S. Yoshida: "Development and test of an axial flux type PM synchronous motor with liquid nitrogen cooled HTS armature windings", J. Phys.: Conf. Ser. **97** (2008) 012203

杉 本 英 彦

工学博士。

昭和 18 年 6 月 2 日生。昭和 48 年名古屋工業大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。現在、福井大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻教授。パワーエレクトロニクス、電動機制御、高温超電導応用機器等の研究開発に従事。平成元年電気学会論文賞、平成 18 年日本産業技術大賞受賞。電気学会、計測自動制御学会、パワーエレクトロニクス学会各会員。