

大出力モータで電車を走らせる

近藤 稔

車両制御技術研究部(動力システム 副主任研究員)



こんどう みのる

はじめに

電車は架線から電気もらい、その電気でモータを回し、そのモータで車輪を回して走っています。電車にはたくさんの車輪がありますが、その全てがモータで回されているわけではありません。例えば、10両編成の通勤電車だと、その半分の5両くらいの車両がモータで車輪を回して走る車であることが多く、残りの車両はそれらに引っ張られたり押されたりして走っています。

普通、1両の車両には4本の車軸があり、モータで走る車ではそれぞれの車軸にモータがありますので、上記の編成では5両×4軸=20個のモータで電車を走らせることになります。これを、例えば、4両の車両がモータで走り、6両が引っ張られるようにすることも可能で、その場合に

は4両×4軸=16個のモータで電車を走らせることとなります。このようにモータの数を減らせば、モータの購入コストや保守コストを安くできるというメリットがあります。しかし、そのためにはモータ1個が出す力を1.25倍(=20個/16個)にしなければなりません。つまり、モータを大出力化する必要があります。

電車のモータは車輪と車輪の間の狭い空間に配置されるため、寸法には厳しい制約があり、その寸法に収まる小さなモータで大きな力を出すためには様々な工夫が必要です。以下では主に在来線電車を想定し、電車用モータの大出力化のための技術を紹介します。

電車用モータの寸法制約

通常の電車では、1つの車体が2つの台車の上に乗っていて、1つの台車には車軸が2本あり、モータ付の台車であればそれぞれの車軸がモータで回されます。台車内でのモータの配置は図1に示すようになっており、モータは台車枠内の狭いスペースに配置されるため、長さや径に厳しい寸法制約が課せられます。

まず、長さについては、2つの車輪の間に、モータ、歯車装置、継ぎ手が並ぶため、モータに与えられる長さ方向のスペースは大きくありません。日本の在来線の多くではレールの間隔が1m程度のため、車輪間の距離も1m程度ですが、歯車装置や継ぎ手にもスペースが必要であるため、モータが使えるスペースは60cm程度です。

次に、径については、歯車装置により決まるモータ軸と車軸の間隔と車軸の径からモータの径に与えられるスペースが決まり、モータの直径に対する制約は50~60cm程度となることが多いです。

結果として、電車用モータは大きいものでも高さ60cm、直径60cm程度の大きさとなり、電車の大きさに比べるとかなり小さいものとなります。この小さなモータで電車を走らせることができる大きな出力を出す必要があるため、

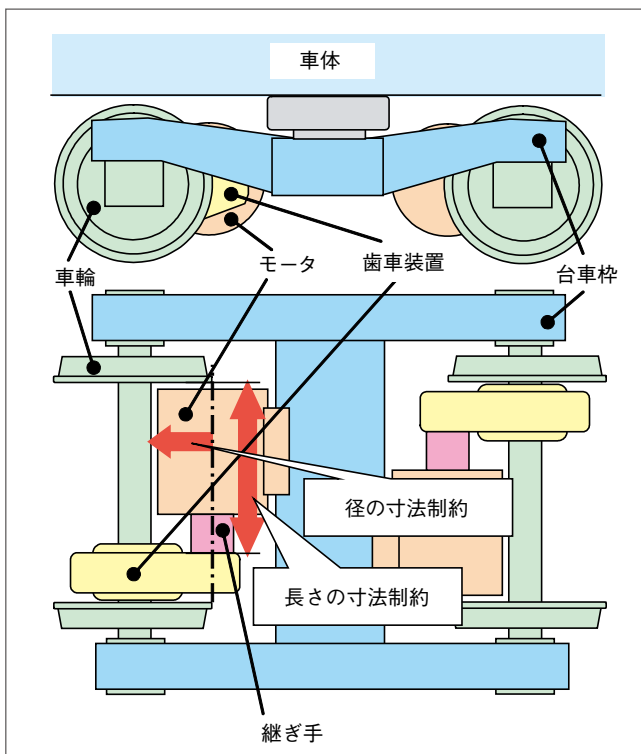


図1 モータに対する寸法制約

電車用モータでは、小形大出力化を実現する様々な技術が用いられています。

モータの大きさを変わらずに鉄心を大きくする

まず、寸法制約を満たしながらモータの中の力を出す部分である鉄心を大きくする方法があります。

通常のモータでは、図2の左上に示すように、鉄製のフレームにモータの鉄心をはめ込んだ構造となっています。これを、鉄心自体がモータのフレームの役割の一部を果たすようにして、フレームを省略した構造が図2右上のフレームレス構造です。この構造は軽量化が重要な新幹線用モータでよく用いられています。この構造を用いることで、径の寸法制約を満たしつつ、フレームの厚み分だけ鉄心の径を大きくすることができます。

さらに、モータの片端には、モータを制御するためにモータの回転を検出するためのセンサが取り付けられています。しかし、制御装置が賢くなれば、モータの電流や電圧からモータの回転状態を推定することができるため、最近ではこのセンサが無くてもモータを制御できるようになっています。そのような賢い制御装置を前提としてセンサを省略すれば、センサの厚み分だけ鉄心の長さを大きくすることができます。

このようにして、モータの外側の寸法は変わらずに、モータの力を出す部分の寸法を大きくすることができます。

モータ内の磁極の数を増やす

次に紹介するのはモータ内の磁極の数を増やす方法です。モータの中には複数の磁極があり、それらの磁極はモータの回転とともに回転します。磁極はN極とS極のセットなので、磁極の数は偶数になります。通常の電車用モータでは磁極の数は4極ですが、最近は6極の電車用モータも使われています。図3ではモータの鉄心をモータの軸に垂直な断面で切った図を示して、4極と6極の形の違いを比較

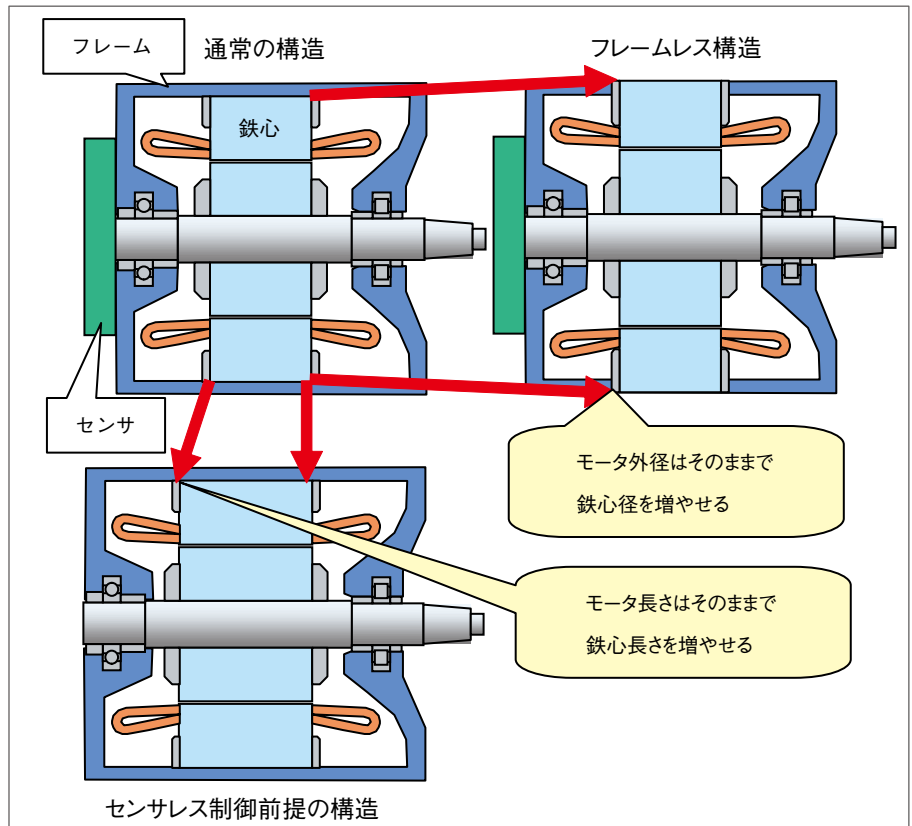


図2 鉄心を大きくできるモータ構造

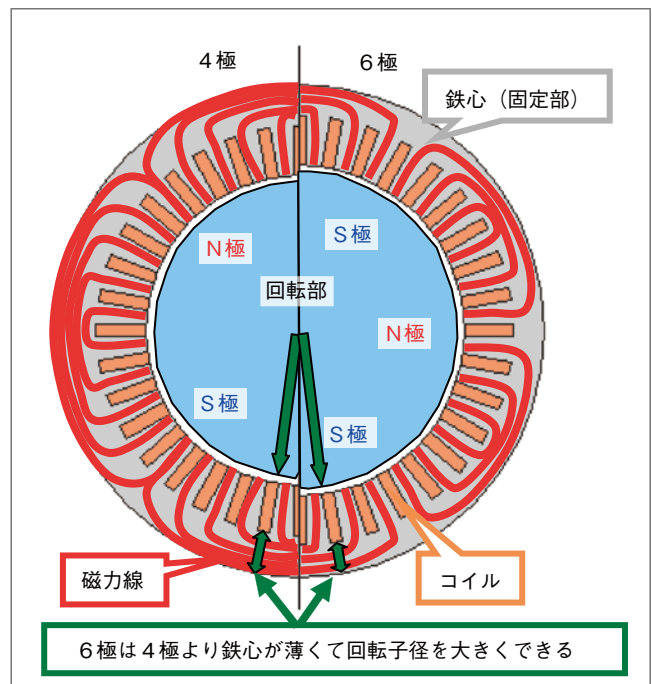


図3 異なる磁極数のモータ断面の比較

しています。モータの中ではN極からS極へと鉄心を経由して磁力線が通っていますが、磁力線の密度が同じであれば、磁極の数が多いと一つの磁極あたりの磁力線の数が小さくなり、鉄心を通る磁力線の数が小さくなります。そのため、鉄心を薄くすることができ、その分回転部を大きくすることができます。回転部表面での力の密度が同じであれば、回転部が大きいほど出力が大きくなりますので、磁極の数を大きくすると出力を大きくすることができるわけです。

なお、磁極の数を増やすと、回転にともなって電流を流す向きを変えるスピードが速くなるため、モータの制御装置は忙しくなります。よって、磁極の数を増やすためには制御装置が速く動作できるようになる必要があります。また、磁極の数はモータの特性に様々な影響を与えるため、ただ多くすれば良いというものではなく、様々な特性について考慮して決める必要があります。

モータが熱くなりすぎないようにする

以上は、モータの外側の寸法を変えずに、モータの力を出す部分の大きさをなるべく大きくする方法です。では、次は、大きさを変える以外の方法で出力を大きくする、すなわち力の密度を大きくする方法について紹介します。

モータは外部から電気を受け取って力を出しており、たくさん電流を流せば、それだけ出力を大きくすることができます。しかし、モータの中のコイルに電流を流すと、コイルの電気抵抗で発熱が生じるため、モータが熱くなって、

モータを構成する材料が熱に耐えられなくなります。そのため、その材料の耐熱温度がモータ出力の限界を決めることになります。よって、出力の密度を大きくするには、以下のような方法があります。

- ①耐熱性の高い材料を使う
- ②効率を高め、モータ内の発熱を少なくする
- ③冷却し、モータの温度を下げる

具体例を挙げると、①についてはコイルの絶縁材料の進歩により、現在では200℃以上の環境にも楽々耐えられる樹脂もあります。②については、近年になり高効率な永久磁石同期モータが実用化されつつあり、このモータは大幅な発熱低減効果があります。③については、モータ内部に冷却風を流す方式が多く用いられていますが、このような方式は電車で用いる以外のモータではあまり用いられておらず、このことから電車で用いるモータがいかに小形大出力を重視しているかがうかがえます。ただし、この方法は通風に伴う騒音や、ゴミや埃がモータ内に入ってしまう問題があるため、近年では、モータ内に通風しない全閉形のモータ(図4)も用いられています。この場合には、他の大出力化技術を用いて必要な出力を確保できるようにする必要があります。

また、図4に示したように、全閉形にも積極的にファンで外表面に冷却風を流す方法(全閉外扇)と、自然に周囲に流れる風を利用する方法(全閉自冷)があり、どの程度低騒音化したいか、どの程度出力を確保したいかによって、最適な冷却方法を選択するのが良いと言えます。

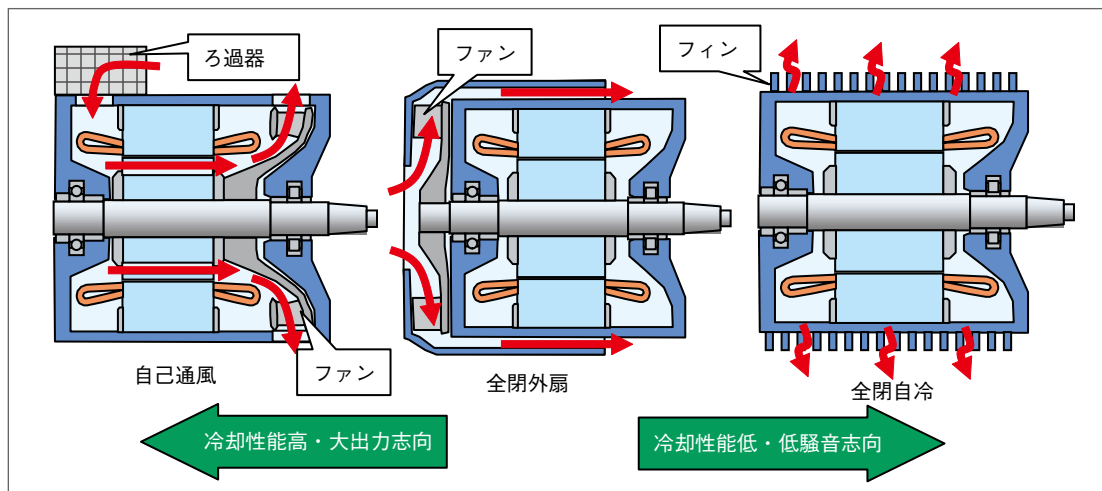


図4 いろいろなモータ冷却構造



図5 大出力全閉形永久磁石同期モータ

高速回転させる

この他、モータを小形大出力化するための基本的技術としては、歯車装置を用いることにより、モータを高速回転させて用いるということが挙げられます。ここまでは、歯車装置の存在を前提にモータの寸法制約について考え、その制約内で出力を大きくする方法について考えてきましたが、歯車装置がある理由は、そもそもモータを小形大出力化するためなのです。

歯車を用いると、「てこ」の原理の応用で、小さな力から大きな力を生み出すことができます。そのかわり、力が小さくて済む分、たくさん回転する必要があります。大きな力を出すためには大きなモータが必要ですが、高速回転させるためにモータを大きくする必要はありません。よって、歯車装置を用いてモータの出す力を小さく済ませることでモータを小形化できます。

しかし、モータを高速回転させると、モータの回転部には大きな遠心力が働くため、回転部はその遠心力に耐えられる構造となるように設計する必要があります。また、高速回転させると、回転部を支えている軸受部の寿命が短くなるので、頻繁に軸受部を保守しなければならなくなってしまいます。これらの事情から、モータの回転速度は、最高でも毎分5700～5800回転程度が限度とされています。そこで、モータの回転速度が限度に収まるように歯車装置が設計されており、モータは車軸よりも6～7倍速く回転するようになっていることが多いです。

表1 大出力全閉形永久磁石モータの諸元

定格出力(1時間)	270kW
冷却方式	全閉自冷
モータの方式	永久磁石同期モータ
磁極の数	6極
構造	フレームレス構造
制御方式	センサレス制御
コイルの温度限度	250℃

大出力モータの例

以上、電車用モータの大出力化技術についてご紹介してきましたが、最後に、最近鉄道総研が開発した大出力モータ(図5)についてご紹介します。

このモータの想定車両では3両中1両がモータ付の車となっており、最高速度は時速140キロです。そのため、モータ出力は270kW(標準的な電車で200kW程度)と日本の在来線電車で最大級の出力となっています。一方、低騒音化や省保守化を目指して冷却方式は全閉自冷とし、大出力化に不利な方式を選択していますので、必要な出力を達成することは容易ではありません。そこで、本モータでは永久磁石同期モータを採用するなど、表1に示したとおり、ここまでで紹介したあらゆる大出力化技術を用いて目標出力を達成しています。これにより、これらの技術を用いることで、大出力と低騒音・省保守が両立可能であることを示すことができました。

おわりに

電車を走らせるモータには、小形大出力化の要求が常に課せられており、低騒音化等を目指す場合にも、小形大出力化技術が重要となります。今後も、これらの技術について更なる向上を目指し、研究開発を行っていききたいと思います。**RRR**