

高速・高出力モータを実現する 回転機設計技術

水田貴裕* 久米将実*
伊藤一将* 高島由晴***
栢山盛幸**

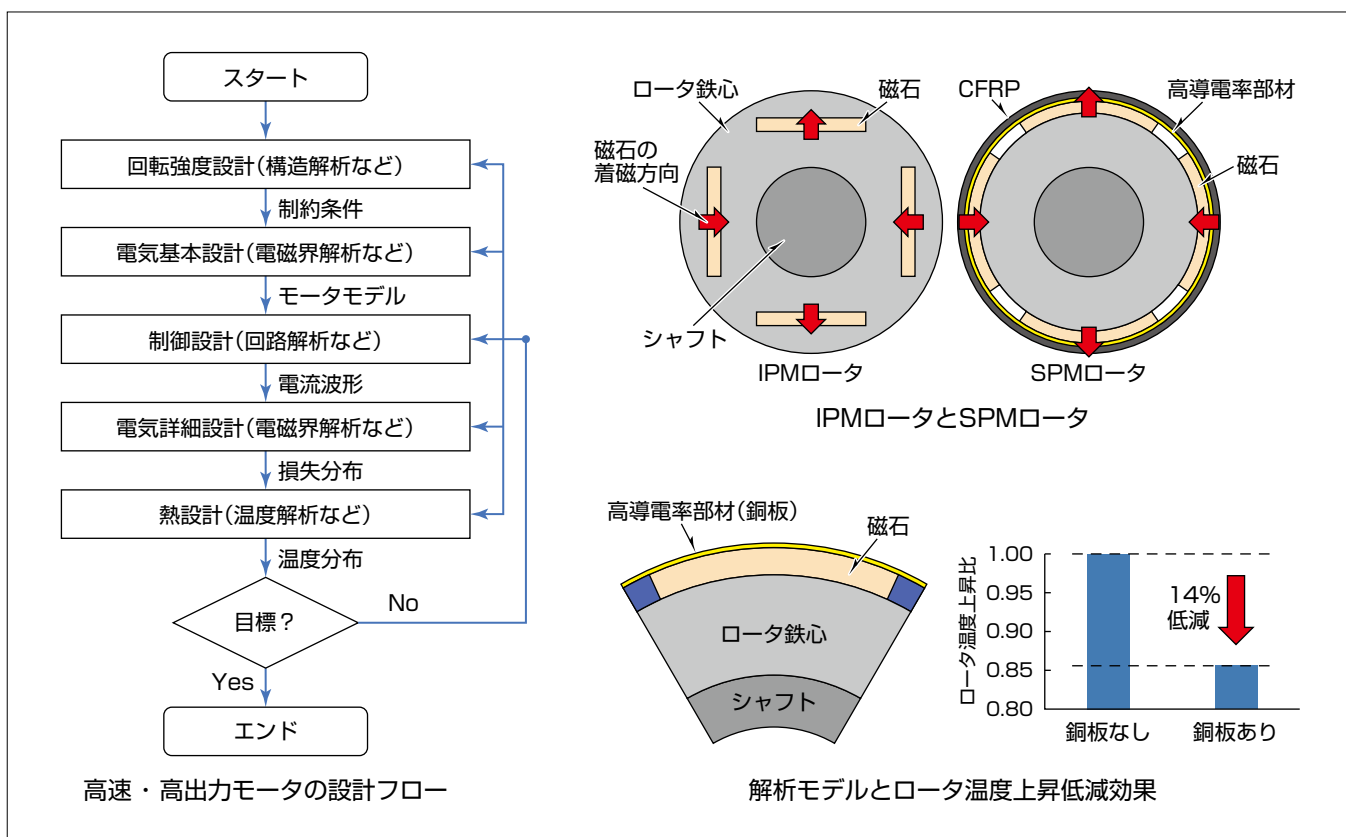
Rotating Machine Design Technology for High Speed and High Output Electric Motor

Takahiro Mizuta, Kazumasa Ito, Moriyuki Hazeyama, Masami Kume, Yoshiharu Takashima

要旨

近年、駆動システムの小型化要求が高まっており、モータには高速化及び高出力密度化が求められている。高速化及び高出力密度化を実現するモータ方式として、誘導機やロータ鉄心内に磁石を埋め込んだモータ(IPM(Interior Permanent Magnet)モータ)などが考えられるが、誘導機は高出力化に、IPMモータは高速化に難があるため、高速化と高出力密度化の両立が課題であった。そこで、ロータの表面に永久磁石を貼り付けた後に、磁石外周にロータ損失を低減するための高導電率部材を巻きつけ、さらに磁石飛散防止のためCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)を巻きつけることで高速回転に対応した表面磁石型モータ(SPM(Surface Permanent Magnet)モータ)を開発した。

高速・高出力モータでは電気設計上の制約条件を設定するために強度設計を最初の実施した後、電気・制御設計を実施する。その後、インバータキャリア起因の損失を算出するため再度電気設計を行う。このフローで設計を進めた結果、キャリアを原因とする高調波の磁束によってロータが非常に高温になることが問題になった。そこで、高導電率部材を磁石外周に巻きつけることでキャリアリップルによるロータの損失を低減する構造を提案した。電磁界解析によって効果を確認し、キャリア周波数の表皮深さに対してロータ損失を低減する最適な高導電率部材の厚みが存在することを明らかにした。実機で効果を検証した結果、磁石外周に高導電率部材(銅板)を巻きつけることでロータの温度上昇(損失)を14%低減できることを確認した。



高速・高出力モータを実現する回転機設計技術

高速・高出力モータでは電気設計上の制約条件を設定するために強度設計を最初の実施した後、電気・制御設計を実施する。その後、インバータキャリアの損失を算出するため再度電気設計を行う。ロータ損失低減のために磁石外周を高導電率部材(銅板)で覆う構造を提案し、実機で温度上昇(損失)を14%低減できることを確認した。

1. ま え が き

モータは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する装置であり、EV(Electric Vehicle)、HEV(Hybrid Electric Vehicle)や鉄道の主機を始め、エアコンの圧縮機、工作機械の主軸など幅広い用途で用いられている。モータにはこれらのアプリケーションによって高出力密度化、低トルクリプル化、高効率化、高速化などが求められる。近年、駆動システムの小型化要求が高まっており、結果としてモータには高速化及び高出力密度化が特に求められている。

図1は横軸を最高回転数、縦軸をモータ出力密度として

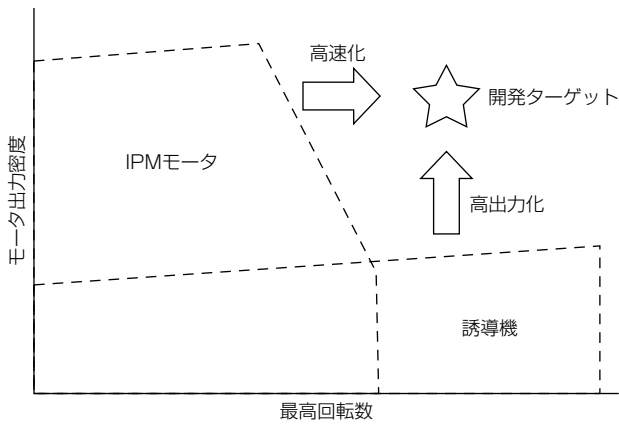


図1. 当社モータ製品マップのイメージ

各方式のモータをマッピングしたイメージ図である。誘導機はロータが堅牢(けんろう)であるため比較的高速域まで出力可能であるが、ロータ側に流れる2次電流の損失が大きいため、IPMモータに対し出力密度に劣る。一方でロータ鉄心内に磁石を埋め込んだモータ(IPMモータ)で高速化を実現するためには、機械強度確保のため磁石を鉄心内深くまで埋め込む必要がある。その結果、磁石の磁束が鉄心内部で短絡してしまうため、高速域での出力が低下してしまう。そこで、高速回転に対応可能な表面磁石型モータ(SPMモータ)を開発した。ロータの表面に永久磁石を貼り付けた後に、磁石外周にロータ損失を低減するための高導電率部材を巻きつけ、さらに磁石飛散防止のためにCFRPを巻きつけ高速回転に耐える強度を確保する構造となっており、高速化と高出力密度化の両立が可能である(図2)。

本稿では、高速・高出力SPMモータを開発する上での設計フローや開発上の課題とその解決手段について述べる。

2. 高速・高出力モータの設計フロー

図3に高速・高出力モータの設計フローを示す。高速モータの場合、遠心力に耐える構造であることが全体の律則となるため、まず構造解析等による概略強度設計を最初に実施する。構造解析等によって電気設計上の制約条件(CFRP厚みや磁石外周形状)を設定した後に、電磁界解析による基本設計に移る。電磁界による基本設計では速度-

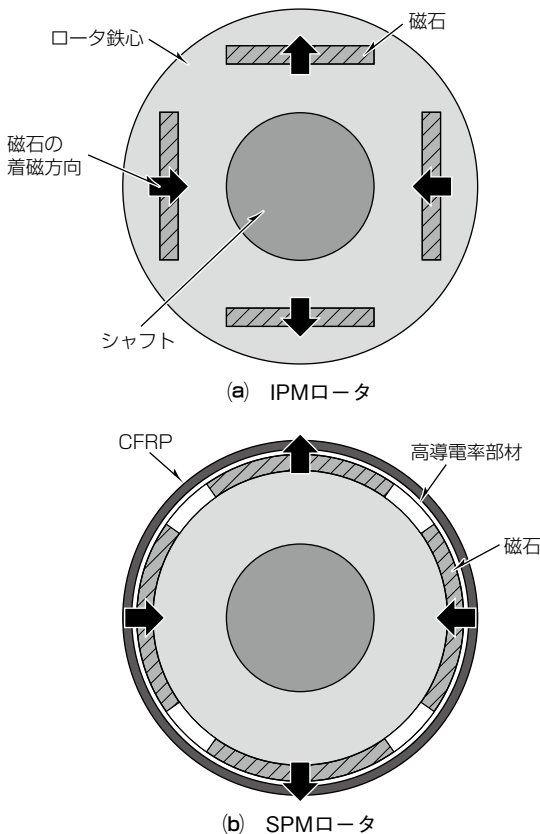


図2. 埋め込み磁石(IPM)ロータと表面磁石(SPM)ロータの断面図

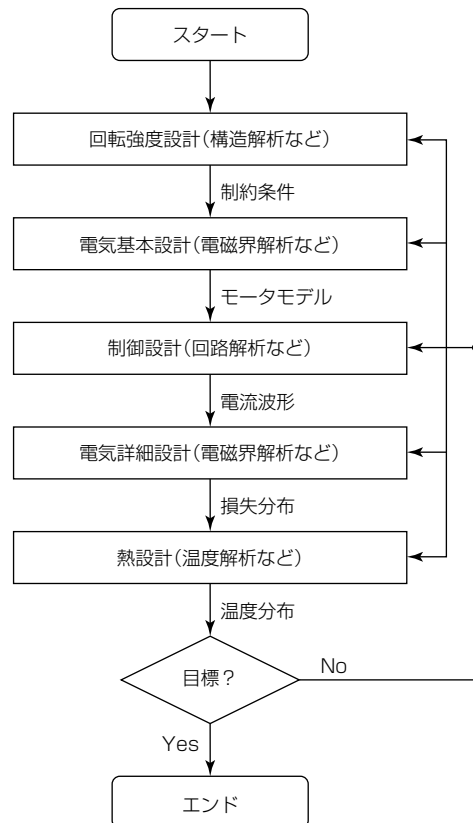


図3. 高速・高出力モータの設計フロー

トルク特性、正弦波駆動による損失量、効率や減磁特性を確認した後に、モータモデルを作成して制御設計を実施する。制御設計では、回路解析によって磁界解析のモータモデルを用いて制御性に問題がないことを確認する。

次いで回路解析の結果から得られる電流波形を用いて再度電磁界解析を実施する。なぜならば、基本設計による電磁界解析では正弦波による駆動を前提にしてキャリアリップルを考慮しておらず、損失が過小評価されるためである。キャリアリップルを考慮した電流波形によって各部材の損失量が求まると、その損失量によって温度解析を実施し、各部位の温度上昇を見積もる。定格ポイントでの温度が目標値に対して未達の場合、目標値を満たすように部材形状や配置を変更する。

3. 高速・高出力モータの課題と対策

高速・高出力モータは高速域での出力を確保するために巻数を小さくする必要がある。インダクタンスは巻数の2乗に比例するためインダクタンスも小さな値となる。電流波形に含まれるキャリアリップルはインダクタンスが小さいほど大きくなるので、高速・高出力モータは大きなキャリアリップルが重畳された電流で駆動されることになる。2章で示した設計フローにのっとり回路解析で得られた電流波形で電磁界解析・温度解析を実施した結果、ロータが非常に高温となることが問題になった。これは、キャリアリップルによる高調波がロータ部材に鎖交することで渦電流損失が発生することが原因である。磁石は耐熱温度を超えると磁力を失う(減磁する)ため、磁石温度が耐熱温度以下となるようにロータの渦電流損失を低減する必要があった。

3.1 ロータ渦電流損失低減の原理

キャリアリップルによるロータの損失を低減するために、高導電率部材を磁石外周に巻きつける構造を提案した。次にロータ損失低減の原理について述べる。

図4にこのモータのキャリア高周波に対するd軸の等価回路を示す⁽¹⁾⁽²⁾。V_{dh}はインバータのキャリア高調波電圧をdq変換した電圧、R_aはステータ巻線の相抵抗、L_{ld}はd軸のステータ巻線漏れインダクタンス、R_{kd}はロータの渦電流経路のd軸等価抵抗、L_{kd}はロータの渦電流経路のインダクタンスである。省略するがq軸の等価回路も同様に表すことができる。

キャリアの角周波数をω_h、基本波の角周波数をωとするとキャリア高調波電圧が正相の場合、dq軸での周波数はω_h - ωとなる。よってdq軸インピーダンスZ_{dh}、Z_{qh}は、

$$\begin{aligned} Z_{dh} &= R_a + R_{kd} + j(\omega_h - \omega)(L_{ld} + L_{kd}) \\ Z_{qh} &= R_a + R_{kq} + j(\omega_h - \omega)(L_{lq} + L_{kq}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。キャリア高調波電流は、電圧とインピーダンスか

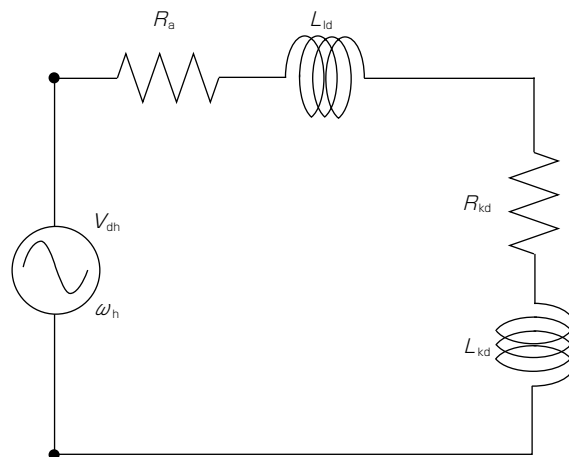


図4. キャリア高調波に対するd軸の等価回路

ら次式で与えられる。

$$I_{dh} = \frac{V_{dh}}{Z_{dh}} \quad I_{qh} = \frac{V_{qh}}{Z_{qh}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

よって、ロータで発生するキャリア高調波による渦電流損失W_eは、

$$W_e = R_{kd}|I_{kd}|^2 + R_{kq}|I_{kq}|^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。このモータで、キャリア周波数は基本波周波よりも十分に高い(ω_h ≫ ω)ため、式(1)でリアクタンス成分が支配的となる。式(1)で抵抗成分を無視すると式(1)~(3)よりW_eは

$$W_e = R_{kd} \left| \frac{V_{dh}}{(\omega_h - \omega)(L_{ld} + L_{kd})} \right|^2 + R_{kq} \left| \frac{V_{qh}}{(\omega_h - \omega)(L_{lq} + L_{kq})} \right|^2 \dots (4)$$

となり、R_{kd}及びR_{kq}、つまりロータ側に流れる渦電流経路の抵抗を小さくすることによってW_eが低減する。よって、磁石よりも導電率の大きな部材を永久磁石外周に設けることで渦電流経路の抵抗が小さくなり、渦電流損失が低減することが期待できる。

3.2 高導電率部材の厚みによるロータ損失への影響

3.1節では、磁石外周に高導電率部材を巻きつけることによってキャリアリップルに起因する渦電流損失が低減する原理を述べた。この節では二次元電磁界解析を用いて渦電流損失低減効果を検証した結果について述べる。電磁界解析の諸元を表1に、ロータの解析モデルを図5に示す。CFRPは非磁性かつ軸方向に非導電性のため、電磁界解析のモデルからは除外している。高導電率部材としては銅板を想定して6.0 × 10⁷ S/mの導電率を設定した。また、解析に用いる電流波形は実機の電流波形を模擬するように基本波にキャリアリップル成分を重畳することで作成した。高導電率部材の厚みに対するロータ損失への影響を調べるために、高導電率部材の厚みtを変化させて解析を実施した。なお、高導電率部材の厚みを変化させる際は磁石外周面を

表 1. 電磁界解析の諸元

回転数	12,000r/min
出力	無負荷
銅板の導電率	$6.0 \times 10^7 \text{S/m}$
磁石の導電率	$7.1 \times 10^6 \text{S/m}$
ロータ鉄心の導電率	$3.2 \times 10^6 \text{S/m}$

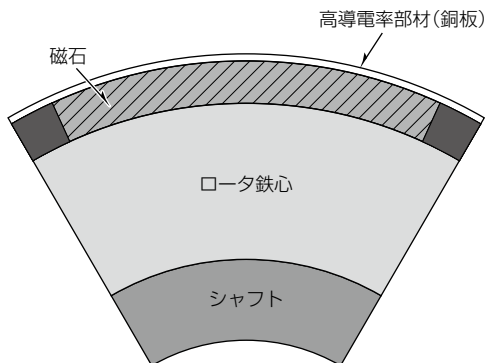


図 5. 解析モデル

固定しているため、ステータ内周から高導電率部材表面までの距離は高導電率部材の厚みを大きくするにつれて小さくなっていく点に注意する必要があります。

図6は、高導電率部材の損失、高導電率部材以外の損失及びロータで発生する全損失を縦軸に、キャリア周波数の表皮深さdに対する高導電率部材厚みの割合(t/d)を横軸としてプロットした結果である。損失は高導電率部材がない(高導電率部材の厚みが0)場合の損失によって規格化している。図で示すように、高導電率部材の厚みが増すにつれて、高導電率部材以外の部材の損失は低減している。これは高導電率部材に流れる渦電流がキャリアリップルに起因する高調波磁束を打ち消し、高導電率部材よりも内周側にある部材に鎖交する磁束が減少するためである。また、高導電率部材の損失は厚みを増すにつれ増加していくものの、ロータの全損失は高導電率部材がない場合よりも低減しており、3.1節で述べた理論と合致していることが分かる。ロータの全損失は $t/d=0.7\sim 0.8$ で最小となり、その後は t/d が増加するにつれ増加していく。ロータ損失が増加している要因としては、高導電率部材の厚みが厚くなるにつれてステータ内周までの距離が小さくなるため、ステータスロット高調波による影響が顕著になると考えられる。

3.3 実測結果

3.2節で高導電率部材によるロータ損失低減効果が確認できたので、実機を試作して効果を検証した。磁石の外周に銅板を巻きつけたロータ(銅板あり)と巻きつけないロータ(銅板なし)を試作し、温度飽和後のロータ温度を測定した。銅板の厚みについては3.2節の結果と工作性の観点から $t/d=0.4\sim 0.5$ となるように選定した。モータの回転数

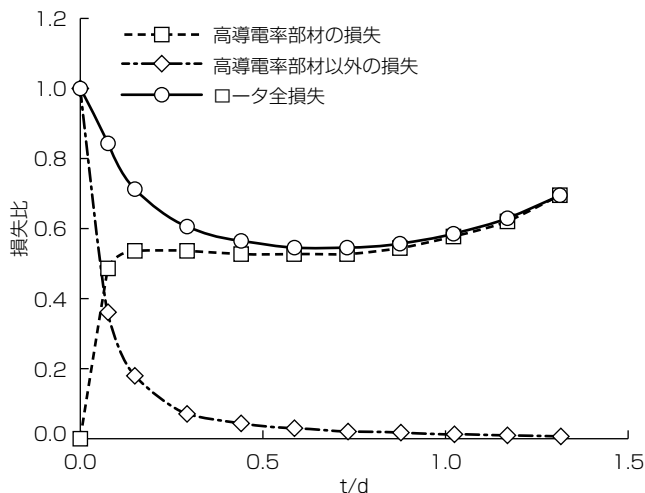


図 6. 高導電率部材厚みがロータ損失に与える影響

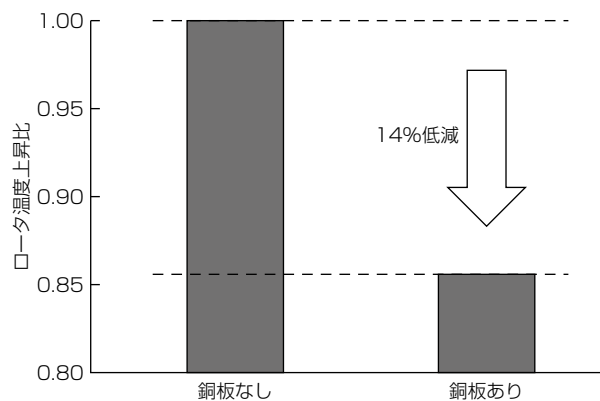


図 7. ロータ温度上昇比の比較

は12,000r/minに設定して試験を実施し、温度はロータ軸方向端面を測定した。結果を図7に示す。銅板なしの温度上昇を1として規格化して表示している。銅板を入れることでロータの温度上昇が14%程度低減しており、実機でも銅板による渦電流損失低減の効果が確認できた。

4. む す び

誘導機やIPMモータに対して高速・高出力なSPMモータを開発する上での設計フローや開発上の課題とその解決手段について述べた。今後も更なる高速化と高出力密度化の要求が進むことが予測されるため、市場ニーズに応えるべく研究開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 猪狩武尚：電気機械理論，コロナ社(1977)
- (2) 中野正嗣，ほか：永久磁石モータのインピーダンスを用いたキャリア高調波による回転子渦電流損の計算手法，電気学会論文誌D，137，No.8，663～672(2017)