

トラクションモータの性能向上を目的としたステータアーキテクチャ

Stator Architecture Advancements for Improved Traction Motor Performance

明上 周平*
Shuheji Myojo

三次 悠介
Yusuke Mitsugi

Volker Uwe Strueken

森野 慎太郎
Shintaro Morino

池田 和寛
Kazuhiro Ikeda

近年、e-mobilityでは「地球温暖化防止対策」が重要な焦点となっている。そのため、自動車業界におけるトラクションモータでは、より高速で、高トルク、高効率なモータが求められる。(株)オートネットワーク技術研究所はステータの巻線とスロットの冷却性能について新規技術を組み合わせることで、トラクションモータの最大トルクを維持しつつ、大幅な小型化を実現するステータアーキテクチャの開発に成功した。また本開発ステータの生産工程では、従来ステータと比較して約30%のCO₂排出削減を可能にする。

The growing emphasis on mitigating global warming has highlighted the need for sustainable solutions in the e-mobility sector. In response, the automotive industry requires traction motors that deliver increased speed, torque, and efficiency. Through the integration of advanced technologies in stator windings and slot cooling, we have successfully developed a downsized stator architecture for traction motors. This novel design maintains maximum torque while achieving significant size reduction. Furthermore, the production process for this stator contributes to a reduction in CO₂ emissions by approximately 30% compared to conventional stators.

キーワード：電気自動車、モータ、平角線、絶縁、冷却

1. 緒言

運輸部門はCO₂排出の主な原因の一つであるため、数多くの対策や規制が必要とされている。排出量削減のために必要な対策として、ハイブリッド自動車や電気自動車など、さまざまな駆動方式がすでに登場している。これら電気自動車市場は急速に成長しており、持続可能性のトレンドに伴い、今後も成長が見込まれている。このため、各社はトラクションモータ^{*1}のさらなる研究への投資を促している⁽¹⁾。高性能化、低消費電力化、低コスト化の要求に応えるため、トラクションモータは、高速化、高トルク化、高

効率化を目指してさらなる開発が進められている。近年、トラクションモータのステータには、ほぼ正方形の断面を持つ銅線（平角線）の分布巻きが使用されている。この平角線をステータに挿入する技術をヘアピン技術と呼び、この技術によりスロット内の占積率^{*2}は大幅に改善され、効果的にサイズと重量を削減し、全体として必要な銅の量を減らすことができる。(株)オートネットワーク技術研究所は、占積率をさらに向上させることでステータサイズの小型化に成功したため（実際の試作品を写真1に示す。）、以下に詳細を報告する。

2. 巻線の課題

2-1 絶縁と占積率

電気自動車の重要な購入基準である高速化とバッテリー充電時間の短縮には、より高い電圧が必要である。例えば、充電ステーションでは800V電圧の技術が普及すると予想されている。この場合、モータ巻線の絶縁はより高い電圧に耐えなければならない。この目的に対して、一般には厚い絶縁皮膜が使用され、その結果、占積率は低くなる。また、モータに高トルクを発生させるためには、巻線に流れる電流を増やす方法が一般的に知られている。そのため、巻線における銅の断面積を増やし、大電流に伴う発熱を抑える必要がある。巻線の絶縁皮膜を厚くし、銅の断面積を増やすことは、モータのサイズを大きくすることになり、小型化やモータケースの最適化というトレンドに逆行することになる。このため、巻線における銅の断面積、絶縁、

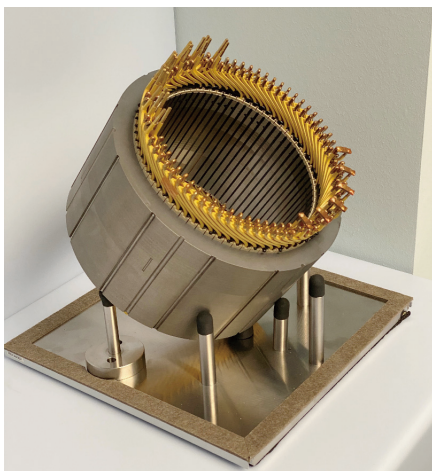


写真1 試作ステータの写真

熱伝達率の間で最適解を見つける必要がある。またコストと持続可能性の観点から製造工程も考慮する必要がある。

2-2 部分放電開始電圧 (PDIV)

インバータのサージ回路が発生する急峻なサージ電圧は、インバータとモータ間の配線の長さが長くなるにつれて増加する。そして、ピーク値はインバータ電圧の2倍に達することがある⁽²⁾。巻線間に高電圧が印加され、部分放電開始電圧 (PDIV)^{*3}を超えると、巻線皮膜の表面に微小な放電 (部分放電) が発生することがある。この部分放電が発生し続けると、皮膜が侵食されて徐々に劣化し、最終的には絶縁破壊に至る。従って、モータの寿命を向上させるためには、高周波・高電圧でも部分放電の発生を抑制できる巻線が必要である。PDIVは絶縁性能の指標であり、その特性はDakinの式とよく一致することが知られている。

【Dakin式】

$$V = A \times (2 \times t / \epsilon_r)^{0.46} \dots\dots\dots (1)$$

A：定数

V：部分放電開始電圧 [Vp]

ϵ_r ：絶縁皮膜の比誘電率^{*4}

t：絶縁皮膜の厚さ [μm]

式 (1) は、皮膜の厚さがPDIVに対して二次関数的に増加することを明確に示しており、高電圧システム (例えば 800V) では皮膜厚さが増加し、スロット内における銅の断面積は減少する⁽³⁾。

3. 冷却システムについて

トラクションモータの冷却には、油冷式と水冷式の2種類がある。油冷式は、モータに電動ポンプでオイルを供給していく方式である。しかし、油冷式は非常に複雑でコストがかかるため、多くのトラクションモータでは水冷式が採用されている。水冷の場合、冷却水はステータを囲むウォータージャケットの中を流れ、冷却水と発熱源である巻線の間にはコア、絶縁紙、ワニスが存在している。特に絶縁紙とワニスは熱抵抗が大きく、冷却性能を低下させている。さらに、絶縁性能を確保するために巻線の絶縁層の厚みを増すと、冷却性能はさらに低下する。つまり、絶縁性能と冷却性能 (放熱性) はトレードオフの関係にある。

4. 高電圧・大電流への取り組み

4-1 低誘電率巻線の開発

前述の式 (1) からわかる通り、比誘電率を下げることで絶縁層の厚さを増やさずPDIVを向上させることができる。絶縁皮膜の比誘電率を大幅に下げる手法として、比誘電率が1.0の空気を皮膜に導入することが知られている。当社は巻線のポリイミド (PI) 皮膜に、気泡を均一に、かつサイズを制御して導入する技術を開発した。この技術に

より、一般的にトラクションモータに使用されるポリイミド (AI) 巻線と比較して、高電圧下における皮膜の厚みを大幅に低減することができ、占積率の低下を防ぐことが可能となった。

4-2 巻線形状の改善

従来の平角線に比べ、さらに角Rを小さくする製造方法を開発した。この技術により、ステータのスロットサイズを変えることなく、占積率を4.4%向上させることに成功した。

4-3 高い放熱性を持つスロット設計

熱抵抗を低減して冷却性能を向上させながら、銅充填率をさらに高めて大電流を目指した。スロット構造における熱抵抗を調査したところ、ワニスと絶縁紙の熱抵抗が支配的であることが判明した。このワニスと絶縁紙を取り除き、代わりにスロットをエポキシ樹脂で埋めることにより、放熱性が大幅に向上し、冷却性能の向上につながった⁽⁴⁾。

(株)オートネットワーク技術研究所が開発したステータアーキテクチャは、最適化された絶縁皮膜、占積率の向上および冷却性能の向上に基づいており、従来ステータとの比較について図1に示す。

4-4 トレードオフの改善

上記の解決策を適用した後、絶縁性と放熱性 (冷却能力) のトレードオフがどの程度改善されたかを図2に示す。同

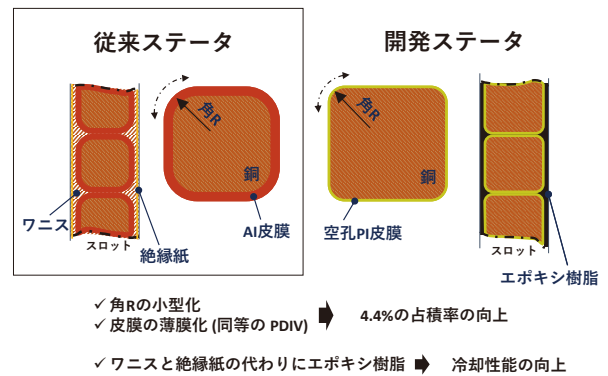


図1 従来ステータと開発ステータの構造比較

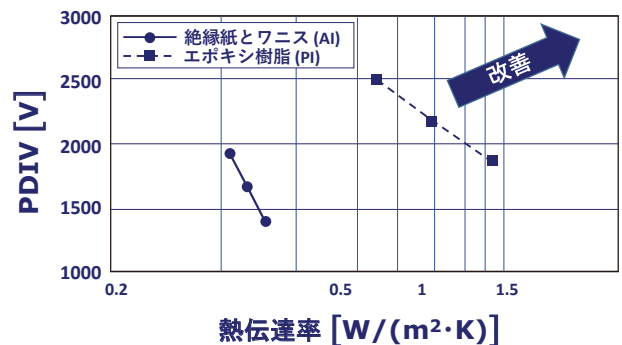


図2 PDIVと熱伝達率の改善

じPDIVで熱伝達率が約3倍になっていることがわかる。この結果、高電圧・大電流に対応したステータの開発に成功した。

5. 冷却性能の検証

ステータのU、V、W相にそれぞれ200Aの直流電流を流した場合、今回開発したステータの最高温度は、従来方式のステータよりも4.0℃低くなることが熱解析の結果で判明した。この熱解析の結果を確認するため、独立した外部研究所による温度測定試験を実施した。この試験結果により、開発ステータの最高温度は、従来ステータよりも2.6℃低いことが確認された。これにより、熱解析結果の正確性が確認できた。また、さらなる冷却性能を検証するため、1相400Aの直流電流を流す熱解析を実施した。その結果、開発ステータの最高温度は、従来ステータの最高温度よりも34.0℃低くなることが確認できた。さらに、(株)オートネットワーク技術研究所内で温度測定試験を実施した。その結果により、開発したステータの最高温度は従来方式のステータの最高温度よりも39.3℃低いことが確認できた(図3)。これらの結果により、ステータの大幅な温度低減の効果を確認することに成功した。

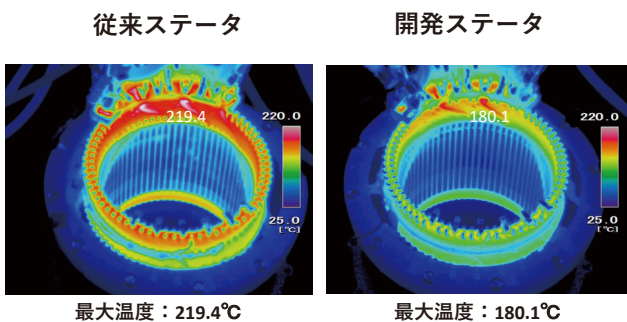


図3 サーマルカメラで測定したステータ温度

6. 性能向上と小型化

占積率の増加と冷却性能の向上による温度の低下より、ステータ設計の自由度は大幅に向上する。これらの新しい技術を組み合わせることで、今回開発したステータを適応したモータは従来方式のモータと比較して最大トルクを10.9%増加させることを、磁気解析により確認することができた。また、この結果を応用して、基準値に対する最大トルクを維持しながらモータを小型化した場合の効果についても検証した。同一条件下でトルクがモータの積厚に比例すると考えると、同じ出力であれば長さを9.6%短縮できる。この比較を図4に示す。

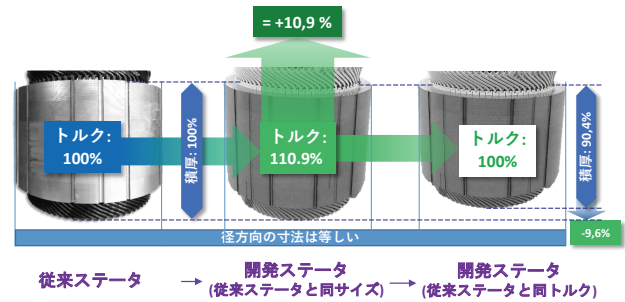


図4 従来ステータとのトルクとサイズの比較

7. 環境負荷物質の削減

さらなる調査により、今回開発したステータは、使用される銅などの原材料の量だけでなく、トラクションモータで使用される環境に有害な物質の量も削減できることが確認できた。ステータ製造時のワニス乾燥をエポキシ樹脂に置き換えることで、生産工程におけるトラクションモータあたりのCO₂排出量を約30%削減に貢献できる(図5)。

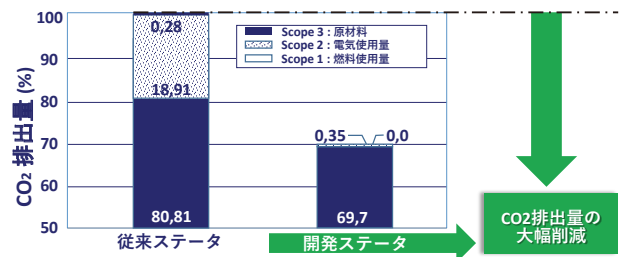


図5 開発ステータにおけるCO₂削減

8. 結 言

新たなステータアーキテクチャの開発により、モータサイズと有害物質の両方を削減できる。さらに、ワニスと絶縁が不要になるため、従来のモータ設計と比較して低コストを実現しながら高性能化できる可能性がある。現在、この開発はまだ初期段階にあり、他の革新的な技術と同時に克服すべき未解決の課題はある。しかしながら、今回の結果を踏まえて、(株)オートネットワーク技術研究所は持続可能なモビリティに向けたよりパワフルで、より高効率で、より低コストで、そして脱炭素化への需要に応えるための設計アプローチを自動車業界に提供していく。

用語集

※1 トラクションモータ

ハイブリッド自動車や電気自動車など駆動する電動機。主機モータとも言われる。

※2 占積率

モータのコアで、巻線が収まるスロットの断面積に対する巻線導体の断面積の比。これが大きいほど大きさあたりのモータの出力は大きくなる。

※3 部分放電開始電圧 (PDIV)

巻線間で放電が開始する電圧。放電が発生した場合、絶縁皮膜が劣化しモータ寿命が短くなる恐れがある。

※4 比誘電率

絶縁体の分極のしやすさを示す値。比誘電率が低いと部分放電開始電圧 (PDIV) が高くなる。

参考文献

- (1) 赤津観、[EV/HV用トラクションモータとインバータの今後の展開]、自動車技術会誌 Vol.76、No.6、pp. 46-53 (2022年)
- (2) 辻孝誠 他、[インバータサージの伝搬と電動機内電圧の解析]、電気学会論文誌産業応用126巻、6号、pp. 771-777 (2006年)
- (3) 太田慎弥、山内雅晃、溝口晃、吉田健吾、田村康、[HEV/EV用駆動モータ向け平角線の開発]、SEIテクニカルレビュー第194号、pp. 41-45 (2019年1月)
- (4) S. Yamamoto, A. Nishikawa, T. Harada, W. Kosaka, "Development of Direct Cooling Stator Structure Using High Thermal Conductive Epoxy Molding Compounds." In: 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), pp. 407-414 (2022)

執筆者

明上 周平* : (株)オートネットワーク技術研究所



三次 悠介 : (株)オートネットワーク技術研究所
グループ長



Volker Uwe Strueken : Sumitomo Electric Wiring
Systems Components and
Electronics Europe Ltd.



森野慎太郎 : (株)オートネットワーク技術研究所



池田 和寛 : Sumitomo Electric Industries
Automotive Europe GmbH,
General Manager
博士 (理学)



* 主執筆者