

エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム用モータの電磁気設計

北尾純士*
 深山義浩*
 中野正嗣**

Electromagnetic Design of Electric Motor for Crankshaft-mounted Integrated Starter-Generator System for 48V Hybrid Vehicles
 Junji Kitao, Yoshihiro Miyama, Masatsugu Nakano

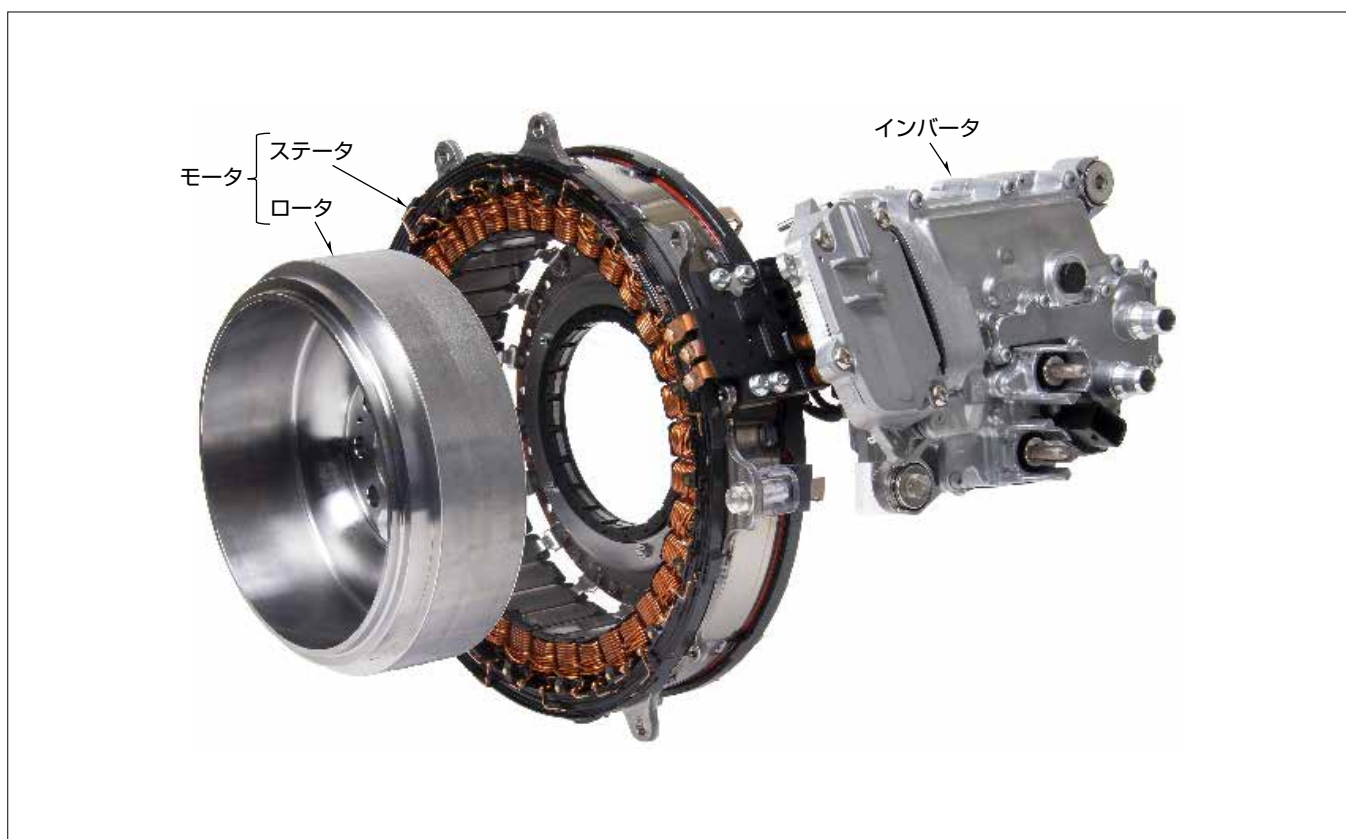
要旨

近年、地球環境保護(CO₂排出量削減)の観点から、自動車市場では電気自動車(EV)やハイブリッド電気自動車(HEV)など様々な電動車両の普及が急加速している。100Vを超える高電圧電源システムを搭載したHEVは燃費改善効果大きい反面システムコストが高く、エンジンルーム内のレイアウト変更が必要になる。これらの背景から、エンジンルーム内のレイアウト変更を抑えつつ、比較的 low コストで燃費向上が実現できる48V規格に対応したマイルドHEVの普及が見込まれている。

三菱電機は、この要求に対応するため、小型・軽量と高効率を両立させたエンジン出力軸直結型48V-ISG(Integrated Starter-Generator)システムを開発し、製品化

した。エンジン出力軸直結型48V-ISGシステムは、アイドリングストップからのエンジン再始動、減速時のエネルギー回生や加速時のトルクアシストを行うことで、自動車の燃費改善に貢献できる。

このシステムのモータは、エンジンと変速機の上に搭載する構造であり、軽量化も必要であることから、薄型・扁平(へんぺい)な円筒状の限られたスペースで磁気回路を構成する必要がある。このような形状制約の中で、高トルク・高出力発電、低～中回転域の低トルク域での高効率、高回転域の連続動作等の様々な要求性能を満足させるための電磁気設計を実施した。



エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム

地球環境保護の観点から、比較的 low コストで燃費向上が実現できる48V規格に対応したISGシステムが求められており、当社はエンジン出力軸直結型48V-ISGシステムを開発した。このシステムはエンジンと変速機の上に搭載され、アイドリングストップからのエンジン再始動、減速時のエネルギー回生や加速時のトルクアシストを行うことで、自動車の燃費改善に貢献する。

1. ま え が き

近年、地球環境保護(CO₂排出量削減)の観点から、自動車市場ではEVやHEVなど様々な電動車両の普及が急加速している。これらの背景から、比較的 low コストで燃費向上が実現できる48VのマイルドHEVの普及が見込まれている。当社は48V規格に対応した小型・軽量と高効率を両立させたエンジン出力軸直結型48V-ISGシステムを開発し、製品化した。

本稿ではエンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの特長とモータの電磁気設計について述べる。

2. エンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの特長

2.1 エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム

図1に、エンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの構成を示す。このシステムは、エンジンと変速機間にモータを搭載する構造であり、エンジン出力軸にモータのロータが直結されている。出力軸直結のため、モータの駆動力を直接伝達でき、高トルク伝達が可能でトルク応答速度向上が図れる。ただし、エンジンルームのレイアウト制約と軽量化の観点から、薄型・扁平な円筒状の限られたスペースで磁気回路を構成する必要がある。

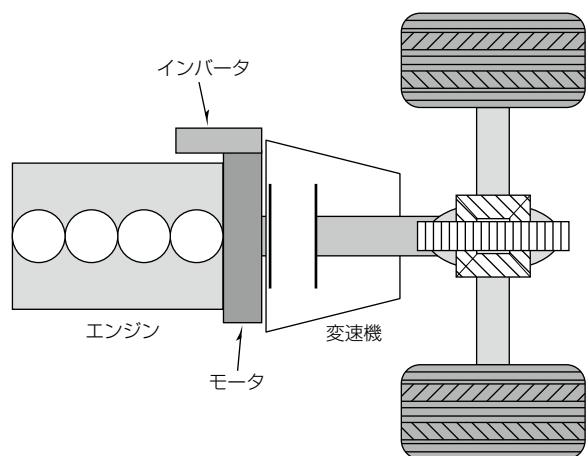


図1. システムの構成

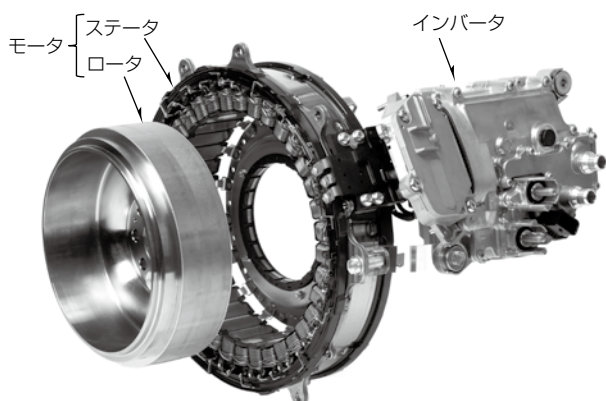


図2. エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム

2.2 48V-ISGシステム用モータ

エンジンとモータを動力源とするHEVは、機能の違いによってフルHEVとマイルドHEVの2種類に大別される。フルHEVは、エンジンを止めた状態でモータだけでの走行が可能であるため、大幅な燃費向上が期待できる。一方、マイルドHEVは、モータだけでの走行はせずトルクアシストや減速回生等の機能を持っており、簡素なシステムで実現できるという点が特長である。特に、48VのマイルドHEVは、高電圧システムで要求される安全機能を実装する必要がないためシステム全体のコストを抑えることができ、普及加速が見込まれている。

マイルドHEV向けの48V-ISGシステムは、アイドリングストップからのエンジン再始動、減速時のエネルギー回生や加速時のトルクアシストを行うことで、自動車の燃費改善に貢献できる。図2に、今回開発したエンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの外観を示す。モータは薄型・扁平構造で、インバータはモータハウジングにマウントされている。このシステムと同様の機能を持つベルト駆動式モータジェネレータ⁽¹⁾と比較すると、ベルト駆動よりも伝達可能なトルクが高く、高出力発電が可能であるため、回生による減速エネルギーの利用率も高めることができる⁽²⁾。

3. 48V-ISGシステム用モータの電磁気設計

3.1 要求性能

図3に、48V-ISGシステム用モータの回転数-トルク特性での各車両動作で求められる領域を示す。アイドリングストップからのエンジン再始動では低回転域で高トルクが求められ、車両加速時のトルクアシスト動作では低~中回転域の低トルク域で燃費に直結する高効率化が求められ、車両減速時のエネルギー回生動作では低~中回転域での高出力発電が求められる。さらに、このシステムではエンジンの駆動力がロータを介して伝達されるため、エンジンの

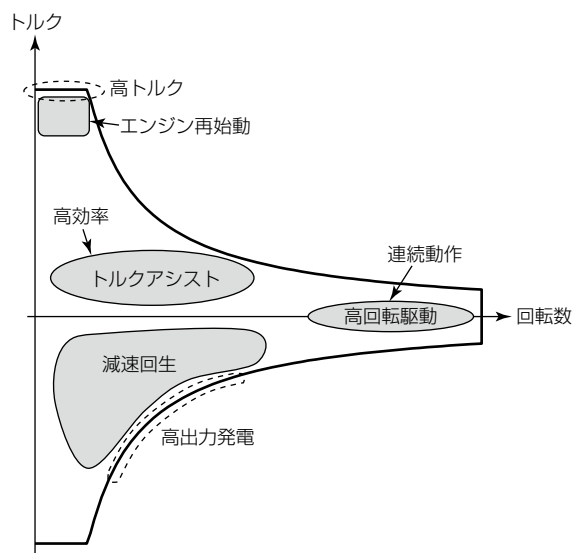


図3. 48V-ISGシステム用モータの動作領域と要求性能

駆動範囲全域で動作する必要があり、高回転域でも連続動作が求められる。このように、高トルク・高出力発電、低～中回転域の低トルク域での高効率化が求められるため、このシステムのモータ方式として高トルク・高出力発電が特長である永久磁石式同期モータを採用している。しかし、永久磁石式同期モータでは、48Vの低電圧でエンジンの最高回転数まで連続動作するために、誘起電圧を弱めるための電流を通電(弱め磁束制御)する必要がある。このシステムでは、弱め磁束制御に必要な電流の低減が電磁気設計でのキーポイントの一つであるため、次節以降では、弱め磁束制御に必要な電流の低減に寄与した巻線構造と多極化に関する検討について述べる。

3.2 巻線構造に関する検討

ここでは、48V-ISGシステム用モータに適した巻線構造の検討について述べる。モータの巻線構造は、一つのティースにコイルが巻回される集中巻構造と複数のティースをまたがってコイルが巻回される分布巻構造に大別される。集中巻構造と分布巻構造の性能を比較するために、鉄心長・コイルの直列導体数・極数・ロータ外径・ギャップ長を同一とし、最大電流密度及び無負荷誘起電圧が一致するようにステータとロータを設計した。

図4に、それぞれの巻線構造の電磁界解析による結果を示す。図4(a)の“短時間定格”は最大電流時でのモータ回転数-トルク特性を示し、“連続定格”は連続動作を想定した同一の電流密度下でのモータ回転数-トルク特性を示す。短時間定格に関しては、どの回転数でも分布巻構造は集中

巻構造より高いことが分かる。分布巻構造は集中巻構造よりもリラクタンストルクが高く、結果として高トルク・高出力を実現できている。しかし、連続定格を比較すると、中～高回転数域では集中巻構造の方が高トルクを実現できている。これは、弱め磁束制御に必要な電流が低減できているためである。一例として、巻線構造の違いによる、ステータに鎖交する磁束を100%弱めるために必要な電流を図4(b)に示す。集中巻構造は分布巻構造よりインダクタンスが高いため、弱め磁束制御に必要な電流を低減でき、図4(b)の結果からも集中巻構造の方が低電流であることが確認できる。この効果は図4(c)及び図4(d)の効率特性にも表れており、一例として同一の効率ラインを点線で示しているが、弱め磁束制御に必要な電流を低減することで集中巻構造の方が高回転域まで高効率範囲を広げることができている。

このように、48V-ISGシステム用モータで高回転域まで高効率かつ連続動作を実現するためには、集中巻構造の方が有利であるため、このシステムではこれらの特長を生かした集中巻構造を採用している。

3.3 多極化に関する検討

48V-ISGシステム用モータは、先に述べたとおり薄型・扁平な円筒状の限られたスペースで磁気回路を構成する必要がある。集中巻構造を採用することでコイルエンドを縮小しつつ、さらに多極化によってコイルエンドの更なる縮小と磁気回路を構成するために必要な面積の低減が可能になるため、このシステムのような限られたスペースで要

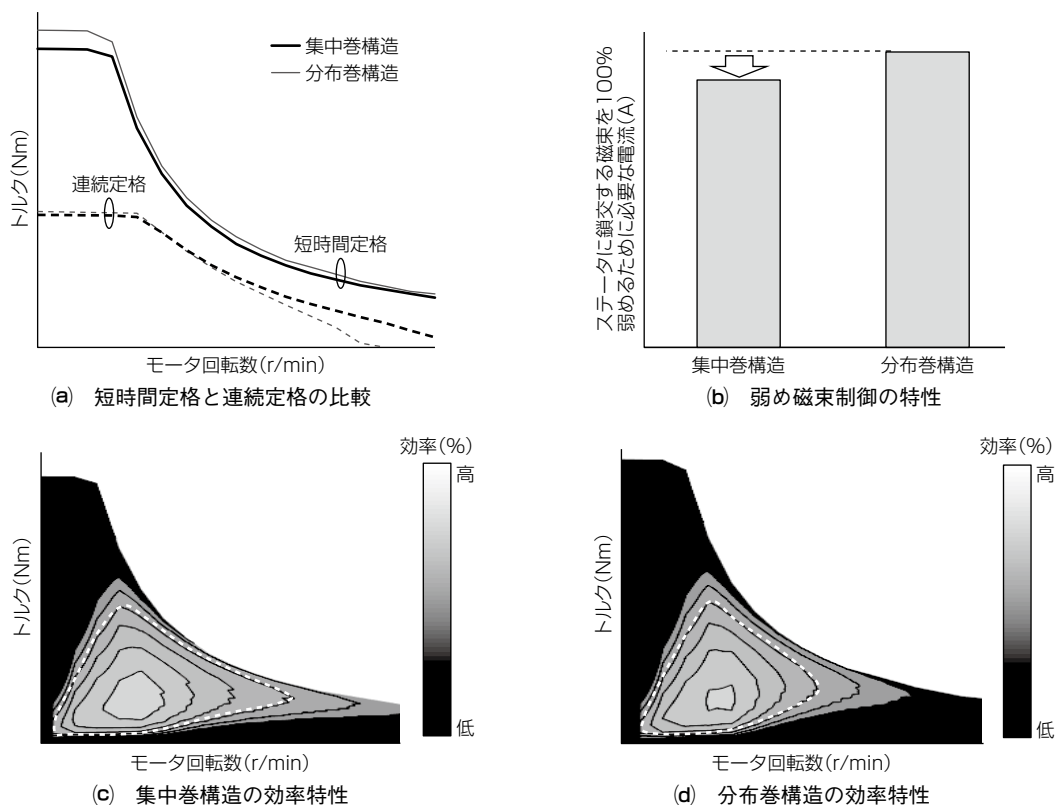


図4. 集中巻構造と分布巻構造の性能比較

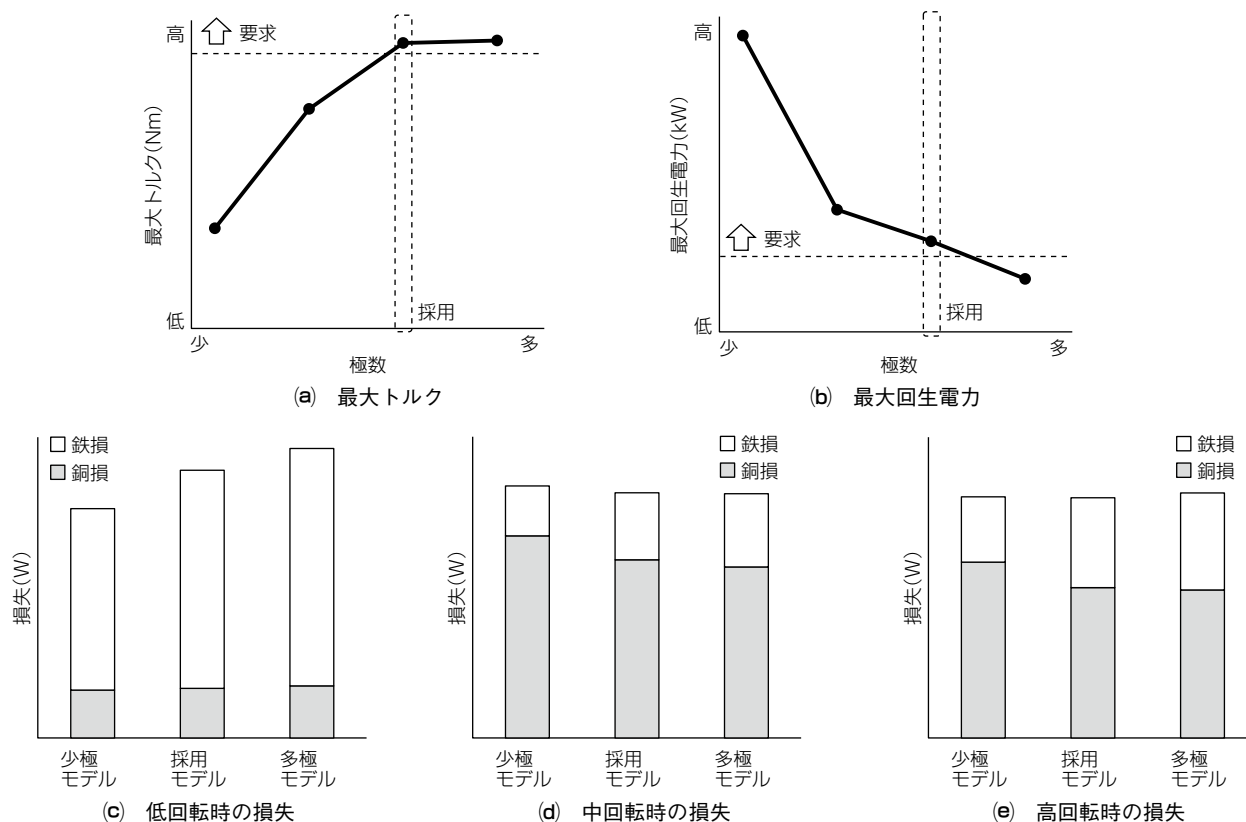


図5. 極数に対する電磁気性能

求性能を満足させるためには集中巻構造及び多極化が効果的であると考えられる。ただし、多極化することでモータの電気角周波数が高くなるため、鉄損の増加が懸念される。このように、極数は電磁気設計で非常に重要なパラメータであるため、ここでは要求性能と極数の関係について述べる。

図5に、最大電流密度・磁石量を同一として設計した各極数での最大トルク・最大回生電力・各回転数の損失の電磁界解析による結果を示す。なお、図5(c)~図5(e)では、全て同一の低トルク時(HEVで使用頻度が高い低負荷の条件であり、図3のトルクアシスト領域に相当する)である。図5(a)に示す最大トルクに関しては、多極化によって増加しているが、ある極数から多極化しても頭打ちになっていることが分かる。多極化によってモータに必要な磁気回路を構成する面積を低減できるため、各部の磁気飽和緩和とロータ径の拡大によってトルクの向上が図れる一方で、多極化によってスロット数が増加してステータのスロット間漏れ磁束が増加するため、これらのトレードオフによって図5(a)のような傾向となる。図5(b)に示す最大回生電力に関しては、多極の方が低いことが分かる。先に述べたとおり、多極化によってスロット間の漏れ磁束が増加するため、インダクタンスが増加して結果的に最大回生電力は低下する傾向にある。したがって、最大トルクと最大回生電力は極数に対してトレードオフの関係にあるため、このシステムではどちらの要求性能も満足する最適な極数を採用している。図5(c)~図5(e)に、低~高回転時の銅損と鉄損の電

磁界解析による結果を示す。低回転では鉄損が支配的であるため少極の方が低損失であるが、中回転では弱め磁束制御の影響によって銅損が支配的となるため、多極の方が総損失では最も低い。高回転になると、少極による低鉄損化と多極による低銅損化がバランスして図5(e)ではどのモデルでもほぼ同等の損失となっている。

このシステムでは、最大トルク及び最大回生電力の短時間定格と、高回転まで連続定格を維持するための弱め磁束制御に必要な電流の低減に着目して極数を選定している。

4. む す び

エンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの特長とモータの電磁気設計について述べた。48V-ISGシステム用モータでは、弱め磁束制御に必要な電流が連続定格や効率特性に対する影響度が高いため、多極化した集中巻構造を採用した。これによって、幅広い動作領域で全ての要求仕様を満足する48V-ISGシステムを開発できた。今後は、更なる小型・軽量・高出力化に向けて、技術開発を推進していく。

参 考 文 献

- (1) 藤田暢彦：ベルト駆動式モータジェネレータ，三菱電機技報，90，No.3，199~202 (2016)
- (2) 吉澤敏行，ほか：車載用発電電動機の進化，電気学会自動車研究会，VT-18-002，7~11 (2018)