

将来の世界の成長と共存をもたらす環境とエネルギー技術

—— 世界最高性能の次世代電気自動車を実現する新モータドライブ技術 ——

New Motor Drive with High Performance for Next Generation Vehicle

堺 和人*

1. はじめに

良好な地球環境を実現する低炭素社会へのシフトと、限られたエネルギー資源の有効利用を目的に実用化を目指した研究開発が行われている。電力分野では太陽光・風力のグリーンエネルギーシステムやスマートグリッド、社会・交通分野では電気推進やLED転換などの省エネルギーシステムがある。これらにはパワーエレクトロニクス技術がキーとなる。交通分野では電気推進システムのハイブリッド化や転換が進められおり、自動車、鉄道、船舶のハイブリッド化、電気自動車の実用の開発が行われている。ここでは、電気自動車の実用化と機器の省エネルギーに大きく貢献できる新方式のモータドライブシステムを紹介する。

CO₂等の排ガスの環境問題を改善するため、電気自動車(EV)、ハイブリッド自動車(HEV)が急速に開発されてきた。HEV、EVでは、モータがエンジンの代替となり、モータの性能は車の走行性能、燃費に大きく影響する。したがって、モータの性能がHEVの実用化・製品化の重要なカギとなる。

本稿では、EVやHEVに適した新しいモータとして、小型・高出力、広い運転範囲で高効率の永久磁石リラクタンスモータ(PRM)、および可変磁力メモリモータについて述べる。

2 ハイブリッド自動車用モータ

2.1 自動車駆動用モータ

HEV、EVでは、モータがエンジンの代替となり、モータの性能は車の走行性能、燃費に大きく影響する。したがって、モータの性能がHEVとEVの実用化の重要なカギとなる。一般的な家電、産業用モータでは定格点の特性を満たす設計が行われる。一方、HEV、EV用モータでは、自動車の運転状況に応じてトルク、速度が変化する。そのため定格特性は「点」ではなく、「面」で表される。したがって、モータは運転範囲の「面」全体で良好な特性が要求される。

これを含めて自動車用モータに要求される特性、重要事項は以下である。

- ①小型で高出力
- ②低速域では短時間で最大トルクを発生
- ③中速～高速域では最大出力で広範囲の可変速運転
- ④電源（バッテリー）の電圧と電流制限下で高出力
- ⑤無負荷及び軽負荷状態でも低損失
- ⑥モータコストは安価

①～④は(1)式で表わされるシステム性能指標で評価できる。

$$\sigma_{ev} = \frac{\text{出力}}{\text{モータ体積}} \times \frac{1}{kVA} \times \text{可変速比} \quad (1)$$

そこで、小型・高出力、広範囲の可変速運転、高効率を全て満たすことを実現した新方式の永久磁石リラクタンスモータ(PRM)が開発され¹⁾²⁾、フォード自動車、日野自動車、トヨタ自動車のHEVに本技術が適用されている。以下にPRMモータの概要について述べる。

2.2 PRMの基本構成と特性

PRMの基本構成を図1に示す。PRMは、リラクタンスモータと永久磁石(PM)モータを同一断面上に複合した新規のモータであり、リラクタンストルクを主導とし、永久磁石と電流によるトルク(PMトルク)の両方を発生する。大きなリラクタンストルクを発生させるため磁気異方性の強い形状とし、同時に永久磁石をV字状に回転子鉄心内に配置して永久磁石の磁束を集中させて効果的に作用させる。また、要求される特性に応じて図1に示すように回転子は数種の形態がある。

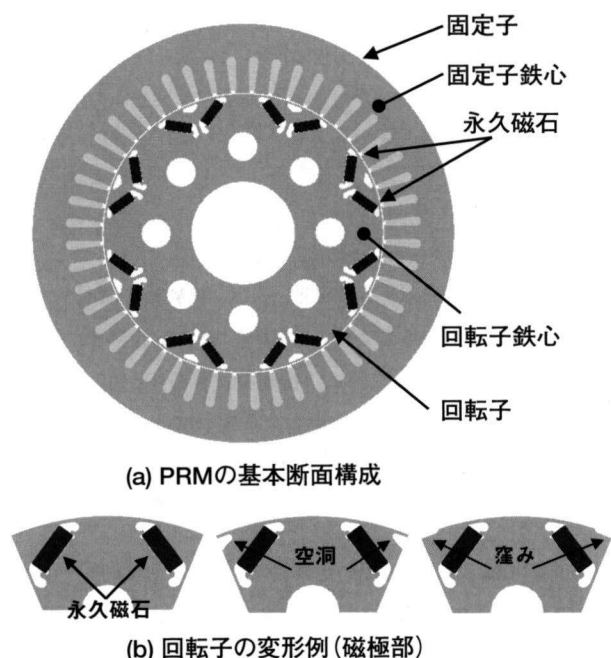


図1 PRMの基本構成
磁気異方性の強い回転子鉄心形状とV字状に配置した永久磁石

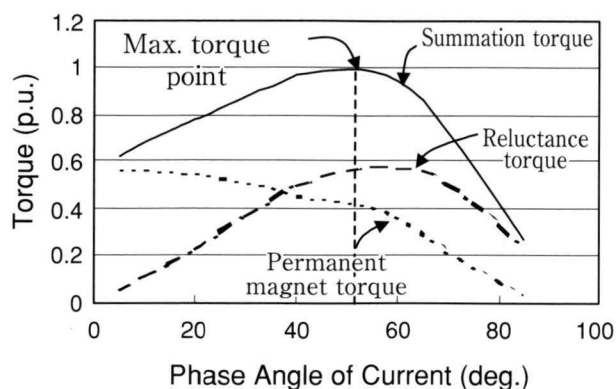


図2 PRMのトルク特性
リラクタンストルクとPMトルクを6:4の比で発生

代表的なPRMのトルクをリラクタンストルクとPMトルクとして分離すると図2に示すように約6:4の比になる。PRMは電流位相を進めた状態(PMモータでは弱め磁束制御時)でもPMトルクを有効に利用している。このようにPRMはリラクタンストルク、PMトルクとも最大に利用して高トルク化を達成している。また、回転時に永久磁石及び鉄心の遠心力が回転子鉄心に作用するが、PRMは遠心力による応力を分散して応力集中を緩和する鉄心形状としている。これより、高速化、回転子外径の拡大も可能である。

車の最大駆動性能としては低速域では一定の最大トルク、中～高速域は一定の最大出力が要求される。これは電気入力としては、電源の電流制限は低速域で要求される最大トルク時の電流になり、電源の電圧上限は中～高速域の最大出力時の電圧で決まる。電流と電圧の上限値

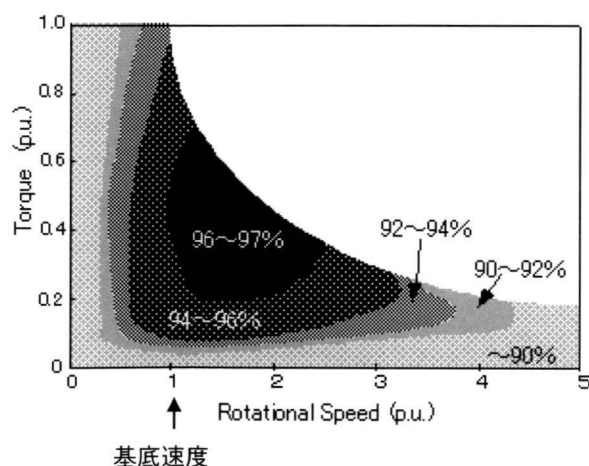


図3 PRMの運転特性
広い可変速運転範囲(最高速は基底速度の5倍)と高効率(最高効率97%)

を小さくできれば、必要なバッテリー容量、インバータ容量を最小限にできる。すなわち、最小の電圧と電流で最大トルク特性と最大出力特性を両立できることが重要である。PRMは励磁電流成分により電圧を広範囲に調整できるので、任意の運転ポイントで要求されるトルクと出力に応じて電圧と電流を最適値にできる。これにより図3に示すように基底速度の5倍(可変速比5)までの広い可変速域で大きな出力を得られ、モータで97%の最高効率と広い運転範囲で高効率が得られている。

PRMは前記に述べたように性能指標の各項目とも高い数値となり、高い性能が得られる。PRMは電源電圧と電流を最適に利用することができ、これにより広い可変速運転と広い運転範囲で高効率が得られことができる新しいモータと言える。

3. 省エネルギーの新原理モータ

HEV, EV, 電車, エレベータ, 家電機器では高効率を得るため永久磁石モータが適用されている。これらは可変速運転するためモータは弱め磁束制御を用いており、中～高速回転域や軽負荷時で効率が低下する課題がある。PRMモータはその一つの解である。しかし、真に限界まで省エネルギーを達成するには低速～高速、軽負荷～高負荷の全運転範囲で高効率を可能とする真に優れた可変速モータの創出が必須となる。これらの課題をブレイクスルーする新技術として、永久磁石の磁化を直接的に変化させるメモリモータ³⁾の概念が発表された。

その後、東芝が永久磁石の磁化を変化させながら運転可能な可変磁力メモリモータを実現し^{4)~7)}、まずは家電製品の洗濯機に適用して世界で初めて実用化した。ここでは、新原理の可変磁束メモリモータの概要について紹介する。

3.1 モータの動作原理

可変磁力用磁石と固定磁力磁石を並列に配置した原理モデルの回転子を図4に示す。この原理モデルでは磁極間の半径方向に可変磁力磁石を配置し、可変磁力磁石で挟み込むように磁極中央部に固定磁力磁石を配置している。可変磁力磁石は低保磁力、固定磁力磁石は高保磁力の磁気特性の磁石を適用し、図5に代表的な磁気特性を示す。永久磁石の磁化特性は(2)式となり、磁束密度を不可逆的に変化させるために外部磁界で磁気分極 J を変化させる。

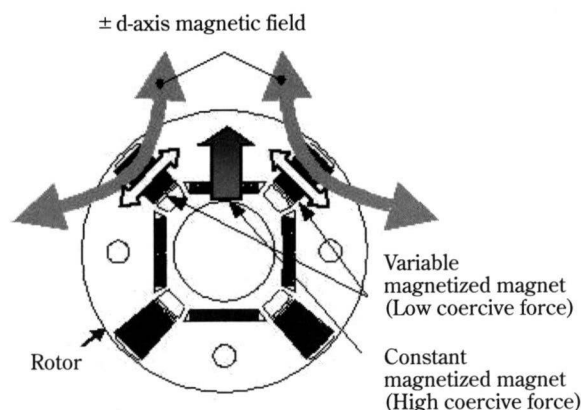


図4 可変磁力メモリモータの基本構成

$$B = \mu_0 H + J \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 B ：磁束密度 (T)， μ_0 ：真空の透磁率，
 H ：磁界 (A/m)， J ：磁気分極 (T)

初期の増磁状態では、固定磁力磁石と可変磁力磁石の磁束を加え合せになるように磁化される。図6の可変磁力磁石の磁気特性を用いて動作を説明する。モータの磁気回路中での可変磁力磁石の動作点がAにある。永久磁石による総鎖交磁束数を減少させる減磁動作は以下となる。電機子巻線に負のd軸電流を流す。負のd軸電流による磁界により可変磁力磁石は不可逆減磁して磁束密度は低下し、動作点はB点に変化する。さらにd軸電流を増やすと可変磁力磁石の動作点はC点に移動して磁束密度は0になる。さらに負のd軸電流を増加すると可変磁力磁石の極性が反転してD点まで逆方向に磁化する。磁化電流を遮断すると、動作点はE点になり、逆方向の磁束が発生する。この状態では、永久磁石による総鎖交磁束数は固定磁力磁石による鎖交磁束数と可変磁力磁石による鎖交磁束数の差になり、総鎖交磁束数を著しく減少させることができる。次に総鎖交磁束数を増加させる増磁動作について説明する。正のd軸電流を流し、反転した可変磁力磁石を不可逆減磁させる。F点で可変磁力磁石の磁束量は0になる。さらに正のd軸電流を増加すると、極性が反転し初期の磁化方向に磁化してG点まで磁化すると元の最大の磁束量が得られる。この状態では、永久磁石による総鎖交磁束数は固定磁力磁石と可変磁力磁石の鎖交磁束数の和になる。

3.2 磁束変化特性

本新方式モータにおいて、永久磁石の鎖交磁束が増加する動作（増磁動作）と、鎖交磁束が減少する動作（減磁動作）について、図4の原理モデルの解析結果を用いて説明する。固定磁力磁石の磁化方向はd軸方向であり、可変磁力磁石の磁化方向はq軸に対して直角方向であ

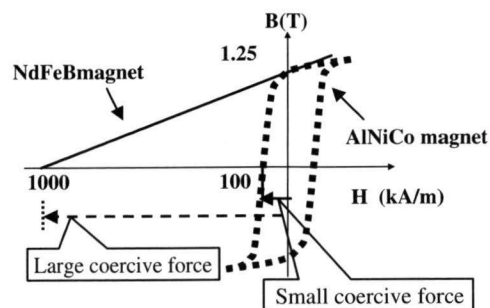


図5 可変磁力用永久磁石の磁気特性

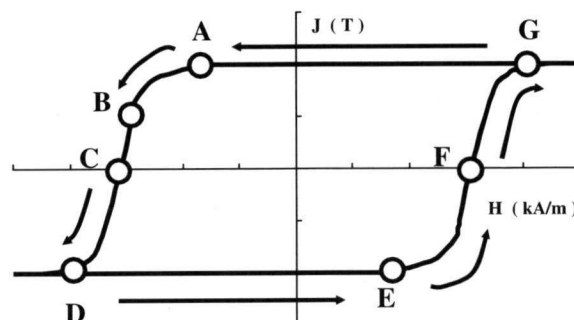


図6 可変磁力磁石の磁気特性上の動作点の変化

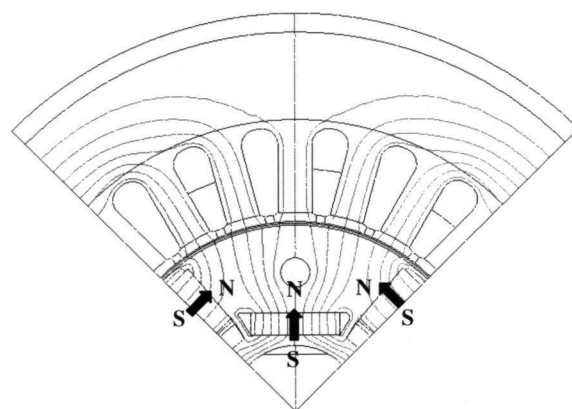


図7 最大鎖交磁束状態

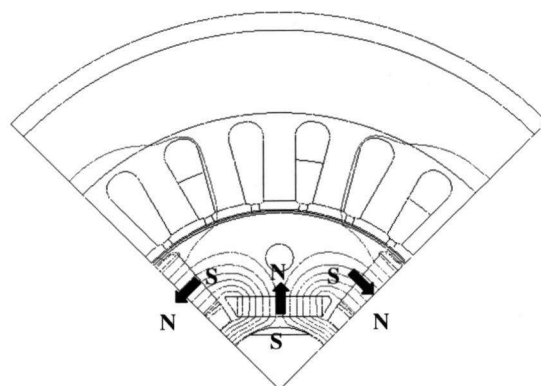


図8 最小鎖交磁束状態

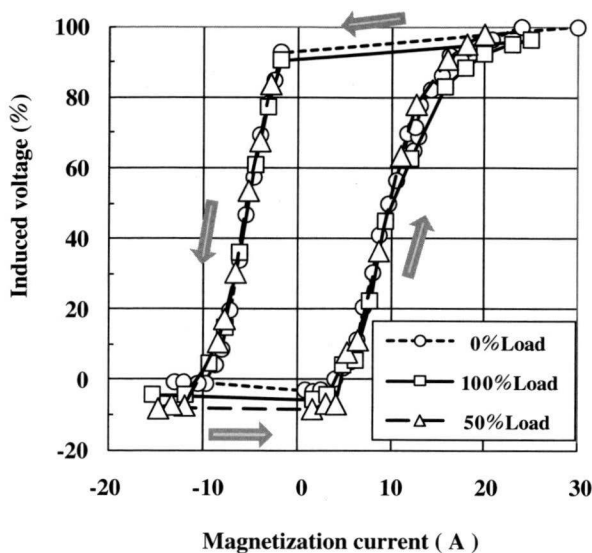


図9 磁化によるモータ電圧変化

る。増磁動作で鎖交磁束が最大の状態の磁束分布を図7に示す。可変磁力磁石と固定磁力磁石の磁束が加え合になり、鎖交磁束が増加していることがわかる。減磁動作で鎖交磁束が最小の状態の磁束分布を図8に示す。可変磁力磁石と固定磁力磁石の磁束が固定子では相殺し、回転子では加え合になる。すなわち、永久磁石の磁束が回転子内に閉じて分布した様になっている。

3.3 誘起電圧の可変特性試験

永久磁石による鎖交磁束の変化を検証するために、回転させた状態でd軸電流を流して可変磁力磁石を磁化させる。d軸電流の通電時間は極短時間でよく、10msのパルス的な電流で磁化を行っている。永久磁石による鎖交磁束は誘導電圧として測定する。図9に原理検証機における磁化後に測定した誘導電圧と磁化電流に関係を示す。試験は始めに可変磁力磁石と固定磁力磁石が加え合わせになる方向に磁化し、誘導電圧は最大となり、100%とする。次に負のd軸電流で可変磁力磁石の磁化を行って永久磁石の磁束量を減少させる。減磁させた後、さらに負のd軸電流を増加して可変磁力磁石の極性を反転させる。このときに永久磁石による総鎖交磁束数は最小になり、誘導電圧はほぼ0である。つぎに正のd軸電流による磁化を行い、永久磁石による鎖交磁束数を増加させて誘導電圧を大きくする。この過程では、正のd軸電流で可変磁力磁石を減磁し、さらに正のd軸電流を増加して再度可変磁力磁石の極性を反転させる。これにより増磁して誘導電圧は約100%になってほぼ飽和した。この試験より原理検証機の誘導電圧は0～100%の範囲で任意に可変できることを実証された。また、永久磁石による総鎖交磁束数と等価な誘導電圧は磁化電

流に対してヒステリシスループで変化することが明らかになった。さらに負荷状態においても同様に磁化変化が実証されている。また、定格トルクで駆動できることが試験で確認され、実現化が実証されている。さらに、永久磁石によるトルクと併用してリラクタンストルクも発生できる可変磁力モータ^{6) 7)}が開発されている。最大トルクは数百Nmであり、自動車用モータレベルの高出力密度が得られている。

また、本可変磁力モータ技術をベースにして、2009年世界で初めて実用化した可変磁力モータとして東芝の洗濯機ZABOONに搭載された。洗濯機は洗いと脱水では回転数は約30倍も変わるため磁力を可変して運転することにより大幅な省エネルギーを実現している。

4. まとめ

ハイブリッド自動車の実用化に貢献した新方式のPRMモータ、さらに次世代自動車や省エネルギーで期待される新原理の可変磁力メモリモータの概要を紹介した。

将来は環境とエネルギーの観点から省エネルギーが最も重要となり、モータ、インバータ、制御からなるパワーエレクトロニクス技術による革新が始まる。今後は真に優れたポテンシャルを持ったモータシステムや電磁応用とパワーエレクトロニクスを融合したパワーエレクトロマグネティクス技術に関する研究を行う予定である。

尚、本稿の内容では参考文献に示すように東芝が発表した論文を引用している。

参考文献

- 1) 堀和人・高橋則雄・霜村英二・新政憲・中沢洋介・田島敏伸：「可変速特性に優れた電気自動車用永久磁石式リラクタンストルクの開発」, 電気学会論文誌D, Vol.123, No.6, pp.681-688 (2003).
- 2) 堀和人・萩原敬三・平野恭男：「ハイブリッド自動車用高出力・高効率の永久磁石リラクタンストルク」, 東芝レビュー, Vol.60, No.11, pp.41-44 (2005)
- 3) V. Ostovic, "Memory Motors" IEEE Industry Applications Magazine, Jan./Feb., pp.52-61 (2003)
- 4) 堀和人・結城和明・橋場豊・高橋則雄：「可変磁力メモリモータの原理と基本特性」, 電気学会産業応用部門大会, 3-10 (2009-8).
- 5) K.Sakai, K.Yuki, Y.Hashiba and N.Takahashi: "Principle of the variable-Magnetic-Force Memory Motor", Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems LA6A-1 (2009).
- 6) 堀和人・結城和明・三須大輔・高橋則雄・橋場豊・松岡佑将・大坪洋輔：「リラクタンストルク併用可変磁力メモリモータ」, 電気学会全国大会, 5-012 (2010-3).
- 7) K.Sakai, D.Misu, K.Yuki, and K.Yasui: "New Generation Motor for Energy Saving", Proc. of International Power Electronics Conference, pp.1354-1358 (2010).