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モータの開発

正員 堺 和人* 非会員 高橋 則雄*
正員 霜村 英二* 正員 新 政憲*
正員 中沢 洋介* 正員 田島 敏伸**

Development of Permanent Magnet Reluctance Motor Suitable for Variable-Speed Drive for Electric Vehicle

Kazuto Sakai*, Member, Norio Takahashi*, Non-member, Eiji Shimomura*, Member,
Masanobu Arata*, Member, Yousuke Nakazawa*, Member, Toshinobu Tajima**, Member

Regarding environmental and energy issues, increasing importance has been placed on energy saving in various systems. To save energy, it would be desirable if the total efficiency of various types of equipment were increased. Recently, a hybrid electric vehicle (HEV) and an electric vehicle (EV) have been developed. The use of new technologies will eventually lead to the realization of the new-generation vehicle with high efficiency.

One new technology is the variable-speed drive over a wide range of speeds. The motor driving systems of the EV or the HEV must operate in the variable-speed range of up to 1 : 5. This has created the need for a high-efficiency motor that is capable of operation over a wide speed range.

In this paper, we describe the concept of a novel permanent magnet reluctance motor (PRM) and discuss its characteristics. We developed the PRM, which has the capability of operating over a wide speed range with high efficiency. The PRM has a rotor with a salient pole, which generates magnetic anisotropy. In addition, the permanent magnets embedded in the rotor core counter the q-axis flux by the armature reaction. Then, the power density and the power factor increase. The PRM produces reluctance torque and torque by permanent magnet (PM) flux. The reluctance torque is 1 to 2 times larger than the PM torque. When the PRM operates over a constant-power speed range, the field component of the current will be regulated to maintain a constant voltage. The output power of the developed PRM is 8 to 250 kW. It is clarified that the PRM operates at a wide variable-speed range (1 : 5) with high efficiency (92-97%).

It is concluded that the PRM has high performance over a wide constant-power speed range. In addition, the PRM is constructed using a small PM, so that we can solve the problem of cost. Thus, the PRM is a superior machine that is suited for variable-speed drive applications.

キーワード：リラクタンスモータ，永久磁石電動機，発電機，可変速，高効率，ハイブリッド自動車，電気自動車，永久磁石
Keywords: reluctance motor, permanent magnet motor, generator, variable speed, high efficiency, hybrid electric vehicle, electric vehicle, permanent magnet

1. はじめに

エネルギーの有効利用と排出される CO₂ の削減は将来にわたり最も重要な課題の一つである。このため、システムは総合効率を高めることが要求される。単体で一つの定格点のみ効率の高い機器をシステムに組み込んでも、システムの総合効率を大きく向上させることは困難である。すなわち、負荷状態に応じてシステムの最適点で運転することが総合効率を向上させることにつながる。したがって、

* (株) 東芝 電力・産業システム技術開発センター
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4
Power and Industrial Systems R&D Center,
Toshiba Corporation

** (株) 東芝 自動車システム技術開発センター
〒105-8001 東京都港区芝浦 1-1-1
Automotive Systems Development Center,
Toshiba Corporation
1-1-1, Shibaura 1-chome, Minato-ku, Tokyo 105-8001

システムに組み込まれる電動機や発電機は一定な回転速度ではなく、負荷状態に応じてシステムの最適動作点になるように可変速で運転されることになる。

このような代表的なシステムとしては、電気自動車 (EV)、ハイブリッド電気自動車 (HEV)、電車、電気推進船、風力発電システム等がある。

特に HEV, EV では総合運転効率を向上するため広い可変速範囲と小型・高効率を兼ね備えた回転機が望まれている。そこで、これらを達成するためリラクタンストルクを主とした永久磁石式リラクタンスモータ (PRM: Permanent magnet Reluctance Motor) を提案している^{(1)~(7)}。

本論文では、新規回転機である PRM の動作原理、基本構成、特徴、基本特性について論じ、試験により PRM は優れた可変速特性を有することを明らかにしている。

2. 高効率で広い可変速特性を満たすための条件

〈2・1〉 小型・高効率化と可変速特性 回転機の小型化は体積当りの出力を高くすることを意味する。回転機の出力式は (1) 式で表される。その方法として、回転角速度 ω の高速化、比電気装荷 ac を高くするための冷却性能の向上、比磁気装荷 B_g の向上がある。

$$P = k\omega B_g ac D^2 L \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P : 出力、 k : 係数、 ω : 回転角速度、 B_g : 比磁気装荷、 ac : 比電気装荷、 D : 回転子外径、 L : 回転子鉄心長

誘導機、直流機、巻線型同期機は回転子にコイルがあるため冷却と遠心力に対する強度が問題となり、小型化、高効率化が困難である。一方、表面磁石型回転機 (SPM)、埋め込み磁石型回転機 (IPM)^{(8)~(11)} は回転子に永久磁石を設けるのみで界磁を形成できるので、小型・高効率化が容易である。これらの永久磁石を利用した回転機とリラクタンス回転機 (RM) の回転子の形状を図 1 に示す。

HEV, EV は小型・高出力のみでなく、可変速特性が最も重要となる。

可変速運転の性能指標として可変速範囲があり、基底速度と最高速度の比で示されている。一般的な HEV, EV 用電動機では 1:3 以上の可変速範囲が要求されている。

この可変速範囲は、基本的には回転機の体格、出力ではなく、インバータ電源の容量に影響することになる。可変速運転を行なうドライブシステムとしての有効利用率 ζ を (2) 式で表す。

$$\zeta = \frac{P_{\max}}{\sqrt{3}V_{\max}I_{\max}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $P_{\max}$: 可変速時の最大出力、 $V_{\max}$: インバータの最大出力電圧、 $I_{\max}$: インバータの最大出力電流

$I_{\max}$ は低速領域の最大トルク時に必要な電流であり、運転領域内で最大値となる。 $V_{\max}$ は基底速度以上の中高速度領域で電圧の上限値となり、運転領域で最大値となる ζ が高い値になるほど、可変速で運転するシステムの電源容量

図 1 各種回転子の形状
Fig. 1. Rotor configurations.

図 2 各種回転機の可変速特性
Fig. 2. Performance of machines at variable speed.

が小さくなり、小型化となる。

インバータ電源を同一容量にしたときの図 1 の各種回転機の一般的な運転特性を図 2 に示す。電気自動車用モータを想定しており、出力は 20~100 kW 程度となる。特に SPM は可変速範囲が狭く、IPM^{(12)~(13)} になると可変速範囲が拡大されることがわかる。

〈2・2〉 誘導起電力に関する問題 エンジン等の他の回転機と組まれて高速回転で連れ回されるときに永久磁石回転機は永久磁石の鎖交磁束による誘導起電力が発生する。この誘導起電力が IGBT パワー素子、コンデンサ等の耐電圧 E_{pd} 以上となり、回路部品を破損するため、永久磁石の磁束鎖交数は (3) 式で示す値に制限される。

$$\psi_{pm} \leq \frac{E_{pd}}{\omega_{e\max}} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ψ_{pm} : 永久磁石の磁束鎖交数、 E_{pd} : 電源回路の耐電圧、 $\omega_{e\max}$: 最高回転角速度

また、インバータ電圧の最大値で可変速時の回転機の電圧が制限される。そこで、永久磁石の誘導起電力がインバータ最大電圧に達すると、弱め磁束制御により電圧を制限値内に抑え込む^{(8)~(11)}。(4) 式を満たす $\omega_{e\max}$ が回転速度の上限値となり、回転機の可能な運転範囲は $0 \sim \omega_{e\max}$ となる。

$$\omega_{e \max} = \frac{V_{\max}}{\Psi_{pm} - L_d I_{\max}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 L_d : d 軸インダクタンス、 $I_{\max}$: 最大電流

さらに、永久磁石回転機がエンジン等で連れ回される運転状態では、永久磁石の誘導起電力による制動トルクを 0 にするため誘導起電力が電源電圧以下となるように無効電流 (d 軸電流のみ) I_{t0} を流す必要がある。

$$I_{t0} = \frac{\Psi_{pm} - \frac{V_{\max}}{\omega_e}}{L_d} \dots\dots\dots (5)$$

この連れ回り状態の運転範囲および運転時間が長ければ、システムの総合運転効率は低下することになる。

SPM は永久磁石の鎖交磁束と電流の作用でトルク (磁石トルク) を発生する。したがって、トルクが永久磁石の磁束に依存しているため Ψ_{pm} は大となり、低透磁率の永久磁石を表面に配置するため L_d は小となる。(5) 式より、 I_{t0} が大きくなり、高速回転での無負荷損失が問題となる。そこで、磁性リング式磁石回転機 (MR-PM)⁽¹⁴⁾ は Ψ_{pm} 、 L_d とともに大とし、良好な可変速特性が得られるとともに I_{t0} を低減することが可能となっている。

IPM も同様に磁石トルクを主とすると Ψ_{pm} が大となり、損失を低減するには L_d を大きくする断面形状が要求される。しかし、 L_d が大きくなると L_q/L_d が小となりリラクタンストルクを大きくできないことになる。

すなわち、大きな Ψ_{pm} と小さな L_d ($\Psi_{pm} \gg L_d I_{\max}$) の機器ではトルクは大であるが可変速特性は狭くなる。一方、大きな Ψ_{pm} と大きな L_d ($\Psi_{pm} \approx L_d I_{\max}$) 機器では広い可変速特性が得られるが、リラクタンストルク ($L_q - L_d$) $I_d I_q$ は小となる。IPM ではトルク特性と可変速特性が相反する特性になり、両立が困難であることがわかる。

3. PRM の概念と基本特性式

RM は励磁電流成分の調整で磁束を可変できるので可変速運転に適している。しかし、回転子歯 (磁氣的に凸) の磁気飽和、実用的なエアギャップ長の確保等で回転子歯間の溝 (磁氣的に凹) の漏れ磁束が増加して q 軸磁束が大きくなるため、低出力で低力率となる大きな問題がある。尚、PRM は RM の d-q 軸とし、SPM と IPM の d-q 軸とは軸が逆の関係になり、ここでは、PRM の d-q 軸は dr-qr 軸で表す。

PRM は RM の高出力化、高力率化を図り、可変速特性に優れた回転機を実現するものである。PRM は回転子に磁氣的に強い異方性を持たせる断面形状にするとともに、qr 軸の電機子反作用磁束を相殺させるための永久磁石の磁束を突極磁極の間の qr 軸に発生させて特性を向上させる。

永久磁石の鎖交磁束を考慮すると、qr 軸の等価的な磁束鎖交数は (6) 式で表され、値は Ψ_{pm} で調整できる。

$$\Psi_{qr} = L'_{qr} I_{qr} = L_{qr} I_{qr} - \Psi_{pm} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Ψ_{qr} : qr 軸の磁束鎖交数、 L'_{qr} : 等価的な qr 軸インダクタンス、 L_{qr} : qr 軸インダクタンス、 I_{qr} : qr 軸電流

永久磁石の磁束を等価的なインダクタンスに置き換えると、等価的な qr 軸インダクタンス L'_{qr} は (7) 式で表すことができる。

$$L'_{qr} = L_{qr} - \frac{\Psi_{pm}}{I_{qr}} \dots\dots\dots (7)$$

すなわち、永久磁石の磁束鎖交数 Ψ_{pm} は L'_{qr} を極めて小さくして等価的に突極比 L_{dr}/L'_{qr} を高くする作用があると考えられる。したがって、PRM は Ψ_{qr} を小として等価的に突極比を向上する RM である。

PRM の特性式を RM の特性式から導出する。

$$T = k_t (\Psi_{dr} I_{qr} - \Psi_{qr} I_{dr}) \\ = k_t [L_{dr} I_{dr} I_{qr} - (L_{qr} I_{qr} - \Psi_{pm}) I_{dr}] \dots\dots\dots (8)$$

$$V^2 = (\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2) \omega_e^2 \\ = [(L_{dr} I_{dr})^2 + (L_{qr} I_{qr} - \Psi_{pm})^2] \omega_e^2 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 T : トルク、 k_t : 比例定数、 V : 電圧、 Ψ_{dr} : dr 軸の磁束鎖交数、 I_{dr} : dr 軸電流、 L_{dr} : dr 軸インダクタンス

(8) 式の第一項は正のトルク、第二項は負のトルクを発生することを示している。第二項において、永久磁石の鎖交磁束は qr 軸磁束を減少させることにより負のトルクを減少させている。

巻線抵抗の電圧降下を無視すると、(10) 式の条件で (9) 式から dr 軸電圧は 0 となる。このとき、電圧は $L_{dr} I_{dr}$ のみからなるので I_{dr} の調整で理想的には最高回転速度は無限となる。

$$L_{qr} I_{qr} - \Psi_{pm} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

最大トルク時に電流及び磁束量は最大になるので、最大トルク時に (10) 式をほぼ満たす機器定数とする。したがって、この機器定数では最大トルクは (11) 式となるので、最大トルク時に (10) 式を満たしながら I_{qr} を大きな値にできれば最大トルクは増大できる。

$$T_{\max} = k_t L_{dr} I_{dr} I_{qr} \dots\dots\dots (11)$$

Ψ_{pm} は可変速範囲における電圧制限で最大値が設定されるので、 L_{qr} を小さくできれば、(10) 式より I_{qr} を大きく取れ、(11) 式から電圧制限内で大きなトルクが得られる。

また、トルクを同一とすると、 L_{qr} を小にできれば (10) 式から Ψ_{pm} も小にできる。したがって、永久磁石の誘導起電力はより高い回転速度で電圧制限値に到達するので可変速範囲を拡大できる。同時に永久磁石の鎖交磁束を小にできるので永久磁石の量を削減して低コスト化が可能となる。

L_{dr} に関しては、(11) 式から L_{dr} ができる限り大きければ、高トルクが得られる。

以上より、 L_{qr} をできる限り小さくし、(10) 式を満たす Ψ_{pm} を設定し、同時に L_{dr} を大きくすることが広範囲の可変速運転と小型・高出力化を可能とする。

一方、IPM から特性向上を考えると PRM は次のように論じることができる。最高速度で電圧制限値以下となる (3) 式の条件と (5) 式の I_{t0} に代表されるように、可変速特性には妨げとなる永久磁石の鎖交磁束を少なくすると PM トルクが低減する。そこで、 L_q/L_d 比を高くしてリラクタンストルクを大幅に増加させる。ここで L_d を小さくすることを考えると、 L_q/L_d 比が高くなるとともに (10) 式を満たすような小さな Ψ_{pm} と小さな L_d が得られる。できるだけ小さな L_d が得られれば、リラクタンストルクが増加するとともに、(10) 式を満たすような Ψ_{pm} を小さくできる。すなわち、高トルクを維持したまま可変速特性を向上できる。さらに、大きな L_q が得られるように磁路を確保して磁気抵抗を極力小とする断面形状にすることにより、リラクタンストルクは向上する。

これにより、PRM は IPM として考えると大きな L_q と最大トルク時に (10) 式をほぼ満たす小さな Ψ_{pm} と小さな L_d の機器定数を有する回転機を実現するものである。大きな L_q がトルクを、小さな Ψ_{pm} と小さな L_d とが主に可変速特性を支配する。

これらの式を満たす機器定数を二次元断面形状で表したものが PRM であり、図 3 にその基本断面形状を示す。

回転子断面の qr 軸中央部の回転子鉄心に穴を設けて高磁気抵抗の部分形成する。一方、磁極となる dr 軸中央部の鉄心は磁気飽和を考慮して十分な幅の磁路を形成し、低磁気抵抗部を形成する。永久磁石は穴に沿って回転子鉄心内に V 字状に挿入される。永久磁石を V 字状に配置することにより qr 軸の永久磁石の磁束を高めることができる。穴と永久磁石間にある内部補助磁路は永久磁石の磁路とな

図 3 PRM の構成

Fig. 3. Structure of PRM.

り、永久磁石の磁束がこの磁路を通り、固定子の電機子巻線と鎖交する。同時に電機子電流による dr 軸磁束の磁路となる。

4. PRM の特性検討

〈4・1〉 トルク比と電気特性 PRM の運転時の特性を明らかにするために (8) のトルク式、(9) の電圧・電流式を用いて可変速特性のシミュレーションを行う。また、IPM と比較して特性の違いを明確にする。可変速特性のシミュレーションはリラクタンストルクと磁石トルクの比を変化させて行われ、このときの機器定数を表 1 に示す (正規化した機器定数については付録を参照方)。

リラクタンストルクと磁石トルクのトルク比が 1.5 : 8.5 の IPM の運転特性を図 4 に示す。図 4(a) に示すように電流 I は基底速度以上になると減少するが、すぐに増加することがわかる。これは、図 4(b) の d 軸電流 I_d が基底速度以上で大きく増加しているためである。 I_d による弱め磁束制御で永久磁石の磁束を減少させて、図のように基底速度以上で q 軸電圧 V_q をほぼ一定に保っている。また、最高回転速度ではほぼ最大電流を必要とする。永久磁石の誘導起電力は最高回転速度において定格電圧の 3.5 倍に達する。

一方、トルク比が 6.7 : 3.3 の PRM の運転特性を図 5 に示す。基底速度 1 以上から最高速度 5 まで定出力で良好な可変速特性が可能であることを示しており、電流 I は基底速度以上で減少している。図 5(b) に示すようにトルク電流である I_{qr} は速度に対してもほぼ一定になっている。最大トルクは電流位相角 $\gamma = 45^\circ$ のときに得られ、電流値は

$$I_{qr} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

となる。この電流値と PRM の機器定数より、

$$L_{qr}I_{qr} - \Psi_{pm} = -0.03$$

となる。値はほぼ 0 であるので高速になっても d 軸電圧 V_{dr} は極めて小さな値になっている。また、(10) 式を満たしているの理想的には無限の可変速範囲が得られる。 I_{dr} は励磁電流成分であり、基底速度以上では回転数の増加とともに減少させて、q 軸電圧 V_{qr} を一定に保っていることがわかる。永久磁石による誘導起電力は最高回転速度においても定格電圧の 1.7 倍程度に収まっている。これは、表 1 に示すように PRM の永久磁石の磁束鎖交数は IPM の 1/2

表 1 PRM と IPM の正規化した機器定数
Table 1. Normalized machine constants of PRM and IPM.

	Ψ_{pm} (p.u.)	L_{qr}, L_d (p.u.)	L_{dr}, L_q (p.u.)
PRM 6.7-3.3*	0.337	0.429	1.373
PRM 5-5*	0.434	0.498	1.251
IPM 1.5-8.5*	0.669	0.552	0.823

*Torque ratio : Reluctance torque—PM torque

まで小としているからである。同時に永久磁石の使用量も大幅に減るため低コストの回転機が実現できる。

以上より、最大トルク時に PRM は電流当りのトルクが最大となる電流位相角 (約 $\gamma = 45^\circ$) で運転され、回転機内の磁束量が最大となる最大トルク発生時において、 qr 軸の合成磁束を 0 とし、 dr 軸の励磁磁束のみの状態を作り出す。実際は、理想的な基本波磁束のみでなく、高調波磁束が残ることになる。

したがって、基底速度の最大トルク点から最大出力で可変速運転する場合、 I_{dr} 電流を絞って励磁磁束量を少なくして I_{qr} はほぼ一定で駆動する。これは、直流機の弱め界磁制御と同様な制御で運転することになり、永久磁石に減磁界を作用させて磁束量を減少させる IPM の弱め磁束制御とは異なる。

つぎに、可変速時の PRM と IPM の力率特性について論じる。図 6 は各回転速度の最大出力における力率を示している。IPM では、基底速度の 1~2 倍の間で力率は最高値となった後、中・高速になるに連れて力率は大きく低下している。これは、図 4(b) に示されるように I_d 電流が増加しているからであり、 I_d 電流は電圧を最大制限値内で維持するため永久磁石の磁束を弱めている。一方、PRM では、可変速領域において基底速度以上で力率は速度の上昇とともに向上している。基底速度の 2 倍で力率が 0.9 になり、基底速度 4~5 倍では力率は 1 の近傍になっている。

中・高速では電流は高周波となるため、図 4 と図 6 より中・高速領域で電流の増加する IPM は高周波による大きな損失を生じて、効率が低下することが予想される。

図 4 トルク比 1.5:8.5 の IPM の特性

Fig. 4. Characteristics of IPM with torque ratio 1.5:8.5.

図 5 トルク比 6.7:3:3 の PRM の特性

Fig. 5. Characteristics of PRM with torque ratio 6.7:3:3.

図 6 可変速における最大出力時の力率特性

Fig. 6. Power factor at variable speed.

また、IPM では永久磁石の鎖交磁束による誘導起電力 E_{pm} が過大であるため、実用上は永久磁石の鎖交磁束を許容制限値内に収まるまで小さくすることが考えられる。この場合、最大トルクを維持するために電流の増加、低・中速度時の力率の低下が生じるため、広い可変速範囲で高効率を得ることが困難であることが予想される。

以上より、PRM は中・高速領域において、力率が向上してほぼ 1 になることから IPM より高効率が得られることが予想される。

また、PRM は特に L_{qr} をさらに小さくできればトルクが増加し、力率も向上できるため、 L_{dr} のみでなく、 L_{qr} も特性を決める重要な要因である。

〈4・2〉 磁界解析による特性検討 シミュレーションでは集中定数系として全体の運転特性を把握することを行なった。ここでは、PRM の回転機内の磁氣的挙動の把握とトルクの算出を行なうために磁界解析を行なう。

対象とする PRM は最高出力 50~70 kW、最高速度 12,000~14,000 rpm で可変速範囲は 1:5 である。

解析で得られた PRM の 2 極分の領域における磁束分布を図 7 に示す。図 7(a) に示すように無負荷時の磁束密度はかなり低いことがわかる。エアギャップ磁束密度の基本波の最大値は 0.3 から 0.5 T である。このことから、無負荷時での鉄損が少なくなり、空転時の損失を小にできる。負荷時には、図 7(b) に示すように回転子の突極の磁極部分と dr 軸上の固定子鉄心の歯の部分に磁束が集中して磁束密度が高くなっていることがわかる。

磁界解析によるエネルギー変位法で得られたトルクを図 8 に示す。最大トルクは位相角 $\gamma = 45 \sim 50^\circ$ 近傍で生じている。このとき、PRM のトルクは 60% のリラクタンストルク成分と 40% の磁石トルク成分からなることがわかる。トルク解析結果から 6:4 のトルク比の PRM が得られており、PRM はリラクタンストルクを主とする回転機であることが明らかになった。

5. 試 験

〈5・1〉 インダクタンス 試作した出力 50~70 kW の

(a) No-load

(b) Maximum torque

図 7 PRM の磁束分布

Fig. 7. Flux distribution of PRM using FEM.

図 8 PRM のトルク成分

Fig. 8. Torque components of PRM.

PRM を駆動し、測定した電圧、電流特性から得られたインダクタンスを図 9 に示す。 L_{dr} は電流の増加により大きく減少し、 L_{qr} はほぼ一定であることがわかる。 L_{dr} の減少は、電流を増加すると鉄心の磁束密度が高くなり、透磁率が低下するためである。特に小型・高出力化のため回転機の体格をできる限り小さくするため、固定子鉄心歯とコアバックの磁気飽和の影響が大と考えられる。図 7(b) に示すように最大トルクを得るため最大電流が流れている状態では、固定子鉄心の磁束密度が 1.8~2.0 T 程度になっている。

図9 PRMのインダクタンス

Fig. 9. Inductance of the PRM.

図10 PRMの運転特性

Fig. 10. Performance of the PRM.

このように、鉄心が磁気飽和近傍の高い磁束密度の状態でもPRMは約3の高い突極比 (L_{dr}/L_{qr}) が得られている。

〈5・2〉可変速特性と効率 PRMは8kW~250kWの出力のものが開発され、EVまたはHEV用のPRMでは小型・高出力化が図られており、体積当りの出力は8~25 W/cm³を実現している。尚、算出時の体積は外径を固定子鉄心外径とし、軸方向長さを鉄心長とする円柱とする。この体積当りの出力を満たした代表的な50~70kWのEV用PRMの駆動特性を図10に示す。定出力範囲はほぼ1:5が得られている。最高効率は97%であり、90%以上の高効率の運転領域が広範囲に分布していることがわかる。

これらより、PRMは小型・高出力を確保しながら、広範囲で可変速運転が可能であり、低速から高速までの広範囲にわたり、軽負荷から高負荷まで高効率で運転できることが確認された。

6. 結 言

PRMの基本構成、動作原理、特性について論じた。PRMは高出力を確保しながら理想的には無限の可変速範囲が得られ、このような可変速に最適な機器定数を持つ回転機を実現化したものである。また、PRMは小型・高出力・高効率であり、しかも、直流機と同様に励磁電流成分を調整し

て弱め界磁制御が可能であるので、高効率で広範囲の可変速運転を実現できる。すなわち、PRMは広範囲で高効率を得られる高性能な可変速回転機の一つである。また、永久磁石量を低減できるので同時に低コスト化となる。

今後は、PRMは電機子漏れ磁束を低減してさらに L_{qr} を小とし、 L_{dr} を大とするような磁気回路の最適化によりさらなる高性能化が期待できる。

(平成14年5月21日受付, 平成14年12月27日再受付)

文 献

- (1) K. Sakai, K. Ohishi, K. Itou, Y. Nakazawa, and R. Kurosawa: "Characteristics of a reluctance motor with permanent magnets", 1998 National Convention Record, IEE Japan, No.5-32 (1998-3) (in Japanese)
堺 和人・大石浩司・伊藤 馨・中沢洋介・黒澤良一:「永久磁石式リラクタン্স電動機の基礎特性」, 平10電気学会大会, No.5-32 (1998-3)
- (2) K. Sakai, M. Takabatake, M. Arata, Y. Nakazawa, R. Kurosawa, and S. Amemori: "Permanent magnet assisted reluctance motor for enhanced efficiency and power", 1999 National Convention Record, IEE Japan, No.5-1 (1999-3) (in Japanese)
堺 和人・高島幹生・新 政憲・中沢洋介・黒澤良一・雨森史郎:「高効率・高出力の永久磁石式リラクタン্সモータの開発」, 平11電気学会大会, No.5-1 (1999-3)
- (3) Y. Nakazawa, R. Kurosawa, K. Sakai, and M. Arata: "A flux weakening control for permanent magnet reluctance motor", 2000 National Convention Record, IEE Japan, No.4-140 (2000-3) (in Japanese)
中沢洋介・黒澤良一・堺 和人・新 政憲:「永久磁石式リラクタン্সモータの弱め磁束制御」, 平12電気学会大会, No.4-140 (2000-3)
- (4) K. Sakai, M. Arata, and T. Tajima: "High-efficiency and high-performance motor for energy saving in systems", *Toshiba Review*, Vol.55, No.9, pp.58-61 (2000-9) (in Japanese)
堺 和人・新 政憲・田島敏伸:「省エネルギーシステムを生かす可変速・高効率モータ」, 東芝レビュー, 55, 9 pp.58-61 (2000-9)
- (5) K. Sakai, T. Hattori, N. Takahashi, M. Arata, and T. Tajima: "High efficiency and high performance motor for energy saving in systems", *Proc. IEEE PES Winter Meeting*, (2001-1)
- (6) K. Sakai, T. Takahashi, E. Shimomura, and M. Arata: "Permanent magnet reluctance motor suitable for variable speed drive for hybrid electric vehicle", *The Paper of Technical Meeting on Vehicle Technology, IEE Japan*, VT-02-11 (2002-3) (in Japanese)
堺 和人・高橋則雄・霜村英二・新 政憲:「可変速特性に優れたハイブリッド自動車用永久磁石式リラクタン্সモータ」, 電気学会研究, VT-02-11 (20002-3)
- (7) Y. Nakazawa: "A position sensorless control for permanent magnet reluctance motor", *The Paper of Technical Meeting on Vehicle Technology, IEE Japan*, VT-02-12 (2002-3) (in Japanese)
中沢洋介:「永久磁石リラクタン্সモータの回転センサレス制御」, 電気学会研究, VT-02-12 (20002-3)
- (8) T.M. Johns, G.B. Kliman, and T.W. Newmann: "Interior permanent-magnet synchronous motors for adjustable-speed drives", *IEEE T. Ind. Appl.*, Vol.IA-22, No.4, July/Aug., pp.738-747 (1986)
- (9) R.F. Schiferl and T.A. Lipo: "Power capability of salient pole permanent magnet synchronous motors in variable speed drive applications", *IEEE T. Ind. Appl.*, Vol.IA-26, No.1, Jan./Feb., pp.115-123 (1990)
- (10) W.L. Soong and T.J.E. Miller: "Field-weakening performance of brushless synchronous ac motor drives", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol.141, No.6, pp.331-340 (1994)
- (11) Y. Takeda, S. Morimoto, K. Ohyama, and A. Yamagiwa: "Comparison of control characteristics of permanent magnet synchronous motors with several rotor configurations", *T. IEE Japan*, Vol.114-D, No.6, pp.662-667 (1994-6) (in Japanese)

Japanese)

武田・森本・大山・山際:「PM モータの制御法と回転子構造による特性比較」, 電学論 D, 114, 6, pp.662-667 (1994-6)

- (12) T. Mizuno, Y. Higashi, K. Yamashita, T. Ashikaga, and Y. Hisamitsu: "Influences of emf harmonics on constant power operation range of PM motor for electric vehicle", *The Paper of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan*, RM-98-142 pp.133-138 (1998) (in Japanese)
水野孝行・東 義高・山下和男・足利 正・久光行正:「EV 用 PM モータの定出力運転範囲に与える巻線誘起電圧高調波の影響」, 電気学会研資, RM-98-142, pp.133-138 (1998)
- (13) Y. Honda, T. Nakamura, T. Higaki, and Y. Takeda: "Motor design considerations and test results of an interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicles", *Proc. IEEE IAS Annual Meeting*, pp.75-82 (1997-10)
- (14) K. Sakai and W. Washizu: "Concept of a new permanent magnet motor for flux weakening operation and analysis of the motor using FEM", *T. IEE Japan*, Vol.115-D, No.4, pp.436-443 (1995-4) (in Japanese)
堺 和人・鷲頭照雄:「弱め界磁制御に適した永久磁石電動機の検討と FEM による特性解析」, 電学論 D, 115, 4, pp.436-443 (1995-4)

付 録

シミュレーションにおける機器定数は下記のように正規化している。

$$\begin{aligned} V(p.u.) &= V/V_n, I(p.u.) = I/I_{\max}, T(p.u.) = T/T_{\max}, \Psi_{pm}(p.u.) = \omega_e \Psi_{pm}/V_n, E_{pm}(p.u.) = E_{pm}/V_n, \\ V_{dr}(p.u.) &= V_{dr}/V_n, V_{qr}(p.u.) = V_{qr}/V_n, I_{dr}(p.u.) = I_{dr}/I_0, I_{qr}(p.u.) = I_{qr}/I_0, \\ L_{qr}(p.u.) &= \omega_e L_{qr} I_0/V_n, L_{dr}(p.u.) = \omega_e L_{dr} I_0/V_n, V_d(p.u.) = V_d/V_n, V_q(p.u.) = V_q/V_n, \\ I_d(p.u.) &= I_d/I_0, I_q(p.u.) = I_q/I_0, L_q(p.u.) = \omega_e L_q I_0/V_n, L_d(p.u.) = \omega_e L_d I_0/V_n, \omega(p.u.) = \omega_e/\omega_b \end{aligned}$$

ここに, V_n : 定格電圧, E_{pm} : 永久磁石の誘導起電力, V_{dr}, V_{qr} : PRM の dr 軸電圧, qr 軸電圧, V_d, V_q : IPM の d 軸電圧, q 軸電圧, ω_b : 基底回転角速度, $I_0 = \sqrt{3}I_{\max}$.

堺 和人 (正員) 1959 年 1 月 6 日生まれ。1983 年 3 月

山口大学電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 電力・産業システム技術開発センターに所属。2003 年横浜国立大学客員助教授。工学博士。主として, 制御用モータ, 原子力・宇宙機器用モータ, 高速発電機, 電気自動車用ドライブシステムの研究開発, 電磁界解析に関する研究に従事。平成 3 年度, 5 年度電気学会論文発表賞。平成 7 年度日本電機工業会奨励賞。平成 9 年度科学技術省注目発明賞。

高橋 則雄 (非会員) 1973 年 11 月 28 日生まれ。1992 年 3 月 3 月宮城工業高校電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 電力・産業システム技術開発センターに所属。主として, 電気自動車用回転機, 高速回転機の研究開発, 回転機の構造・振動に関する研究に従事。

霜 村 英二 (正員) 1958 年 3 月 22 日生まれ。1982 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科修士課程終了。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 電力・産業システム技術開発センターに所属。主として, 電磁鋼板等の磁性材料の応用研究, 回転機の研究開発に従事。日本応用磁気学会会員。

新政 憲 (正員) 1958 年 8 月 4 日生まれ。1983 年 3 月東京大学大学院電気工学専攻修士課程終了。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 電力・産業システム技術開発センターに所属。主として, 永久磁石モータ, 分散電源システム, 超電導マグネットの研究開発に従事。

中 沢 洋介 (正員) 1965 年 8 月 1 日生まれ。1991 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程終了。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 電力・産業システム技術開発センターに所属。主として, パワーエレクトロニクスの研究開発に従事。

田 島 敏伸 (正員) 1950 年 11 月 25 日生まれ。1974 年 3 月東京工業大学電気工学科卒。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在, 自動車システム技術開発センターに所属, 主幹。主として, 自動車ドライブ事業推進業務, 産業用モータドライブシステムの業務に従事。