

薄型モータ用ステータの開発

Development of the Stator for Thin Electric Motor

新 博文*

Hirofumi ATARASHI

福田 武雄*

Takeo FUKUDA

高 尾 充 良*

Mitsuyoshi TAKAO

塚 本 宗 紀*

Toshinori TSUKAMOTO

要 旨

ハイブリッド自動車に搭載するモータの高効率化と小型化のために、筆者らはステータの巻線方式に重ね巻を採用し、薄型化と損失低減を実現した。I 字形状に分割したティースに、外周側から三機のノズルで巻線を行うことにより、編み込み形状の巻線端部を最短で形成し、線材長を低減した。一方、線材一本ごとに各一個のノズル穴を割り当てて整列したノズルと、スロット内の線材の移動を抑制する治具を併用して、占積率を向上させた。さらに、巻線端部に、内径の拡張と軸長方向の成形工程の二段階に分けたプレスを行い、巻線端部の高さを10mmに抑えた。この結果、損失が低減され、7%の運転効率向上を実現した。

ABSTRACT

For efficiency improvement and miniaturization of electric motor to be equipped in hybrid electric vehicle, lap winding was adopted as winding type of stator and reduction of thickness and loss of the motor was achieved. Three nozzles are utilized to wind from the outer circumference around I-shaped split cores, enabling the length of the braided winding overhang to be minimized, reducing the length of the winding. The use of multi-hole alignment nozzles and a jig for fixing the winding has increased the space factor. In addition, employing a two-step stamping process in which the first load is applied to increase the internal diameter and the second is applied in the axial direction has enabled the height of the winding overhang to be limited to 10mm. These have increased operation efficiency by 7%.

1. まえがき

近年、地球環境問題に対する関心の高まりにつれて、ハイブリッド自動車、燃料電池車などの低公害車への期待が高まっている。これらの車両において、駆動源となるモータに対するニーズは、高効率化や小型・軽量化による高トルク密度化、高出力密度化などが挙げられる。モータの損失低減や小型化を目的とした性能改善の手法として、従来の重ね巻から突極集中巻を採用する事例は、近年の論文発表でよく知られていることである^{(1)~(3)}。しかしながら、元々の磁束の有効利用率が高い重ね巻の構造を踏襲しながら性能改善手法を適用した研究は少ない。巻線方式に関して、突極集中巻と重ね巻の特徴を比較した(Table 1)。重ね巻の巻線係数は1.0であり、突極集中巻は0.866である。従って、ロータを同一とした場合、巻線電流を低減できるため、銅損を低減する効果がある。さらに、重ね巻は、突極集中巻に比べて

起磁力分布が正弦波であり、磁束変化の高調波成分が少なく、突極集中巻に対して鉄損や騒音が少ない利点もある。これらを勘案し、巻線端部が大きくなる課題があるものの、巻線係数と磁束高調波に優位性がある重ね巻を選択した。さらに、本研究では、モータの小型化と低損失化を主目的とした性能改善を行う手法として、鉄心構造と巻線製法に改良を加える。

Table 1 Comparison of winding types

Factor	Effect	Winding type	
		Lap winding	Concentrated winding
Winding overhang	Thickness	—	good
	Copper loss	—	good
Winding factor	Copper loss	good	—
	Iron loss	good	—
Harmonic wave of stator flux	Necessity of high voltage parts in inverter	good	—
	Torque ripple	good	—
	Noise	good	—

*栃木研究所

2. 開発のねらい

ステータに発生する損失は、銅損と鉄損(ヒステリシス損、渦電流損)に大別される。銅損は、電流の二乗と巻線抵抗の積で定まるため、これを低減するには、巻線抵抗を低減する方法と、巻線電流を低減する方法がある。重ね巻を採用することで巻線係数が向上し、巻線電流を低減可能である。巻線抵抗は、線材長に比例して増加し、断面積に反比例して減少する。巻線抵抗を低減するには、線材長を低減するか、スロット内の占積率の向上で実現できる。重ね巻では、太い線径の線材は採用しがたく、比較的細い線径の線材を用いて並列本数を増やすことによって、線材の合計断面積を増加させる。また重ね巻は突極集中巻に対して鉄損が少ない利点がある。そこで、重ね巻の利点を生かし、巻線端部の膨らみを改善し、モータの小型化と銅損の低減を行い、従来困難であった突極集中巻同等の巻線端部の高さ、インサータ巻同等の占積率を両立させることをねらいとした。本研究の技術目標を Fig. 1 に示す。

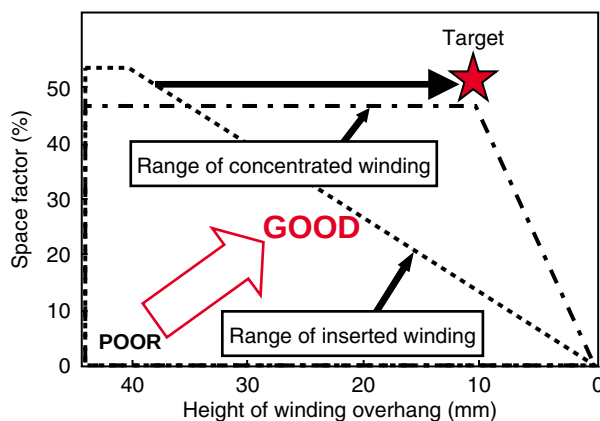


Fig. 1 Relation between space factor and height of winding overhang

3. 達成手法

3.1. 巻線端部の小型化と銅損低減の両立

巻線端部の小型化と高占積率を両立する手法として、Fig. 2に示す編み込み構造を巻線端部に形成することを考案した。従来のインサータ巻機による重ね巻では、同一のスロットに一相の巻線と他相の巻線の端部が重なるため、巻線端部の高さが増してしまう。これを Fig. 3 に示す。また、巻線端部を低くするために、束線を大きく湾曲させるとスロットに空隙(くうげき)が発生し占積率が低下してしまう。これを Fig. 4 に示す。これらを改善するために、一相の束線の周方向の巻終わり部分と、他相の束線の周方向の巻始め部分を、交互に編み込んだ束線を巻線端部に形成することによって、高い占積率と低い巻線端部を実現することが可能となる。また、編み込み部位置の調整

によって編み込み部の交錯層数を選択し、巻線端部の高さと占積率を任意に調整することを可能とした。この実現手法として、次の六項目を考案した。

- (1) 外周側から三機のノズルで巻線を行うことにより、編み込み形状の巻線端部を最短で形成する。
- (2) コアの I 字型分割構造により、外周側から巻線を行う。
- (3) 複数線材のグループ分割巻により、束線の屈曲性を向上する。
- (4) 多穴整列ノズルにより、スロット内の線材を整列させる。
- (5) 線材固定治具により、スロット内の占積率を向上する。
- (6) テンション力の軽いレーシングと、内径の拡張と軸長方向の成形工程の二段階に分けたプレスを組み合わせ、巻線端部の高さを低減する。

この結果、巻線端部の小型化と銅損低減を両立させ、モータの薄型化と損失低減を実現した。

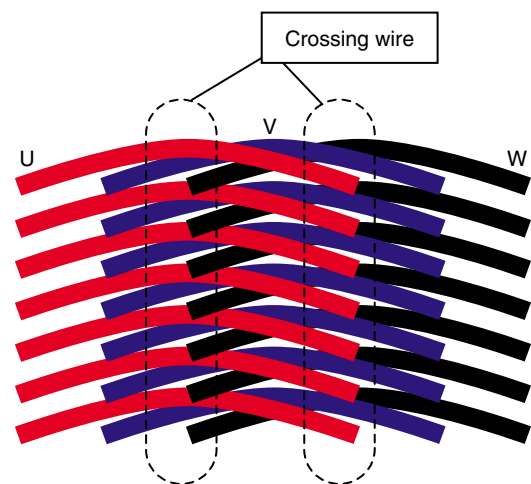


Fig. 2 Method of crossing wire



Fig. 3 Winding overhang produced by insert coil machine

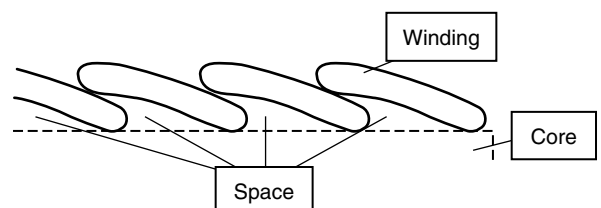


Fig. 4 Reduction of space factor

3.2. 線材長の低減

試作したインナーロータ型モータ用のオープンスロット型ステータの仕様を Table 2 に示す。薄型化と銅損低減のため、線材長を低減することを最優先させ、コアに直接、巻線可能なノズル巻を採用した。また、一度に多数の線材を巻くことは、巻線機械の大型化と線材ボビンの在庫増加を招き、生産コストが上昇するため、並列巻する線材を複数のグループに分けて小グループずつスロット内に巻線することとした。巻線端部に使用する線材の長さを、さらに低減するため、ノズルをU相、V相、W相に各一機用意し、三機を同時に動作させ、巻線端部に編み目形状を形成するようにした。各相巻線用のノズルの配置を Fig. 5 に示す。線材の重なりを精密に調整するために、線材一本ごとに各一個のノズル穴を割り当て、これを整列に並べた多穴整列ノズルを採用した。さらに、線材の交錯する位置を管理するために、線材固定治具を設置した。これらによって、線材長を29%低減した。多穴整列ノズルをFig. 6に、線材固定治具をFig. 7に、線材長低減の結果を Fig. 8 に示す。

Table 2 Stator specifications

Outer diameter (mm)	260.0
Inner diameter (mm)	200.9
Core length (mm)	40.0
Number of slots	48
Wire diameter (mm)	Φ0.5
Number of turns	5
Winding type	Lap winding
Number of poles	4

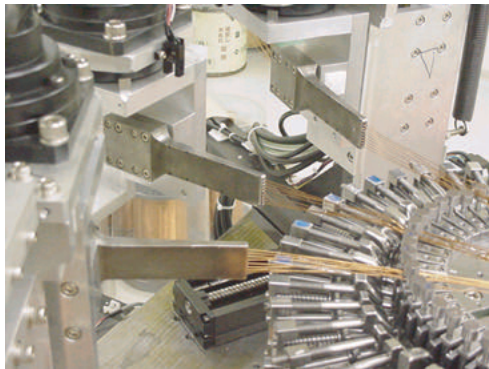


Fig. 5 Nozzles for winding of three phases

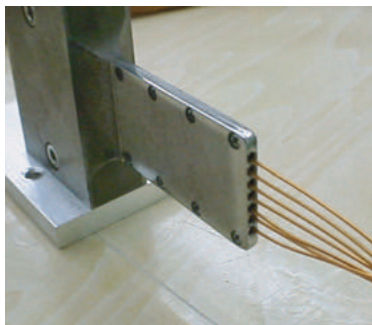


Fig. 6 Multi-hole alignment nozzle



Fig. 7 Jig for fixing winding

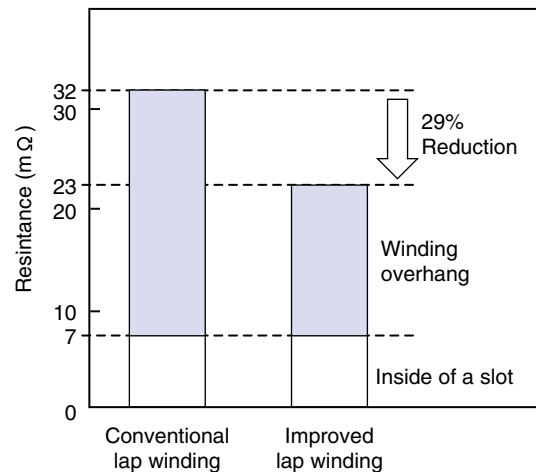


Fig. 8 Effect of reduction of length of winding

3.3. スロット内の占積率向上

従来、一体ステータを内周側からノズル巻すると、ノズルの移動経路を確保するために、スロット内の占積率が低下する。今回は、高い占積率の確保を優先し、ノズルの移動経路を外周側に確保した。I字型ティースとバックヨークに分けた分割ティース構造を採用し、ステータの外周側に開口部を設けた。分割ティース構造を Fig. 9 に示す。また巻線工程を Fig. 10 に示す。I字型のティースを、巻線機のティース固定治具に装着し、外周側からノズルで線材を巻く。Fig. 7の線材固定治具を併用してスロット内に入った線材の移動を抑制する。線材固定治具は、グループごとに巻線が完了すると、外径方向に移動する。さらに、Fig. 6の多穴整列ノズルによってスロット内に挿入する線材は、Fig. 11の状態を整列する。ノズルは巻線中に回転させないことで、 n 本の線材は、1ターンごとに $n \times (n-1)$ 箇所の線材交錯点が発生するため、各線材の長さが均等化できる。これにより、インピーダンスを均一化する効果については、束線にひねりを加えることで行う通常の転位工程と同等である。巻線を終了した後、絶縁紙を折り曲げながらバックヨーク部を挿入する。この際に、スロット内の線材間のすきまを圧縮する。これらの手法を組み合わせ、スロット内の占積率を向上した。Fig. 9中のバックヨークは、2箇所の半円形状

の突起部を備え、内周側はI字型ティースの抜け止めを、外周側は鉄心の円筒度を向上させる働きをする。スロット内の占積率は、改善前の 40.3% から 48.3% に向上した。改善前後の占積率を Fig. 12 に示す。

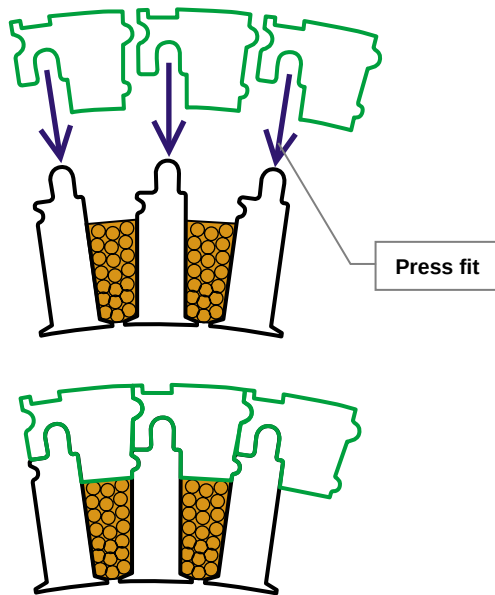


Fig. 9 Structure of split core

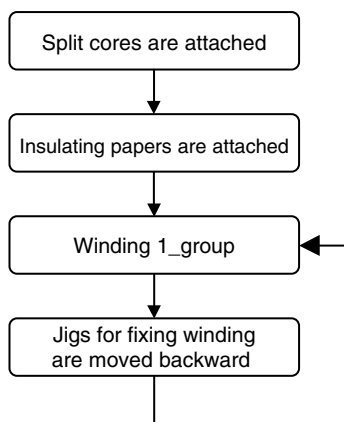


Fig. 10 Winding process



Fig. 11 Winding aligned inside a slot

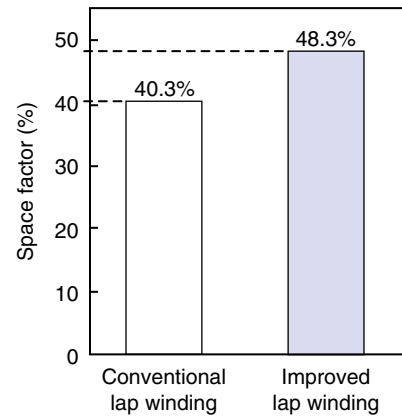


Fig. 12 Space factor of winding

3.4. 薄型化手法

モータの薄型化を行うために、巻線端部にプレスを行い、巻線端部の体積を低減する。従来のレーシングは、レーシング材の巻きつけ工程で巻線端部の線材を拘束させる力を発揮させる。プレスは最終成形にとどめられ、線材の変形量は比較的少ない。本手法では、レーシング後にプレスで線材を変形させる量が多いため、通常より軽いテンションでレーシングを行う。プレスする際に、巻線端部の断面の周長が増加する現象を利用して、通常のレーシングと同等の線材を拘束する力を確保する。本手法の概念図を Fig. 13 に示す。レーシング用の線材は伸びないため、巻線材の拘束力が向上し、巻線端部の占積率を向上させる。また、巻線端部を軸長方向から一回でプレスすると、線材の屈曲が発生することが判明したため、内径を拡張するプレス工程と軸長方向にプレスする工程の二段階に分けた。これによって、線材にかかる機械的ストレスを最小限に抑えながら、巻線端部の線材を網目形状に維持した状態で、プレスすることが可能となった。二段階のプレス工程を Fig. 14 に示す。また、薄型に成形した後の巻線端部を Fig. 15 に示す。

	Without string	With string
Before stamp		
After stamp		 Space factor improves by increase of binding force

Fig. 13 Method of increasing force which binds winding overhang

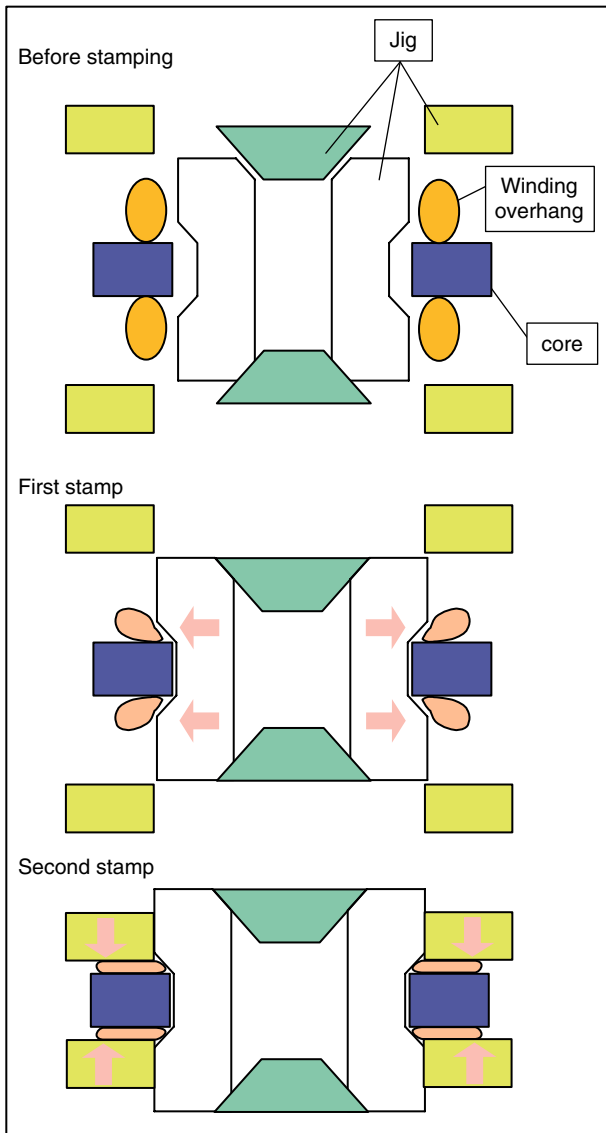


Fig. 14 Stamping process of two steps

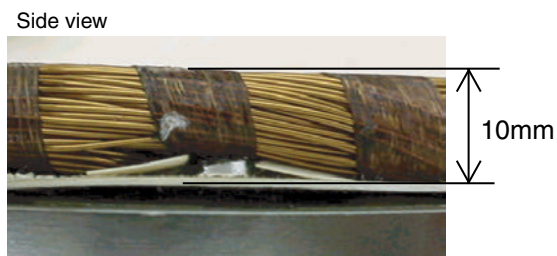
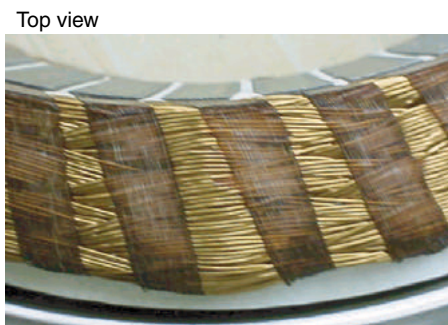


Fig. 15 Winding overhang after stamping process

4. モータ性能の検証

Fig. 16 に示すハイブリッド車用インダクションモータで、運転効率と軸出力を評価した。一次銅損は、従来手法に対して、41%の低減を確認した。内訳は、線材長低減分が29%、占積率向上効果分が12%である。巻線端部の高さが10mmと薄型化する効果も確認した。一方、一次銅損の低減によって、運転効率は7%向上した。さらに、巻線抵抗部の電圧降下が低減されたことによって、軸出力は16%向上している。運転効率と軸出力の向上効果を Fig. 17 に示す。



Fig. 16 Induction motor for hybrid vehicle

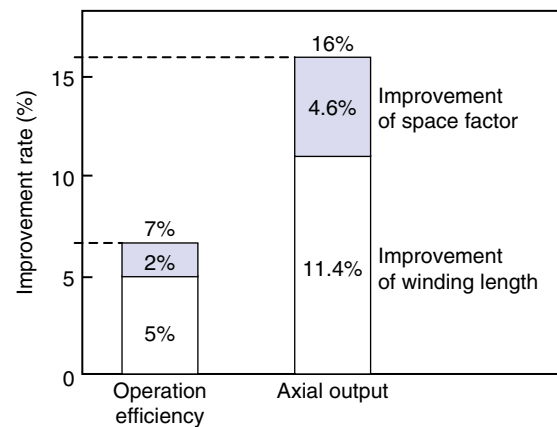


Fig. 17 Improvement of operation efficiency and axial output

5. 生産性の検証

ステータの組立工程を Fig. 18 に示す。本巻線手法を自動化する巻線機を実現し、当社の同サイズステータの突極集中巻構造をボビン巻する巻線時間に対して、45%短縮できる生産性の向上を確認した。巻線時間の比較をFig. 19に示す。

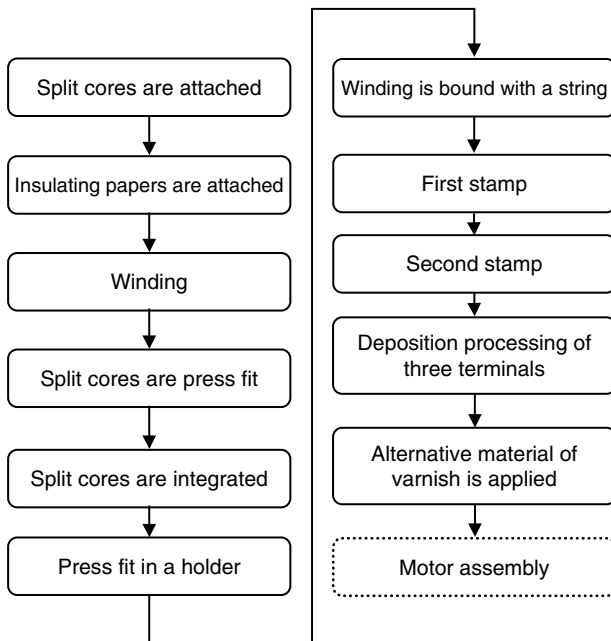


Fig. 18 Assembly process of stator

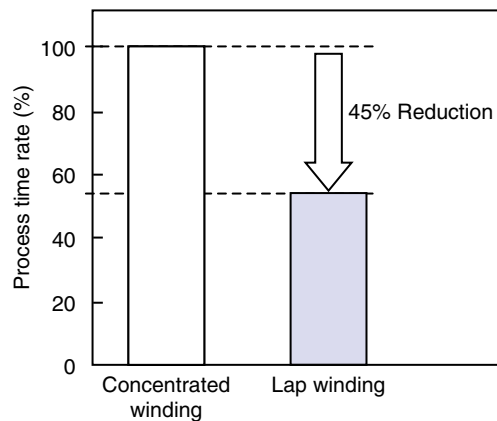


Fig. 19 Comparison of winding time

6. まとめ

モータの低損失化と薄型化のために、重ね巻ステータの、巻線端部の線材長と体積が増大する課題に着目して、鉄心構造と巻線製法に改善を加えた結果、次の成果を得た。

- (1) 突極集中巻と同等の巻線端部高さ10mmと、インサータ巻と同等のロット内占積率 48.3%の両立を達成した。
- (2) スロット内占積率の向上と線材長の低減によって、巻線抵抗が低減でき、運転効率の向上7%と出力の向上16%を達成した。
- (3) 自動巻線機を実現し、当社の同サイズステータのボビン巻に比べ巻線工程時間の 45%短縮を達成した。

謝 辞

自動巻線機の製作にあたり、ご協力をいただいた日特エンジニアリング株式会社の方々に心より感謝いたします。

参考文献

- (1) 馬場和彦, 及川智明, 秋田裕之, 米谷晴之, 川口 仁: プラシレス DC モータの高性能化検討, 電気学会回転機研究会資料, RM-00-141 (2000)
- (2) 一海康文, 西山典植, 岸部太郎, 近藤康宏, 角谷直之: EV 用分割コア集中巻 IPM モータ, 平成 12 年度 JEVA 電気自動車フォーラム, p.199-206 (2000)
- (3) 秋田裕之, 平井義典, 川口 進, 川口 仁: エアコン用圧縮機モータの省エネルギー・高効率化, 三菱電機技報, Vol.75, No.10, p.25-28 (2001)

■ 著 者 ■



新 博文



高尾 充良



福田 武雄



塚本 宗紀