

## 160,000r/min-2kW PM モータ駆動システムの損失解析

高田 陽介 (長岡技術科学大学)

Loss analysis of 160,000 (r/min) - 2 (kW) PM motor drive system

Yosuke Takata (Nagaoka University of Technology)

## Abstract

This paper describes loss analysis of a 2kW PM motor system which comprises two ultra high-speed permanent magnet machines (motor and generator) and a pseudo current source inverter. To measure mechanical Power of an Ultra High Speed Motor is difficult due to there are not Torque Sensors for Ultra-High Speed range. In this paper, an experimental loss analysis has been made using two ultra high-speed machines coupled. The maximum developed speed and rated power of this system machines are, respectively, 160,000 r/min and 2 kW, To quantify Loss Analysis of motor, generator and driver, it has been made FEM simulations of the motor and experimental measures of driver and machines power consumption. A comparison between FEM simulation analysis and experimental results shows about 10in future works in order to improve loss analysis and enhance Ultra High-Speed PM Motor design.

キーワード : 超高速 PM モータ, 擬似電流形インバータ, 損失解析  
(Ultra-high speed PM motor, pseudo current-source inverter, loss analysis)

## 1. 諸 言

筆者らはターボチャージャやスーパーチャージャの電動化を目指して、擬似電流形インバータを用いた超高速 PM モータ駆動システムの研究開発を推進してきた<sup>(1),(2)</sup>。最高回転数が 160000 ないし 220000 (r/min) で、定格出力が 2 (kW) 以上という目標仕様を設定し、試作機による実験検証を重ねてきた。このような超高速モータは基本波周波数が数 (kHz) と非常に高く、電機子巻線の自己インダクタンスが約 10 ( $\mu\text{H}$ ) 未満と極めて小さいため、通常の電圧形 PWM インバータでは正弦波状に電流制御することは困難である<sup>(3)</sup>。一方で、電流形インバータを使用したのでは装置が大型化し、効率面でも問題がある。そこで直流バスに電流制御形チョップを挿入し制御電流源として動作させる擬似電流形インバータを超高速モータの駆動に採用した。

以前までの研究成果では、インバータ出力として 2.2 (kW) 出力していることを確認できたものの、モータ回転数の高さ故に、正確なモータ出力を計測することは不可能であった。従って、モータ効率を割り出すには、コンプレッサ出力や FEM 解析を元にした推測値に頼るしかなく、精度、信憑性の点で満足する結果ではなかった。

本稿では、擬似電流形インバータを用いて最高回転数 160000 (r/min)、定格出力 2 (kW) の超高速モータ・ジェネレータシステムの駆動試験を行い、実験的に効率測定し、FEM 解析結果と比較したので報告する。

## 2. 超高速 PM モータ・ジェネレータ

本研究における試験機は、同じ仕様を持つ超高速 PM モータを同一軸でカップリングしてモータ・ジェネレータとしている。表 1 に超高速 PM モータの仕様を示す。

永久磁石は高エネルギー積で温度特性の優れた Sm-Co 系永久磁石用い、ギャップ長を大きく設計してステータからの空間高調波を低減した。ステータ構造は 3 スロット

表 1 超高速 PM モータの仕様

Table 1. Design specifications of ultra high-speed PM motor.

Rated power (cont.)	2.0 (kW)
Maximum speed	160000 (r/min)
Permanent magnet material	Sm-Co
Pole number	2
Slot number	3
Back E.M.F const.	$1.1 \times 10^{-4}$ ( $V_{rms}/r/min$ )
Phase resistance value	2.2 (m $\Omega$ )
Phase inductance value	12.5 ( $\mu\text{H}$ )

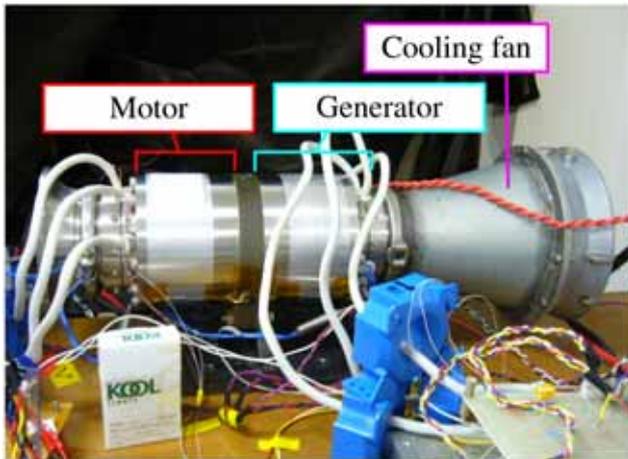


図1 超高速PMモータ・ジェネレータ外観  
Fig.1. View of ultra high-speed PM motor and generator.

ト、巻線は集中巻として線占率を低く設計し、ステータ冷却方式に空冷方式を採用した(4),(5),(6)。

図1に超高速モータ・ジェネレータの外観を示す。超高速運転時にロータ、軸受けが破損しても飛び散らないようにカップリング部も含めて2つのステータを接合してある。軸受けは玉軸受けを採用し、潤滑用グリースを定期的に補充している。

### 3. 擬似電流形インバータを用いた駆動システム

図1にシステム構成図を示す。超高速PMモータジェネレータシステムでは直流バス電流をPAM制御し、 $120^\circ$ 通電波形によりPMモータを駆動する方式を採用した(4),(5)。

擬似電流形インバータは直流バスに電流制御を行うチョップと、 $120^\circ$ 通電を行う6ステップインバータから構成されている(7),(8),(9)。まず、ホールCTを用いてリアクトル電流 $I_L$ をフィードバックし、直流バスの $S_{C1}$ と $S_{C2}$ をスイッチングすることにより直流電流の制御を行う。このとき、両スイッチング素子のスイッチング周波数を30(kHz)と高周波化することによりリアクトル $L_C$ の小型化を図りつつ、直流バスを制御電流源として機能させる。PMモータの力行時は $S_{C1}$ をオンすることにより直流電源から電流を流すと同時に、 $L_C$ にエネルギーを蓄積する。 $S_{C1}$ がオフになると $S_{C2}$ を通じて電流が還流することによって、 $L_C$ に蓄えられたエネルギーを放出する。一方、インバータが $120^\circ$ 毎に転流する際、モータの巻線インダクタンスにより高電圧が発生するが、これはバイパスダイオードDと $S_1 \sim S_6$ のボディダイオー

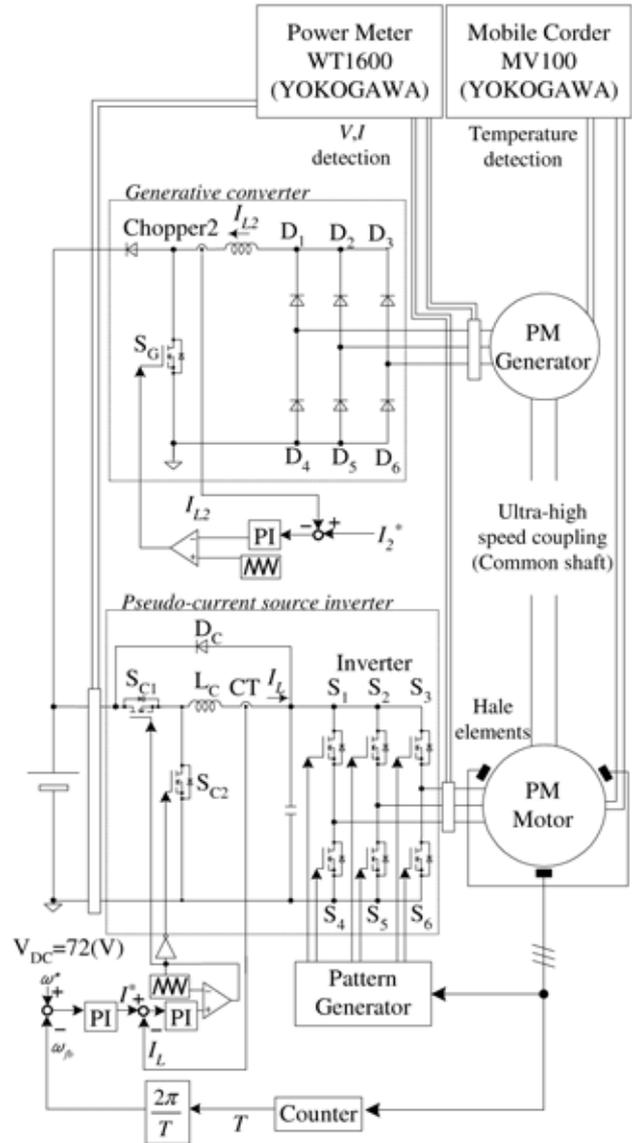


図2 システム構成  
Fig.2. System configuration.

ドを通じて直流バス平滑コンデンサ電圧にクランプされる。したがって、従来の電流形インバータのように逆阻止能力をもつスイッチング素子は不要であり、一般的なIGBTやMOSFETを使用してそれにダイオードを直列接続する必要もない。モータと同期した $120^\circ$ 通電のパターンは、ステータに組み込んだホール素子から得られた $60^\circ$ 毎の磁極位置情報を元に形成される。

ジェネレータの回生コンバータは、3相整流器と昇圧チョップで構成し、リアクトル電流 $I_{L2}$ を制御することにより負荷トルクを調整した。従がって、回生時の電流および電圧は電流形コンバータと同じ波形となる。また、回

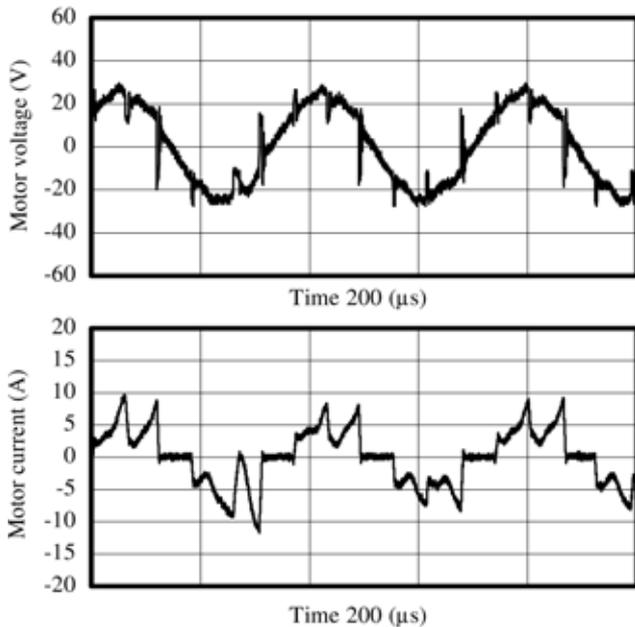


図3 モータ入力電圧・電流波形 (160000 (r/min) - 無負荷 運転時)

Fig.3. Motor input voltage, current wave forms (160000 (r/min)-No load operation).

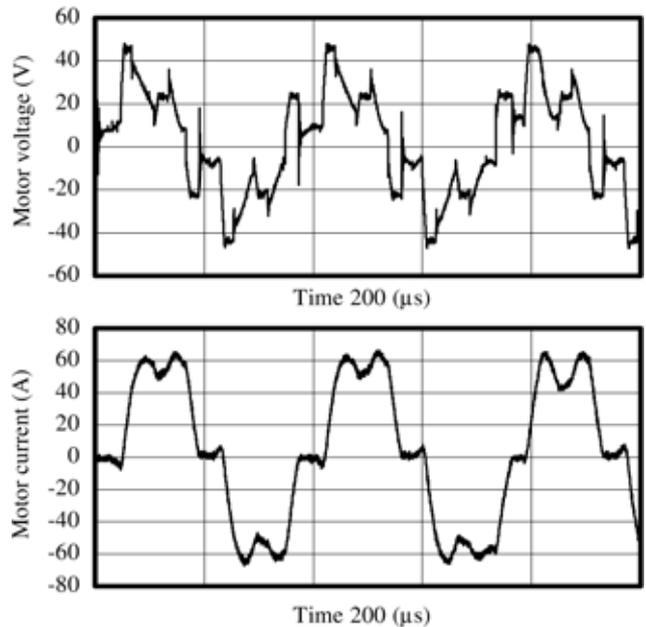


図5 モータ入力電圧電流波形 (160000 (r/min)-2 (kW))

Fig.5. Motor input voltage, current wave forms (160000 (r/min) - 2 (kW)).

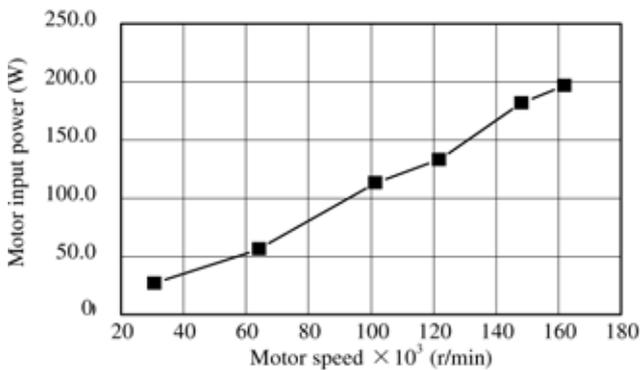


図4 モータ入力電力 (無負荷運転)

Fig.4. Motor input power (no load).

生コンバータの出力は直流バス電源電圧  $V_{in}$  にフィードバックされ、システム全体の損失分のみを DC バス電源から供給する。

#### 4. 実験結果

前述の超高速 PM モータ・ジェネレータシステムを用いて、無負荷および負荷トルク一定試験を行い、各部波形、電力、力率、効率の計測を行った。

4.1 無負荷運転試験 回生電流  $I_{L2}=0$  (A) として 30000 (r/min) ~ 160000 (r/min) までモータ回転数

を変化させた。図3にモータ回転数 160000 (r/min) の無負荷運転時のモータ相電圧線電流波形を示す。

モータ相電圧波形を見ると、電流の転流時に多少のサージが発生しているが、モータ誘起電圧が綺麗な正弦波であることが読み取れる。一方、電流波形は誘起電圧と同相の波形であるが、他相の転流パターンの影響が大きく出ており、高調波成分の多い波形となっている。

図4に無負荷時 ( $I_{L2}=0$  (A)) のインバータ出力 - モータ回転数のグラフを示す。回転数に従って、モータジェネレータ内の損失がほぼ比例して上昇していることが分かる。損失の内訳としては、ステータ鉄損機械損永久磁石上の渦電流損があげられるが、筆者らが行った FEM 解析結果からも、回転数に対して顕著に現れるのはステータ鉄損と永久磁石上の渦電流損の割合が多いと考えられる<sup>(3)</sup>。

4.2 負荷トルク一定試験 モータ回転数 160000 (r/min) においてモータ入力電力 2 (kW) となるようにジェネレータ電流  $I_{L2}$  を固定し、30000 (r/min) ~ 160000 (r/min) までのトルク一定試験を行った。

図5にモータ回転数 160000 (r/min)-モータ入力電力 2 (kW) 時のモータ相電圧線電流波形を示す。モータ相電圧と同期して  $120^\circ$  通電波形が形成されていることが読み取れる。図4と比較すると、電圧波形が歪んでいる。

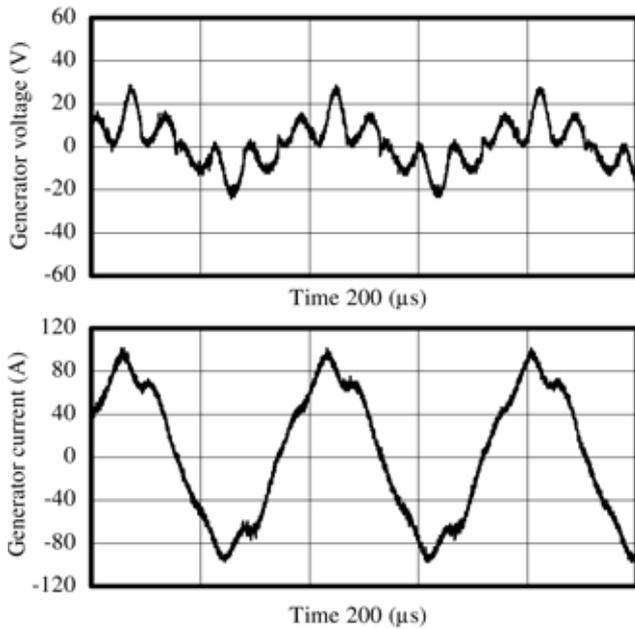


図6 ジェネレータ電圧・電流波形 (160000 (r/min)-2 (kW))

Fig.6. Generator voltage, current wave forms (160000 (r/min)-2 (kW)).

これは、モータに流入する電流が増加したことにより、転流期間が長くなったためであり、同時に見られる相電圧に見られる急峻な立ち上がりは、サージ電圧を電源電圧  $V_{DC}$  にクランプしている期間である。

図6は、モータ回転数 160000 (r/min)-モータ入力電力 2 (kW) 時のジェネレータ相電圧線電流波形である。低負荷時では、電流波形は  $120^\circ$  通電波形となるが、多く電流を取り出したため、ほぼ三角波に近い形となる。回生側のコンバータは、擬似電流形インバータのように転流期間に電源電圧にクランプするパターンは無いので、ジェネレータ内での転流は誘起電圧によってのみ行われる。従って、転流時の  $di/dt$  が擬似電流形インバータの場合より遅くなるため、擬似電流形インバータによってモータに流入できる電流量よりも少ない電流量しか取り出せない。

特に、この時点でジェネレータ電流波形がほぼ三角波となっているため、本システムでジェネレータから取り出せる電力はこの時点でほぼ限界と考えている。

図7に一定トルク運転における、総合力率、出力、効率をまとめたグラフを示す。総合力率は、モータ入力とジェネレータ出力を計測した。モータ入力部分の総合力率が回転数とともに上昇しているのは、転流時に発生するサージ電圧に対して誘起電圧が上昇するためと考察している。

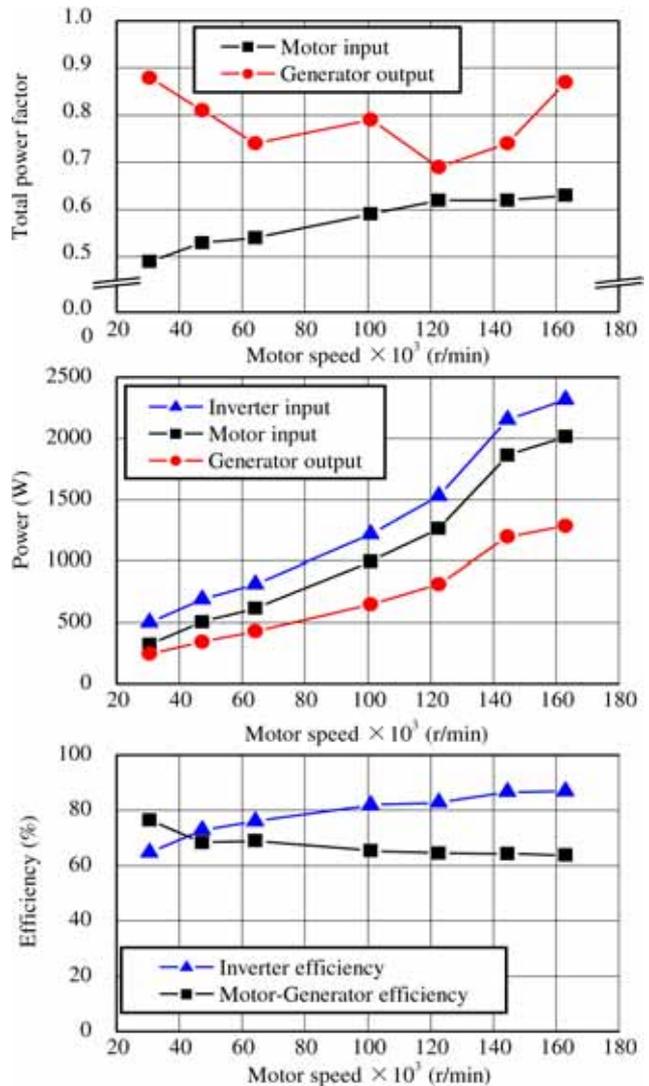


図7 力率・出力・効率特性 (定トルク運転時)

Fig.7. Characteristic of total power factor, output power and efficiency (const. torque operation).

中段には、インバータ入力、モータ入力およびジェネレータ出力電力を示す。2 (kW) モータ入力電力が確認できた。

下段はインバータ効率と、超高速 PM モータ・ジェネレータの効率である。インバータ効率は最大で 88 (%) 程度であった。擬似電流形インバータは降圧チョッパと  $120^\circ$  通電のインバータが組み合わさったトポロジーを持っているため、効率はこの二つの効率を掛け合わせた値となる。チョッパ部分のキャリア周波数は 30 (kHz) であり、インバータ部分のスイッチング周波数は回転数と同じである。この差を見ても、インバータ部よりチョッパ

部の方に損失が偏っていることが分かる。今回は、主素子を全て IXFN150N15 (IXYS 社製, 150 (V), 150 (A)) を採用したが、チョッパ部分により大容量、インバータ部分により小容量な素子を選定すれば、高い擬似電流形インバータの効率が得られると考えている。

モータジェネレータ効率とインバータ効率を比較すると、その傾向が反対になっている。インバータ効率は回転数上昇に伴って効率が上昇しているにもかかわらず、モータジェネレータ効率は回転数の上昇に伴って下降する傾向にある。インバータを構成する主素子の定格が非常に大きいので、インバータの最大出力点がより高出力な領域にあることが分かる。また、本研究のように非常に広い回転数範囲を持つ場合、現状の材料損失として周波数に依存するところが多いので、高周波になればなるほど効率が低下することが実験により明らかになった。

### 5. FEM による損失解析結果との比較

モータ回転数 160000 (r/min)、インバータ出力 2 (kW) 運転時における FEM 解析結果との損失比較を行った。図 8 に FEM 解析結果を示す。ここでのモータ損失は僅か 148.6 (W)、モータ効率は 92.8 (%) であった。しかしこれに対して、実験により得られたデータでは、モータジェネレータあわせて 62.5 (%)。単純に二つのモータで等しい損失を発生していると考えても、試験機において得られたモーター機あたりの効率は 79 (%) 程度である。

FEM 解析において仮定している電流波形と実際の電流波形には実験波形の方に多く高調波が含まれているという点で相違があり、完全に一致した条件下での損失比較したとは言いがたい。しかしながら、このモータ効率の違いは FEM 解析を基として開発を進めてきた我々にとっては衝撃的な数値であった。今後は、この FEM 解析と試験結果の数値の違いを究明する所存である。

### 6. 結 言

本稿では、擬似電流形インバータを用いて最高回転数 160000 (r/min)、定格出力 2 (kW) の超高速モータ・ジェネレータシステムの駆動試験を行い、実験的に効率測定し、FEM 解析結果と比較した。

回生側コンバータは 3 相整流器と昇圧チョッパで構成し、このシステムによってモータ入力電力 2(kW) を確認した。一定トルク試験を行い、モータ・ジェネレータ及びインバータの効率測定を行った際、インバータ効率はモータ昇速に従って上昇するが、モータジェネレータ効率は反対に下降していくことが分かった。これは、鉄損や渦電流損など、周波数に大きく影響を受ける損失が多いためと考察した。

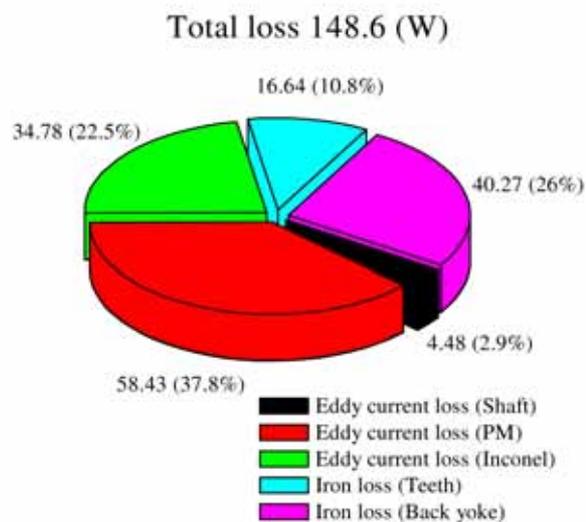


図 8 FEM による損失解析結果 (160000 (r/min) - 2 (kW) 運転時)

Fig. 8. FEM Loss analysis result (160000 (r/min) - 2 (kW) operation.)

FEM 解析と実験結果の比較を行った結果、大幅に実験結果の方のモータ効率が低いことが分かった。今後はこの FEM 解析と実験結果の相違の原因を追求していく所存である。

### 7. 謝 辞

本研究において、試験装置を提供していただいた三菱重工業株式会社のエンジニアの皆様方に心より感謝いたします。

### 文 献

- (1) Y. Takata, T. Noguchi, Y. Yamashita, Y. Komatsu, and S. Ibaraki, "Ultra High-Speed Electric Drive of Supercharger for Automobiles," *IEE - J Tech. Meet. on Vehicle Tech.*, VT-05-9, pp. 49-54, 2005. (in Japanese)  
高田陽介・野口敏彦・山下幸生・小松善美・茨木誠一:「車載スーパーチャージャの超高速電動ドライブ」電気学会自動車研究会資料, VT-05-9, pp. 49-54, (2005)
- (2) Y. Takata, T. Noguchi, Y. Yamashita, Y. Komatsu, and S. Ibaraki, "220000r/min, 2-kW PM Motor Drive for Turbocharger," *Proc. of the 2004 Japan Ind. Appl. Soc. Conf.*, vol.1, p.p.155 (in Japanese)  
高田陽介・野口敏彦・山下幸生・小松善美・茨木誠一:「ターボチャージャ用 220000r/min-2kW PM モータ駆動システム」平成 16 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, vol.1, p.p.155 (2004)
- (3) K. Aldayma, T. Fukuda, K. Terauchi, and Y. Ohori, "Inverter Control of A Super High Speed PM Motor," *IEE - J National Convention Record*, No.4, 892, pp.

274-275 (in Japanese)

秋山和成・深田隆文・寺内勝実・大堀勇二:「超高速永久磁石式電動機のインバータ制御」,平成8年電気学会全国大会

- (4) Y. Takata, T. Noguchi, Y. Yamashita, Y. Komatsu, S. Iharaki, "Ultra High-Speed Electric Drive of Supercharger for Automobiles," *IEE - J Tech. Meet. on Vehicle Tech.*, VT-05-9, pp. 49-54, 2005(in Japanese)  
高田陽介・野口敏彦・山下幸生・小松喜美・茨木誠一:「車載スーパーチャージャの超高速電動ドライブ」,電気学会自動車研究会資料」VT-05-9, pp. 49-54, 2005
- (5) A. Hoshino, M. Morimoto, and N. Matsui, "Estimation of Output Voltage for High Speed, Surface Permanent Magnet Generator," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, No.10, pp.1036-1042, 2004(in Japanese)  
星野昭広・森本雅之・松井信行:「大エアギャップの表面磁石型高速発電機設計のための出力電圧予測法」,電学論 D, Vol.124, No.10, pp.1036-1042, 2004
- (6) 大川光吉:「永久磁石磁気回路磁石回転機設計マニュアル」,総合リサーチ (1989)
- (7) T. Koganezawa, I. Takahashi, K. Oyama, "Sensor less speed control of a PM Motor by a quasi-current source inverter", *IEE - J Proc. of the 1992 Japan Ind. Appl. Soc Conf.*, no.45, pp.175 (in Japanese)  
小金沢竹久・高橋 勲・大山和伸:「擬似電流形インバータによるPMモータのセンサレス制御」,平成4年電気学会産業応用部門大会講演論文集, vol.1, no.45, pp. 175 (1992)
- (8) スヤ ボンバン・小金沢竹久・高橋 勲:「チョッパを用いたPMモータの回生制御」,平成5年電気学会全国大会, 551, vol.5, pp.112
- (9) I. Takahashi, T. Koganezawa, G. Su, K. Oyama, "A super high speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.30, May-June 1994, pp. 683-690
- (10) T. Fuleo, A. Chiba, "Super High Speed Drive Technologies," *IEE Trans.D* 118-2, pp. 145-149, 1998(in Japanese)  
深尾 正・千葉 明:「超高速回転機と駆動技術」,電学論 D 解説, 118 巻 2 号, pp. 145-149, 平成 10 年
- (11) 田中博一郎・鈴木 功:「超高速電動機駆動システム」,電気学会雑誌, pp. 41-44, 昭和 60 年-1, 105 巻 1 号
- (12) 電気学会技術報告 第 749 号:「超高速ドライブ技術 (1999)」
- (13) K. Shigematsu, J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, and Yasuhiro Ueno, "The novel approach of Coupled Analysis for Small Size and Ultra-High Speed Motor," *IEEE Proc. Ind. Appl. Soc. Conf.*, no.85, pp.349 2002(in Japanese)  
重松浩一・小山 純・桶口 剛・安部貴志・上野泰弘:「小型・超高速モータの磁場・回路連成解析法の構築」,平成15年電気学会産業応用部門大会講演論文集」, no. 85, pp. 349 (2002)
- (14) K. Shigematsu, J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, and Y. Ueno, "The study of eddy current in rotor and circuit coupling analysis for small size and ultra-high speed motor," *Power Electronics and Motion Control Conference Conf. Proc.(PEMC)*, pp.275-279, 2004
- (15) K. Akiyama, T. Fuleo, K. Terauchi, O. Yuji, "Inverter Control of A Super High Speed PM Motor," *IEEJ, National Convention Record*, No.4, 892, pp. 274-275(in Japanese)  
秋山和成・深田隆文・寺内勝実・大堀勇二:「超高速永久磁石式電動機のインバータ制御」,平成8年電気学会全国大会講演論文集, 892, pp. 274-275