

学術論文

8X-VR レゾルバにおけるロータ偏心およびギャップ長の出力特性への影響

The effects of the rotor eccentricity and the gap length variation of the 8X-VR resolver on its output characteristics

楢井 雅巳	(長野高専)	山本 行雄	(長野高専)
北沢 完治	(多摩川精機)	菊地 良巳	(多摩川精機)
神谷 昭範	(信州大学)	脇若 弘之	(信州大学)

Masami NIREI	Member
Yukio YAMAMOTO	Member
Kanji KITAZAWA	
Yoshimi KIKUCHI	
Akinori KAMIYA	
Hiroyuki WAKIWAKA	Member

An 8X-VR resolver is a variable reluctance type resolver. Clarification of relationship between the rotor eccentricity and the angle determination is required in order to improve variation of a revolution angle determination due to the eccentricity of the rotor. Effects of the eccentricity are predicted by means of 2D finite element analysis in various gap length models. Predicted relative electrical angle errors due to the rotor eccentricity gives good approximation of measured values. Amplitude variation of error distribution shows tendency to remain stable at rotor eccentricity longer than 0.08 mm. Spectrum analysis of output signals describes that the amplitude differences of 2nd, 3rd and 4th harmonic components vary wider than those of other harmonic components. And multivariate analysis indicates that the gap length has a high correlation with amplitude of harmonic components.

Key Words: Resolver, electromagnetic sensor, error prediction, finite element analysis.

1 まえがき

レゾルバはFAなどの制御システムにおいて、振動や温度などの環境に強い回転型位置検出装置として広く用いられている [1]。筆者等はレゾルバの角度誤差の低減について検討を行い、特に1回転で8周期の二相正弦波信号を発生する8X-VRレゾルバの誤差特性解析評価について報告してきた [2][3]。

数値解析から8X-VRレゾルバの誤差特性を評価する場合、ロータの回転を考慮して出力信号の瞬時値を計算すると、計算時間が膨大なものとなるため現実的

ではない [4]。定常電磁界解析を用いてロータの回転角に対する出力信号を計算すると、出力信号の包絡線を求めることができ、この包絡線のひずみを評価することによりレゾルバの変圧比の変動を求めることができる。この結果から誤差評価が可能であり、計算時間が短縮できる [5]。筆者らは、本手法をブラシレスレゾルバおよび8X-VRレゾルバの角度検出誤差解析に適用し、ロータ偏心の影響に関する検討に用いてきた [6][7]。

本論文では、8X-VRレゾルバについて二次元有限要素法を用いた定常電磁界解析による特性評価を行い、8X-VRレゾルバのロータ偏心量とギャップ長が検出角度誤差変動および包絡線高調波歪みなどへ与える影響について検討した結果について述べている。

連絡先: 楢井雅巳, 〒381-8550, 長野市徳間716, 長野工業高等専門学校, email: nirei@ei.nagano-nct.ac.jp

2 8X-VR レゾルバの構造と解析手法

Fig.1 に 8X-VR レゾルバの構造を示す。ステータ側には 20 極の磁極があり、磁極毎に施された巻線を直列に結線し励磁巻線を構成している。出力巻線は 2 つあり、互いに空間的に 90° の位相差を持って配置されている。2 つの出力巻線それぞれを Sine 巻線, Cosine 巻線と呼ぶ。出力巻線は励磁巻線に重ねて巻かれ、それぞれ直列に接続され Sine 巻線, Cosine 巻線を構成する。ロータは滑らかな曲線で形成される 8 極の磁極を持っており、ロータの回転によってギャップ長が変動することにより、正弦波状のレクタンス変化を与えるように設定されている。

実測と解析に用いた 8X-VR レゾルバの諸元を Table 1 に示す。

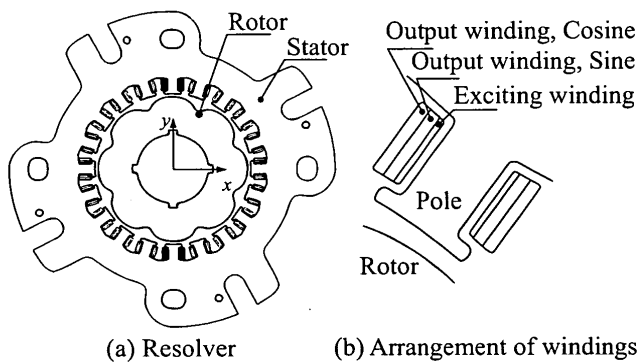


Fig. 1: Cross section of an 8X-VR resolver.

Table 1: Specification of a 8X-VR resolver.

Outer radius of stator	39	[mm]
Inner radius of stator	25	[mm]
Maximum radius of rotor	24	[mm]
Exciting voltage	2	[V _{rms}]
Exciting frequency	10	[kHz]
Resistance of exciting coil	46	[Ω]
Inductance of exciting coil	1.5	[mH]
Resistance of output coil	274.5	[Ω]
Inductance of output coil	13.0	[mH]

Fig.2 は、ロータが 1,000 rpm にて等速回転している場合の出力電流瞬時値を、非線形二次元有限要素法 ($A-\phi$ 法) により逐次計算した結果のうち、Sine 巻線について電気角 360° 分とその部分拡大を示したものである。出力電流は、出力巻線に 10 kΩ の負荷抵抗

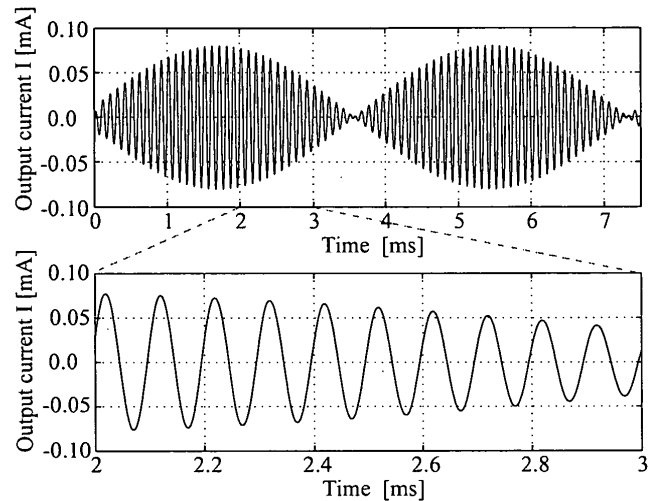


Fig. 2: Current waveform from FE analysis taking into account rotor rotation at 1,000 rpm.

が接続されているものとして求められている。

Fig.2 に示されるように、VR レゾルバの出力信号は励磁信号をキャリア信号、ロータの回転にともなう変圧比の変動を変調信号とする AM 変調された信号である。8X-VR レゾルバの出力は、ロータ 1 回転につき 8 周期の二相出力信号が発生し、ロータ機械角 45° に電気角 360° が対応する。理想状態での二相出力電圧の振幅 E_1, E_2 は次式で与えることができる。

$$\begin{aligned} E_1 &= EK \cos 8\theta_m \\ E_2 &= EK \sin 8\theta_m \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 E : 励磁電圧、 K : 励磁巻線と出力巻線との間の変圧比、 θ_m : 機械角

上式よりロータ位置の電気角 θ_e は次式で与えられる。

$$\theta_e = 8\theta_m = \tan^{-1} \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (2)$$

しかしながら、ロータの回転を考慮して逐次に出力量瞬時値を解析するには膨大な時間を要し、現実的ではない。ここでは出力信号の振幅と位相を、レゾルバの設計上実用的な時間で計算するため定常電磁界解析 ($j\omega$ 法) を行った。

出力 E_1, E_2 と負荷抵抗 10 kΩ の外部回路を連成することにより、出力電流が求められる。ロータ回転角を変化させながら出力電流を求めることにより、出力電流の包絡線が与えられる。得られた包絡線の比を用いて、式 (2) によりロータ位置の電気角推定値が求められ、ロータの絶対位置との差を角度誤差として評価す

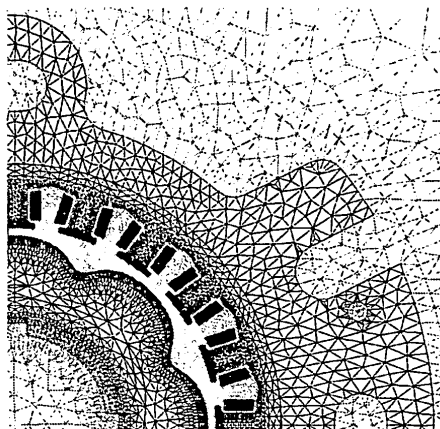


Fig. 3: A meshed model for FE analysis.

ることができる。本論文では、無偏心時のロータとステータの最短空隙長をギャップ長と呼び、ロータの最大外径を変化させることによりギャップ長を与えている。ロータの輪郭形状は最大外径に対して相似形に設定した。ギャップ長を変動させたモデルそれぞれについてロータを偏心させた時の、誤差特性の変動、包絡線の振幅や高調波歪みなどについて検討を行う。なお本論文における角度誤差はすべて電気角で示している。

ロータの x 軸方向への偏心は、Fig.1 において $-x$ 軸方向にステータの中心を偏心させることで相対的に表現し、ロータは原点で回転するモデルとした。二次元解析を用いているため回転軸の傾斜は考慮されない。

Fig.3 に示すように電磁界解析に適用した解析モデルには一次三角要素を用いており、偏心のない場合の基本モデルにおいて節点数 35,767、要素数 71,472 である。ロータ 1 回転（機械角 360° ）を 160 ステップのモデルで与え、各ステップにおける出力電流振幅値を連ねて包絡線を得ている。

$j\omega$ 法を適用しているため、構成する磁性材料特性は線形とした。 $A-\phi$ 法を用いた非線形解析から得られた結果より、鉄心内の最大磁束密度は 16 mT 程度である。したがって磁束密度分布による透磁率の変化は少なく、線形計算で十分な精度が得られると考えられる。実際の動作に近い状態で解析するために、 $A-\phi$ 法を用いた非線形解析より得られた要素毎の磁気抵抗率の平均値を用いている。うず電流の影響については、本レゾルバの鉄心が積層構造であることから、本検討では考慮しないものとした。

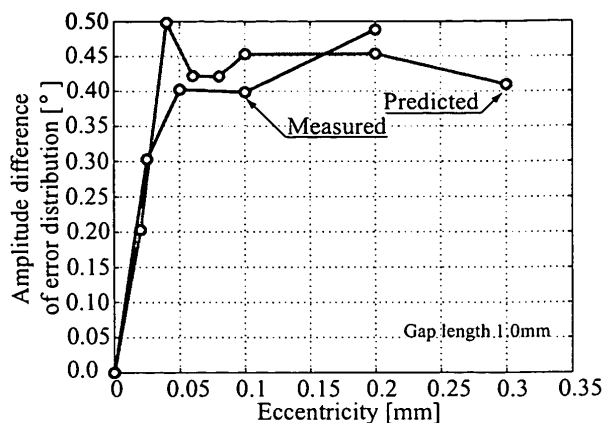


Fig. 4: Comparison of measured and predicted electrical angle errors in the model of 1mm gap length.

3 実測値と計算値の比較

角度誤差は、ロータ絶対位置と出力信号からの推定位置との差で表される。本論文ではロータ偏心による角度検出への影響を検討するため、ロータ偏心がない場合の角度誤差の Peak-to-Peak 値を基準として、偏心によって現れる Peak-to-Peak 値の変動量を相対角度誤差として評価を行っている。

Fig.4 はギャップ長 1 mm のレゾルバにおいて、偏心によって相対角度誤差が変化する様子について実測値と計算値とを比較したものである。実験では光学式エンコーダからの角度出力を比較基準出力として与え、レゾルバからの角度出力との差分を角度誤差としている。同図実測値は、ロータ偏心に伴う角度誤差の変動量を示している。Fig.4 において、実測値と計算値とはほぼ同程度の誤差変動量であることが確認できる。偏心量が微量な初期領域における変動部分についても同様の傾向が見られることから、本解析手法より誤差変動の推定が可能であると考えられる。同図より偏心量 0.1 mm において実測値と計算値との差は、機械角に換算して 0.375 分である。

4 ギャップ長とロータ偏心が緒特性に与える影響

4.1 相対角度誤差

Fig.5 に相対角度誤差のロータ偏心に伴う変動を示す。Fig.5 より、偏心量 0.04 mm 未満での誤差変動が大きく、偏心量 0.1 mm 以上における誤差変動は小さく単調である。ギャップ長を変化させた場合の変動は小さく、誤差変動量もほぼ同程度である。偏心量

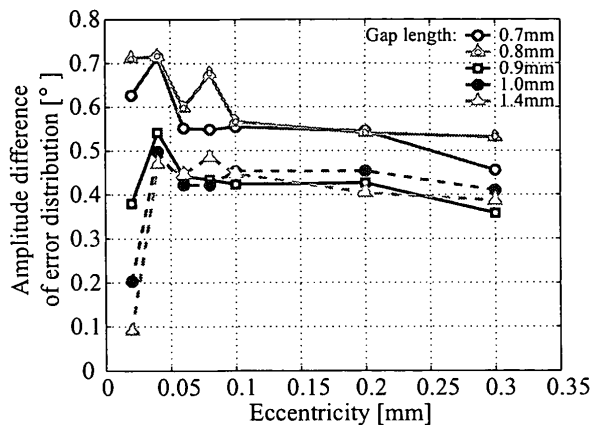


Fig. 5: Variation of predicted amplitude difference of error distribution.

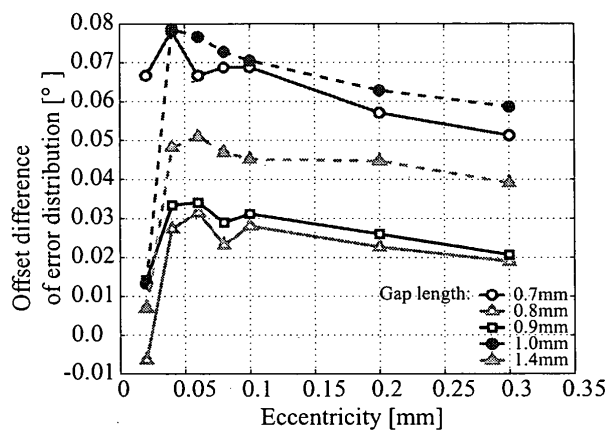


Fig. 6: Variation of predicted offset difference of error distribution.

0.04 mm 未満の領域においては、誤差振幅変動量はギャップ長増加にともない大きくなっている。ギャップ長の増加により立ち上がりが緩やかになる傾向が見られる。

Fig.6 に相対角度誤差分布の平均値の変動(オフセット変動)を示す。偏心量 0.05 mm 以上では、変動量はそれぞれのギャップ長において単調な減少傾向を示している。ギャップ長 0.8 mm, 0.9 mm において、変動量はギャップ長 0.7 mm, 1.0 mm のおよそ半分程度で推移し、減衰量もほぼ半分となっている。オフセット変動の絶対値では、ギャップ長 0.8 mm, 0.9 mm において小さくなっており、ギャップ長変動に伴う単調変動とはなっていない。また、偏心量 0.05 mm 未満では Fig.5 と同様に、ギャップ長により大きな変動が見られるが、その変動傾向は単調ではない。

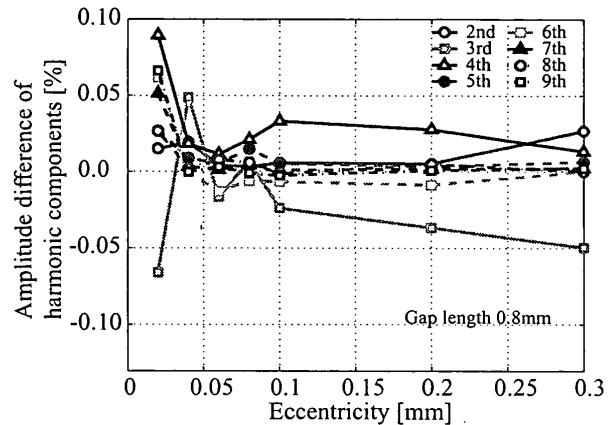


Fig. 7: Variation of amplitude ratio of harmonic components at gap length of 0.8 mm.

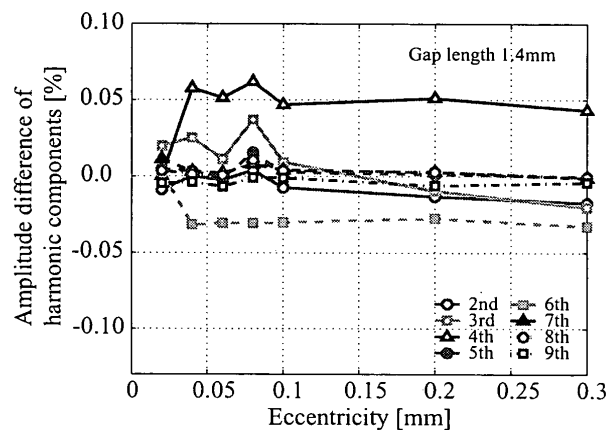


Fig. 8: Variation of amplitude ratio of harmonic components at gap length of 1.4 mm.

4.2 高調波振幅変動

高調波振幅変動は偏心がない場合の高調波振幅を基準とし、ロータ偏心にともなう高調波振幅の変動を評価した。

Fig.7, Fig.8 にギャップ長 0.8 mm および 1.4 mm における Cosine 巻線出力電流の高調波振幅がロータ偏心によって変動する様子をそれぞれ示した。ギャップ長 0.8 mm では、偏心量 0.05 mm 以下の領域において振幅変動が特に大きく現れている。また各調波の変動も大きくなっている。偏心量 0.1 mm 以上においては第 3 次調波、第 4 次調波の変動が大きく現れている。ギャップ長 1.4 mm では、偏心量 0.05 mm 以下の領域において第 4 次調波が大きく変動している。他のギャップ長においても、ギャップ長の設定により第 3 次、第 4 次調波を中心に複雑な特性変動を示してい

る。Sine 巻線出力電流の高調波振幅についても同様な傾向が見られた。

4.3 位相変動

二相包絡線の位相差は、その基本波成分について比較を行うことにする。

Fig.9 に出力信号の位相差がロータ偏心によって変化する様子を示す。位相変動は、ギャップ長 0.8 mm, 1.4 mm において大きく、ギャップ長 0.9 mm において最も小さい。偏心量 0.04 mm 以上においては、ギャップ長 0.8 mm の場合を除いてほぼ同程度の位相変動であり、偏心量の増加にともない単調に増加している。

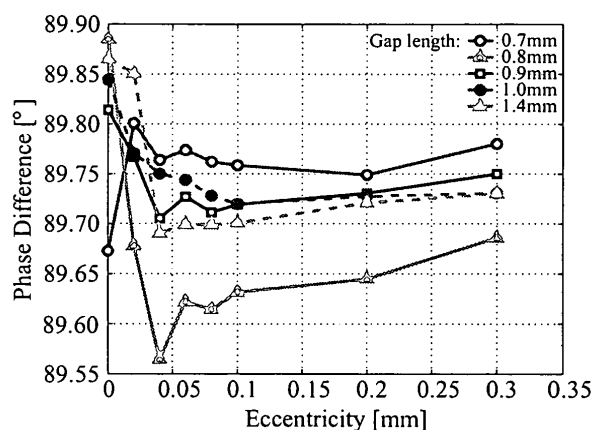


Fig. 9: Variation of phase difference of two output signals.

4.4 出力電流振幅差の変動

Fig.10, Fig.11 にそれぞれギャップ長 0.9 mm, ギャップ長 1.4 mm における出力電流 - 角度特性の、正負振幅差の偏心量に対する変動を示したものである。Fig.10 では、Sine 巻線での変動が見られるのに対して、Cosine 巻線における振幅差に大きな差は現れていない。Fig.11 においては、Sine, Cosine 巻線とも変動が見られる。振幅差の変動については、他のギャップ長においてもそれぞれ異なる振る舞いが観測されている。

北沢らはスロット内磁束分布と検出角度の関係について、巻線配置により磁束鎖交数が変動し検出角度に大きな影響を与えることを報告している [8]。本検討においてもロータ偏心およびギャップ長の設定により、スロット内磁束分布が変動しているものと考えられる。

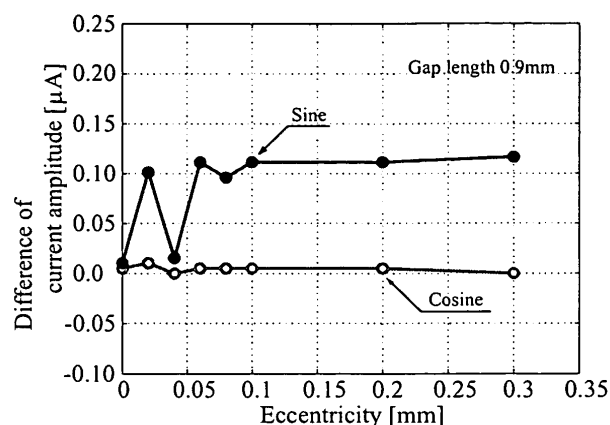


Fig. 10: Variation of output current amplitude.

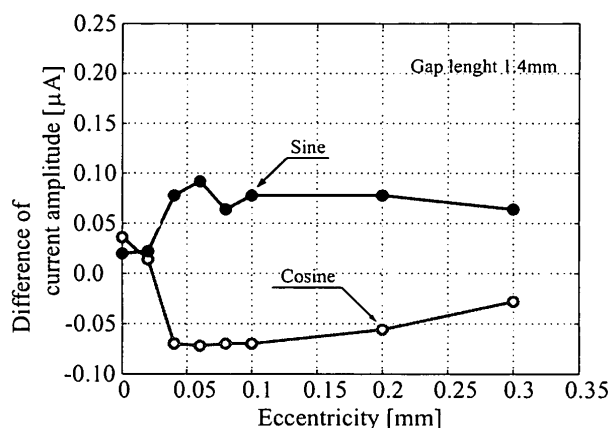


Fig. 11: Variation of output current amplitude.

Fig.1 に示すように巻線は層状に配置されているため、内側および外側で磁束鎖交数に差異を生じる。これにより各検出巻線の出力信号のひずみを複雑に変動させ、角度誤差が影響を受けるものと考えられる。

4.5 相関解析

先に述べたように各特性は偏心およびギャップ長の設定により、複雑な変動を示している。これらの特性変動とロータ偏心およびギャップ長変動の影響を確認するために、線形重回帰解析を適用した相関解析 [9][10]を行った。Table 2 に相関解析の結果、相関が得られた項目のみを○印で示す。同表において第 1 列の項目は独立変数、第 1 行の項目は従属変数を示している。また従属変数 “Relative Error” は相対角度誤差、“H.n-th” は第 n 次高調波の振幅変動、“DH.n-th” は第 n 次高調波振幅変動の Sine, Cosine 間差を示しており、独立変数と相対角度誤差、独立変数と高調波振

Table 2: Correlations between eccentricity, gap length, phase difference and characteristics on the resolver.

	Relative Error	H.2nd	H.3rd	H.4th	DH.2nd	DH.3rd	DH.6th
Eccentricity		○	○				
Gap length	○	○	○	○	○	○	○
Phase difference	○						

幅についてはそれぞれ独立に相関解析が行われている。相関解析における危険率は1%である。

Table 2 に示すように、相対角度誤差とギャップ長および基本波位相差の間には相関が確認される。高調波成分振幅変動と各従属変数との相関では、ギャップ長との相関が最も優位に現れており、ロータ偏心は2次と3次の高調波振幅と相関が得られている。

以上から、相対角度誤差へのロータ偏心の直接的な相関は弱く、ギャップ長の相関が強く存在することが明らかとなった。また、偏心量およびギャップ長が出力信号高調波ひずみに影響し、相対角度誤差へ複合的に影響を与えていると考えられる。

5 あとがき

8X-VR レゾルバについて、偏心時の角度検出誤差変動の実測値と計算値の比較を行い、二次元電磁界解析により角度誤差の推定が可能であることを示した。さらに、ギャップ長が異なる場合のロータ偏心量と相対角度誤差との関係について、電磁界解析によって検討を行い、以下の特徴を明らかにした。

1. 解析結果に相関解析を適用し、ロータ偏心およびギャップ長が出力信号のひずみに影響を及ぼし、角度検出へ影響を与えていることを確認した。
2. 相対角度誤差について、偏心量 0.04 mm 未満での変動が大きく、偏心量 0.1 mm 以上における変動は小さく単調であり、ギャップ長による相違は小さく、変動量もほぼ同程度である。
3. 高調波振幅は、ギャップ長により振幅変動の様子は大きく異なる。相対角度誤差同様に偏心が微小な場合の変動が大きく現れている。2次、3次、4次高調波振幅の変動は他の調波成分と比べて大きな変動を示す。

今後は、角度誤差と幾何情報との相関についてより詳細に検討するとともに、スロット内磁束密度分布と巻線配置による角度誤差への影響についてもさらに検討を進める予定である。

(2001 年 8 月 22 日受付)

参考文献

- [1] 電気学会編：電気機器学 II, 電気学会, (1995).
- [2] K. Kitazawa, H. Mimura, H. Makiuchi, H. Kushihara, et al.: Analysis of Dynamic Angle Error of 8X-VR type Resolver System, *Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM) 2000*, Vol.1 (2000), pp.568-572.
- [3] 北沢完治, 神谷昭範, 楢井雅巳, 脇若弘之: 8X-VR 形レゾルバシステムの動的角速度誤差の測定, 平成 12 年度電気学会全国大会, Vol.2, No.160 (2000), p.730.
- [4] 楢井雅巳, 山本行雄, 北沢完治, 脇若弘之: 8xVR レゾルバの角度誤差解析, 平成 12 年度電気学会全国大会, Vol.2, No.159 (2000), p.729.
- [5] 楢井雅巳, 山本行雄, 北沢完治, 脇若弘之: 8X-VR レゾルバ出力電圧の高調波解析, 第 12 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, (2000), pp.531-534.
- [6] K. Masaki, K. Kitazawa, H. Mimura, M. Nirei, et al.: Magnetic field analysis of a resolver with a skewed and eccentric rotor, *Sensors and Actuators*, Vol.A81 (2000), pp.297-300.
- [7] 楢井雅巳, 山本行雄, 北沢完治, 神谷昭範, 脇若弘之: 8X-VR レゾルバのロータ偏心による出力信号への影響, 電気学会研究会資料, MAG-00-188, (2000), pp.5-10.
- [8] 北沢完治, 菊地良巳, 三村尚史, 牧内浩三, 神谷昭範, 脇若弘之: 2X-VR 形レゾルバの静的誤差低減法の検討, 電気学会研究会資料, MAG-01-1, (2001), pp.1-4.
- [9] 田口玄一: 実験計画法, 丸善, (1991)
- [10] M. Nirei, Y. Yamamoto, K. Kobayashi, and T. Maruyama: Torque form Design of Leser Scanning Actuator Based on Statistical Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.33, No.5 (1997), pp. 4242-4244.