

## 2 相ステップングモータの 1 相励磁駆動における 共振周波数のセンサレス検出

# Sensorless Detection of Resonance Frequency in One-phase Excitation Drive of a Two-phase Stepping Motor

加藤啓希\*, 松尾健史\*, 三浦 武\*

Hiroki Kato\*, Kenshi Matsuo\*, Takeshi Miura\*

\*秋田大学

\*Akita University

キーワード : ステッピングモータ (stepping motor), 共振周波数 (resonance frequency), 1 相励磁方式 (one-phase excitation), センサレス検出 (sensorless detection), 回転子振動 (rotor vibration)

連絡先 : 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 秋田大学大学院理工学研究科  
松尾健史, Tel.: (018)889-2332, Fax.: (018)837-0406, E-mail: matsuo@gipc.akita-u.ac.jp

## 1. はじめに

ステップングモータは, 駆動回路に入力される指令パルスの総数および周波数によって, 回転角度および速度が制御可能なモータである. そのため, センサを使用しない開ループ制御が可能であり, 簡易, かつ, 低コストに制御システムを構築することができる<sup>1,2)</sup>.

このように開ループ制御可能な利点がある一方で, 位置決め時に回転子振動が発生する問題がある. 例えば, 1 相励磁方式で 1 基本ステップ角度分回転させたいならば, モータの巻線への励磁を初期励磁相から隣接する次の相に励磁を切り替えることが必要である. そうすれば, モータが 1 基本ス

テップ角度分回転して停止する. しかし, 停止するとき大きな振動が発生する.

この問題を解決する手法として, 次の励磁相に切り替えたあと, 一定時間後に 1 度前の相に励磁を戻すことでブレーキをかけ, 十分に速度を落とした後, もう一度次の励磁に戻す方法, すなわち, 指令パルスのパルスタイミング調整によって達成される逆相励磁ダンピング法が知られている<sup>3)</sup>. しかし, この手法は基本的に実際に駆動させて, 角度波形を確認しながらパルスタイミングを試行錯誤的に調整する必要がある. また, 慣性負荷の慣性モーメントが変化すると駆動系の共振周波数も変化するため, その都度パルスタイミングを調整する必要がある.

以上のような理由のため、慣性モーメントが変化しても自動調整する手法が要求される。先行研究として、人工知能を用いてステップ応答から適切なパルスタイミングが出力される手法<sup>3)</sup>、あるいは、装着される慣性負荷の慣性モーメントの値が分かれば、モデルより適切なパルスタイミングが求められる手法<sup>4)</sup>が提案されている。

これらの手法は、どこかでセンサで取得した角度情報が必要になる。このとき、慣性負荷の慣性モーメントが変化したとき、パルスタイミング調整が必要となるため、自動調整を可能にするためには、その角度情報に含まれる共振周波数についての情報が特に必要となる。

さて、ステッピングモータは開ループ制御可能な特性を持つため、開ループ制御での運用を考えたとき、パルスタイミングを調整するときはセンサを用いなくて、センサレスで調整を行いたい。

そこで、本研究ではこの目的を達成するための初期的な研究として、センサレスで共振周波数を検出する方法を明らかにしたい。今回は、モータの巻線電圧から共振周波数の情報を検出できるか、実際にモータ駆動実験をすることによって検討する。

## 2. 実験システム

本研究で用いた実験システムを Fig. 1 に示す。使用したステッピングモータは 2 相ハイブリッド形のオリエンタルモーター社 PKP243D08B2 である。そのモータの仕様を

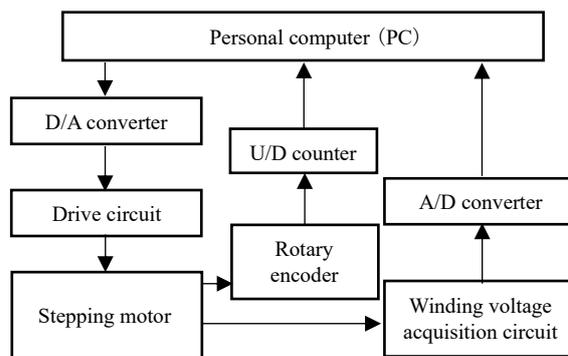


Fig. 1 Experimental system

Table 1 Specification of the stepping motor

Holding torque	0.35 [N · m]
Rotor inertia	$3.6 \times 10^{-6}$ [N · m · s <sup>2</sup> /rad]
Rated current	0.85 [A/phase]
Rated voltage	4.6 [V]
Winding resistance	5.4 [Ω/phase]
Winding method	Unifier winding
Fundamental step angle	1.8 [deg.]

Table 1 に示す。また、励磁方式は 1 相励磁方式で駆動する。

実験システムの流れとして、まずパーソナルコンピュータ(PC)から送られるデジタル指令を、Digital-Analog(D/A)変換器を介することでアナログの電圧値へと変換する。駆動回路は、この入力された電圧値に従って制御された電流値をモータ巻線 (2 相モータなので A 相および B 相) に流す。このようにモータの各相へ励磁電流が流され、それによってモータが駆動される。このとき、サンプリング時間は 0.3ms である。

駆動して回転した角度はロータリエンコーダにより検出され、Up/Down(U/D)カウンタを介して、PC へ測定データが入力される。また同時に、A 相および B 相の巻線電圧は巻線電圧取得回路により取得され、Analog-

Digital(A/D)変換機を介してPCへ観測データが入力される。

最後に、これらの取得されたデータを、それぞれ高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)することで周波数スペクトルを求める。

### 3. 共振周波数の検出

本章では、センサレスで共振周波数を求めるために、巻線電圧から共振周波数を求めることができないか、実験を行う。

#### 3.1 実験方法

1相励磁方式で1基本ステップ角回転させる。ここで、1相励磁方式とは、1相ごとに励磁相を切替えることで回転子を回転させる方式である。2相モータでは、回転方向が同じであればA相からB相(初めにA相が励磁された状態で回転子が静止している状態から、B相に励磁する相が切替えられると、回転子は回転を始めて1基本ステップ角度回転して、そこで振動してから最後に静止する)、B相からA相、A相からB相、B相からA相の4通りの励磁切替がある。ここで、A相およびB相とは、A相およびB相の逆方向への励磁をそれぞれ示す。

上述の4通りの励磁切替それぞれにおいて、Table 2で示される慣性モーメントの慣性負荷を取り付けて実験を行う。このとき、それぞれの場合でモータの回転子角度、および、A相およびB相の巻線電圧を計測し、これらをFFTする。

Table 2 Inertial moment of inertial loads

Load	Inertial moment ( $\times 10^{-6}$ ) [N · m · s <sup>2</sup> /rad]
No Load	0.00
Load 1	0.05
Load 2	0.10

#### 3.2 実験結果

実験によって得られた回転子角度と、A相およびB相の巻線電圧、およびそれら周波数解析の結果を示す。

Fig. 2にはA相からB相へ励磁したときの結果、Fig. 3にはB相からA相へ励磁したときの結果、Fig. 4にはA相からB相へ励磁したときの結果、Fig. 5にはB相からA相へ励磁したときの結果を示す。また、それぞれの図中(a)には、慣性負荷としてNo Loadで駆動したときの結果、(b)にはLoad 1を装着して駆動したときの結果、(c)にはLoad 2を装着して駆動したときの結果を示す。さらに、それぞれの図の(a1), (b1), (c1)には、1基本ステップ角度回転時の回転子角度の時間応答波形を示し、(a2), (b2), (c2)には、同時に測定したA相およびB相の巻線電圧波形をそれぞれ示す。また、(a3), (b3), (c3)には、回転子角度、A相およびB相の巻線電圧の時系列データを、それぞれFFTしたときに得られる周波数スペクトルを示す。

Fig. 2 (a1)を見ると、1基本ステップ角度である1.8 degを中心に、大きな振動が発生していることが分かる。次に(a2)を見ると、A相の巻線電圧波形の振動の周波数が(a1)の回転子角度の振動の周波数に近いことが分

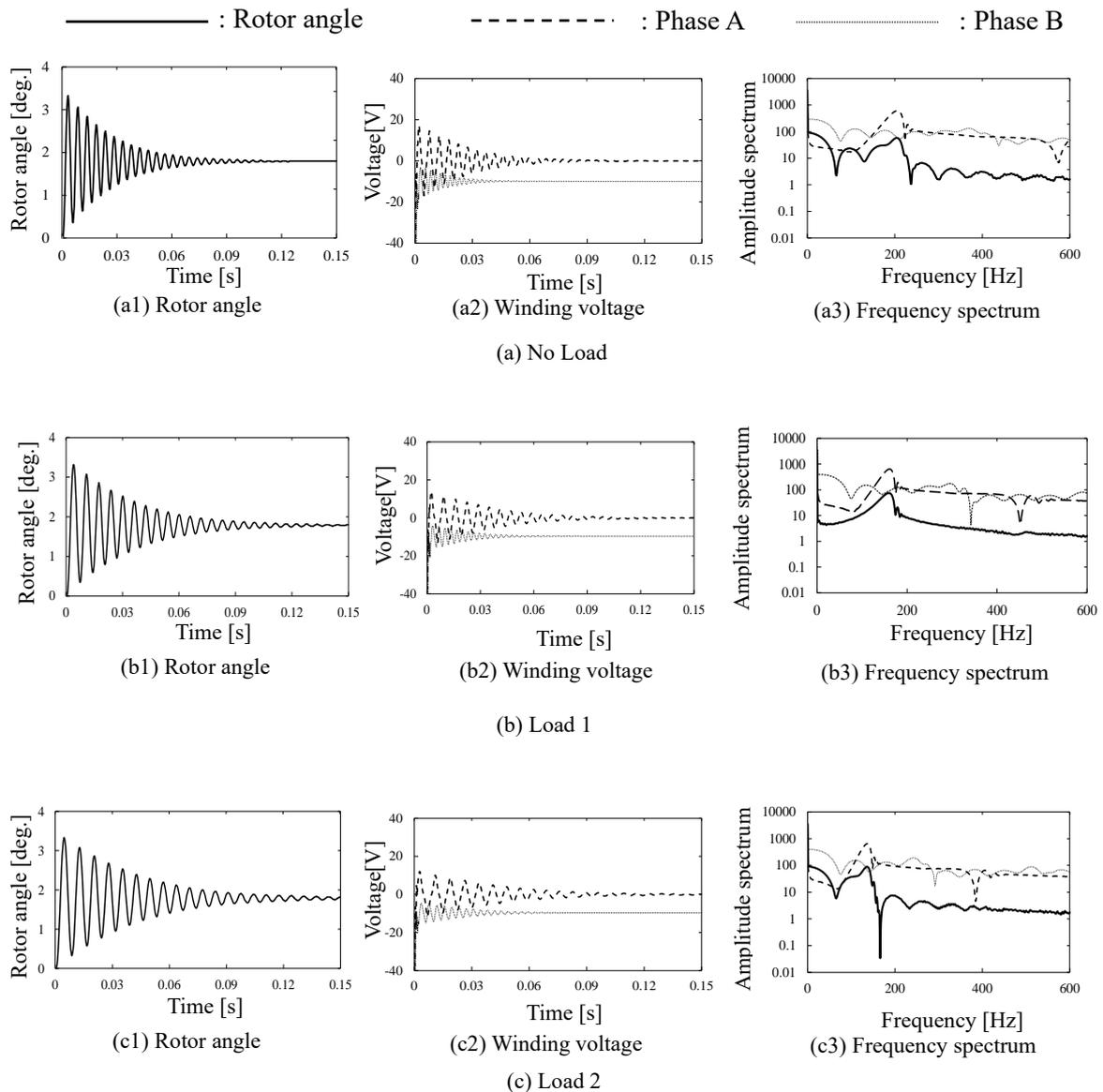


Fig. 2 Time characteristics and FFT of rotor angle and winding voltage (phase A to phase B)

かる．一方で B 相電圧の周波数は異なる．

次に，Fig. 2 (a3)の振幅スペクトルを見ると，直流成分付近の成分を除いたとき，回転子角度と A 相電圧の周波数成分のピークが 200 Hz 付近で同じ周波数になっていることが分かる．一方で，B 相電圧の周波数成分のピークは，400Hz 付近なので異なる．これは時間応答時の考察通りとなっている．ここで，この回転子角度波形の振動を 2 次系の応答波形としてみたとき，これは共振周波数<sup>5)</sup>にあたるが，この周波数と A 相電

圧の振動の周波数は一致していることが分かる．これは，A 相から B 相に励磁切替して駆動するとき，無励磁側の巻線電圧(Fig. 2 の場合は A 相)からセンサレスで共振周波数を得られるということが分かる．

次に，Load 1 を装着した場合である(b)の場合を検討する．まず，(b1)をみると，無負荷の場合である(a1)と回転子振動の周波数が異なることが分かる．これは，慣性モーメントが変化するため共振周波数も変化するためである．

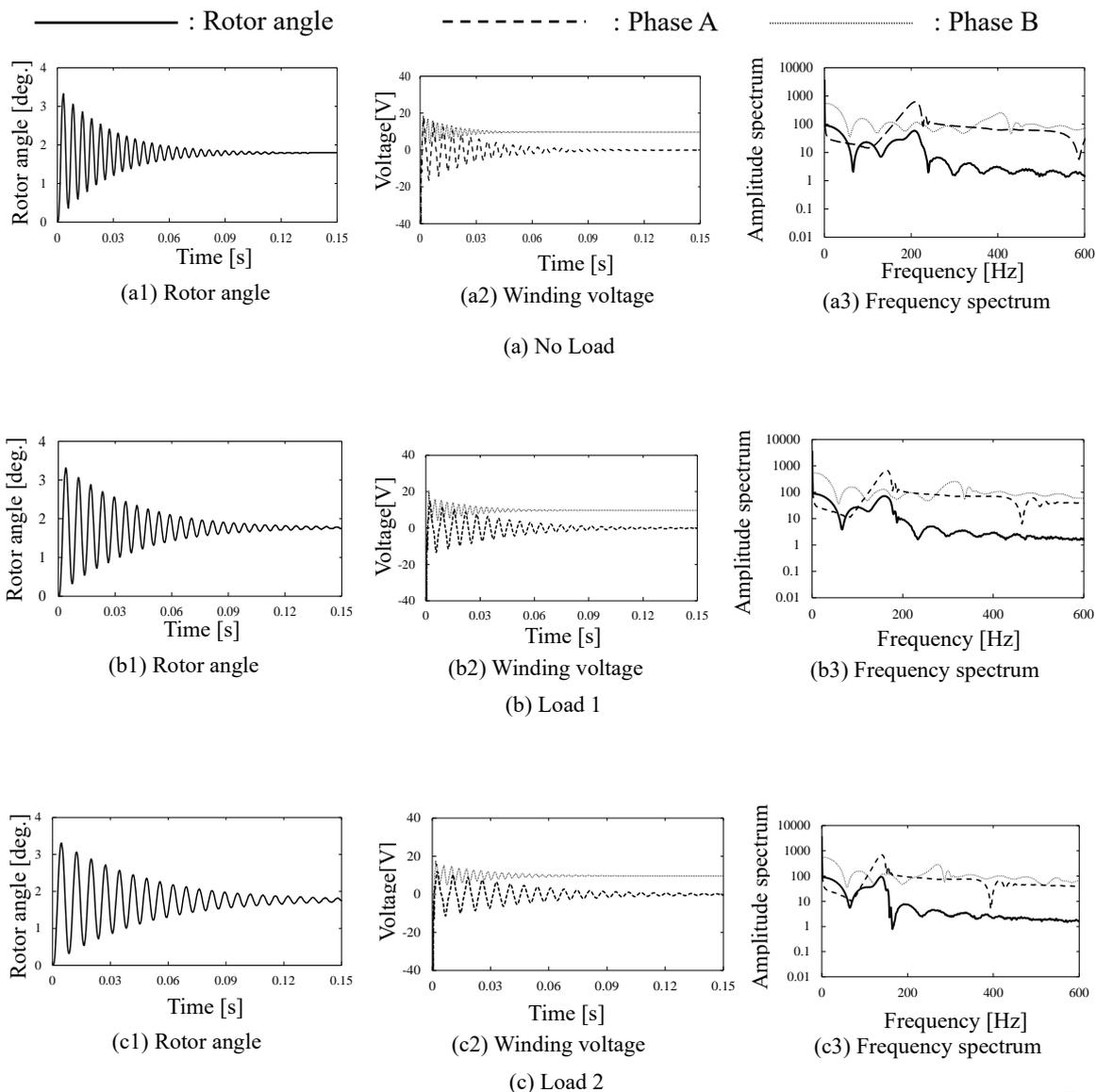


Fig. 3 Time characteristics and FFT of rotor angle and winding voltage (phase B to phase A)

次に(b2)を見ると、(a)の場合と同様に、無励磁側の A 相の巻線電圧波形の振動の周波数が回転子角度の振動の周波数に近く、一方で励磁側の B 相の周波数は異なることが分かる。このことから、慣性負荷が変化しても無励磁側の巻線電圧波形の周波数が、回転子角度波形の周波数と一致することが分かる。また、(b3)の振幅スペクトルのピークを見ると、直流成分付近を除いたときの回転子角度と A 相電圧波形のピークはどち

らも 180 Hz 付近であり一致することが分かる。一方で、B 相巻線電圧のピークは 300 Hz 付近なので異なる。

Load 2 を装着した場合である(c)の場合もこれまでの考察と同様であり、A 相電圧波形の周波数は回転子波形の振動の周波数と 140 Hz 付近で一致していることが分かる。

これらより、無励磁側の相の直流成分付近を除く巻線電圧の振幅スペクトルのピークを検出することができれば、回転子角度

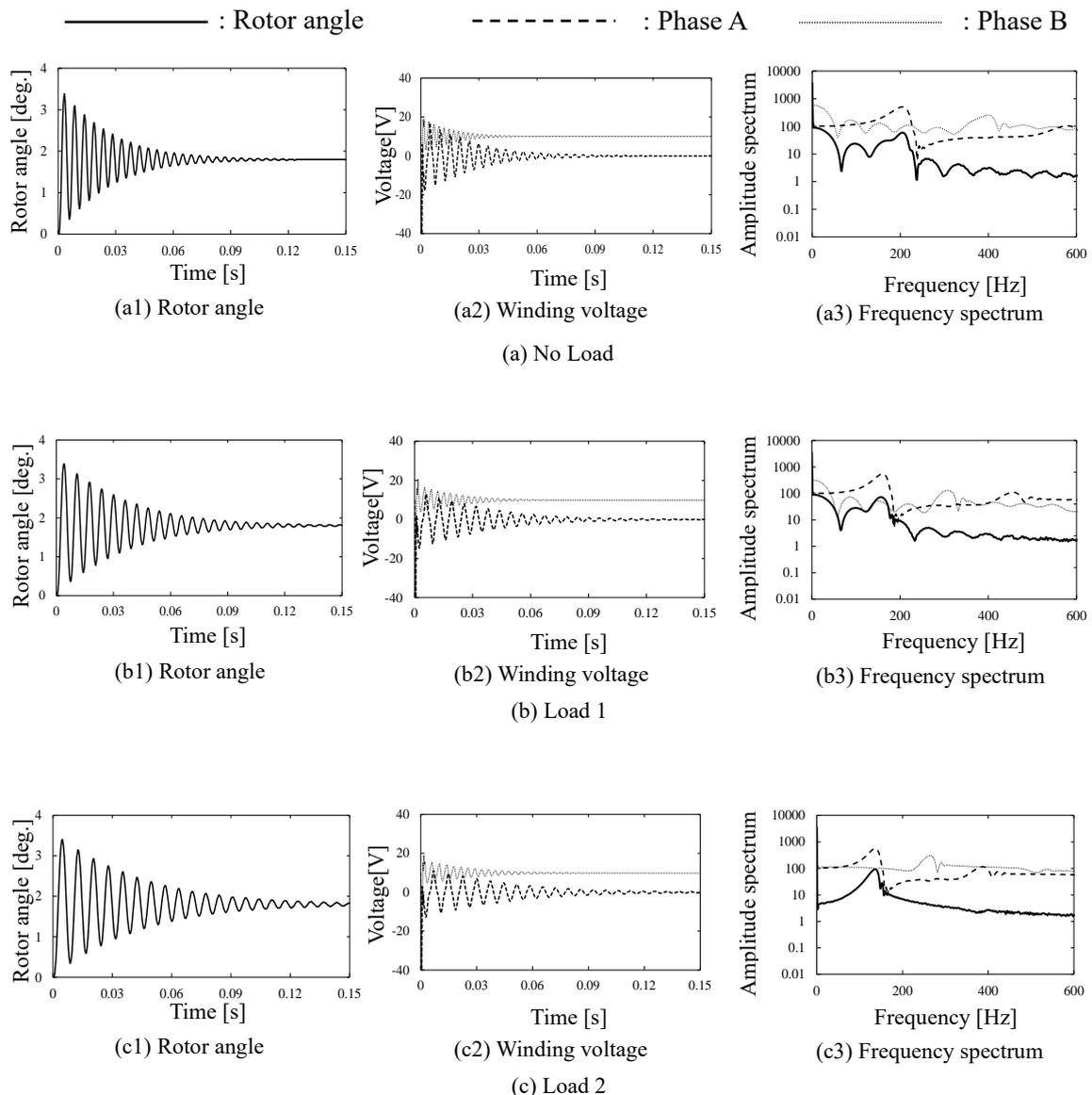


Fig. 4 Time characteristics and FFT of rotor angle and winding voltage (phase  $\bar{A}$  to phase  $\bar{B}$ )

の周波数成分のピーク，すなわち共振波数を推測することが可能であることが分かる。

このことは，別の励磁切替時の場合でも同様の結果となる．例えば， $\bar{A}$ 相から $\bar{B}$ 相へ励磁を切替した場合で，Load 2 を装着した場合の結果である Fig. 4 の(c3)をみると，無励磁側の巻線電圧（Fig. 4 の場合， $\bar{A}$ 相励磁なので物理的にはA相の巻線電圧）において，直流成分付近を除く振幅スペクトルのピークの周波数と，回転子角度のピークの周波数は，一致していることが分かる。

これは，他の Fig. 3, Fig. 4 (a)(b), Fig. 5 の場合の結果でも同様の結果が得られる．このことから，1相励磁方式であれば，励磁切替のパターン，および，負荷条件を変更しても，無励磁側の相の巻線電圧波形からFFTして得られる振幅スペクトルの直流成分付近を除くピークの周波数を求めることで，これまで角度波形の振動部分から得られてきた共振周波数を巻線電圧からも求められることが分かる。

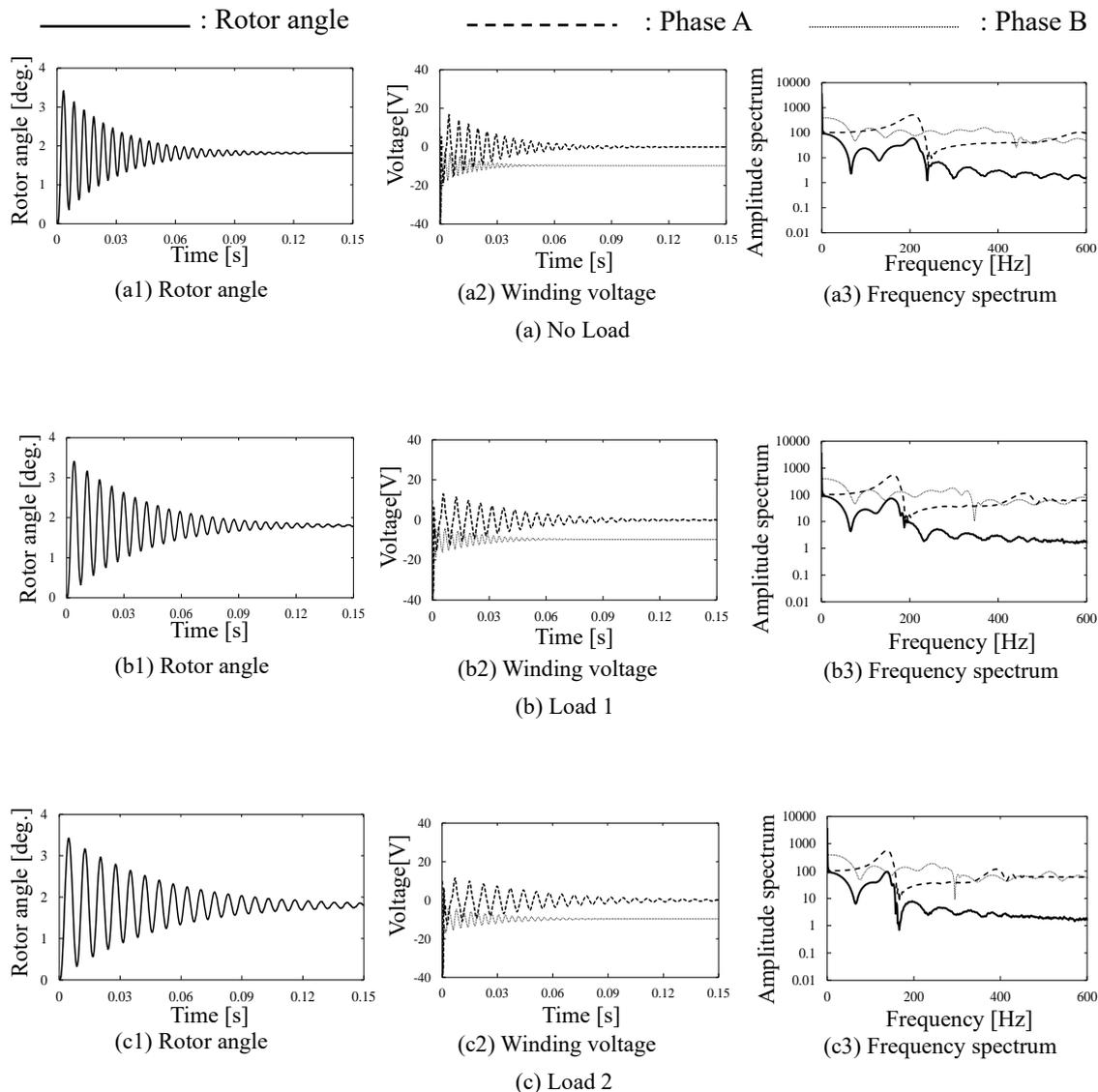


Fig. 5 Time characteristics and FFT of rotor angle and winding voltage (phase B to phase A)

以上より、巻線電圧から共振周波数が求められることが分かったため、この手法を用いることで、文献 3)の手法をセンサレスで行うことが可能であると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、1相励磁方式で1基本ステップ駆動させたとき、回転子角度と励磁相の巻線電圧の測定を行うことで、巻線電圧から回転子の共振周波数を求めることができ

ないか、実験により検証した。

結果より、無励磁側の巻線電圧波形から共振周波数を検出できることがわかった。また、これは、1相励磁方式であれば励磁パターン、および、慣性負荷が変更しても、同様にして共振周波数が検出できた。これらの結果から、文献 3)の人工知能を用いた自動調整法においても、センサレス情報のみでパルスタイミングの自動調整法を開発可能であると考えられる。

よって今後の課題は、逆相ダンピング法のためのセンサレス自動調整システムの開発となる。

## 参考文献

- 1) 見城 尚志: ステッピングモータとマイコン制御, 総合電子出版社 (1994)
- 2) 百目鬼 英雄: ステッピングモータの使い方, 工業調査会 (1993)
- 3) K. Matsuo, Z. Xiang, T. Miura and K. Tajima: Automatic Tuning of Pulse Timings Using Neural Network for Rotor Oscillation Damping of a Stepping Motor, IEEJ Journal of Industry Applications, 7-5, 443/444 (2018)
- 4) K. Matsuo, T. Miura and K. Tajima: Systematical Tuning for Back-phasing Damping of a Stepping Motor, IEEJ Journal of Industry Applications, 11-5, 713/714 (2022)
- 5) 松尾 健史, 三浦 武, 田島 克文: ステッピングモータの位置決め時における過度応答モデルに関する一検討, 第 50 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, B15, pp.65-66 (2018)