

# ICT を利用した誘導電動機学習支援システム

## Educational Support System for Induction Motors using ICT

福本尚生† Hisao Fukumoto  
 瀬戸口和明† Kazuaki Setoguchi  
 石橋眞† Makoto Ishibashi  
 古川達也† Tatsuya Furukawa  
 伊藤秀昭† Hideaki Itoh  
 相知政司‡ Masashi Ohchi

### 1. はじめに

近年、電気エネルギーに関する社会的な関心が高まる中、若い技術者の育成不足が問題になりつつある。電気技術の根幹をなす、電力機器・電気機器に関する学生の興味・関心はあまり高くないと思われる[1]。また、電気機器の基本原則である電磁気現象は、目に見える現象ではなく、イメージがつかみにくく、高等教育機関の座学を中心とした講義だけでは理解が深まり難い。

そこで、実験による学習が重要な役割を担うことになるが、大学等で行われる学生実験では、一つの実験テーマについて数名のグループで取り組む。これは、実験機器の数が限定されるためであるが、協調性が養われる等のメリットもある。しかし、実験に積極的に参加しない、あるいは役割分担によってデータ整理に没頭する学生が少なからず存在し、実験を行うことで体験学習する機会を十分に活かすことなく、内容の理解が十分にできないまま終わる場合もある[2]。さらに、学生実験では、場所や時間的な制約などから、同じ実験を再度確認する機会ほとんどないのが現状である[3]。

これらの問題に対する解決策として、ICT を利用した遠隔実験システムや学習支援システムなどの開発が行われている[3-5]。これらのシステムでは、クライアントサイドでの動的な画面処理の実装のために、OS に依存するアプリケーションや、Flash や Java アプレットなどの WEB プラグインを利用しているものが多く、近年普及してきているスマートフォンやタブレット端末での利用は困難である。

そこで、筆者らは、スマートフォンやタブレット端末で利用可能な、電気機器学習支援システムの開発を進めている。これまでに、直流電動機と発電機を対象とした遠隔実験システム[6]や、ステッピングモータを対象とした遠隔実験システムを提案している[7]。本論文では、誘導電動機の原理等を学習する模擬誘導電動機学習支援システム[8,9]を開発したので報告する。

### 2. 遠隔実験・学習支援システムの概要

筆者らが開発を進めている電気機器学習支援システムの概要を Fig. 1 に示す。インターネットから遠隔実験が利用可能なシステムとして構成している。本システムには、パ

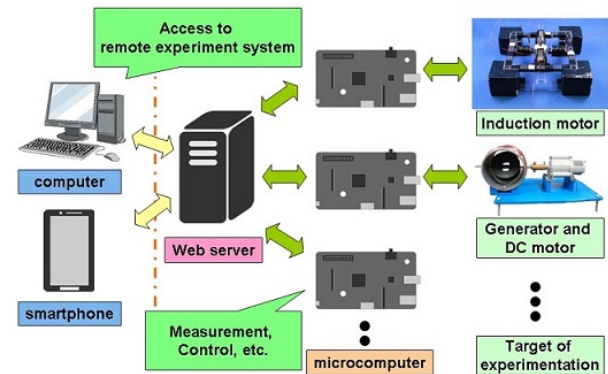


Fig.1. Remote experiment system.

ーソナルコンピュータからの利用だけでなく、スマートフォンやタブレット端末からも利用可能なように HTML5 を用いている。また、さまざまな実験を可能にするために、WEB サーバと実験サーバを独立させ、実験機器を制御するサーバには Fig. 1 に示すように、マイクロコンピュータを使用することにした。以下、本論文で提案する模擬誘導電動機の学習支援システムの構成要素について示す。

#### 2.1 WEB サーバ

インターネットから接続し利用するために、WEB サーバを構築しているが、本システムでは Node.js[10]を用いて構築している。Node.js は、JavaScript でネットワークアプリケーションを構築するためのプラットフォームであり、通常の JavaScript はクライアントサイドで実行されるものであるが、サーバサイドで実行される JavaScript である。Node.js を用いることで、JavaScript だけで WEB サーバやアプリケーションサーバを開発可能である。シングルスレッドで動作し、比較的メモリ消費量が少ないため、組み込みマイコンなどでも十分動作可能である。また、Node.js では、動的なインターネット通信が可能な WebSocket[11]通信を利用することができる。WebSocket 通信によって画像や計測データの高速転送が可能である。

#### 2.2 誘導電動機

本システムでは、誘導電動機を学習対象としたが、通常の誘導電動機では、内部構造を見ることができず、また、構造が複雑で原理の学習には適さないため、構造を単純にした模擬誘導モータを製作した。製作した模擬誘導モータを Fig. 2 に示す。

四つのコイルとヨークからなる固定子と回転子で構成されている単純な構造で、大きなトルクを得ることはできないが、回転子が回転する動作を確認することができ、仕組みや原理を学習するには十分である。

† 佐賀大学大学院工学系研究科電気電子工学専攻, Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Saga University

‡ 千葉工業大学工学部電気電子情報工学科, Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology

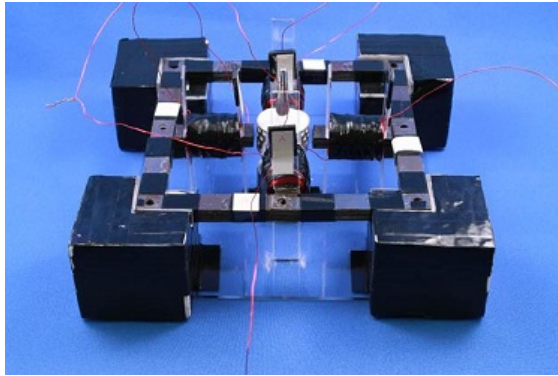


Fig.2. Developed induction motor.

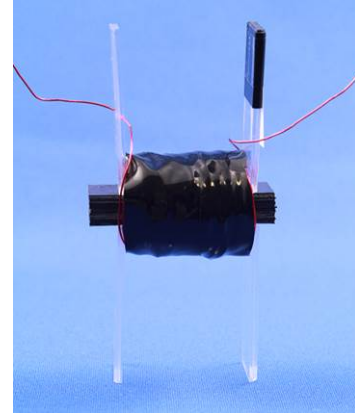


Fig.4. Coil.

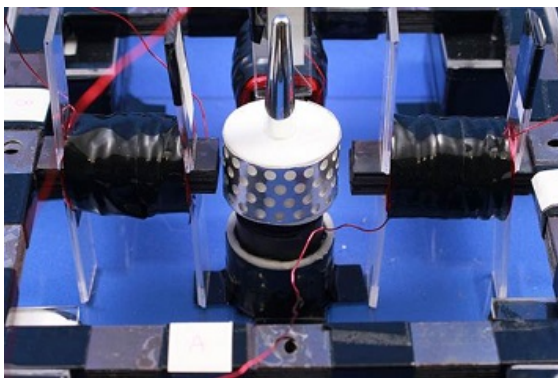


Fig.3. The rotor of induction motor.

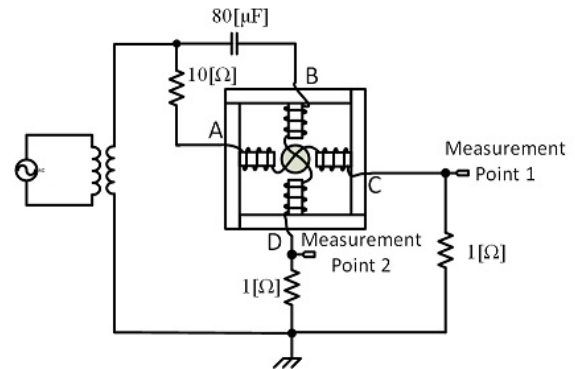


Fig.5. Basic driving and measurement circuit.

Table 1. Coil design parameter.

|            |     |
|------------|-----|
| コイル巻き数 [回] | 400 |
| 銅線径 [mm]   | 0.4 |
| 鉄心長さ [mm]  | 46  |
| 鉄心幅 [mm]   | 13  |
| 鉄心厚さ [mm]  | 7   |

Table 2. Coil parameters.

| コイル対        | AC     | BD     |
|-------------|--------|--------|
| インダクタンス[mH] | 32.54  | 31.36  |
| 内部抵抗 [Ω]    | 7.873  | 7.787  |
| インピーダンス[Ω]  | 14.576 | 14.156 |

回転子の部分を拡大したものを Fig. 3 に示す. 回転子の直径は 30[mm]であり, 軽量の発泡スチロールを用いて作成しており, その円筒状の表面には, 複数の穴が空いたアルミニウム製の板を円筒状に加工したものを設置している. 四つのコイルから生じる回転磁界によって, アルミニウムの回転子表面に渦電流が生じ, 回転する仕組みである.

コイルの設計データは Table 1 に示す通りであり, コイルの部分の拡大図を Fig. 4 に示す.

模擬誘導モータの駆動方式としては, コンデンサを用いたキャパシタ分相式を採用しており, 駆動させるための回路図を Fig. 5 に示す. 固定子の四つのコイルをそれぞれ図に示すように, A, B, C, D とすると, コイル A, C とコイル B, D がそれぞれ直列に接続されており, 二つのコイルで一對のコイルとしている. コイル対 BD については, 回路図にあるように, コンデンサを接続しているため, コイル対 AC とは位相の異なる電流が流れる. このようにして, 各コイルに交流電流を流すことで, 回転子には

二相回転磁界が生じることになる. 各コイル対を LCR メータ(3522-50, HIOKI)で周波数 60[Hz]において計測したパラメータ結果を Table 2 に示す.

### 2.3 実験サーバ

本システムでは, 実験サーバを別途構築し, WEB サーバと通信を行うことで遠隔実験を可能としている. このような仕組みとすることによって, さまざまな電気機器を新たに導入する場合にも, システム全体の構成を変更する必要がなく, 実験サーバだけを構築し直すことで, 新たな遠隔実験機器の導入が可能である. ここで, 実験サーバには, マイコンボード Raspberry Pi を使用した. Raspberry Pi では, 汎用入出力ポートやイーサネット端子, USB 端子, HDMI 端子等のインタフェースを実装しており, コンパクトでありながら, 充実した機能を有している. OS には Linux ディストリビューションの一つである Debian に基づいた Raspbian と呼ばれるものを使用し, サーバとしての利用も

可能である。Raspbian 上でサーバサイド JavaScript プラットフォームである Node.js を用いてサーバ機能を構築した。

## 2.4 電流計測回路

本システムでは、模擬誘導モータの各コイルに流れる電流を計測する必要がある。採用したマイコン Raspberry Pi には A/D 変換器は搭載されていないため、外付けで A/D 変換器 (MCP3002, Microchip) を接続し、マイコンとはシリアル通信の一つである SPI 通信でデータ転送を行っている。A/D 変換は 10bit の分解能で、マルチプレクサ方式 2ch の変換が可能であり、マイコンからのソフトウェア制御による変換速度は、実測で最大 6.6[kHz]であった。コイルに流れる電流は、オペアンプを用いたバッファ回路・オフセット回路を通して、A/D 変換器の入力に接続されている。

## 2.5 電流制御回路

模擬誘導モータを用いた遠隔実験を可能とするために、電流を制御する回路を作成した。Fig. 5 に示した回路はコイル対 AC, BD 間の電流の位相差が、90 度に近くなるようにパラメータを設定した回路を示している。しかし、回転原理の学習のためには、位相差がない場合や、位相のずれ方が逆になった場合、位相差が 90 度ではない場合などの実験も可能である方が都合がよい。そこで、マイコンからリレー素子を駆動し、回路構成を変更することで、それぞれの実験が行えるように回路を作成した。その回路図を Fig. 6 に示す。それぞれのリレースイッチ (SW0~SW3) を制御することによって、上記の各実験が遠隔操作によって可能になった。

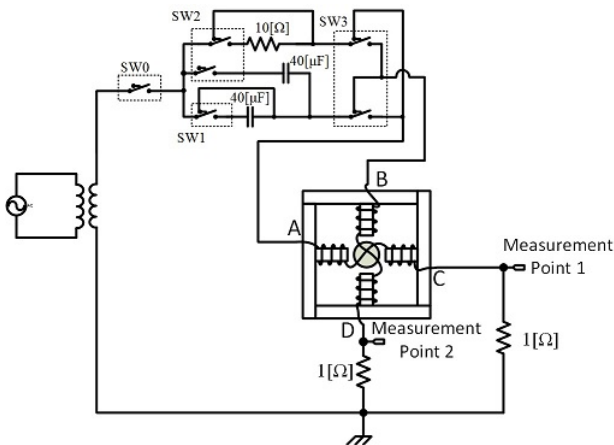


Fig.6. Relay controlled circuit.

## 2.6 動画配信カメラサーバ

遠隔実験を行う上で、実験機器の動作を動画撮影し、WEB 上で確認する必要がある。ここでは、WEB サーバと実験サーバを分離して構成しているため、動画を撮影し提供するカメラサーバを構築した (Fig. 7 参照)。実験サーバと同様に、Raspberry Pi を別途使用し、カメラには USB で接続可能な USB カメラ (QV-4000, Logicool) を使用し、Node.js で WebSocket 通信を用いてカメラ画像を WEB サーバに提供する。320×240 の画像を 30[fps]のフレームレートで動画撮影が可能であることを確認した。

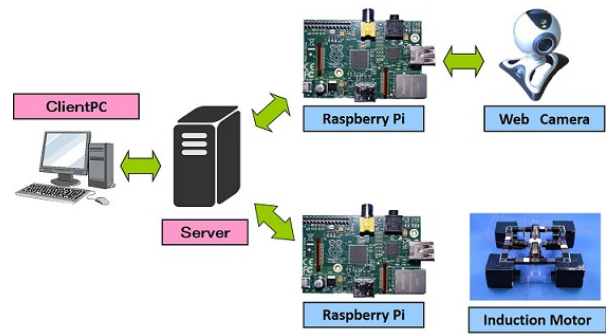


Fig.7. Experiment server and camera server.

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 電流計測実験

Fig. 5 に示す回路を用いてコイル対に流れる電流の計測実験を行った。模擬誘導モータには、変圧器によって 100[V]交流から 8[V]の交流に降圧した電圧が印加される。この時、80[μF]の容量のコンデンサによって位相が 90 度進んだ電流がコイル対 BD に流れ、回転子は回転を始める。Fig. 8 に、オシロスコープで計測点 1, 2 での電圧を測定し、抵抗値から電流値に変換したものを示す。コイル対 AC に

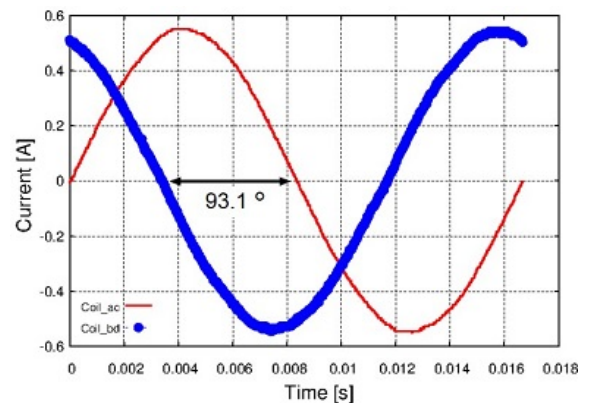


Fig.8. Current waveform of oscilloscope.

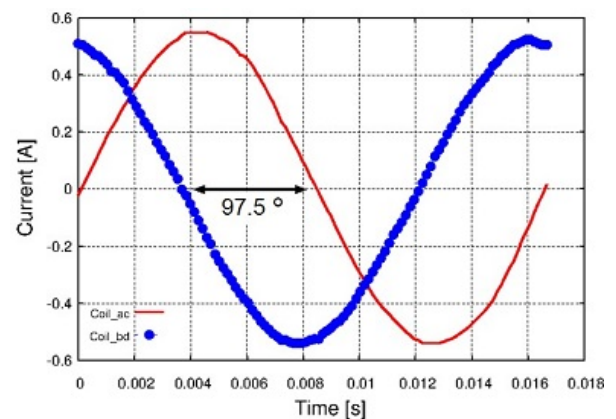


Fig.9. Current waveform of microcomputer.

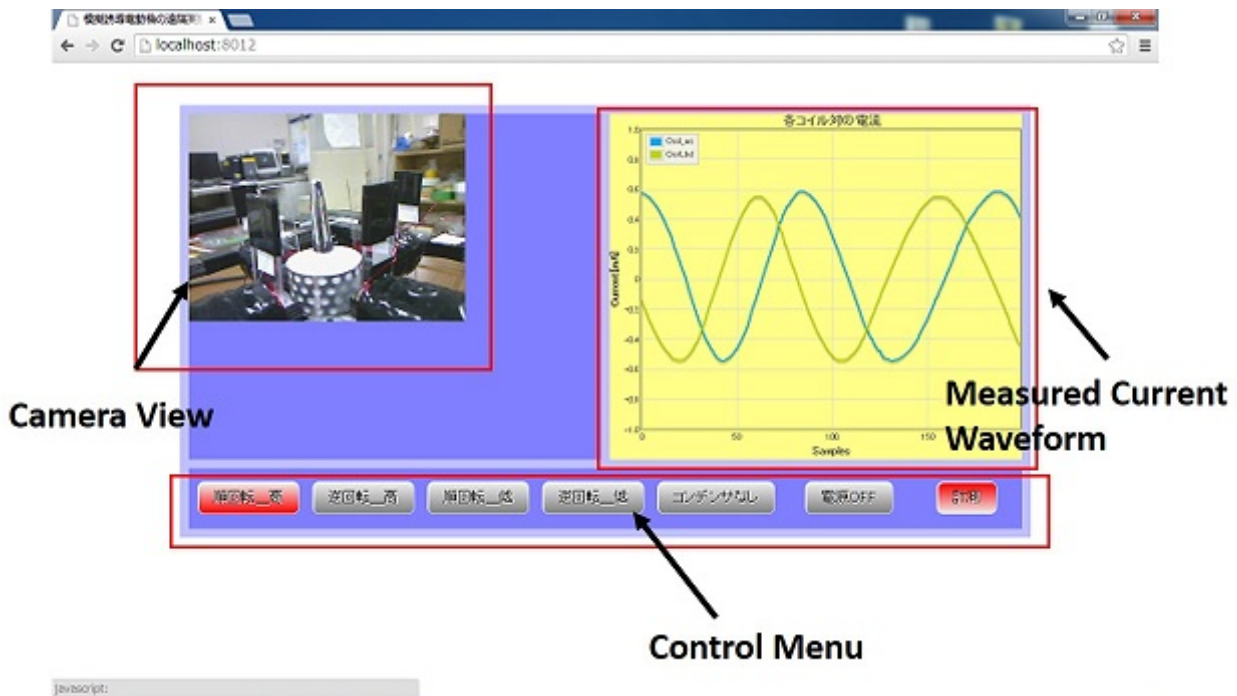


Fig. 10. Remote experiment WEB page.

対して、コイル対 BD の位相が約 93.1 度進んでいることが確認できた。また、それぞれのコイルに流れる電流の最大値は約 0.5 [A] であった。同様に、マイコンを用いた計測を行った結果を Fig. 9 に示す。この時のサンプリング周波数は 6.6[kHz] であり、コイル対間の電流の位相差は約 97.5 度であった。オシロスコープでの結果と比較すると、約 4% の誤差があった。これは、マイコンに接続している A/D 変換器が、マルチプレクサ方式で 2ch を切り換えてデジタル値に変換しているために、変換遅延が生じているものと考えられる。しかし、誘導電動機の動作原理を学習する目的のためには、十分許容できる誤差であると考えている。

### 3.2 学習支援システムの動作確認

Fig. 10 に本システムの実行画面の例を示す。図に示すように、模擬誘導モータの回転子部分の監視動画が表示される。画面の下部には、制御を行うための各種ボタンが表示されており、画面右部には、電流の計測結果がグラフ表示される。

#### (1) 順回転高速回転

「順回転\_高」のボタンを選択すると、マイコンがリレーを制御し、コイル対 BD に 40[ $\mu$ F] のコンデンサ二つが並列接続された状態になり、80[ $\mu$ F] のコンデンサが接続されたことになり、コイル対 AC, BD 間の位相差は約 90 度になる。具体的には、Fig. 6 の回路図における SW0, SW1, SW2 を ON とし、SW3 は OFF とすることで実現される。この時の回転子の回転方向を順回転方向としている。この時、WEB 画面上に表示された電流計測波形部分を Fig. 11 に示す。電流の最大値は約 0.5[A] であり、位相

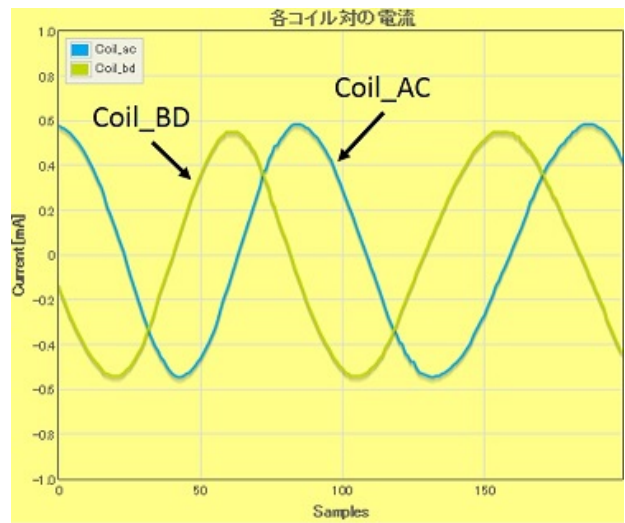


Fig. 11. Current waveforms of normal rotation (High Speed).

差を確認することができる。WEB 画面上の動画によって、回転子が回転していることを確認した。

#### (2) 逆回転高速回転

「逆回転\_高」のボタンを選択すると、マイコンからの信号を受け、Fig. 6 の回路図における SW0, SW1, SW2, SW3 を ON とすることによって、順回転の場合とは逆に、コイル対 AC に 40[ $\mu$ F] のコンデンサが二つ並列接続される。こうすることによって、80[ $\mu$ F] のコンデンサが接続されたことになり、順回転時とは位相のずれ方が逆になる。つまり、コイル対 AC の電流がコイル対 BD に比べて 90 度進むことになる。この時の、WEB 画面の計測結果を

Fig. 12 に示す。Fig. 11 と比べると、位相のずれ方が逆になっていることがわかる。この時の回転子の回転も、逆回転になることを確認した。

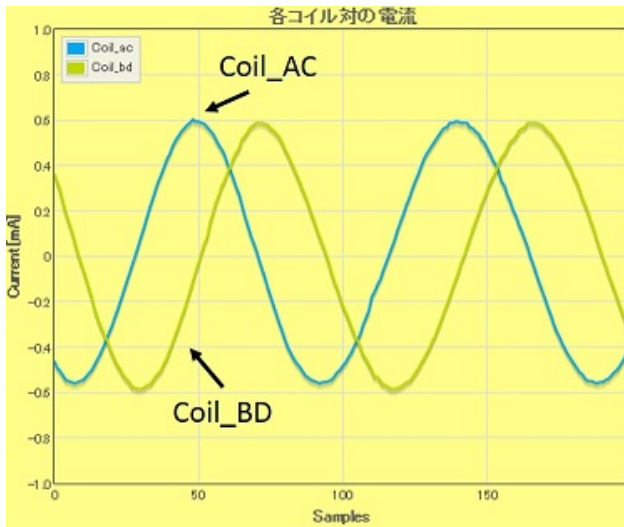


Fig. 12. Current waveforms of reverse rotation (High Speed).

### (3) 順・逆回転低速回転

「順回転\_低」「逆回転\_低」のボタンをそれぞれ選択すると、接続されるコンデンサは  $40[\mu\text{F}]$  のコンデンサが一つとなり、位相のずれが約  $130$  度になる。コイルの内部抵抗の影響もあり、それぞれのコイル対に流れる電流の大きさにも不平衡が生じることが確認できる。回転方向については、(1)、(2) の場合と同様に、コイル対の BD 側にコンデンサを接続するのか、コイル対 AC 側に接続するかで回転方向を決定する。WEB 画面上の計測結果を Fig. 13 に示す。この時の回転子の回転も (1)、(2) に示した高速回転に比べて、回転速度が遅いことが WEB 画面上の動画によって確認できた。

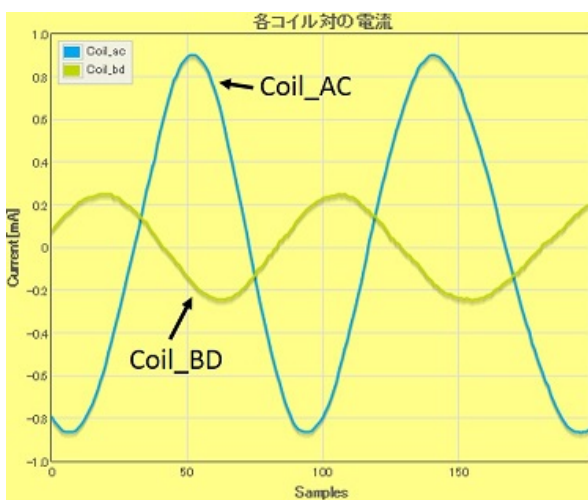


Fig. 13. Current waveforms of normal rotation (Low Speed).

### (4) コンデンサなし

「コンデンサなし」のボタンを選択すると、Fig. 6 における SW0 だけが ON になり、コイル対 AC, BD のどちらにもコンデンサが接続されない状態になり、両コイル対に流れる電流の位相差が生じない状態になる。当然この状態では、回転子は回転しない。この時の WEB 画面上の計測結果を Fig. 14 に示す。WEB 画面上の動画を確認しても、回転子は回転しないことを確認した。

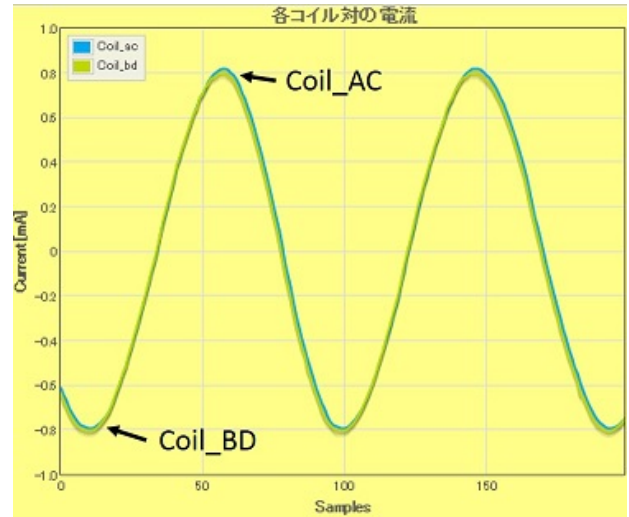


Fig. 14. Current waveforms of non-rotation.

## 4. まとめと今後の課題

ICT を利用した電気機器の学習支援システム開発の一環として、模擬誘導電動機を用いた学習支援システムを構築することができた。本システムでは、接続可能な実験機器を容易に拡張可能とするために、WEB サーバと実験サーバを分けて構築した。実験サーバにはマイコンを利用し、模擬誘導電動機の遠隔制御・計測を行うシステムの構築を行った。

WEB 上から、模擬誘導モータの正転・逆転の実験を行うことができ、その時の各コイル対の電流の位相差を確認することができた。また、位相のずれがない場合に、回転子が回転しないことや、位相ずれが異なることによって回転の効率が変化することを確認可能なシステムとして構築した。

今後の課題として、多人数アクセスに対する対応や回転原理の理解を促す学習コンテンツの充実を図る必要がある。模擬誘導モータについては、すでに CAE ツールで得られた解析結果を基に、拡張現実によって電磁界現象を実機画像の上に重ねて表示するシステム[12]を開発しており、これらのシステムとの融合を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 奥村克夫：「将来社会を支える技術者育成と産学官連携の課題」, 電気設備学会誌, Vol.28, No.4, pp.236-239 (2008)

- [2] 荒川雄介, 竹川真人, 加藤和夫, 佐々木整, 志士田有光: 「個別実験を指向した学生実験支援システムの開発とその実践」, 信学技報, ET2007-68, pp.75-78 (2007)
- [3] 宮原剛, 高橋光生, 田中清臣: 「学生実験支援のためのインターネットを利用した遠隔実験環境」, 信学技報, ET2003-107, pp.53-58 (2004)
- [4] 古川達也, 相知政司, 倉垣健治: 「インターネットを援用した遠隔操作可能な動画, 計測データ配信システムの構築」, 電気学会論文誌 C, Vol.125, No.7, pp.1077-1083 (2005)
- [5] A. Tekin, F. Ata and M. Gokbulut: “Remote control laboratory for DSP-controlled induction motor drives”, Comput. Appl. Eng. Educ. 20, pp.702-712 (2012)
- [6] M. Ishibashi, H. Fukumoto, T. Furukawa, H. Itoh and M. Ohchi: “Development of a Web-Based Remote Experiment System for Electrical Machinery Learners”, International Power Electronics Conference, 19P14-3, Hiroshima, Japan (2014)
- [7] 石橋眞, 福本尚生, 古川達也, 伊藤秀昭, 相知政司: 「ステップモータ学習のための Web ベース遠隔実験システムの開発」, 電気学会研究会資料 教育フロンティア研究会, FIE-14-042, pp.91-96 (2014)
- [8] 瀬戸口和明, 福本尚生, 古川達也, 伊藤秀昭, 相知政司: 「学習支援のための誘導機遠隔実験システムの開発」, 電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, 06-2A-01 (2014)
- [9] 瀬戸口和明, 福本尚生, 古川達也, 伊藤秀昭, 相知政司: 「誘導電動機のための遠隔実験システムの開発」, 電気学会研究会資料 教育フロンティア研究会, FIE-14-043, pp.97-102 (2014)
- [10] Node.js: “<http://nodejs.org>”
- [11] WebSocket: “<http://ajf.me/websocket/>”
- [12] 重松優希, 福本尚生, 古川達也, 伊藤秀昭, 相知政司: 「CAE 解析データを利用した電気工学学習用拡張現実ツールの開発」, 平成 26 年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 06-2A-06 (2014)