

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04451

研究課題名（和文）調整レスを実現する深層学習を用いたPMSMセンサレス制御における自動調整法の検討

研究課題名（英文）Study on automatic tuning method for PMSM sensorless control using deep learning without adjustment process

研究代表者

前川 佐理（Maekawa, Sari）

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：90849225

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではシミュレーション上で様々な出力・トルク・回転数定格のモータを多数作成しこれらに対して最適と考えられる制御パラメータの組み合わせを準備し、そしてこれら多数のモータ定格を表す入力データ、それらの最適な制御パラメータを自動調整するニューラルネットワーク（ANN）を構成した。この結果、未知のモータ定格を表す入力データを入力するとそれに適した制御パラメータを出力可能なANNの構築を実現した。更に得られた制御パラメータの組み合わせを実際のモータ駆動を再現できるシミュレータに入力し、位置センサレス制御で駆動可能なことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果により既存の多くの調整データが準備できれば熟練した技術者でなくても簡単にモータを安定に駆動するための制御パラメータのチューニングを行うことができるようになる。また、一般的な制御だけでなく大きな製品で用いられている複数の制御器切替にも対応可能でありより実践的な成果を享受できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a large number of motors with various power, torque, and speed ratings were created in simulation, and combinations of control parameters that are considered optimal for these motors were prepared. A neural network (ANN) was constructed to automatically adjust these optimal control parameters. As a result, an ANN capable of outputting control parameters appropriate for the input data representing unknown motor ratings was constructed. Furthermore, the obtained control parameter combinations were input to a simulator that can reproduce actual motor drive, and it was confirmed that the motor can be driven by position sensor-less control.

研究分野：パワーエレクトロニクス，電動機制御

キーワード：永久磁石同期モータ オートチューニング ニューラルネットワーク 制御ゲイン 安定性

1. 研究開始当初の背景

永久磁石同期モータのセンサレス制御における自動調整法の研究は、大きく2つの区分がある。1つは、巻線抵抗などの機器定数を自動で検出するための研究、2つ目は、電流制御・速度制御・センサレス制御などの制御ゲインを定量的に設計するものである。そして、これらをつなげることで永久磁石同期モータのセンサレス制御の自動調整法が実現され、産業界ではインバータメーカーやサーボメーカー等で実用化がされている。

ところが、未だ多くのケースで「自動調整・設計法を適用するにあたり、機器定数の自動検出のための測定用設定値が必要、制御ゲインを決定するための新たな別の定数が必要」という条件がみられる(図1参照)。そして、これらの新たな設定値は、モータ制御の熟練者にとっては容易に決められるが、モータ初学者や上位システム運用者(EV用モータであれば自動車システム担当)にとっては設定が困難であることが多い。すなわち「モータの機器定数の自動測定」「各制御の制御ゲインの設計」に加え「自動測定・設計に必要なパラメータの定量的な決定法」が求められている。本研究では、制御の数学モデルの解析を基礎とし、既存の多くのモータデータを用いた深層学習を組み合わせることで、調整を行う人間の技術レベルによらず自動測定・設計が可能な手法を開発する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、センサレス制御の数学モデルをベースとし、完全な調整レスを実現する自動調整法を開発することである。センサレス制御に必要な各制御パラメータとそれを検出・設計するための設定パラメータの関係を明確にした上で、特に既存の大量データと深層学習を用いた設定パラメータを用いない巻線抵抗・インダクタンス・磁石磁束・慣性モーメント等の機器定数の自動測定法電流・速度・センサレス制御等の複数の制御間の関係を考慮した制御系の安定限界を解明する。さらに、これらの知見を踏まえセンサレス制御系の制御パラメータ自動調整法を実現する。本研究により制御パラメータの自動検出・設計のための本質的な知見が得られると共に、自動調整法の実現により、永久磁石同期モータの産業製品・民生品への普及が促進される。

3. 研究の方法

初期パラメータが不要なケースへの対応策として最適化アルゴリズムやニューラルネットワークを用いた制御パラメータの自動調整方法が研究されている。しかしこれらの最適化には多くの時間が必要なほか、適正でないパラメータ設定によるモータの過回転等の問題が発生する恐れもある。一方で、企業等での開発現場では過去のPMSM適用製品における調整済みのパラメータデータ等を多数保有しているケースがある。本方式ではこれらの設計データの活用可能性について考える。電動機制御の自動調整へニューラルネットワークを用いた研究例は先に述べたように制御対象の駆動時の時系列データを用いた学習則が一般的であり、既存の制御設計のビッグデータを用いた制御系の自動調整に関する研究は見当たらない。本方式では先に述べた2つの課題を改善するために、“線形解析が困難な制御調整への適用”と“最適化アプローチにおける繰り返し動作を行わずに実現可能”な制御パラメータの自動調整方法について、大量の調整済みのPMSM駆動用パラメータデータを用いて人口ニューラルネットワーク(ANN: Artificial Neural Network)を学習し、安定にPMSMを駆動できる制御パラメータを導出する方式を検討する。

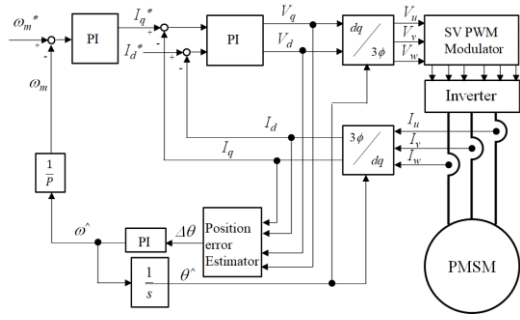
4. 研究成果

4-1. 対象とするPMSMの制御構成と問題点

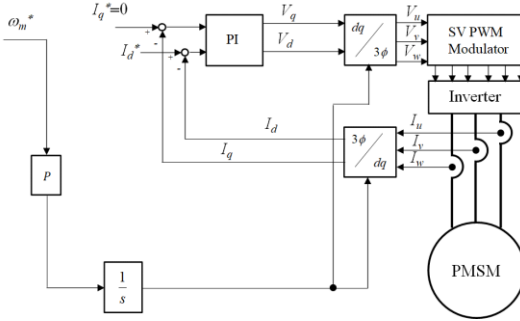
Fig.1(a)に磁束推定型のセンサレス制御でPMSMの速度制御および電流制御を行う制御構成、(b)に強制同期駆動時の制御構成、(c)に高速域での電圧位相角制御時の構成を示す。ただし ω^* 、 $\hat{\omega}$: 速度指令値、推定速度、 I_d^* 、 I_q^* 、 I_d 、 I_q : d, q軸電流指令および電流、 V_d 、 V_q : d, q軸電圧。 $\hat{\theta}$ 、 $\Delta\theta$: 推定角度、推定軸誤差である。ここで回転数が低い場合は磁極位置推定が難しいため、Fig.1(b)で示すような強制同期駆動や引き込み運転と呼ばれるオープンループ制御を行い、中速度で速度制御に切替を行う方式がファンやコンプレッサモータ用途などで多く用いられている。さらに、速度が上がり弱め磁束制御が必要な場合に(c)で示す電圧位相角制御などが用いられることが多い。これらのようにモータの運転速度条件などにより複数の制御がFig.2で示すように切り替わる構成は多くのモータ用途で適用されている。しかし制御ゲインなどの調整が不十分である場合、Fig.3に示すように同期駆動から速度制御への切替時に速度や電流の脈動、あるいは脱調が発生する。これを十分に抑制するためには制御器の初期値等の基本的な設定はもちろんであるが各々の制御器間の関係性を考慮した細かなゲイン調整および同期駆動時の電流設定などが必要となり、これらは線形解析において厳密に求めることが困難である。

4-2. ANNによる制御パラメータの自動調整法

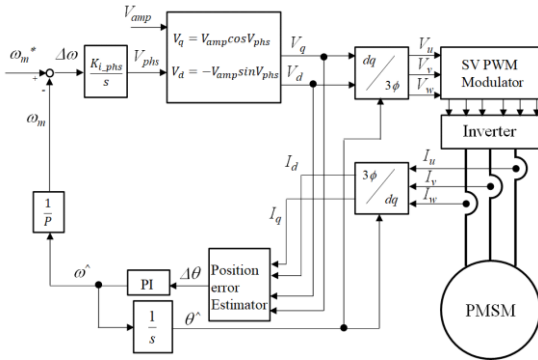
本方式では様々なPMSMの電氣的・機械的定数と各制御器の安定な制御パラメータを教師デー



(a) Sensorless speed control

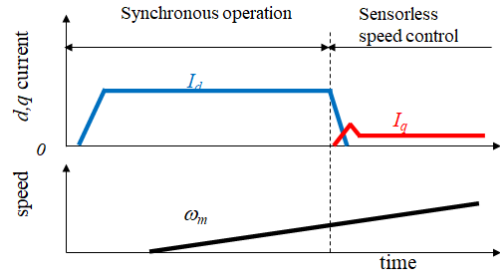


(b) Synchronous operation

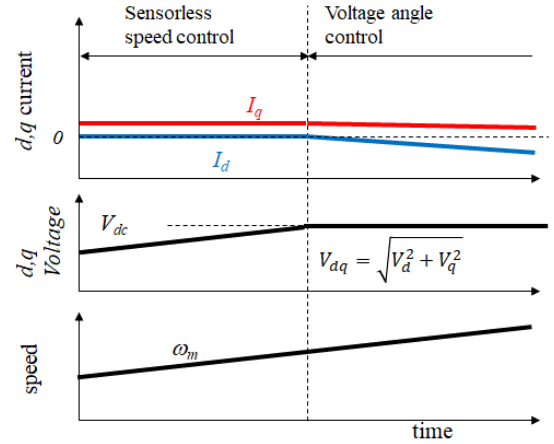


(c) Voltage angle control

Fig. 1. Configuration of each PMSM controllers.



(a) Synchronous operation to sensorless speed control



(b) Sensorless speed control to Voltage angle control

Fig. 2. Switching controller process.

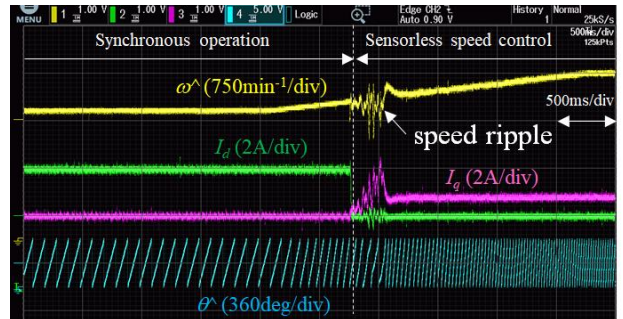


Fig. 3. Problem of conventional stability analysis.

タとし学習を行うことにより、未知のPMSMデータが与えられた場合に安定な制御パラメータを出力可能なANNを構築する。Fig. 4(a)にANNの構造を(b)に学習用データの構造を示す。入力層にはPMSMを規定する巻線抵抗、磁束等のモータ定数および複数の制御器のゲイン等のパラメータセットが入力される。中間層を通して演算される出力層はそれらの制御パラメータセットが安定であるか不安定であるかを出力する。すなわち本方式におけるANNは任意のPMSM仕様に対する制御パラメータセットの安定判別器として作用する。教師データは入力データであるパラメータセットが安定であるかの判定結果信号である。これらの学習用のデータは既存の制御調整済みのPMSMの制御ゲイン等のデータを用いる。学習時には(1)式で示す誤差評価関数Eを最小化するように各ニューロンの重み付けがバックプロパゲーションにより実行される。 $y(N_M, N_{p1}, N_{p2})$ はNMのPMSMを対象に N_{p1}, N_{p2} のパラメータをセットした場合のANNの出力、 $t(N_M, N_{p1}, N_{p2})$ は教師信号である安定判別結果で0ないし1の値をとる。なお、(1)式では調整する制御パラメータが2変数 N_{p1} をセンサレス制御の交差角周波数 ω_{PLL} 、 N_{p2} を速度制御の交差角周波数 ω_{ASR} の場合の例を示している。これらをサンプルモータ数 M_{max} の数だけ準備する。なお応答性に関わるパラメータ以外に同期駆動電流値や切替時間設定等のパラメータを選定することも可能である。

$$E = \sum_{N_M=1}^{M_{max}} \sum_{N_{p2}=1}^{P_{2max}} \sum_{N_{p1}=1}^{P_{1max}} \{y(N_M, N_{p1}, N_{p2}) - t(N_M, N_{p1}, N_{p2})\}^2 \quad \dots(1)$$

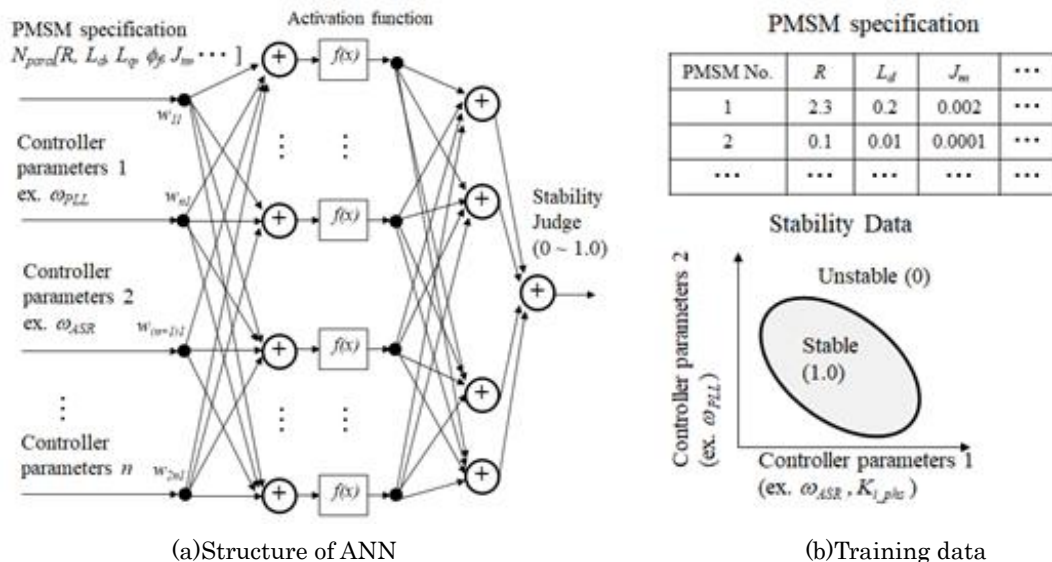


Fig. 4. Configuration of ANN in order to auto tuning.

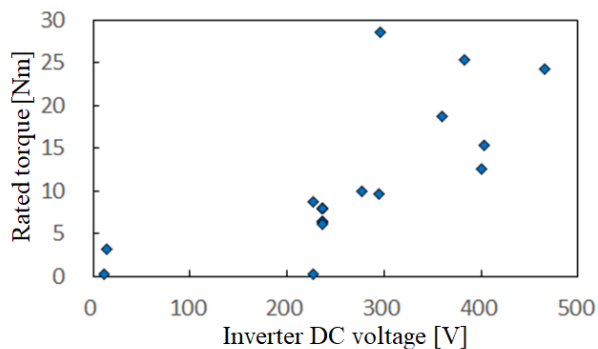


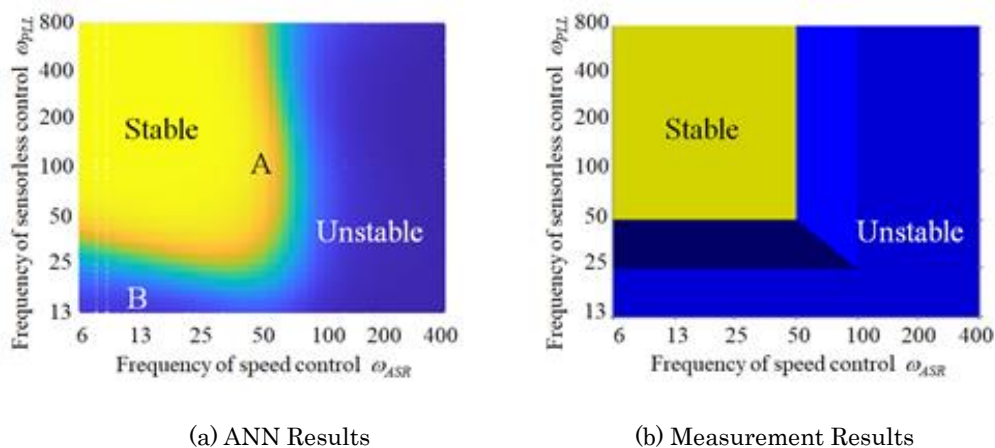
Fig. 5. PMSM specification map using learning ANN.

4-3. 実験による検証

ANNによるパラメータ自動チューニングの効果を、センサレス制御における制御器切替シーケンスを用いて検証した。まず第1に同期運転からセンサレス速度制御への切り替えを検証し、第2にセンサレス速度制御から電圧位相角制御への切替の実験結果を示す。本研究では、 $M_{max}=20$ のサンプルモータのPMSMの速度制御、センサレス制御、電圧位相制御の交差角周波数に応じたモータ仕様パラメータと安定性判別データを教師データとしてANNを学習させる。図5は、20個のサンプルPMSMの定格トルクとインバータ直流電圧の分布図である。小容量から大容量まで幅広いPMSMのデータを用意している。さらに、 ω_{ASR} 、 ω_{PLL} 、 $K_{L,phs}$ の周波数数 N_{p1} 、 N_{p2} は、それぞれ7である。ANNは収集した学習データから学習し、安定性を決定するマップを出力する。最後に、ANNから与えられた安定性マップから制御帯域やゲインを選択し、実験機で検証する。

4-4. 強制同期駆動とセンサレス速度制御における検証

図6(a)は、未知のPMSM仕様パラメータが与えられた場合の学習後のANN安定性判定結果であ



(a) ANN Results

(b) Measurement Results

Fig. 6. Stability map of ω_{ASR} and ω_{PLL} estimated by ANN.

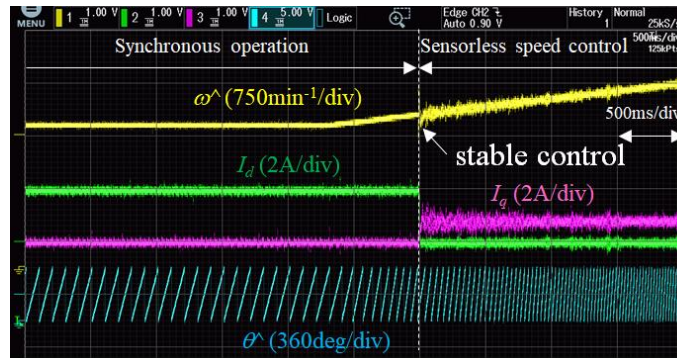


Fig. 7. Operation waveform when controller changes Synchronous operation to sensorless speed control.

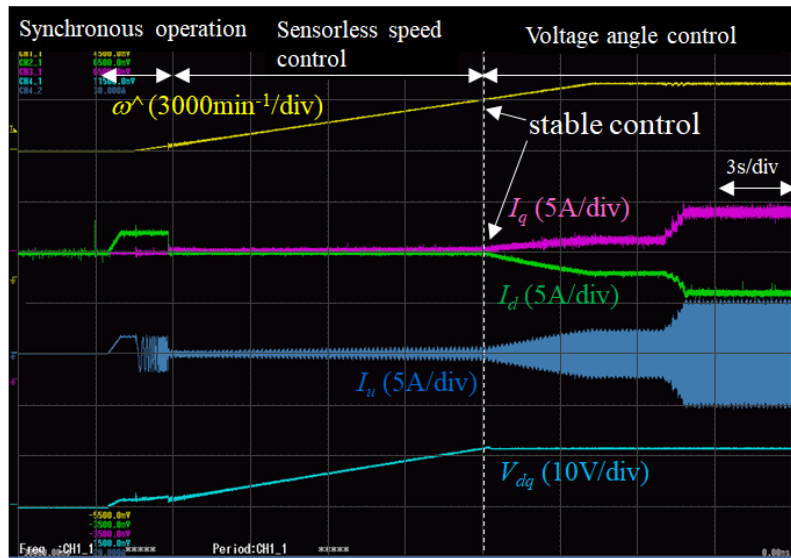


Fig. 8. Operation waveform when controller changes sensorless speed control to voltage angle control.

る。Fig. 6(b)は実際の運転試験による安定パラメータ範囲を示しており、両者はよく一致している。図 6(a)の A 点のパラメータを用いた実機の運転波形を図 7 に示すが、提案する調整方法により、コントローラ切り替え時にも速度・電流リップルを抑制することができる。一方、B 点は、図 3 に示した不安定な場合のパラメータを示している。

図 8 は、調整されたパラメータを用いて強制転流から速度制御、電圧位相角制御を行った場合の波形である。速度制御から電圧位相角制御に切り替えても大きな変動が発生せず、安定した制御が実現されていることが確認できる。

5. まとめ

開発現場の過去の制御設計データを用いて ANN を学習させることで、未知の PMSM 制御調整や、制御切り替え時の速度リップル低減など線形解析が困難な用途の調整を有効活用できることを示した。同期運転から速度制御への切り替え、速度制御から電圧角制御への切り替えをモチーフに実験を行い、提案手法が有効であることを示しました。さらに、効果的な学習のためには、各モータに対して十分な数の同調ゲインセットが必要であり、本論文では、20 個程度のモータがあれば十分であることを示した。今後、提案手法を様々な種類の制御チューニングに拡張していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Sari Maekawa | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Automatic Tuning Method for PMSM using Big Data based ANN | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications | 6. 最初と最後の頁 pp.185-186 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.L21000741 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tanaka Ami、Maekawa Sari |
| 2. 発表標題 The Proposal of discriminating stable control bandwidth using ANN in sensorless speed control system for PMSM |
| 3. 学会等名 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Maekawa Sari |
| 2. 発表標題 Self-Tuning for each PMSM Controller using Big Data based ANN |
| 3. 学会等名 IPEC2022（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

| 氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号） | 所属研究機関・部局・職 （機関番号） | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|