

# 永久磁石同期モータ

— PMSM の基礎から設計・制御・評価まで —

森本 茂雄  
真田 雅之 【共著】  
井上 征則

コロナ社

# ま え が き

永久磁石同期モータ（PMSM, PM モータ）は、1930年代のアルニコ磁石の発明により研究開発が始まり、フェライト磁石の発明により実用化が進み、希土類永久磁石の発明により小型・高効率モータとしてさまざまな用途に適用され飛躍的な発展を遂げている。

PMSMの発展には、永久磁石材料の進歩だけでなく、可変速駆動を可能とするパワーエレクトロニクス技術やベクトル制御、センサレス制御などのモータ制御理論の進歩とそれら高性能制御を実現するマイクロプロセッサの発展がある。さらに、有限要素法による磁界解析を用いたモータ構造設計、特性評価技術も大きな役割を果たしている。

PMSMの中でも永久磁石をロータ内に埋め込んだ埋込磁石同期モータ（IPMSM）は、多様な運転範囲・出力特性・運転性能を実現できる性能設計自由度が大きく、かつ組込機器における寸法制約や形状制約を満たすことができる形状設計自由度があるモータである。そのため、エアコンのコンプレッサ駆動用など家電用モータ、ハイブリッド自動車や電気自動車などの電動車（xEV）駆動用モータではIPMSMが主流となっている。さらに鉄道車両、産業機械などの用途に加え、風力発電や小水力発電など再生可能エネルギー発電用の発電機としても適用されている。IPMSMは代表的な用途指向形モータであり、寸法や電源仕様などの制約条件を満たしつつ使用目的に応じた性能を発揮するモータを設計するには、モータの構造設計だけでなく駆動回路、制御を含めたモータドライブシステム全体の理解と最適化が必要である。

本書は、上述の視点よりPMSMの制御と設計の基礎から具体的な制御システムとモータ設計手法までをまとめたものであり、実際の研究事例や特性評価法も述べている。1章では、PMSMの制御と設計の基礎としてPMSMの概要や

数学モデルについて説明している。2章と3章では、PMSMのベクトル制御について、電流ベクトル制御法、モータパラメータと出力特性の関係やベクトル制御システムの設計法などを説明している。4章ではセンサレス制御システムの設計法や高精度化手法について説明している。5章では、直接トルク制御の基本から実際の設計法まで詳細に説明している。6章では、PMSMの構造と有限要素法による特性解析法、および特性改良設計事例について説明している。7章では、IPMSMのさまざまな用途、目的に応じたモータ構造設計事例を詳細に説明している。8章では、モータ特性評価システムと評価について具体的事例とともに説明している。各章には、できるだけ多くの設計事例や実験結果を含めることで、理論だけでなく具体的なイメージが持てるように配慮した。

本書が、モータの設計・制御やその応用に携わっておられる方々、およびこの分野の研究を志す学生諸君に少しでも役立ち、高効率モータの開発と電動化の推進、ひいてはカーボンニュートラルの実現に寄与できれば幸いである。

本書の執筆にあたり、数多くの専門書や学術論文を参考にさせていただいた。それらの執筆者や研究者に対して敬意と感謝を表す。また、本書の解析・実験データの多くは著者らの研究室に所属した学生諸君の研究成果であることを付記して感謝の意を表す。

最後に、本書を執筆する機会をいただき、出版にご尽力いただいたコロナ社の関係各位に謝意を表す。

2024年5月

著者を代表して 森本 茂雄

# 目 次

## 1 章 永久磁石同期モータの基礎

1.1 はじめに	1
1.2 PMSM の概要	1
1.3 PMSM の基本構造	3
1.3.1 電機子巻線と回転磁界	3
1.3.2 PMSM のロータ構造	6
1.4 トルク発生原理	8
1.5 PMSM の特徴	11
1.6 数学モデルと基本式	13
1.6.1 各種座標系と座標変換	13
1.6.2 三相座標系の電圧方程式	16
1.6.3 $\alpha$ - $\beta$ 座標系の電圧方程式	18
1.6.4 $d$ - $q$ 座標系の電圧方程式	19
1.6.5 $d$ - $q$ 座標系での特性式	20
引用・参考文献	26

## 2 章 電流ベクトル制御法と出力特性

2.1 はじめに	29
2.2 電流ベクトルと基本特性	29
2.2.1 電流一定時の電流位相制御特性	29
2.2.2 トルク一定時の電流位相制御特性	30
2.2.3 鎖交磁束一定時の電流位相制御特性	31

2.2.4	電流ベクトル平面上の特性曲線	32
2.3	電流ベクトル制御法	34
2.3.1	最大トルク／電流制御	34
2.3.2	最大トルク／磁束制御（最大トルク／電圧制御）	35
2.3.3	弱め磁束制御	37
2.3.4	最大効率制御	39
2.4	最大出力（最大トルク）制御法	40
2.4.1	電流ベクトルの選択可能範囲	40
2.4.2	制御モードⅠ	41
2.4.3	制御モードⅡ	42
2.4.4	制御モードⅢ	43
2.4.5	最大出力制御	43
2.5	モータパラメータと出力範囲	46
2.5.1	最小 $d$ 軸鎖交磁束と速度-トルク・出力特性	46
2.5.2	可変磁束モータ	47
2.5.3	速度-トルク・出力特性の一般化	49
2.5.4	要求出力特性を満たすモータパラメータの範囲	51
	引用・参考文献	56

### 3章 ベクトル制御システム

3.1	はじめに	59
3.2	電流制御システム	59
3.2.1	ベクトル制御システムの全体構成	59
3.2.2	電流制御システムの基本構成	60
3.3	ベクトル制御	64
3.3.1	速度制御システム	64
3.3.2	モータモデルに基づく電流ベクトル制御	65
3.3.3	電圧フィードバックによる弱め磁束制御	67
3.3.4	高速時の $d$ 軸電流優先制御	68
3.3.5	損失最小化制御	70

3.3.6	電圧利用率向上による高出力・高効率化	72
3.3.7	方形波駆動（1パルス駆動）	73
3.4	モータパラメータのオンライン同定	75
3.4.1	同定アルゴリズム	76
3.4.2	パラメータ同定用モータモデル	76
3.4.3	同定モデルと同定特性例	78
	引用・参考文献	81

## 4章 センサレス制御

4.1	はじめに	84
4.2	センサレス制御の概要	84
4.2.1	位置推定の基本原理	84
4.2.2	各種センサレス制御法	86
4.2.3	基本システム構成	88
4.3	拡張誘起電圧推定方式	89
4.3.1	$\alpha$ - $\beta$ 座標系での位置推定	89
4.3.2	回転座標系での位置誤差推定	90
4.3.3	位置・速度の推定法	92
4.3.4	拡張誘起電圧推定方式の特性	94
4.3.5	過変調，方形波駆動時の特性	95
4.4	高周波信号重畳方式	100
4.4.1	高周波信号重畳方式の基本	100
4.4.2	高周波電圧重畳方式	101
4.4.3	高周波信号重畳方式の特性	104
4.5	全速度域センサレス制御	107
4.6	位置推定精度の向上	109
4.6.1	モデルベースセンサレス制御における位置推定誤差の要因	109
4.6.2	パラメータ同定による推定精度の向上	111
4.6.3	低速時の特性改善	114

4.7 電流センサレスと低分解能位置情報の高分解能化	115
4.7.1 電流センサレス制御システム	116
4.7.2 低分解能位置センサのみを用いたベクトル制御システム	117
引用・参考文献	122

## 5章 直接トルク制御

5.1 はじめに	126
5.2 トルクと磁束を制御する原理	126
5.2.1 システム構成と特徴	126
5.2.2 トルク制御	129
5.2.3 磁束制御	131
5.2.4 制御できる条件	132
5.3 トルクと磁束の指令値作成法	133
5.3.1 電流制限のためのトルク制限	135
5.3.2 最大トルク／磁束制御のためのトルク制限	135
5.3.3 最大トルク／電流制御のための指令磁束作成	135
5.3.4 弱め磁束制御のための磁束制限	137
5.4 DTC のシステム構成	138
5.4.1 磁束推定	138
5.4.2 トルク推定	141
5.4.3 指令電圧計算	141
5.4.4 トルク制御器のゲイン設計	145
5.4.5 制御特性	147
5.5 DTC の高性能化	150
5.5.1 トルク制御系の線形化	151
5.5.2 トルク制御器のアンチワインドアップ	153
5.5.3 トルク制御系の異なる構成	155
5.5.4 FPGA に適した指令電圧計算式の演算高速化	158
5.5.5 弱め磁束制御に関する電流制御方式との比較	161
引用・参考文献	166

## 6章 設計の基礎と特性解析法

6.1 はじめに	170
6.2 モータ構成要素	170
6.2.1 モータ構成要素の概要	170
6.2.2 永久磁石配置	171
6.2.3 フラックスバリア	176
6.2.4 電機子巻線（分布巻）	177
6.2.5 電機子巻線（集中巻）	180
6.2.6 特殊な巻線方式	182
6.3 有限要素法による磁界解析	183
6.3.1 有限要素法の概要	183
6.3.2 ポストプロセスにおける諸量の計算	186
6.4 基本特性の算出法	191
6.4.1 瞬時トルク	191
6.4.2 電流位相-トルク特性	193
6.5 $d$ - $q$ 座標モデルのモータパラメータ算出法	194
6.5.1 永久磁石による電機子鎖交磁束	195
6.5.2 $d, q$ 軸インダクタンス	198
6.6 制御特性の算出法	200
6.6.1 最大トルク/電流制御	200
6.6.2 電圧制限の取り扱い	200
6.6.3 弱め磁束制御	201
6.6.4 最大トルク/磁束制御	202
6.6.5 鉄損の考慮	204
6.6.6 効率の計算	205
6.7 ロータ構造のモータパラメータへの影響	206
6.7.1 永久磁石の埋込方法	207
6.7.2 永久磁石の埋込深さ	208
6.7.3 磁石層数	211

6.7.4	フラックスバリア	212
6.8	設計プロセスと設計例	213
6.8.1	設計のプロセス	213
6.8.2	磁石材料変更時に特性を維持できるロータ設計	215
	引用・参考文献	221

## 7章 IPMSM の設計

7.1	はじめに	223
7.2	電動車駆動用モータの高効率化	223
7.3	電動車駆動用モータの小型・高出力・高効率化	230
7.3.1	小型・高速化による出力密度の向上	230
7.3.2	高性能磁性材料の適用による高効率化	234
7.3.3	遠心力に対するロータ機械強度の確保	237
7.4	低振動・静音化	239
7.4.1	スキュー	240
7.4.2	フラックスバリア非対称化	241
7.4.3	ロータ表面窪みによるコギングトルク低減	246
7.4.4	微小ホール配置によるラジアル力低減	248
7.5	省・脱レアアース化	252
7.5.1	フェライト磁石補助形同期リラクタンスモータ	253
7.5.2	希土類ボンド磁石 PMASynRM	257
7.6	可変磁束モータ	261
7.6.1	アクティブタイプの構造例	262
7.6.2	パッシブタイプの構造例	264
7.7	自動設計システム	266
7.7.1	遺伝的アルゴリズムと粗メッシュ FEM を用いた自動設計システム	267
7.7.2	自動設計システムによる高効率運転領域最大化	268
7.7.3	自動設計システムによるトルクリプル最小化設計	271
	引用・参考文献	275

## 8章 モータ特性評価法

8.1 はじめに	279
8.2 実験システムの構成	279
8.3 電気系定数の測定	285
8.3.1 概要	285
8.3.2 永久磁石による電機子鎖交磁束	285
8.3.3 $d, q$ 軸インダクタンス	288
8.4 特性測定	291
8.4.1 電流位相-トルク特性	291
8.4.2 速度-トルク特性	293
8.4.3 効率特性, 効率マップ	294
8.4.4 瞬時トルク波形	295
8.5 損失分離	297
8.5.1 銅損・機械損・鉄損	297
8.5.2 PWM 高調波による鉄損	299
引用・参考文献	300
索引	302

# 1 章 永久磁石同期モータの基礎

## 1.1 はじめに

永久磁石同期モータ（**PMSM**：permanent magnet synchronous motor）は、永久磁石界磁の同期モータであり、永久磁石の形状や配置に自由度があるためさまざまな構造が提案されている。しかし、その動作原理や数学モデルは基本的に共通である。本章では、まず PMSM の概要を述べ、基本構造をもとに動作原理と特徴を説明する。また、座標変換を用いて代表的な座標系での PMSM の数学モデルを導出し、2 章以降の PMSM の制御および設計の基礎とする。

## 1.2 PMSM の概要

PMSM は、1930 年代のアルニコ磁石の発明により開発が始まり、その後のフェライト磁石（ferrite magnet）の発明やインバータによる可変速駆動により実用化が進んだ。さらにサマリウムやネオジムを用いた希土類永久磁石（rare earth permanent magnet）の発明により、PMSM は小型、高効率な高性能モータとしてさまざまな用途に適用され飛躍的な発展を遂げている<sup>1)~15)†</sup>。

次節で説明するように PMSM のステータ（stator, 固定子）の構造は基本的に誘導モータ（**IM**：induction motor）と同様であり、ロータ（rotor, 回転子）

---

† 肩付き数字は章末の引用・参考文献の番号を表す。

## 2 1. 永久磁石同期モータの基礎

の構造のみ異なるブラシレス交流モータである。IM はすべりに伴うロータ銅損が発生するが、同期モータ (synchronous motor) である PMSM にはすべりがなくロータ銅損が生じないことに加えて、永久磁石で界磁磁束を得るため励磁損失もなく低損失、高効率なモータである。さらに、希土類永久磁石のように強い磁石を用いることで、トルク／電流比の増加による高トルク化、高力率化やさらなる高効率化が可能となる。

PMSM の発展にはつぎのような要因を挙げることができる。

- ・ 永久磁石の高性能化と鉄心材料の低鉄損化など磁性材料の進歩、および加工、組立などの生産技術の進歩
- ・ 有限要素法による磁界解析を用いた電磁構造設計や特性評価など計算機援用設計・解析技術の進歩と磁界解析ソフトウェアの汎用化、およびパソコンの計算能力の飛躍的な向上
- ・ モータを駆動するインバータ回路と半導体スイッチングデバイスの進歩や実装技術の向上
- ・ ベクトル制御やセンサレス制御などモータ制御理論の発達と高性能制御を実現するマイクロプロセッサの進歩やモータドライブ専用 IC の開発
- ・ 環境・エネルギー問題、カーボンニュートラルへの対応のための高効率・省エネルギー化への強い要求

PMSM の代表的な用途の一つは家電である。エアコンのコンプレッサ駆動用モータとして、1982年10月にフェライト磁石をロータ表面に張りつけた**表面磁石同期モータ (SPMSM : surface permanent magnet synchronous motor)**を120°通電方式でインバータ駆動するエアコンが国内で量産開始されている<sup>16)~18)</sup>。

1996年3月にはロータ内部に永久磁石を埋め込んだ**埋込磁石同期モータ (IPMSM : interior permanent magnet synchronous motor)**を用いてリラクタンストルクを有効利用したエアコンが発売されている<sup>16)~18)</sup>。その後、PMSM は冷蔵庫や洗濯機にも適用され、2000年頃からは、掃除機にも適用されている<sup>18)~20)</sup>。

自動車駆動用モータとしては、1997年に発売された量産型ハイブリッド自動車にIPMSMが採用されており、現在はハイブリッド自動車や電気自動車の駆動用モータとして、IPMSMが主流となっている<sup>19),21)</sup>。ほかにも鉄道車両、産業機械などに加え、風力発電や小水力発電など再生可能エネルギー発電用の発電機としても適用されている。

PMSM、特にIPMSMは「モータの構造や機構そのものを変えて、機械あるいは機構の要求特性を実現させるいわば“ハード”的なアプローチの考えに基づいたモータ」と定義される**用途指向形モータ (ASEM: application-specific electric motors)**<sup>14),15)</sup>に相当する代表的なモータであり、カーボンニュートラルの実現と電動化が加速する中でPMSMはますます適用範囲を拡大していくものと思われる。

## 1.3 PMSM の基本構造

### 1.3.1 電機子巻線と回転磁界

PMSMのステータ巻線は、誘導モータと同じ交流モータの巻線構造である**対称三相巻線 (symmetrical three-phase winding)**が基本であり、**電機子巻線 (armature winding)**と呼ばれる。**図 1.1**に電機子巻線の例を示す。ステータのスロットにu相、v相、w相の三相巻線が電気角で120°間隔で対称に巻かれている(対称三相巻線)。巻線の巻き方、配置により極数が変わるが、本節の説明ではおもに2極機をもとに説明する。

図 1.1(a)の分布巻線を**図 1.2**のように集中巻(全節集中巻)で等価的に表し、各巻線電流が作る**磁束密度 (magnetic flux density)**の空間的な分布を正弦波で近似する。この磁束密度分布をベクトルで表すと**図 1.2(a)**の磁束密度ベクトル $B_u, B_v, B_w$ となり、その方向を巻線軸と呼ぶ。各巻線軸は電気角で120°間隔となる。また、本章では対称三相巻線を**図 1.2(b)**のように表記する。なお、PMSMで一般に用いられている集中巻は**図 1.2(a)**の全節集中巻ではなく、6.2.5項で説明する短節集中巻である。

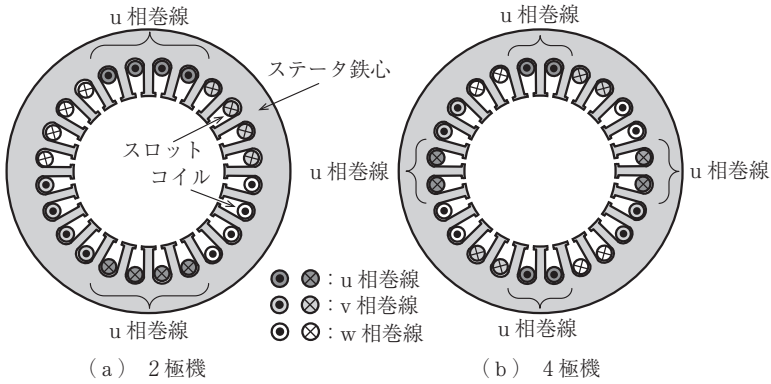


図 1.1 電機子巻線の例 (対称三相巻線)

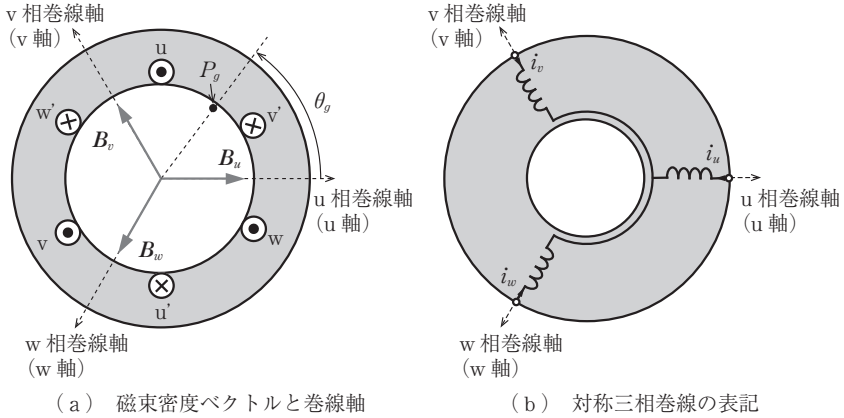


図 1.2 対称三相巻線による磁束密度ベクトルと巻線の表記

三相巻線電流  $i_u, i_v, i_w$  による磁束密度の空間分布は次式で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned}
 B_u(\theta_g) &= K_g i_u \cos \theta_g \\
 B_v(\theta_g) &= K_g i_v \cos \left( \theta_g - \frac{2\pi}{3} \right) \\
 B_w(\theta_g) &= K_g i_w \cos \left( \theta_g - \frac{4\pi}{3} \right) = K_g i_w \cos \left( \theta_g + \frac{2\pi}{3} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

ただし、 $K_g$ ：コイルの巻数や磁気回路のパーミアンス等で決まる定数、 $\theta_g$ ：エアギャップの位置  $P_g$  の基準軸 (u 相巻線軸) からの角度 (図 1.2(a)参照)，である。

三相巻線電流として式(1.2)に示す角周波数 $\omega$ の平衡三相交流電流 (balanced three-phase alternating current) (図1.3参照) を流したときの磁束密度の空間分布は、式(1.3)となる。

$$\left. \begin{aligned} i_u &= I \cos \omega t \\ i_v &= I \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_w &= I \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = I \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} B(\theta_g) &= B_u(\theta_g) + B_v(\theta_g) + B_w(\theta_g) \\ &= K_g I \cos \theta_g \cos(\omega t) \\ &\quad + K_g I \cos \left( \theta_g - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + K_g I \cos \left( \theta_g - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \\ &= \frac{3}{2} K_g I \cos(\theta_g - \omega t) \end{aligned} \quad (1.3)$$

図1.3に $\omega t = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ のとき(図中の①~④に対応)の磁束密度分布と合成磁束密度ベクトル $\mathbf{B}$ を示す。磁束密度が最大となる位置 $\theta_{gm}$ は $\omega t$ で

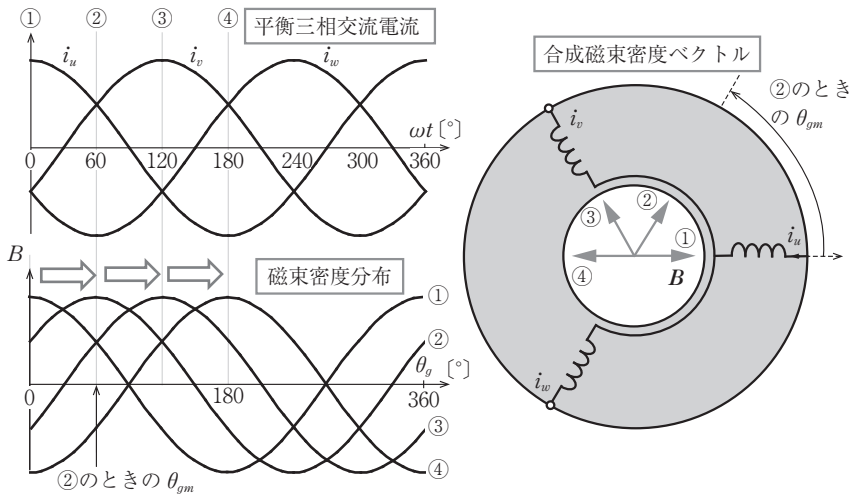


図1.3 平衡三相交流電流による回転磁界の発生

# 索引

<b>【あ】</b>	過変調駆動	96	最大エネルギー積	253		
アンチwindアップ	153	可変漏れ磁束モータ	265	最大効率曲線	39	
<b>【い】</b>	<b>【き】</b>	基準モータ	215	最大効率制御	39, 71	
位置センサ	281	希土類永久磁石	1	最大出力制御	43	
位置センサレス制御	84	希土類焼結磁石	215	最大トルク角	133	
遺伝的アルゴリズム	267	希土類ボンド磁石	215	最大トルク/磁束制御	35	
インクリメンタルエンコーダ	282	逆円弧形	173	最大トルク制御	43	
インセット形	172	逆突極	7	最大トルク/電圧制御	36	
<b>【う】</b>	局所インダクタンス	25	最大トルク/電流曲線	35		
渦電流損	189	極性判別	103	最大トルク/電流制御	34	
埋込磁石形	171	<b>【く】</b>	座標変換	14		
埋込磁石同期モータ	2, 7	空間高調波	24	三角波比較方式 PWM 制御	72	
<b>【え】</b>	空間ベクトル変調方式	72	参照テーブル	136		
エアギャップ磁束密度分布	173	クニック点	254	三相座標系	18	
永久磁石同期モータ	1	クロスカップリング	25	<b>【し】</b>		
永久磁石補助形同期	253	クロスサチュレーション	25	磁気ベクトルポテンシャル	184	
リラクタンスモータ	253	<b>【け】</b>	ゲインスケジューリング	151	磁気飽和	24
<b>【お】</b>	<b>【こ】</b>	高周波信号重畳方式	100	軸間干渉	25	
オンラインパラメータ同定	76, 111	高周波電圧重畳方式	101	ジスプロシウム	257	
<b>【か】</b>	効率特性	294	磁束障壁	7		
回転磁界	6	効率マップ	206, 295	磁束密度	3	
外乱オブザーバ	91	コギングトルク	182	磁束密度分布図	187	
拡張磁束	65	国際調和排出ガス・		集中巻電機子巻線	177	
拡張誘起電圧	89	燃費試験法	236	省レアアースモータ	253	
可変磁束モータ	49	コンシクエントポール	264	指令磁束ベクトル計算器	142	
過変調 PWM 制御	72	<b>【さ】</b>	最小 $d$ 軸鎖交磁束	46, 201	シンクロナスリラクタンスモータ	10
					<b>【す】</b>	
					スイッチングテーブル	138
					スキュー	240

ステータ	1	電流位相	21	ヒステリシス損	189
スリップリング	263	電流最小化制御	70	非対称構造ロータ	242
<b>【せ】</b>		電流制御システム	60	非突極機	7
静的インダクタンス	25	電流制限円	40	表面磁石形	171
絶対変換	14	電流センサレス制御	115	表面磁石同期モータ	2, 7
全節巻	179	電流ベクトル制御法	29	比例・積分制御器	61
<b>【そ】</b>		電流ベクトル平面	32	<b>【ふ】</b>	
		電力不変変換	14	フェライト磁石	1, 253
相対変換	15	<b>【と】</b>		不可逆減磁	254
損失最小化制御	71	等価鉄損抵抗	23	不完全積分器	139
<b>【た】</b>		同期角速度	6	ブラシレス DC モータ	115
対称構造ロータ	242	同期モータ	2	フラックススイッチング モータ	264
対称三相巻線	3	等高線図	295	フラックスバリア	7
脱リアアースモータ	253	動的インダクタンス	25	分布係数	179
縦埋込形	172	突極機	7	分布巻電機子巻線	177
短節係数	180	突極性	7	<b>【へ】</b>	
短節巻	179	突極比	20	平均インダクタンス	25
<b>【ち】</b>		トルク角	74, 129	平衡三相交流電流	5
逐次最小二乗法	76	トルク制御系	145	ベクトル制御	29
直接トルク制御	87, 126	トルクリプル	176	ベクトル制御システム	59
<b>【て】</b>		トルクリプル振幅	273	ヘテロダイン処理	101
定鎖交磁束楕円	33	トルクリプル率	192	<b>【ほ】</b>	
デジタル信号プロセッサ	158	<b>【な】</b>		方形波駆動	72, 73, 97
定出力運転範囲	51	軟磁性材料	171	ホールセンサ	117
定電流円	32	<b>【に】</b>		<b>【ま】</b>	
定トルク曲線	33	二相変調方式	72	巻線温度	279
低分解能位置センサ	118	<b>【ね】</b>		巻線係数	180
定誘起電圧楕円	33	ネオジム	257	マクスウェル応力	187
鉄損	23, 189	熱電対	281	マグネットトルク	8, 22
デッドタイム補償	62	<b>【は】</b>		マグネットトルクと リラクタンストルクの分離	193
テルビウム	257	ハイブリッド界磁モータ	49	<b>【み】</b>	
電圧一定制御	37	ハイブリッド自動車	223	ミーゼス応力分布	237
電圧制限楕円	37, 40	パルス幅変調	127	<b>【め】</b>	
電圧方程式	16	パルス幅変調インバータ	62	メモリモータ	49
電機子鎖交磁束	131	<b>【ひ】</b>			
電気自動車	223	比較器	138		
電機子巻線	3	非干渉制御	60		
電動車駆動用モータ	223				

<b>【ゆ】</b>		横埋込形 弱め磁束制御	172 37, 66	<b>【れ】</b>	
有限要素法	183			レゾルバ	282
誘導モータ	1	<b>【ら】</b>		<b>【ろ】</b>	
ユニタリ行列	14	ラジアル力	248	ロータ	1
<b>【よ】</b>		<b>【り】</b>		ローパスフィルタ	90, 148
用途指向形モータ	3	リラクタンストルク	9, 22		

<b>【A】</b>		<b>【I】</b>		<b>【Q】</b>	
ASEM	3	$i_d=0$ 制御	44	$q$ 軸	7
<b>【C】</b>		IM	1	<b>【R】</b>	
CPSR	51	IPMSM	2	RFVC	142
<b>【D】</b>		<b>【L】</b>		RLS 法	76
$d-q$ 座標	13	LPF	90, 148	<b>【S】</b>	
$d-q$ 座標系	19	LUT	136	SPMSM	2
$d-q$ 変換	16	<b>【M】</b>		SynRM	10
DSP	158	MTPA 曲線	35	<b>【V】</b>	
DTC	87, 126	MTPA 制御	34, 66	V/f 一定制御	87
$d$ 軸	7	MTPF 制御	35	V 字形	172
$d$ 軸電流優先制御	69	MTPF 曲線	37	<b>【W】</b>	
<b>【E】</b>		MTPV 制御	36	WLTP	236
EEMF	89	MTPV 曲線	37		
EV	223	M-T 座標	128	<b>【ギリシャ文字】</b>	
<b>【F】</b>		<b>【P】</b>		$\alpha-\beta$ 座標	13
FEM	183	PE 性	78	$\alpha-\beta$ 座標系	18
FPGA	158	PI 制御器	61	$\alpha-\beta$ 変換	15
FW 制御	37	PLL	90	<b>【数字】</b>	
<b>【G】</b>		PLL 制御	93	1 パルス駆動	72, 73, 97
GA	267	PMASynRM	253	3 次調波注入方式	72
<b>【H】</b>		PMSM	1	120° 矩形波駆動	117
HEV	223	PS	281		
		PWM	127		
		PWM インバータ	62, 72		

—— 著者略歴 ——

**森本 茂雄**（もりもと しげお）

- 1984年 大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程修了（電気工学専攻）
- 1984年 三菱電機株式会社入社
- 1988年 大阪府立大学助手
- 1990年 工学博士（大阪府立大学）
- 1993年 大阪府立大学講師
- 1994年 大阪府立大学助教授
- 2006年 大阪府立大学教授
- 2022年 大阪公立大学教授
- 現在に至る

**真田 雅之**（さなだ まさゆき）

- 1991年 大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程修了（電気工学専攻）
- 1994年 大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了（電気工学専攻）、  
博士（工学）
- 1994年 大阪府立大学助手
- 1997年 大阪府立大学講師
- 2007年 大阪府立大学准教授
- 2022年 大阪公立大学准教授
- 現在に至る

**井上 征則**（いのうえ ゆきのり）

- 2007年 大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程修了（電気・情報系専攻）
- 2010年 大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了（電気・情報系専攻）、  
博士（工学）
- 2010年 大阪府立大学助教
- 2016年 大阪府立大学准教授
- 2022年 大阪公立大学准教授
- 現在に至る

永久磁石同期モータ — PMSM の基礎から設計・制御・評価まで —

Permanent Magnet Synchronous Motors

— Fundamentals, Design, Control, and Evaluation —

© Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, Yukinori Inoue 2024

2024年7月26日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 森本茂雄  
真田雅之  
井上征則  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 新日本印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00991-0 C3054 Printed in Japan

(西村)



JCOPY

<出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。