

電気機器

起草：2018 年

最終更新日：平成 30 年 11 月 8 日

T.Ueda

All Rights Reserved (c) Takumi Ueda 2018-present.
個人使用目的以外での使用を禁じます。ただし、教育目的での再配布に限り著作者を
明示する場合に許諾します。

目次

第 1 章 電動機	6
第 2 章 モータの分類と区分	8
2.1 モータの歴史	8
2.2 モータの分類	8
2.3 誘導電動機	9
2.4 同期電動機	9
第 3 章 電力伝送	11
第 4 章 DC モータ	12
第 5 章 永久磁石同期モータ	13
5.1 ブラシレスモータの概要	13
5.1.1 ブラシレスとは	13
5.1.2 突極型と非突極型	13
5.1.3 回転子の構造	13
5.1.4 電機子の構造	14
5.1.5 固定子巻線	14
5.2 PSIM の数学モデル	14
5.3 界磁と界磁電流	15
5.4 ベクトル制御	16
5.4.1 dq 座標と dq 変換	16
5.4.2 park 変換と逆 park 変換	16
5.5 ベクトル制御のアルゴリズム	18
5.5.1 ブラシレスモータの解析モデル	18
5.5.2 ブラシレスモータの dq 変換	18
5.6 電動機の損失	19
5.7 インバータ	20
第 6 章 復習	22
6.1 行列	22

付録	22
索引	24

第1章 電動機

同期インピーダンス

$$Z = \sqrt{r_a^2 + r_x^s} [\Omega] \quad (1.1)$$

同期インピーダンス

$$Z = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_s} [\Omega] \quad (1.2)$$

同期インピーダンス

$$Z = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_s} [\Omega] \quad (1.3)$$

百分率同期インピーダンス

$$\%Z = \frac{Z_s I_n}{\frac{V_n}{\sqrt{3}}} \times 100 [\%] \quad (1.4)$$

$$(1.5)$$

これを整理して

$$\%Z = \frac{\frac{V_n}{\sqrt{3}I_s} I_n}{\frac{V_n}{\sqrt{3}}} \times 100 [\%] \quad (1.6)$$

を得る.

$$\%Z = \frac{I_n}{I_s} \times 100 [\%] \quad (1.7)$$

短絡比

$$\%Z = \frac{1}{K} \times 100 \quad (1.8)$$

$$(1.9)$$

負荷損
銅損

無負荷損
鉄損

トルク短絡比

$$T = Fr \quad (1.10)$$

電機子反作用
増磁作用
減磁作用
交差磁化作用

慣性モーメント

$$J = mr^2 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (1.11)$$

第2章 モータの分類と区分

2.1 モータの歴史

ニコラ・テスラ

電動機と呼ばれる。

同期電動機あるいは単に同期機

誘導電動機あるいは単に誘導機

2.2 モータの分類

1. DC モータ

- (a) 永久磁石界磁型
- (b) 電磁石界磁型
 - i. 分巻モータ
 - ii. 直巻モータ
 - iii. 他励モータ

2. ブラシレス DC モータ

- (a) 表面磁石型
- (b) 埋込磁石型

3. 交流モータ

- (a) 整流子型モータ
- (b) 同期モータ
- (c) 誘導モータ

4. スイッチドレクタンスモータ

5. ステッピングモータ

6. 超音波モータ

銅損

鉄損

2.3 誘導電動機

誘導電動機

滑り

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (2.1)$$

無負荷時は

$$s = 0 \quad (2.2)$$

始動時は

$$s = 1 \quad (2.3)$$

2.4 同期電動機

同期速度

$$N_s = \frac{2f}{P} \times 60 = \frac{120f}{P} \quad [\text{r/min}] \quad (2.4)$$

$$L_a \frac{di(t)}{dt} + R_a i(t) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt = e(t) \quad (2.5)$$

$$L_a \frac{di(t)}{dt} + R_a i(t) + v_a(t) = e(t) \quad (2.6)$$

$$v_a(t) = K_e \frac{d\theta}{dt} \quad (K_e = \text{逆起電力定数}) \quad (2.7)$$

$$\tau(t) = K_\tau i(t) \quad (K_\tau = \text{トルク定数}) \quad (2.8)$$

SI 単位系では

$$K_\tau = K_e \quad (2.9)$$

より,

$$i(t) = \frac{\tau(t)}{K_\tau} \quad (2.10)$$

$$L_a \frac{di(t)}{dt} + R_a \frac{\tau(t)}{K_\tau} + K_e \frac{d\theta(t)}{dt} = e(t) \quad (2.11)$$

$$\tau(t) = K_\tau i(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + D \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2.12)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{K_\tau} \left(J \frac{d^3\theta(t)}{dt^3} + D \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\frac{L_a}{K_\tau} \left(J \frac{d^3\theta(t)}{dt^3} + D \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \right) + R_a \left(J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + D \frac{d\theta(t)}{dt} \right) + K_e \frac{d\theta(t)}{dt} = e(t) \quad (2.14)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2.15)$$

$$\frac{L_a J}{K_\tau} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + \left(\frac{L_a D}{K_\tau} + \frac{R_a J}{K_\tau} \right) \frac{d\omega(t)}{dt} + \left(\frac{R_a D}{K_\tau} + K_e \right) \omega(t) = e(t) \quad (2.16)$$

第3章 電力伝送

架空送電線

許容電流

コロナ

コロナ放電

電力損失

電圧降下

第4章 DCモータ

界磁巻線

分巻

複巻

他励

励磁

第5章 永久磁石同期モータ

5.1 ブラシレスモータの概要

5.1.1 ブラシレスとは

永久磁石同期モータ (Permanent-Magnet Synchronous Motor,PMSM)
PMSM は永久磁石直流モータ (Permanent-Magnet DC Motor) と同様に永久磁石によって界磁を得ている。永久磁石は回転子 (Rotor) 側に取り付けられ、発生する界磁 (Field) は回転界磁 (Revolving Field) となる。
ブラシレスモータは単相もしくは三相交流で動作する。
インバータ回路を内蔵しているものを特にブラシレス DC モータという。

5.1.2 突極型と非突極型

突極型
非突極型

5.1.3 回転子の構造

回転子永久磁石による分類
埋込磁石型 (Interior-type PMSM,IPMSM)
表面磁石型 (Surface-type PMSM,SPMSM)

5.1.4 電機子の構造

モータのトルク

$$\tau = Ki \quad (K = \text{const.}) \quad (5.1)$$

$$i = \frac{1}{Ls - R}(v - K\omega) \quad (5.2)$$

5.1.5 固定子巻線

集中巻巻線

分布巻巻線

5.2 PSIM の数学モデル

n 行 n 列正方向行列 \mathbf{A} を考える.

直交行列の条件は

1. aaa

2. aaa

3. aaa

$${}^t\mathbf{A} = \mathbf{A}^{-1} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_n \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$${}^t\mathbf{a}_i\mathbf{a}_j = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5.5)$$

$${}^t\mathbf{A}\mathbf{A} = \mathbf{E} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{A}{}^t\mathbf{A} = \mathbf{E} \quad (5.7)$$

ここで \mathbf{E} は $n \times n$ 単位行列
回転行列

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

回転磁界
機械角 θ_m と電気角 θ_e 間には

$$\theta_e = \frac{P_m}{2} \theta_m \quad (5.9)$$

なる関係が存在する.

ブラシ
電機子
整流子
コンバータ

5.3 界磁と界磁電流

界磁とは、整流子機や同期機を電動機または発電機として使用するとき磁界を発生させる固定子または回転子である。界磁の発生には永久磁石や電磁石などが使用される。

クラーク変換
磁気特性
磁気
磁性

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} [\text{N}] \quad (5.10)$$

磁界
力行

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R} = IV [\text{W}] \quad (5.11)$$

$$J = \frac{1}{2} L I^2 [\text{J}] \quad (5.12)$$

$$J = \frac{1}{2}CV^2[\text{J}] \quad (5.13)$$

機械エネルギー
電気エネルギー

5.4 ベクトル制御

三相二相変換

5.4.1 dq 座標と dq 変換

dq 変換

$$d = a \cos \phi - b \sin \phi \quad (5.14)$$

$$q = a \sin \phi - b \cos \phi \quad (5.15)$$

$${}^{dq}\mathbf{C}_{ab} = \begin{pmatrix} \sin \phi & -\cos \phi \\ \cos \phi & \sin \phi \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

$$\begin{pmatrix} d \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \phi & -\cos \phi \\ \cos \phi & \sin \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

5.4.2 park 変換と逆 park 変換

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) & \cos \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{pmatrix} \quad (5.18)$$

$$\begin{pmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

絶対返還の条件

$${}^tCC = I \quad (5.20)$$

定出力領域

加速定数

パワーレイト

定出力領域

自己インダクタンス

$$L = \frac{N\phi}{i} [\text{H}] \quad (5.21)$$

寄生インダクタンス

寄生容量

相互誘導

相互誘導結合の強さ

結合係数

$$\kappa = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (5.22)$$

漏れ係数 (leakage Coefficient)

$$\sigma = 1 - \kappa^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2} \quad (5.23)$$

同相インダクタンス L_i (in-phase inductance), 鏡相インダクタンス L_m (mirror-phase inductance)

$$\begin{pmatrix} L_i \\ L_m \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_d \\ L_q \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

同相インダクタンスは d 軸, q 軸インダクタンスの平均

自己誘導
 機械的動特性
 モデルベース
 面積素ベクトル

$$i = \frac{dq}{dt}[\text{A}] \quad (5.25)$$

回路方程式

$$v_R = Ri[\text{V}] \quad (5.26)$$

$$v_L = L \frac{di}{dt}[\text{V}] \quad (5.27)$$

$$v_C = \frac{1}{C} \int i dt[\text{V}] \quad (5.28)$$

5.5 ベクトル制御のアルゴリズム

5.5.1 ブラシレスモータ の解析モデル

鎖交磁束 $\phi_u \phi_v \phi_w$
 電圧 $v_u v_v v_w$
 電流 $i_u i_v i_w$

5.5.2 ブラシレスモータ の dq 変換

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) & \cos \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \end{pmatrix} \quad (5.29)$$

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{pmatrix} \quad (5.30)$$

この座標変換により dq 座標系での電圧方程式は

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_q & R_a + pL_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \phi_a \end{pmatrix} \quad (5.31)$$

直交変換
状態方程式
ベクトル
状態
相互インダクタンス
周期

$$T = \frac{1}{f} [\text{s}] \quad (5.32)$$

周波数

$$f = \frac{1}{T} [\text{Hz}] \quad (5.33)$$

高調波

着磁
ホールセンサ

シャント抵抗
作動増幅回路

5.6 電動機の損失

全損失
固定損
鉄損
ヒステリシス損
渦電流損

機械損
軸受

電気機器

冷却装置の摩擦損
風損

負荷損
抵抗損 (銅損)
一次抵抗損
二次抵抗損
漂遊負荷損

5.7 インバータ

VVVF
可変電圧可変周波数制御
サイリスタ位相制御
回転数 $N[\text{rpm}]$
渦電流
電磁誘導
右ねじの法則
ファラデーの電磁誘導の法則

$$V = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = L \frac{di}{dt} \quad (5.34)$$

$$\phi = B \cdot s \quad (5.35)$$

D 因子
新中

$$B = \mu H \quad (5.36)$$

磁力線
磁束
磁化
磁区

$$\oint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (5.37)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5.38)$$

レンツの法則

ローレンツ力

発電機

電動機

減速機

フレミングの法則

脱調

定動トルク

始動トルク

ストールトルク

ローレンツ力

負荷

磁性体

コイル

ステートコイル

テスラコイル

ソレノイド

整流子

第6章 復習

6.1 行列

ユニタリ行列

$$UU^* = U^*U = E \quad (6.1)$$

随伴行列またはエルミート行列

エルミート共役

$$U^* = {}^t\overline{U} \quad (6.2)$$

A が実行列のとき A の随伴行列 A^* は

$$A^* = {}^t A \quad (6.3)$$

複素共役行列

ダイナミックブレーキ

回生ブレーキ

付録

単位一覧

表 6.1: SI 基本単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 6.2: SI 接頭辞

接頭辞	記号	10^n	接頭辞	記号	10^n
ヨタ	Y	10^{24}	ヨクト	y	10^{-24}
ゼタ	Z	10^{21}	zepto	z	10^{-21}
エクサ	E	10^{18}	アト	a	10^{-18}
ペタ	P	10^{15}	フェムト	f	10^{-15}
テラ	T	10^{12}	ピコ	p	10^{-12}
ギガ	G	10^9	ナノ	n	10^{-9}
メガ	M	10^6	マイクロ	μ	10^{-6}
キロ	k	10^3	ミリ	m	10^{-3}
ヘクト	h	10^2	センチ	c	10^{-2}
デカ	da	10^1	デシ	d	10^{-1}
-	-	1	-	-	1

物理定数一覧

表 6.3: 普遍定数

定数名	量記号	定数値	単位
真空中の光速	c_0	299 792 458	[m/s]
真空の透磁率	μ_0	$4\pi \times 10^7$	[N/A ²]
真空の誘電率	ε_0	$8.854\,187\,817 \cdots \times 10^{-12}$	[F/m]
真空のインピーダンス	Z_0	376.730 313 461 \cdots	[Ω]
万有引力定数	G	$6.674\,08 \times 10^{11}$	[N · m ² /kg ²]
プランク定数	h	$6.626\,070\,040 \times 10^{-34}$	[J · s]
ディラック定数	\hbar	$1.054\,571\,800 \times 10^{-34}$	[J · s]