

# 電気機器

---

起草：2018 年

最終更新日：平成 30 年 11 月 22 日

Takumi 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	復習	6
1.1	行列	6
第 2 章	力学	7
2.1	質点の力学	7
2.2	剛体の運動	8
2.2.1	剛体の自由度	8
2.2.2	剛体の運動方程式	8
第 3 章	電動機	9
3.1	モータの歴史	9
3.2	電動機の分類	9
第 4 章	直流機	10
4.1	直流機の構造	10
4.2	直流機の誘導起電力と大きさ	10
4.3	直流機の電機子反作用	10
4.3.1	電機子反作用	10
4.3.2	補極と補償巻線	11
4.3.3	整流	11
第 5 章	誘動機	12
5.1	円線図	12
第 6 章	同期機	13
第 7 章	発電機	16
第 8 章	変圧器	17
8.1	変圧器の結線	17
8.2	変圧器の損失	17
8.3	変圧器の効率	17

---

8.4 変圧器の保護 . . . . .	17
付録	17
索引	19

# 第1章 復習

## 1.1 行列

ユニタリ行列

$$UU^* = U^*U = E \quad (1.1)$$

随伴行列またはエルミート行列

エルミート共役

$$U^* = {}^t\overline{U} \quad (1.2)$$

$A$  が実行列のとき  $A$  の随伴行列  $A^*$  は

$$A^* = {}^tA \quad (1.3)$$

複素共役行列

ダイナミックブレーキ

回生ブレーキ

## 第2章 力学

### 2.1 質点の力学

$$F = m\alpha = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2} [\text{N}] \quad (2.1)$$

$$\tau = \int F dx = \int m \frac{dv}{dt} dx = \int m v dv = \frac{1}{2} m v^2 [\text{J}] \quad (2.2)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = r \frac{d\theta}{dt} = r\omega [\text{m/s}] \quad (2.3)$$

$$F = m \frac{dv}{dt} = mr \frac{d\omega}{dt} [\text{N}] \quad (2.4)$$

$$T = Fr = mr^2 \frac{d\omega}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} = I \frac{d^2\theta}{dt^2} [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (2.5)$$

$I$  は慣性モーメント

$$I = mv_b - mv_a = \int_{t_a}^{t_b} \mathbf{F} dt [\text{N} \cdot \text{s}] \quad (2.6)$$

力積

$$K = \int T dx = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.7)$$

## 2.2 剛体の運動

### 2.2.1 剛体の自由度

トルクはそれぞれの物体が回転するために必要なトルクの合計になるので

$$T = \sum_{i=1}^n F_i r_i = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \frac{d\omega}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} \quad (2.8)$$

となり，慣性モーメント  $I$  は

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (2.9)$$

$$I = \sum_{i=1}^{\infty} m_i r_i^2 \quad (2.10)$$

$$I = \int r^2 dm = I \frac{d\omega}{dt} = \int \rho r^2 dV \quad (2.11)$$

### 2.2.2 剛体の運動方程式

$$\sum_i^n \mathbf{F}_j = m \frac{d^2 \mathbf{r}_g}{dt^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \sum_i^n (\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i) = \mathbf{N} \quad (2.13)$$



## 第3章 電動機

### 3.1 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

### 3.2 電動機の分類

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

## 第4章 直流機

### 4.1 直流機の構造

波巻  
重ね巻

### 4.2 直流機の誘導起電力と大きさ

円周の長さは

$$l = 2\pi r = \pi D \quad (4.1)$$

$$v = \pi D \frac{N}{60} [\text{m/s}] \quad (4.2)$$

$$B = \frac{2p\phi}{\pi D l} [\text{T}] \quad (4.3)$$

$$e = Blv = \frac{2p\phi}{\pi D l} \cdot l \cdot \pi \cdot D \frac{n}{60} = \frac{2p\phi n}{60} [\text{V}] \quad (4.4)$$

$$e = \frac{2a}{z} = \frac{2p\phi n}{60} \cdot \frac{z}{2a} = \frac{p}{60} \cdot \frac{z}{a} \phi n = k\phi n [\text{V}] \left( k = \frac{pz}{60a} : \text{電圧定数} \right) \quad (4.5)$$

### 4.3 直流機の電機子反作用

#### 4.3.1 電機子反作用

幾何学的中性軸  
磁束

偏磁作用  
交差磁化作用  
界磁  
磁束分布の偏り  
電気的中性軸

#### 4.3.2 補極と補償巻線

#### 4.3.3 整流

## 第5章 誘動機

### 5.1 円線図

誘導電動機  
滑り

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (5.1)$$

無負荷時は

$$s = 0 \quad (5.2)$$

始動時は

$$s = 1 \quad (5.3)$$

## 第6章 同期機

複巻直巻分巻他励式自励式界磁磁界電気角機械角  
同期インピーダンス

$$Z = \sqrt{r_a^2 + r_x^s} [\Omega] \quad (6.1)$$

同期インピーダンス

$$Z = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_s} [\Omega] \quad (6.2)$$

同期インピーダンス

$$Z = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_s} [\Omega] \quad (6.3)$$

百分率同期インピーダンス

$$\%Z = \frac{Z_s I_n}{\frac{V_n}{\sqrt{3}}} \times 100 [\%] \quad (6.4)$$

$$(6.5)$$

これを整理して

$$\%Z = \frac{\frac{V_n}{\sqrt{3}I_s} I_n}{\frac{V_n}{\sqrt{3}}} \times 100 [\%] \quad (6.6)$$

を得る.

$$\%Z = \frac{I_n}{I_s} \times 100 [\%] \quad (6.7)$$

短絡比

$$\%Z = \frac{1}{K} \times 100 \quad (6.8)$$

$$(6.9)$$

負荷損  
銅損

無負荷損  
鉄損

トルク短絡比

$$T = Fr \quad (6.10)$$

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

$$J = mr^2 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (6.11)$$

同期速度

$$N_s = \frac{2f}{P} \times 60 = \frac{120f}{P} \quad [\text{r/min}] \quad (6.12)$$

$$L_a \frac{di(t)}{dt} + R_a i(t) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt = e(t) \quad (6.13)$$

$$L_a \frac{di(t)}{dt} + R_a i(t) + v_a(t) = e(t) \quad (6.14)$$

$$v_a(t) = K_e \frac{d\theta}{dt} \quad (K_e = \text{逆起電力定数}) \quad (6.15)$$

$$\tau(t) = K_\tau i(t) \quad (K_\tau = \text{トルク定数}) \quad (6.16)$$

SI 単位系では

$$K_\tau = K_e \quad (6.17)$$

より,

$$i(t) = \frac{\tau(t)}{K_\tau} \quad (6.18)$$

$$L_a \frac{di(t)}{dt} + R_a \frac{\tau(t)}{K_\tau} + K_e \frac{d\theta(t)}{dt} = e(t) \quad (6.19)$$

$$\tau(t) = K_\tau i(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + D \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6.20)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{K_\tau} \left( J \frac{d^3\theta(t)}{dt^3} + D \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \right) \quad (6.21)$$

$$\frac{L_a}{K_\tau} \left( J \frac{d^3\theta(t)}{dt^3} + D \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \right) + R_a \left( J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + D \frac{d\theta(t)}{dt} \right) + K_e \frac{d\theta(t)}{dt} = e(t) \quad (6.22)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6.23)$$

$$\frac{L_a J}{K_\tau} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + \left( \frac{L_a D}{K_\tau} + \frac{R_a J}{K_\tau} \right) \frac{d\omega(t)}{dt} + \left( \frac{R_a D}{K_\tau} + K_e \right) \omega(t) = e(t) \quad (6.24)$$

## 第7章 発電機



## 第8章 変圧器

### 8.1 変圧器の結線

### 8.2 変圧器の損失

#### 1. 損失

##### (a) 無負荷損（鉄損）

- i. ヒステリス損
- ii. 渦電流損

##### (b) 負荷損

- i. 銅損
- ii. 漂遊負荷損

### 8.3 変圧器の効率

負荷比

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_i}{P_{cn}}} \quad (8.1)$$

$$\eta = \frac{\alpha P \cos \theta}{\alpha P \cos \theta + P_i + \alpha^2 P_{cn}} \times 100[\%] \quad (8.2)$$

### 8.4 変圧器の保護

劣化等で変圧器に生じる事故

- 1. 巻線間短絡
- 2. 巻線と鉄心間の絶縁破壊による地絡
- 3. 高圧巻線と低圧巻線の混触
- 4. 巻線の断線

# 付録

## 単位一覧

表 8.1: 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 8.2: 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	$\mu$	$10^{-6}$
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 8.3: 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	$\mu_0$	$4\pi \times 10^7$	[N/A <sup>2</sup> ]
真空の誘電率	$\varepsilon_0$	$8.854\,187\,817 \cdots \times 10^{-12}$	[F/m]
真空のインピーダンス	$Z_0$	376.730 313 461 $\cdots$	[ $\Omega$ ]
万有引力定数	$G$	$6.674\,08 \times 10^{11}$	[N · m <sup>2</sup> /kg <sup>2</sup> ]
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]