

6 回転機の基本原理

6.1 フレミングの法則

6.2 iB 則, vB 則と電気-機械エネルギー変換の原理

6.3 回転機の基本原理

6.3.1 直流機の基本原理

6.3.2 ブラシレスDCモータの基本原理

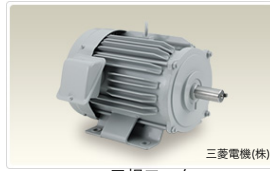
6.3.3 三相正弦波交流による回転磁界の発生

6.3.4 三相同期機の基本原理

6.3.5 三相誘導電動機の基本原理

6.4 巻線の基本構造

6.5 回転機における電気-機械エネルギー変換の流れと効率



三菱電機(株)
三相モータ

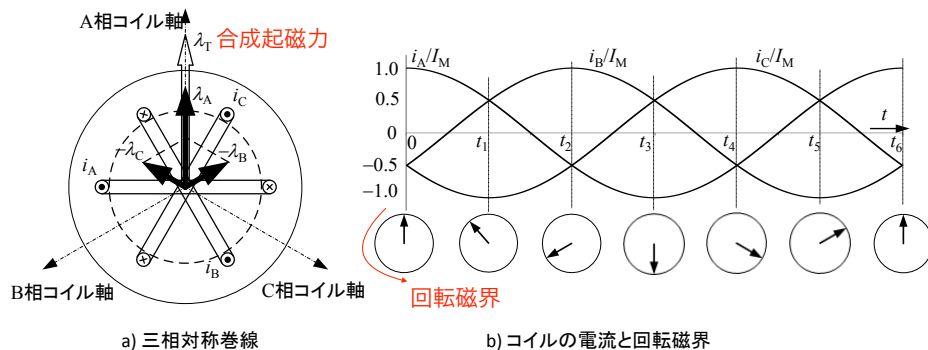
第6回 交流機の基本原理, 三相同期機

今日のテーマ

- ・ 回転磁界はどうやって作るのか？
- ・ 同期速度と回転機の回転速度の関係は？
- ・ 電機子反作用とは？
- ・ 三相同期機の等価回路は？

6.3.3 三相正弦波交流による回転磁界の発生

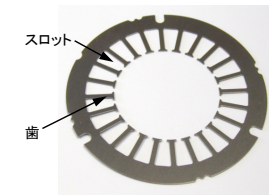
1. 回転磁界とその性質



- (1) 合成起磁力は 電流最大の巻線の軸方向 (負の場合は負方向)
- (2) 合成起磁力の大きさは 一つのコイルで作られる起磁力の1.5倍
- (3) 回転磁界の回転速度 N_0 [rps] は 交流電流の周波数 f [Hz] に等しい
- (4) 回転磁界の回転方向は 電流の位相の順序に一致している

6.3.3 三相正弦波交流による回転磁界の発生

2. 極数, 極対数と同期速度



a) 固定子鉄板



b) 積層鉄心

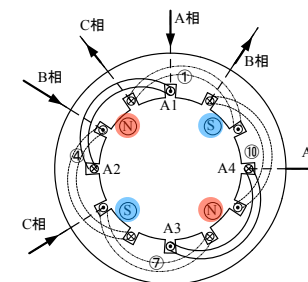


図6.15 三相4極巻線

$$\text{極数: } p_n = 4 \quad (4\text{極機})$$

$$\text{極対数: } p \equiv \frac{p_n}{2} = 2$$

$$\begin{aligned} \text{回転速度: } N_0 &= \frac{f}{p} \left(= \frac{2f}{p_n} \right) \text{ [rps]} \\ &= \frac{60f}{p} \text{ [rpm]} \end{aligned}$$

同期速度 (回転磁界の回転速度)

6.3.3 三相正弦波交流による回転磁界の発生

3. 機械角と電気角

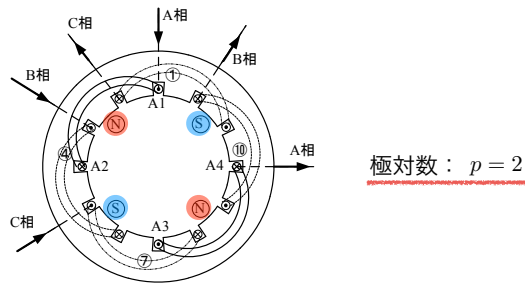


図6.15 三相4極巻線

軸が機械的に1回転する間に、電気的には2周期 (4π) が経過している

$$\theta_e = p\theta_m$$

電気角 機械角

$$\omega_e = p\omega_m$$

電気角速度 機械的角速度

図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.3 三相正弦波交流による回転磁界の発生

[例題6.5] 50Hz, 60Hzの交流電源の場合の同期速度の最大値

極対数 のとき、同期速度は最大となる

$$50\text{Hzの場合} \quad N_0 = \frac{60f}{p} = 60 \times 50 = 3000 \quad [\text{rpm}]$$

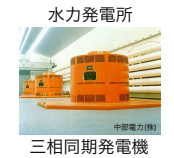
$$60\text{Hzの場合} \quad N_0 = \frac{60f}{p} = 60 \times 60 = 3600 \quad [\text{rpm}]$$



[例題6.6] 極数36極の水車発電機が毎分200回転しているとき

$$\text{極対数} \quad p = \frac{36}{2} = 18$$

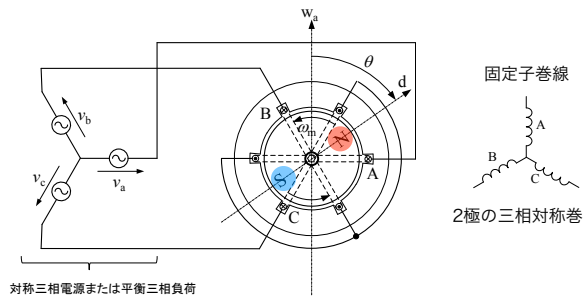
$$\text{周波数} \quad f = p \frac{N_0}{60} = 18 \times \frac{200}{60} = 60 \quad [\text{Hz}]$$



[例題6.7] 回転磁界の回転方向を変えるには

三相電源からコイルに接続する3線のうちの2線を入れ替えて、相順を変える

6.3.4 三相同期機の基本原理解



対称三相電源または平衡三相負荷

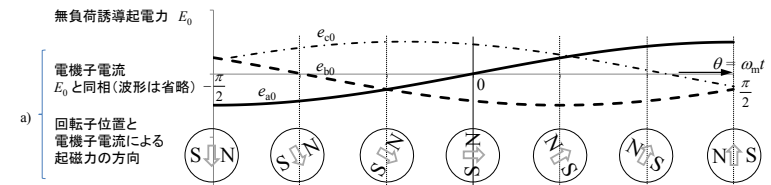
回転軸に原動機を結合して一定の回転速度で回転 → 三相同期発電機

三相電源に接続して巻線に三相交流電流を流す → 三相同期電動機

図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.4 三相同期機の基本原理解

1. 三相誘導起電力



$$e_{a0} = \omega N \Phi \sin \omega t$$

$$\text{誘導起電力} \quad e_{b0} = \omega N \Phi \sin \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right)$$

$$e_{c0} = \omega N \Phi \sin \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right)$$

$$\text{誘導起電力の実効値} \quad E_{0\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N \Phi = \frac{2\pi f N \Phi}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \Phi$$

図6.17 回転磁極位置と無負荷誘導起電力および電機子電流による起磁力方向

図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.4 三相同期機の基本原理

[例題6.8] 三相同期発電機 (2極機 $p = 1$)

回転速度 $N_0 = 3600$ [rpm]

巻線の巻数 $N = 60$ [回] (三相巻線はY結線)

回転子の直径 $a = 0.3$ [m] 長さ $l = 0.5$ [m]

空げきの磁束密度分布 $B_m = 0.6$ [T] (正弦波)

(1) 無負荷誘導起電力の周波数

$$f = p \frac{N_0}{60} = 1 \times \frac{3600}{60} = 60 \text{ [Hz]}$$

(2) 無負荷誘導起電力の線間電圧 (実効値)

1極あたりの有効全磁束 $\Phi = laB_m = 0.5 \times 0.3 \times 0.6 = 0.09$ [Wb] … 式(6.3)

相電圧 (実効値) $E_{0\text{eff}} = 4.44fN\Phi = 4.44 \times 60 \times 60 \times 0.09 = 1439$ [V]

線間電圧 (実効値) $E_{01} = \sqrt{3}E_{0\text{eff}} = \sqrt{3} \times 1439 = 2492$ [V]

図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.4 三相同期機の基本原理

2. 誘導起電力と電機子巻線電流との関係

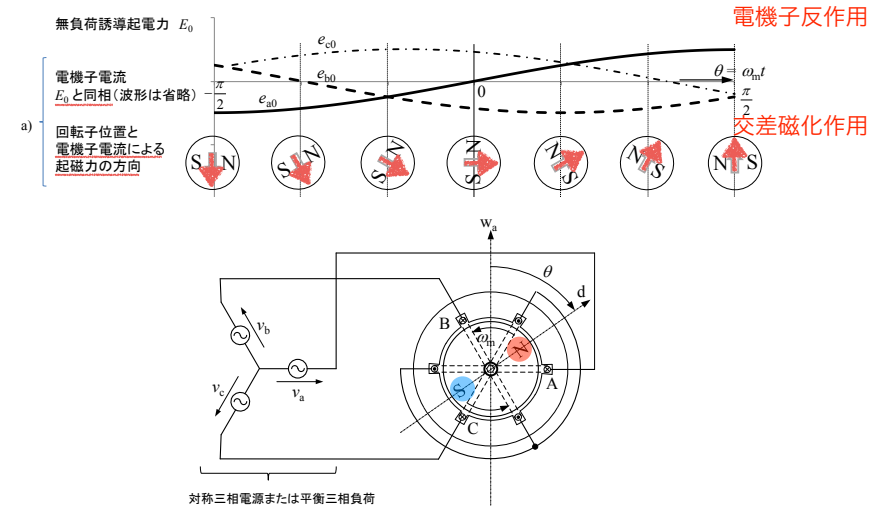


図6.17 回转子磁極位置と無負荷誘導起電力および電機子電流による起磁力方向

図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.4 三相同期機の基本原理

2. 誘導起電力と電機子巻線電流との関係

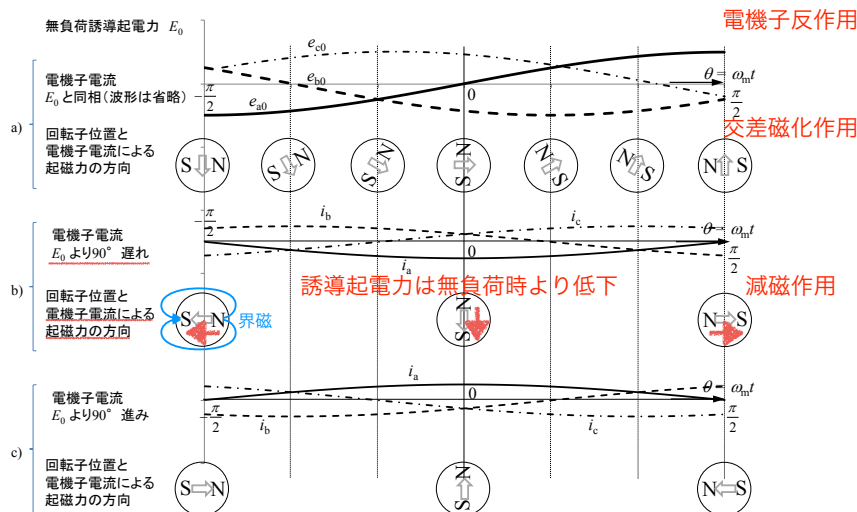


図6.17 回转子磁極位置と無負荷誘導起電力および電機子電流による起磁力方向

図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.4 三相同期機の基本原理

2. 誘導起電力と電機子巻線電流との関係

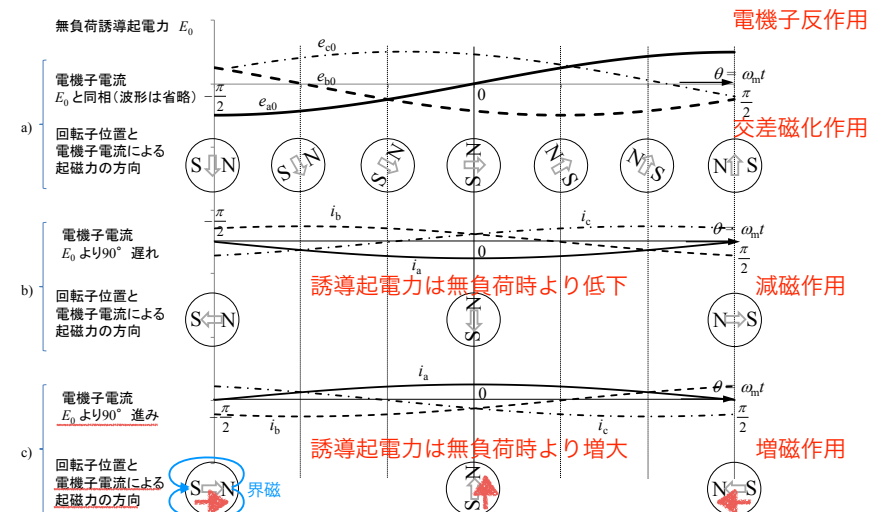
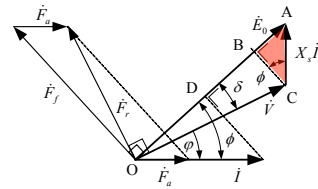
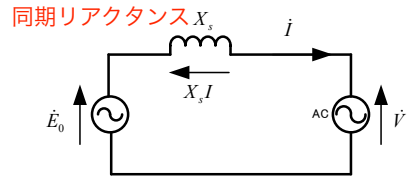


図6.17 回转子磁極位置と無負荷誘導起電力および電機子電流による起磁力方向

図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.4 三相同期機の基本原理

3. 等価回路とフェーザ図



同期発電機の等価回路 (1相分)

$$E_0 = |\dot{E}_0| = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N \Phi = 4.44 f N \Phi$$

発電機出力 (1相分) $P_{1p} = VI \cos \varphi$

フェーザ図より $I \cos \phi = \frac{V}{X_s} \sin \delta$ $I \sin \phi = \frac{E_0 - V \cos \delta}{X_s}$ $\varphi = \phi - \delta$

代入して $P_{1p} = VI (\cos \phi \cos \delta + \sin \phi \sin \delta) = \frac{E_0 V}{X_s} \sin \delta = E_0 I \cos \phi \equiv E_0 I_q$

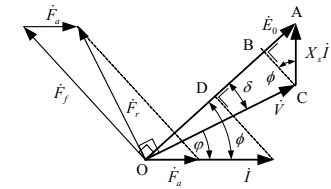
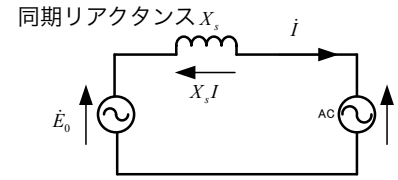
発電機出力 $P = 3P_{1p} = 3 \frac{E_0 V}{X_s} \sin \delta$ トルク $T_M = 3 \frac{P_{1p}}{\omega_m} = 3 \frac{p E_0 I_q}{\omega}$

出力角 (内部相差角, 負荷角, トルク角)

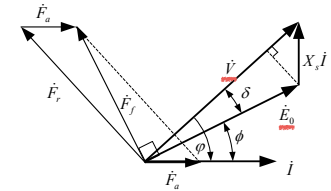
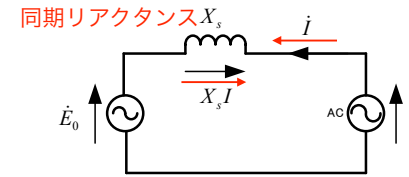
図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.4 三相同期機の基本原理

3. 等価回路とフェーザ図



同期発電機の等価回路 (1相分)



同期電動機の等価回路 (1相分)

同期電動機の出、トルクも同期発電機と同じ式で表わされる

図・写真提供: 一般社団法人電気学会『電気機器・パワーエレクトロニクス通論』

6.3.4 三相同期機の基本原理

(1) 出力は δ で変化する 出力 $P = 3P_{1p} = 3 \frac{E_0 V}{X_s} \sin \delta$

δ : 負荷角, トルク角, 内部相差角, 出力角

(2) 直流機との対比

$P_{1p} = E_0 I_q$ 直流機の出と同一形

$I_q \equiv I \cos \phi = \frac{V}{X_s} \sin \delta$ 電機子電流と等価な作用

同期機の出、トルクは $\sin \delta$ に比例

(3) 同期機を無負荷で、同期速度で回転させた場合、
進み、遅れの無効電流を発生する無効電力源になる (同期調相機)

(4) ブラシレスDCモータとの類似性

ブラシレスDCモータは同期機と半導体を用いた直流-交流変換装置から構成される
直流機と同期機がトルク発生、起電力発生に関して全く等価である

レポート (第6回)



テキスト 第6章

問題 (3), (6), (8c), (8d)

例題 6.9

電機子反作用について説明せよ.