

5. 三相同期電動機の特性試験

5.1 目的

三相同期電動機の始動法を習得し、同期リアクタンス、V字曲線を測定して、原理特性を理解する。

5.2 原理

5.2.1 同期電動機の構造

同期電動機は、三相交流電流によって回転磁界を発生する電機子と、その回転磁界に引っ張られて回転する界磁極からなる(図5.1)。界磁は、直流電流で励磁する電磁石とすることが多い。

5.2.2 同期電動機の始動

同期電動機は始動トルクが小さいので、補助電動機を用いて同期速度まで加速し、電源に接続する必要がある。

同期電動機を電源と接続する時は、電動機の電圧、周波数、位相を電源のそれらと一致させなければならない。

- 電機子電圧が電源電圧と等しくなるように、同期機の界磁電流を調整する。

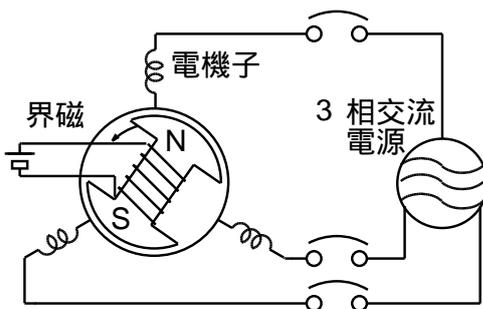


図 5.1: 同期機の概略構造

- 周波数は、補助電動機の回転速度を調整して、電源周波数と合わせる。
- 位相は、回転速度を微調整して、電源の位相と合わせる。

5.2.3 同期検定器

位相を確認するため、同期検定器を用いる。図5.2に同期検定器の回路を示す。L1, L2, L3のランプが3-1, 2-2, 1-3端子間に接続されている。ランプの明暗パターンは電動機と電源の位相差を表す。周波数がずれていると、明暗パターンが回転する。周波数を合わせると、パターンが止まる。さらに、L1, L3が点灯し、L2が消灯したとき、位相差が0となっている。

5.2.4 電動発電機の構成

実験では、直流電動機、同期電動機、直流発電機を電磁クラッチで連結した電動発電機(図5.3)を用いる。直流電動機は、同期電動機を始動する際の補助電動機である。直流発電機は、同期電動機の機械的な負荷として、回転軸にブレーキをかける。

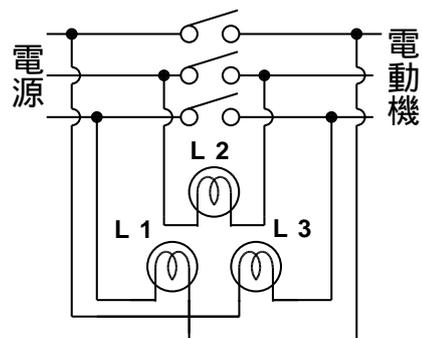


図 5.2: 同期検定器

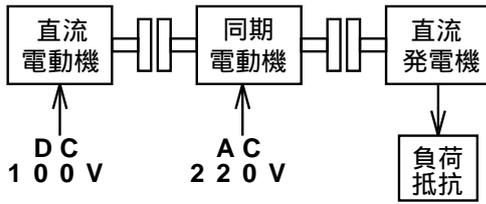


図 5.3: 電動発電機の構成

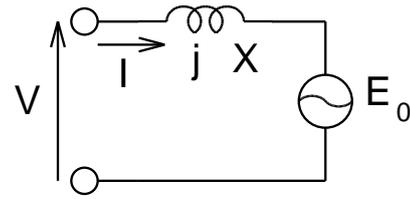


図 5.5: 同期機の等価回路

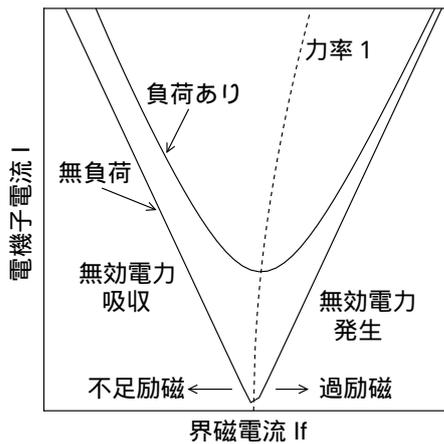


図 5.4: V 字曲線と無効電力

るのに用いる。

5.2.5 V 字曲線と無効電力

同期電動機が一定の供給電圧、一定の負荷で運転しているとき、界磁電流 I_f に対して電機子電流 I を描いた特性を、V 字曲線と呼ぶ(図 5.4)。

一定電圧の電源に接続された同期機は、励磁の強弱により、無効電力を発生したり吸収したりする。

- 励磁を弱くした場合、電源電圧相当の磁束を電機子巻線に作るために、外部から電流を供給する必要がある(不足励磁)。すなわち、電機子巻線は、本来のコイルの性質、誘導性リアクタンスに見える。この場合、同期機は無効電力を吸収している。

- 励磁を強くすると、電源電圧相当以上の磁束が界磁極から発生する。この磁束を適切な値まで打ち消すために、電機子電流が流れる(過励磁)。この場合、電機子巻線は容量性インピーダンス、すなわちコンデンサのように見える。この場合、同期機は無効電力を発生している。
- 励磁を適当な値とすると、同期機は無効電力を発生も吸収もしなくなり、電機子電流の力率が 1 となって、その値は最小になる。

5.2.6 同期電動機の等価回路とベクトル図

同期電動機の等価回路を図 5.5 に示す。界磁極の作る磁束が電機子コイルを切ると、発電機の動作として、電機子電圧が発生する。これを無負荷誘導起電力 E_0 と呼ぶ。無負荷誘導起電力 E_0 は界磁電流 I_f で決まる。

電機子電圧 V と無負荷誘導起電力 E_0 の差に応じて、電機子電流 I が流れる。これは、内部インピーダンス Z_s で制限される。 Z_s は同期インピーダンスと呼ばれ、同期リアクタンス jX と電機子巻線抵抗 R_a の和である。 R_a は無視されることが多い。

以上の関係を式で書くと、

$$\dot{V} = \dot{E}_0 + jXI \quad (5.1)$$

となる。これらの関係はベクトル図で表される。

5.2.7 V 字曲線とベクトル図

V 字曲線をベクトル図で説明しよう。電圧 V の電源に接続された同期機がある。界磁電流 I_f を変

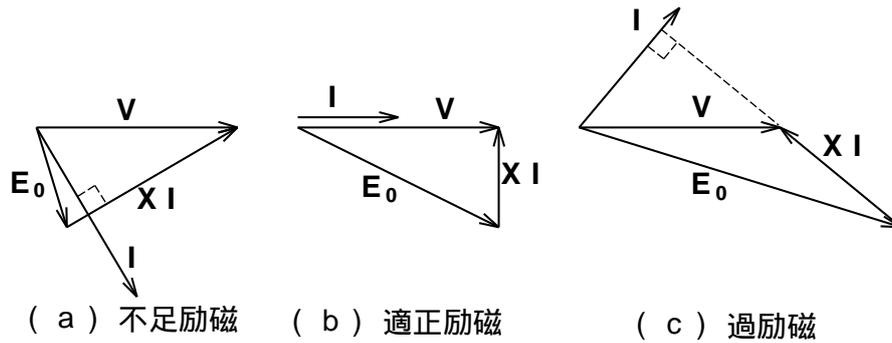


図 5.6: 励磁によるベクトルの変化

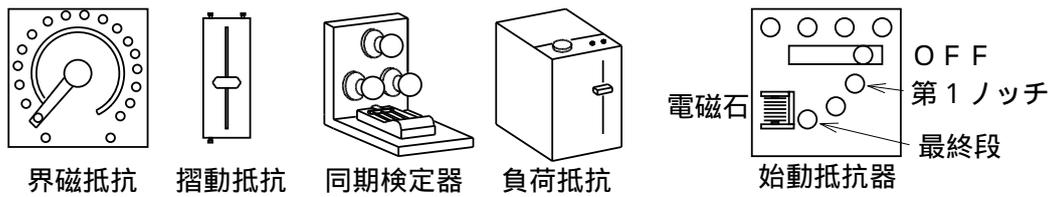


図 5.7: 使用器具

表 5.1: 1 相分と 3 相分の関係

1 相分電力 P_1	3 相分電力 P_3
$P_1 = P_3/3$	$P_3 = 3P_1$
相電圧 E	線間電圧 V
$E = V/\sqrt{3}$	$V = \sqrt{3}E$
$E = RI$	$V = \sqrt{3}RI$
$P_1 = EI$	$P_3 = \sqrt{3}VI$
$P_1 = RI^2$	$P_3 = 3RI^2$
$P_1 = \frac{E^2}{R}$	$P_3 = \frac{V^2}{R}$

R は Y 結線された 1 相分の抵抗

化させると無負荷誘導起電力 E_0 が変化する。このとき、ベクトル図は図 5.6(a) ~ (c) のように変化する。

- 図 (a) は励磁の弱い場合で、 E_0 は小さいから $V - E_0 = jXI$ が大きくなり、電機子電流 I は、大きな遅れ電流となる (不足励磁)。
- 図 (b) は界磁電流が適当な場合で、力率が 1 となり、電機子電流 I が最小値となる。
- 図 (c) は界磁電流を増した場合で、 E_0 は大き

くなり、 $V - E_0 = jXI$ は進み、値も大きくなるから、 I は大きな進み電流となる (過励磁)。

電動機の損失を無視すれば、有効電流は (a) ~ (c) のどの場合でも同じである。

5.2.8 1 相分, 3 相分

(5.1) 式やベクトル図は、1 相分について作られている。ここでは E_0, V は相電圧である。このように理論の説明には、3 相回路の 1 相分が使われることが多い。しかし、実験で測定する電圧は線間電圧であり、3 相分電力である。電力関係で、断りなく「電圧、電力」というときには、線間電圧と 3 相分電力を表すことが多い。

電力関係の書物で数式を見る場合、

- 1 相分 (相電圧・1 相分電力), 3 相分 (線間電圧・3 相分電力) のいずれの意味であるか
- 実用単位系 (VAΩ...), 単位法のどちらを用いているか、いずれでも使えるのか

に注意する必要がある。表 1 に、電圧、電流、電力、抵抗の 1 相分と 3 相分の関係式を示す。

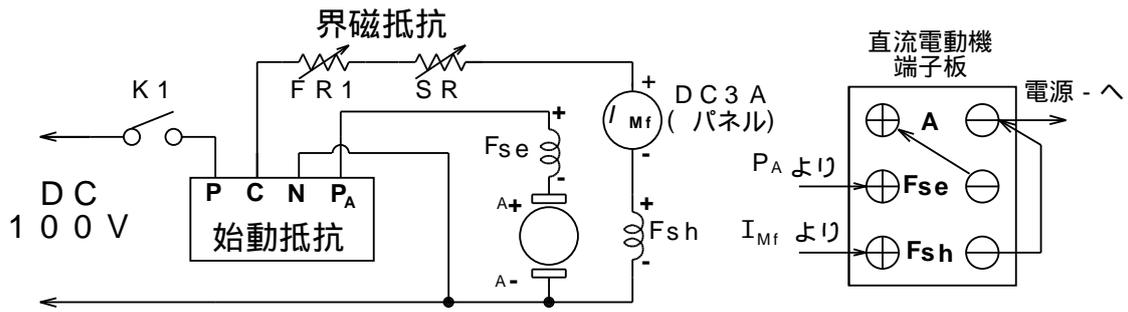


図 5.8: 直流電動機駆動回路

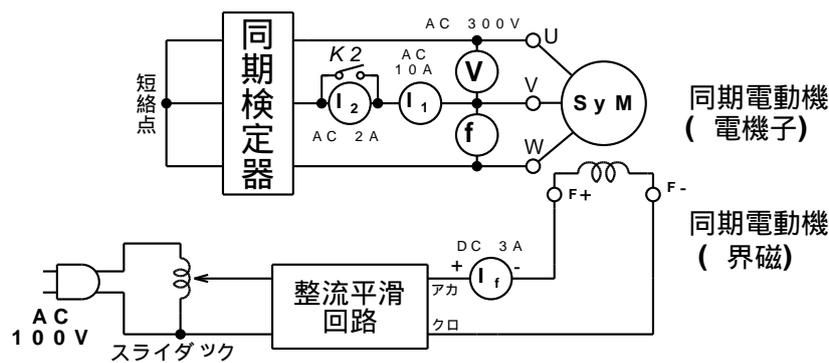


図 5.9: 無負荷・短絡試験回路

5.2.9 単位法 (per unit system)

電圧, 電流, インピーダンスなどの諸量を基準値 (base value) に対する比で表す方法を単位法と呼ぶ。基準値としては, 機器の定格値を用いる場合が多い。

例えば, 電圧の基準には定格電圧, 電流の基準には定格電流を用いる。インピーダンスの基準 (ベース インピーダンス) Z_{base} には, V_n を定格 (線間) 電圧, I_n を定格電流として

$$Z_{base} = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_n} \quad (5.2)$$

を用いる。

単位法では, 電圧などの量を基準値に対する比で表す。例えば, 値のインピーダンス Z [] は,

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}} \quad (5.3)$$

により, 単位法の値 Z_{pu} [pu] に換算される。

5.3 実験

5.3.1 無負荷特性・短絡特性の測定

図 5.8 に示す直流電動機駆動回路 および図 5.9 に示す無負荷・短絡試験回路を組む。

直流電動機駆動回路は, 始動抵抗器と界磁抵抗器を用いて, 直流電動機を始動し, 速度調整する回路である。直流電動機は複巻形であり, 直巻界磁 F_{se} と分巻界磁 F_{sh} の 2 つの界磁巻線を用いる。分巻界磁の電流は, 界磁抵抗器 $FR1$, 摺動抵抗器 SR で調整する。

無負荷・短絡試験回路は, 同期機を発電機として運転するもので, 同期機の界磁電源回路, 電機子測定回路からなる。同期機の界磁電流は, 交流を整流した直流電源で供給する。同期検定器のスイッチは, 同期機の電機子回路につながっている。開くと無負荷状態 (電機子開放), 閉じると電機子を短絡した状態となる。

表 5.2: 使用器具 (パネルは, 実験機パネル取り付けを示す)

器具名	メーカー名	形式	規格または定格	製造番号	整理番号	備考
直流電動機						(備付け)
三相同期電動機						(備付け)
直流発電機						(備付け)
同期 電動機 関連						
同期検定器						
交流電流計 I1			10A			
交流電流計 I2			2A			
スイッチ K2						(支給)
交流電圧計 V			300V			
周波数計 f						(パネル)
三相電力計			5A,240V			
力率計			25A			
同期機 界磁 関連						
スライダック						
整流平滑回路						(支給)
直流電流計 I_f			3A			
直流 電動機 関連						
始動抵抗						
界磁抵抗 FR1						
摺動抵抗 SR						
スイッチ K1						(支給)
直流電流計 I_{Mf}			3A			(パネル)
直流 発電機 関連						
直流電流計 I_D			30A			
直流電圧計 V_D			300V			
負荷抵抗						
界磁抵抗 FR2						

三相同期電動機の定格は, 銘板の全内容を記録すること。

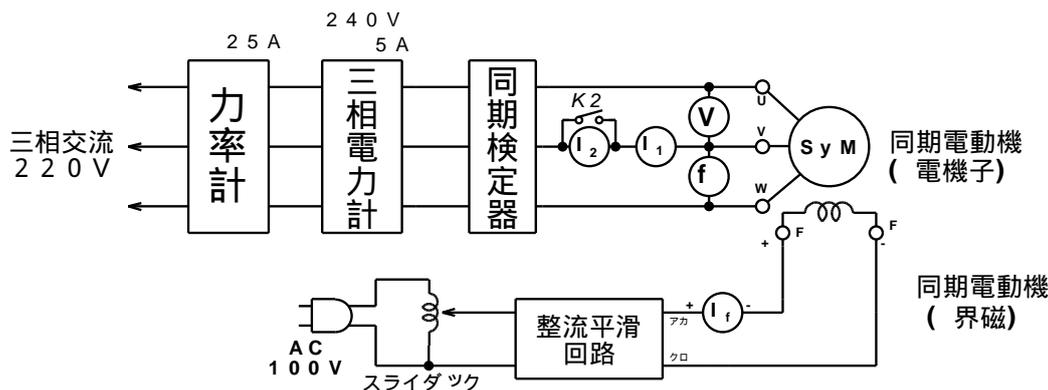


図 5.12: 同期電動機回路

注意 1 多くのメータ, 抵抗器などを用いるので, 紙片に名前を書いて貼り付けるとよい。

直流電動機の運転手順

1. 直流電動機界磁抵抗 : 最小
同期機界磁電源電圧 : 最小
直流発電機界磁抵抗 : 最大
電流計バイパススイッチ K2 : ON
に設定する。
2. 直流電動機と同期機間のクラッチを接続する。
3. スイッチ K1, 直流電源のスイッチを投入する。
4. 直流電動機界磁電流 I_{Mf} が 0.6A 程度流れること, 直流電動機界磁抵抗 FR1 によって減少することを確認する。
5. 周囲の安全を確認した後, 始動抵抗器 (図 5.7) を第 1 ノッチに投入する。電動機が回り出す。
6. 回転速度がほぼ落ち着いたら, ノッチを進める。最終段はフックに引っかける。
7. 直流電動機界磁抵抗を調整して, 回転速度を 1800rpm とする。

表 5.3: 無負荷特性

界磁電流 I_f [A]	電機子電圧 E_0 [V]

表 5.4: 短絡特性

界磁電流 I_f [A]	電機子電流 I [A]

実験 1 無負荷特性試験

図 5.9 の回路で, 同期検定器のスイッチを OFF (同期機の電機子端子開放) とし, 上の運転手順に従って, 定格速度で回転させる。同期機の界磁電流 I_f と電機子電圧 E_0 の関係を, 電機子電圧 250V 以下の範囲で測定せよ (表 3, 図 5.10) ¹。

実験 2 短絡特性

図 5.9 の回路で, 同期検定器のスイッチを閉じ (同期機の電機子短絡), 定格速度で回転させる。短

¹この実験では, 電機子電圧 V は 無負荷誘導起電力 E_0 と等しい。

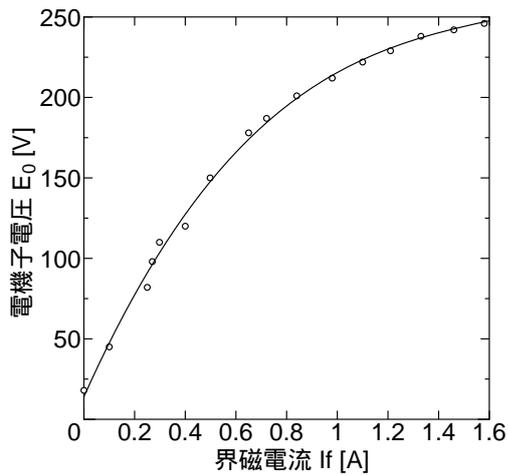


図 5.10: 無負荷特性曲線

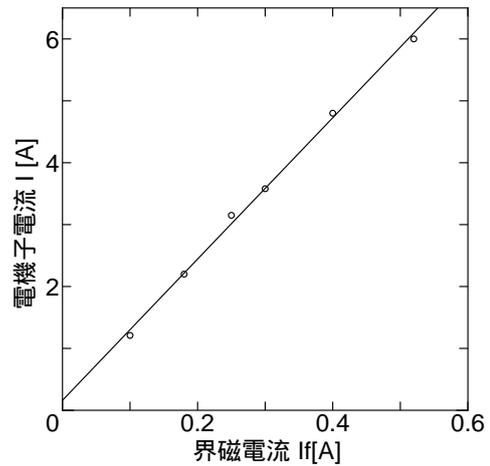


図 5.11: 短絡特性曲線

絡操作は、同期機の界磁電流を 0 にして行う。界磁電流 I_f と電機子電流 I の関係を、電機子電流 $I < 6A$ の範囲で測定せよ (表 4, 図 5.11)。

バイパス スイッチ K2 の扱い

スイッチ K2 は、電流計 I_2 をバイパスするスイッチである。通常は K2 を閉じておき、電流計 I_1 を読みとる。電流が 1A 以下となって電流計 I_1 が読みとり不能となるとときに限り、K2 を開いてより高感度な電流計 I_2 を使用する。

以下、同期電動機を電源に同期投入して運転するため、図 5.12 に示す同期電動機回路 および図 5.13 に示す直流発電機回路を組み立てる (先に組んだ 直流電動機駆動回路 は、ここでも用いる)。

同期電動機回路は、同期電動機を三相交流電源で運転する回路である。先の無負荷・短絡試験回路を一部修正する。

電力計、力率計は、計器底面の接続図に従って配線する。Source は電源、Load は負荷 (ここでは

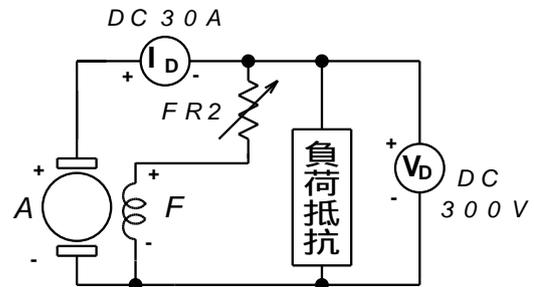


図 5.13: 直流発電機回路

同期電動機) を表す。三相の端子記号 RST は、必要なら UVW に読み替える。

直流発電機回路は、自励式の直流発電機を構成している。電機子で発電した直流を用いて、自らの界磁巻線を励磁している。界磁抵抗器 FR2 を最大値から下げていくと、ある点から電機子電圧が確立し始める。

ここでは、同期機界磁電流あるいは直流発電機出力を変化させた特性をとる。前者は V 字特性、後者は負荷特性である。まず、以下の手順にて同期電動機を電源に接続する。

表 5.5: V 字特性試験 および 負荷特性試験

同期機					直流発電機			
界磁電流	電機子電流	電力計	電機子電圧	力率	無効電力	発電機電圧	発電機電流	発電機電力
$I_f[A]$	$I[A]$	$P[W]$	$V[V]$	$\cos \phi$	$Q[var]$	$V_D[V]$	$I_D[A]$	$P_D[W]$
		倍率 注意		0.9(Lag)	計 算			計 算

同期投入の手順

1. 直流電動機を起動し、回転速度を 1800rpm とする。
2. 同期機の界磁電流を調節して、同期機の電機子電圧 V を 220V とする。
3. 同期検定器のスイッチが OFF であることを確認して、三相電源を投入する。
4. 同期検定器の点滅が遅くなるように、直流電動機界磁抵抗 FR1,SR によって、回転速度を微調整する。
5. 同期検定器において、上側のランプが消灯し、下側のランプが同じ明るさで点灯しているときに、同期検定器のスイッチを投入する。
6. 直流電動機のスイッチ K1 を開く。
7. 直流電動機のクラッチを開く。(数秒後、始動抵抗器が、自動的に復帰する。)

注意 2 なお、同期検定器の 3つのランプが同時に明滅するときは、相回転の方向が逆である。いずれか 2相を入れ替えるか、電動機の回転方向を逆にする。

停止手順

1. 直流発電機を無負荷とする。
2. 三相電源のスイッチを開く。

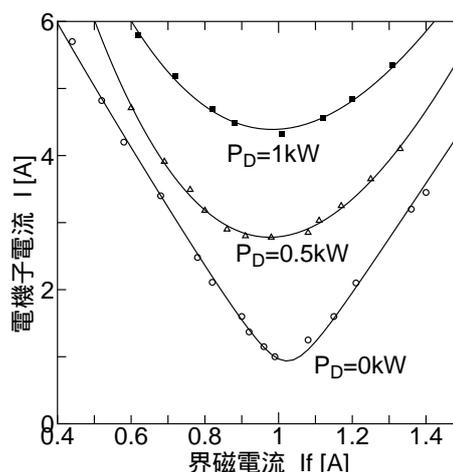


図 5.14: V 字曲線

3. 直流電源のスイッチを開く。
4. 同期検定器のスイッチを開く。
5. 各種抵抗器を、次の始動に備えて戻す。

直流電動機界磁抵抗 : 最小
 同期機界磁電源電圧 : 最小
 直流発電機界磁抵抗 : 最大
 電流計バイパススイッチ K2 : ON

実験 3 V 字特性

直流発電機の負荷を一定に保ち、同期機の電機子

電流 I を同期機の界磁電流 I_f に対して描いた曲線を、 V 字特性あるいは位相特性と呼ぶ (図 5.14)。

直流発電機の負荷として、

イ) 無負荷: 直流発電機は運転しない

ロ) 中負荷: 直流発電機出力 $P_D = 0.5kW$ の

ハ) 重負荷: 直流発電機出力 $P_D = 1kW$

3つの場合について、同期機の電機子電流が $6A$ 以下の範囲で測定する (表 5)。

ロ), ハ) では、直流発電機を運転する。電動発電機を一旦停止し、直流発電機クラッチも連結して、再起動する。直流発電機の電機子電圧 V_D が $100V$ 程度となるように直流発電機の界磁抵抗を調整する。直流発電機の負荷抵抗を投入し、直流発電機に電機子電流 I_D を流す。 V_D が低下した場合は、直流発電機の界磁抵抗を再度調整する。直流発電機の出力 $P_D = V_D I_D$ が、指定値となるよう負荷抵抗を設定し、1本の特性曲線の測定中、一定に保つ。

注意 3 同期機の電機子電流 I が最小となる付近では、最小点が判明するように細かく測定する。グラフを描きながら測定するのが望ましい。

注意 4 力率は、進み (LEAD)・遅れ (LAG) を区別して「 $0.9(LAG)$ 」のように記録する。

注意 5 直流負荷抵抗器の交直切替えスイッチを、 DC とすること。

実験 4 負荷特性

同期機の界磁電流を一定に保ち、直流発電機の出力を変化させた曲線を、負荷特性と呼ぶ。負荷特性は つぎの 3通りの界磁電流について、測定する (図 5.15)。

イ) 適正励磁: 適正值

ロ) 過励磁: 適正值の 130%

ハ) 不足励磁: 適正值の 70%

まず、界磁電流の適正值を定める。直流発電機を無負荷とし (負荷抵抗を OFF)、同期機の力率が 1 となるように、同期機の界磁電流を調整する。この界磁電流を 適正值 と呼ぶことにする。

始めに、界磁電流をこの適正值で一定に保ち、直流発電機の出力を徐々に上げて、負荷特性を測

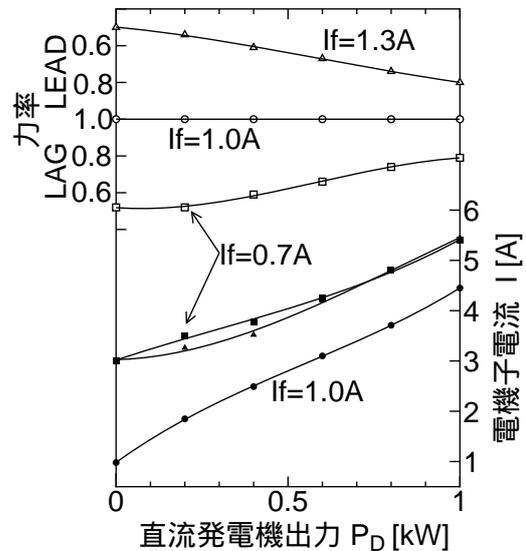


図 5.15: 負荷特性曲線

定する。このとき同期機の電機子電流が、 $6A$ を越えないようにする (表 5)。

続いて、界磁電流を適正值の 130% に保った場合 (過励磁) および、適正值の 70% に保った場合 (不足励磁) を測定する。

直流発電機の出力を変化させるためには、直流発電機の電機子電圧 V_D が $100V$ 程度となるように直流発電機の界磁抵抗を調整し、直流発電機の負荷抵抗を投入して、直流発電機に電機子電流 I_D を流す。

直流発電機に負荷をかけると、力率は始めに設定した値から変化する。この測定では、同期機の界磁電流を一定に保ち、力率を記録する。

5.4 研究課題

課題 1 三相回路と $\sqrt{3}$

線間電圧 $V = 220V$ の三相電源に、抵抗 $R = 32.3\Omega$ が 3本、 Y 形に接続されている (図 5.16)。

1. 相電圧 $E[V]$ を求めよ。

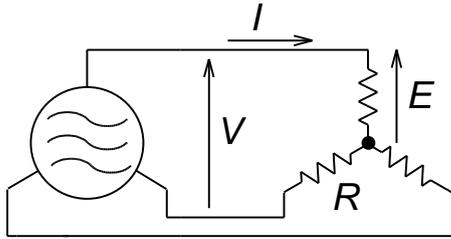


図 5.16: 三相電源に接続された抵抗器

2. 流れる電流 $I[A]$ を求めよ。
3. 1相分の消費電力 $P_1[W]$ を求めよ。
4. 3相分の消費電力 $P[W]$ を求めよ。
5. 一般に、線間電圧 V の電源に、Y結線の抵抗 R が接続されている。三相分電力 P に関する公式の に、係数 ($1, \sqrt{3}$ など) を入れよ。

$$P = \text{} VI \quad (5.4)$$

$$P = \text{} \frac{V^2}{R} \quad (5.5)$$

$$P = \text{} RI^2 \quad (5.6)$$

$$V = \text{} RI \quad (5.7)$$

6. 以上をまとめて、「 に $\sqrt{3}$ がつく」と覚えろとよい。

課題 2 力率と無効電力

1. 力率の「進み, 遅れ」を説明せよ。何に対して何が、遅れたり進んだりするのか?
2. 有効電力 P , 無効電力 Q , 皮相電力 S の関係を説明せよ。
3. 無効電力を発生する回路素子, 吸収する回路素子をあげよ。
4. ベクトル電圧 $\dot{V} = V e^{j\alpha}$, ベクトル電流 $\dot{I} = I e^{j\beta}$ が与えられたとき, 有効電力 $P = VI \cos \phi$ と無効電力 $Q = VI \sin \phi$ (ϕ は \dot{V} と \dot{I} の位相差) を合成した複素電力が

$$P + jQ = \dot{V} \bar{\dot{I}} \quad (5.8)$$

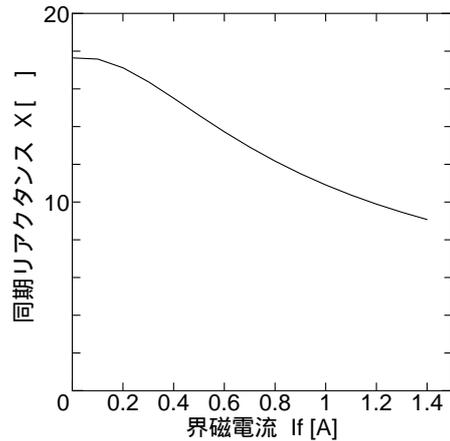


図 5.17: 同期リアクタンスの変化

となることを示せ²。ただし、 $\bar{}$ は複素共役を表す。

課題 3 同期リアクタンス

無負荷特性と短絡特性から同期リアクタンス X を求めよ。すなわち, ある界磁電流に対し, 無負荷時の電機子電圧 E_0 と短絡時の電機子電流 I を用いて,

$$X = \frac{E_0}{\sqrt{3}I} \quad (5.9)$$

により, 同期リアクタンス X を求める (図 5.17)。

課題 4 単位法と短絡比

1. 上で求めた同期リアクタンスの平均値は, 何か。
2. 実験で使用した同期機の定格値を用いて, 単位法の基準インピーダンス, すなわち $1pu$ となる 値を (5.2) 式より求めよ。
3. 1. で求めた同期リアクタンス (値) を, (5.3) 式により単位法の値 (pu 値) に換算せよ。

²電力分野では (5.8) 式で定義するが, Q の符号を逆にし, $\bar{\dot{V}} \dot{I}$ と定義する流儀もある。

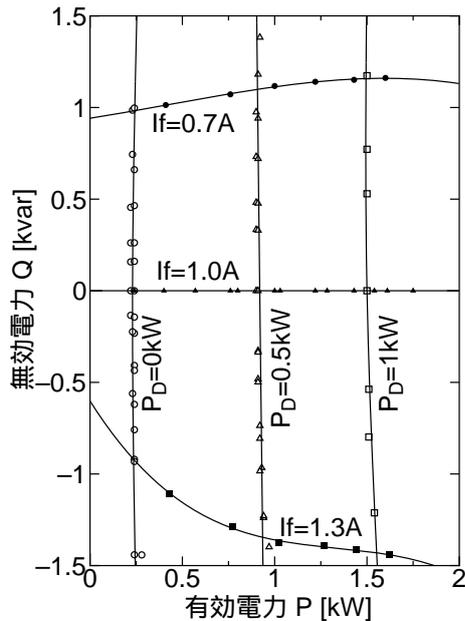


図 5.18: 有効電力 – 無効電力特性

4. 短絡比 K_s を求めよ。

I_{f1} : 無負荷特性曲線上で、
 定格電圧を与える界磁電流
 I_{f2} : 短絡特性上で、
 定格電流を与える界磁電流
 とす
 るとき、 $K_s = I_{f1}/I_{f2}$ である。

5. 「短絡比の逆数は、単位法で表した同期リアクタンスと等しい」ことを数値として確認せよ (なぜか、あまり合わない...)

課題 5 有効電力・無効電力

1. V字特性試験、負荷特性試験の結果に対して、同期機の電機子無効電力 Q を、次式で求めよ。

$$Q = \pm\sqrt{3}VI\sqrt{1 - \cos^2\phi} \quad (5.10)$$

V : 電機子電圧 (線間)
 I : 電機子電流
 $\cos\phi$: 力率 (力率計の指示値)
 \pm : 遅れ (+), 進み (-)

2. 電力計の測定値 P (有効電力) を横軸、上で求めた無効電力 Q を縦軸にプロットし、

- V字特性：無負荷、中負荷、重負荷
- 負荷特性：励磁適正、不足励磁、過励磁

の 6 本の曲線を描け (図 5.18)。縦 $1kvar$ と横 $1kW$ の長さを等しく描くのが望ましい。

課題 6 同期機とベクトル図

1. 電圧 \dot{V} 、角周波数 ω の交流電源に、インダクタンス L のコイルが接続されている。コイルに流れる電流 \dot{I} のベクトルを描け。ただし、 \dot{V} を水平に描くものとする。
2. 同じ交流電源に、静電容量 C のコンデンサが接続されている。コンデンサに流れる電流 \dot{I} のベクトルを描け。
3. 同期リアクタンス X 、無負荷誘導起電力 E_0 の同期電動機が、電圧 V の交流電源につながっている。 E_0 と V の位相は同じとする。不足励磁 ($V > E_0$) のとき、同期電動機に流れ込む電流 \dot{I} のベクトルを描け。ただし、 E_0, V を水平に描くものとする。
 ヒント: (5.1) 式より \dot{I} を求める。図 5.6 を参考に作図。 E_0 と V の位相が同じになるので、 \dot{V} と \dot{E}_0 は平行になる。
4. 同様に、過励磁 ($V < E_0$) のとき、電流 \dot{I} のベクトルを描け。
5. 電流 \dot{I} が電圧 \dot{V} より進むのは、コイル、コンデンサ、不足励磁の同期機、過励磁の同期機のうち、どの場合か? また、 \dot{I} が \dot{V} より遅れるのは、どの場合か?

課題 7 同期機の等価回路と電力円線図

1. 電機子端子を電圧 V の電源に接続したとき、同期機の有効電力 P 、無効電力 Q が次式で与えられることを、等価回路あるいはベクトル

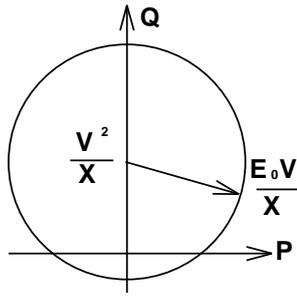


図 5.19: 円線図

図から示せ。ただし、 δ は V と E_0 の位相差 (相角) を表す。

$$P = \frac{VE_0 \sin \delta}{X} \quad (5.11)$$

$$Q = \frac{V^2 - VE_0 \cos \delta}{X} \quad (5.12)$$

ヒント: $\dot{E}_0 = E_0 e^{-j\delta}$, $\dot{V} = V$ とおき, (5.1) 式から \dot{I} を求めて, 複素電力 $P + jQ = \dot{V}\dot{I}$ に代入。ここで \cdot は複素共役を示す。

2. V, E_0 を一定として δ を変えたとき, 上式の P, Q の軌跡が, 中心 $(P, Q) = (0, \frac{V^2}{X})$, 半径 $\frac{VE_0}{X}$ の円 (図 5.19) となることを示せ。

ヒント: 「円の公式」の形になるよう, $\sin \delta, \cos \delta$ を消去。

課題 8 課題 7-2 で示した $P-Q$ 曲線上の円を, 負荷特性の 3 通りの界磁電流 (適正, 不足, 過励磁) について作図せよ。すなわち, 負荷特性を測定した時の界磁電流 I_f を用いて, 無負荷特性曲線 (図 5.10) から E_0 を, 課題 3 の結果から X を定め, 実測した V を用いて, 円を描く。

課題 5 で描いた $P-Q$ 平面上の実測値と比べよ。(あまり, うまく合わない...)

課題 9 V 字曲線の理論曲線

1. 同期機のベクトル図あるいは等価回路から, 電機子電圧 V , 無負荷誘導起電力 E_0 , 出力 P のとき, 同期機の電機子電流 I は,

$$I = \frac{\sqrt{V^2 + E_0^2 - 2\sqrt{E_0^2 V^2 - P^2 X^2}}}{X} \quad (5.13) \quad 12$$

となることを示せ。

ヒント: $\dot{E}_0 = E_0 e^{-j\delta}$, $\dot{V} = V$ とおき, (5.1) 式より \dot{I} を求めて, 実部と虚部に整理する。 $I = |\dot{I}|$ を求めて, (5.11) 式を用いて δ を消去する。

または $\dot{E}_0, \dot{V}, X\dot{I}$ のベクトル図を描いて余弦定理より XI を求め, (5.11) 式を用いて δ を消去する。

2. 上の (5.13) 式は, V, E_0 を相電圧, P を 1 相分電力とした時は正しい。 V, E_0 を線間電圧, P を 3 相分電力としたとき, どう修正すればよいか?

ヒント: 相電圧 = (線間電圧) / $\sqrt{3}$, 1 相分電力 = (3 相分電力) / 3 を用いる。課題 1 の 6. の性質を満たすはずである。

3. (5.13) 式で $P = 0$ とし, V, X を一定にして E_0 を変えたとき, I の最小値とそれを与える E_0 を求めよ。
4. 修正した (5.13) 式を用いて, 無負荷, 中負荷, 重負荷に対する V 字特性を作図せよ。

界磁電流 I_f と無負荷誘導起電力 E_0 の関係は, 無負荷特性曲線 (図 5.10) を用いる。同期機の出力 P は, 諸々の損失を無視すれば, 直流機の出力電力 P_D と等しいとみなせる。電機子電圧 V は実験 3 の測定値, 同期リアクタンス X は課題 3 の値が使える。

問題 1 同期検定灯の原理を調べよ。

問題 2 相順が逆のとき, 同期検定灯の 3 つのランプが同時に点滅することを, 数式あるいはベクトル図で示せ。

問題 3 同期電動機の乱調について調べ, 防止法を説明せよ。

問題 4 同期電動機の始動法を調べよ。

問題 5 直流電動機の原理的な構造を図示せよ。電機子, 界磁, ブラシ, 整流子とはどこか。

問題 6 直流機の励磁方式には, 分巻, 直巻, 複巻がある。それらは どう違うか? 実験に用いた直流電動機は どの形か? それは 駆動回路 (図 5.8) の どこを見ると分かるか?

問題 7 直流電動機の電機子誘導起電力とは何か?

問題 8 直流電動機の回転速度が, 電機子に加える電圧と界磁磁束から決まる機構を説明せよ。

問題 9 直流電動機の世界調整法を調べよ。

問題 10 分巻電動機において, 界磁抵抗を調整すると回転速度が変わる機構を説明せよ。

問題 11 直巻電動機の世界トルク特性と, 分巻電動機の世界トルク特性の違いを述べよ。

問題 12 直巻電動機で駆動している機械的負荷が無くなると, 回転速度が上昇して危険である。これを直巻電動機の世界トルク特性から説明せよ。

問題 13 同期投入の際, 直流電動機を電源につないだまま, 同期電動機との結合クラッチを切り離すと, 直流電源のヒューズがとんでしまった。なぜだろう。

問題 14 分巻電動機の運転中に, 界磁回路が切れると回転速度が上昇して危険である。これを分巻電動機の世界特性から説明せよ。

問題 15 分巻の直流電動機を起動する時, 界磁電流 I_{Mf} が流れないと危険である。なぜか?

問題 16 「直流電動機の運転手順」(5.3.1 章)では, 界磁電流 I_{Mf} が $0.6A$ 程度流れていること, 界磁抵抗の操作により減少することを確認している。これは, どのような誤配線, 誤操作を防ぐ目的か?

問題 17 直流電動機を起動するとき, 電機子回路に始動抵抗を挿入する。その役割を述べよ。

問題 18 直流電動機の始動抵抗器 (スタータ)には, レバーを保持する電磁石 (無電圧開放器)がついている。この役割を述べよ。

問題 19 直流発電機の自励式, 他励式とは なにか?

問題 20 直流発電機の電圧調整法を調べよ。

問題 21 発電機は, 磁界中で運動する導体に生じる電圧をとりだす。図 5.13 の直流発電機の回路では, どの部分が発電し, どの部分が磁界を作るのか? この回路を「自励式」と呼ぶのはなぜか?

問題 22 直流分巻電動機と直流自励発電機の構造・結線上の違いは何か。直流分巻電動機を直流発電機として使うことは可能か?

問題 23 同期電動機の起動時に, 直流電動機のスイッチ $K1$ を切っても何も起きないが, 同期電動機との結合クラッチを外すと, 始動抵抗器が数秒後に復帰する。これはどういうカラクリか?

ヒント: 始動抵抗器のレバーを保持する電磁石の電流は, どこから供給されているのか?

問題 24 実験中, 電動機の世界は変化したか? 変化しないとすれば, それはなぜか?

問題 25 実験で使用した同期機の極数はいくつか? (ヒント: 回転速度と周波数の関係を考えよ)

問題 26 同期電動機の回転速度を変えるためには, どうしたらよいか?

問題 27 回転磁界とは, どうゆうものか?

問題 28 図 5.20 に示すように, 電池, スイッチ, 2組のコイル と回転する磁石が接続されている。コイルについての \times 印は, 端子 P から端子 M へ電流を流したときの電流の向きを示す。スイッチ S_k と S'_k は連動して開閉する。

1. スイッチ $S1, S1'$ を閉じたとき, コイルの中にはどの向きの磁界が生じるか?

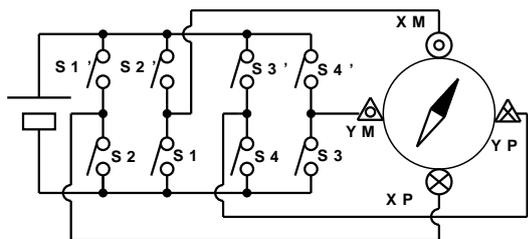


図 5.20: おもちゃ電動機

2. 磁石を右回りに回転させたい。スイッチ S_1, S_2, S_3, S_4 をどういう順序で操作すればよいか？

問題 29 図 5.20 のおもちゃのまわりに 4 つの豆電球をおき、磁界の方向の豆球を点灯させる回路を考えよ。

問題 30 同期電動機の回転方向を逆にするためには、どうしたらよいか？ (三相誘導電動機について答えてもよい)

問題 31 無負荷特性で 界磁電流 0 のときでも 電機子電圧が 0 でなく、短絡特性で 界磁電流 0 のときでも 電機子電流が 0 でないとすれば、その原因は何か？

問題 32 実験機は 60Hz 用であるが、これを 50Hz で運転したとき、無負荷特性はどのように変化するか？ また、短絡特性は 50Hz でも変化しないが、なぜか？

問題 33 直流電動機駆動回路 (図 5.8) のスイッチ K_1 の目的は何か？ すなわち、同期投入後に スイッチ K_1 ではなく直流電源を切り離すと、何がまずいか？

問題 34 スイッチ K_2 は閉じておく方が安全で、むやみに開くと危険である。なぜか？

問題 35 電動機で発電機を駆動する装置を電動発電機 (MG) と呼ぶ。電動発電機が実用的に使われている例を調べよ。

問題 36 実験では、同期機の界磁電源として「整流平滑回路」を用いた。整流回路および平滑回路の構成例を示し、それぞれの部分の働きを述べよ。

問題 37 交流電源から直流を得る方法を、2通り以上、述べよ。

ヒント：この実験で使った方法

問題 38 スライダックには *input*, *output* の 2組 (4つ) の端子がある。これらの端子と 内部の単巻変圧器の接続を示せ。

問題 39 実験で用いた電動発電機は、直流電動機 (DCM)、同期電動機 (SM)、直流発電機 (DCG) の組合せであった。

1. 各機械の界磁回路の働きを述べよ。すなわち、その機械の界磁電流を調整すると、何が変わるか？
2. 実験中、ある機械の界磁回路が切れてしまったとき、どういう現象が起きるか？ それは、どの程度危険か？ (DCM, SM, DCG のそれぞれの場合について記せ)

問題 40 1.5kW の電動機で駆動されるクレーンがある。 100kg の荷物を 10m もちあげるのに、何秒かかるか？ 機械的伝達機構の損失は無視する。

問題 41 出力 1.5kW 、回転速度 1800rpm の電動機がある。

1. 電動機の軸に半径 5cm のドラムを直結する。ドラムにロープを巻き付けて、ロープを巻き上げるとする。ロープが巻かれる速度 $v[\text{m/s}]$ を求めよ。
2. 軸トルク $T[\text{Nm}]$ を求めよ。
3. ロープにかかる張力 $f[\text{N}]$ を求めよ。
4. 機械的な仕事率 $P_m = fv$ を求めよ。
5. 上の答を、電動機出力と比較せよ。

問題 42 校舎の屋上に貯水タンクを造り、雨水を貯める。この水が 1 階まで落ちるエネルギーを利用して、毎週 1 回、学生実験用の電動機を運転する。1 回当たり、何分間運転できるか？ 大阪の年間降水量は 1318mm である。

ヒント: 雨水の位置エネルギーを求める。校舎の寸法は概算でよい。

問題 43 無負荷特性と短絡特性から、(5.9) 式で同期リアクタンスが計算できる理由を、等価回路あるいはベクトル図により説明せよ。

問題 44 同期リアクタンス $X = 12$ の同期電動機がある。この同期機が、電機子電圧 $V = 220\text{V}$ 、出力 $P = 1.5\text{kW}$ 、力率 1 で運転されているとき、無負荷誘導起電力 E_0 、相角度 δ を求めよ。

ヒント: P, V より電機子電流 I を求め、ベクトル図を描け。 $\sqrt{3}$ に注意。

問題 45 前問の同期機が、 P, V が同じで 力率 0.9(遅れ) で運転されているとき、無負荷誘導起電力 E_0 、相角度 δ を求めよ。

ヒント: 力率より \dot{V} と \dot{I} のなす角 ϕ がわかる。これより、 \dot{V} と jXI のなす角がわかり、ベクトル図が作図できる。余弦定理により、 E_0 が求まる。

問題 46 同期リアクタンスが界磁電流にともなって変化する理由を述べよ。

問題 47 通常の同期機における短絡比の値を調べよ。実験機の短絡比は、その範囲にあるか？

問題 48 鉄機械、銅機械について調べよ。実験機は、どちらに属するか？

問題 49 無負荷時に定格電圧が出るように界磁電流を調整した同期機がある。この同期機を短絡したときに流れる電機子電流の pu 値を、短絡比で表せ。

問題 50 無負荷試験 (実験 1) では、同期機の電機子電圧 V を測定して、それを E_0 としている。問題ないか？

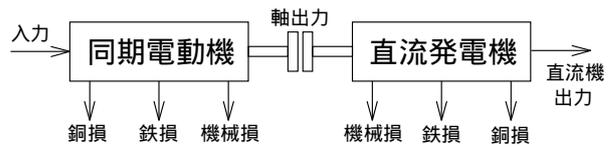


図 5.21: 電動発電機の損失

問題 51 ベクトル図 5.6 で、 P, V, X を一定にして $|E_0|$ を変えたとき、ベクトル \dot{E}_0 の先端が水平、すなわち \dot{V} と平行に移動する理由を説明せよ。

ヒント: (5.11) 式

問題 52 図 5.6(b) のベクトル図のどこを見ると、力率が 1 であることがわかるか？

問題 53 図 5.6(a), (c) のベクトル図において、どこを見ると、力率が遅れあるいは進みであることがわかるか？

問題 54 V 字曲線の最低点では、

$$I = \frac{\sqrt{E_0^2 - V^2}}{X} \quad (5.14)$$

となることを示せ。

ヒント: 最低点では、力率=1 より Q が決まる。(5.12), (5.11) 式より δ を消去、 P を E_0, V で表し、(5.13) 式に代入する。あるいは、図 5.6(b) より。

問題 55 V 字曲線の最低点を与える界磁電流値は、何 A か。その界磁電流値による無負荷誘導起電力 E_0 は、何 V か。それは、どういう意味の値か。

問題 56 直流発電機の出力 P_D が、同期電動機の入力電力より小さくなるのはなぜか？

問題 57 V 字特性試験 (無負荷) のとき、同期機に入った有効電力はどこへ行くのか？

問題 58 同期電動機で直流発電機を駆動する電動発電機では、損失は

- 同期機銅損 ($R_a I^2$ に比例)
- 同期機鉄損 ($(V/f)^2$ にほぼ比例)

- 同期機機械損 (回転速度の $1 \sim 2$ 乗に比例)
- 直流機機械損 (回転速度の $1 \sim 2$ 乗に比例)
- 直流機鉄損 (V_D^2 に ほぼ比例)
- 直流機銅損 (I_D^2 に比例)

に分類できる (図 5.21)。実験で測定した電力から、あるいは追加実験を行うことで、これらの損失の大きさを見積もる方法を考えよ。

問題 59 回転子に電流を伝える機構として、スリップリングあるいは整流子がある。それぞれの構造を示し、構造上の違い、機能の違いを述べよ。

問題 60 同期機では界磁が回転する回転界磁形が多いが、直流機では電機子が回転する回転電機子形が多い。なぜか？

問題 61 同期機には回転界磁型と回転電機子型がある。実験機がどちらであるか、確認する方法を考えよ。

問題 62 同期機の定格電圧 $V_n[V]$ 、定格電流 $I_n[A]$ 、定格容量 $S_n[VA]$ の間には、どういう関係があるか？

問題 63 同期リアクタンスを計算する (5.9) 式で、 $\sqrt{3}$ がつく理由を説明せよ。

問題 64 同期機の電力 P, Q を与える (5.11), (5.12) 式は、1 相分、3 相分のいずれの式か？