

三相同期発電機の特性試験

1. 目的

三相同期発電機の無負荷特性試験と短絡特性試験をおこない、同期発電機の原理と基本的な特性を理解する。また短絡比および同期インピーダンスを算出して、電機子反作用がリアクタンスによって表わすことができることの概念を理解し、同期機の特性にあたる電機子反作用の重要性を理解する。また実負荷試験をおこなって、負荷の軽重にともなう電圧変動、効率の変化などの特性を理解する。

2. 三相同期発電機の原理と理論

三相同期発電機は、全国の火力および水力発電所などを中心に広く使用されており、電力エネルギー発生源として重要な役割をはたしている。

2. 1 三相同期発電機の原理

図1は三相同期発電機の原理図で、固定子には磁界を発生させるための界磁極があり、界磁コイルが巻かれていて、界磁コイルに流れる直流電流（界磁電流） I_f の大きさを加減することにより磁界の強さ（または磁束の量 Φ ）を調整することができる。回転子には3つのコイル（coil A、coil B、および coil C）が埋め込まれていて、回転子が回転することによってコイルが磁束を切り、コイルに電圧が発生する。回転子は電機子とよばれる。コイルが半回転するとコイルの運動方向（磁束を切る方向）が逆になるので、発生する電圧の方向が逆になり、結局、1回転すると1周期分の電圧が発生する（図2の v_a ）。coil B および coil C は、空間的な位置が、それぞれ、 120° および 240° ことになって（遅れて）いるので、それぞれ、電氣的に 120° および 240° 位相が遅れた電圧が発生する（図2の v_b 、 v_c ）。各コイルは、電機子とともに回転するスリ

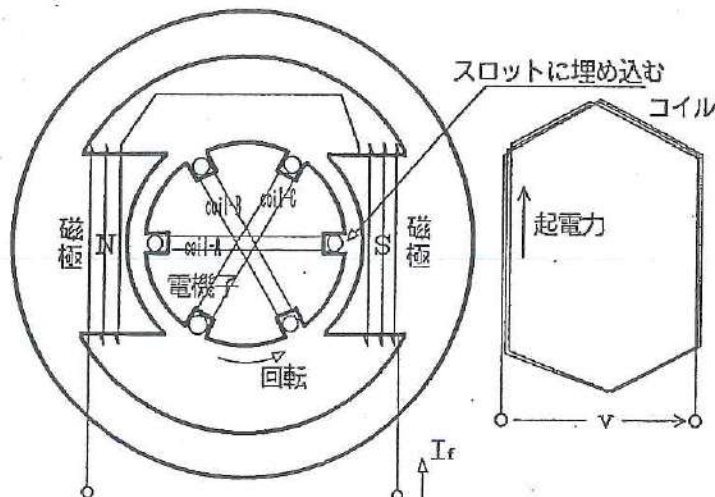


図1 三相同期発電機の原理図

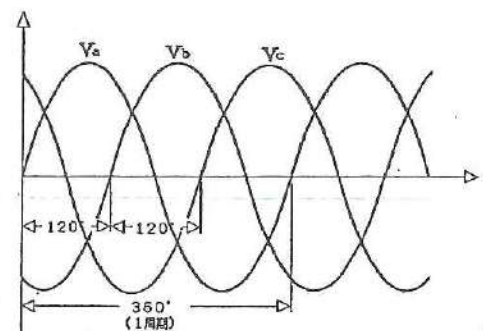


図2 対称三相交流電圧

ッブリングに電氣的に接続されていて、発電電圧はブラシをとおして外部にとり出される。

上でのべた三相同期発電機の原理は、極数が2の回転電機子形（電機子が回転する形式）であるが、発電所に設置される大型の発電機は回転界磁形が普通である。また火力発電所に設置されるタービン発電機は2極機が多いが、水力発電所に設置される水車発電機は極数の多い三相同期発電機が使用される。図3は4極の回転界磁形の原理図である。極数が4の場合には、N極、S極が2個ずつあるので1回転すると2周期分の電圧が発生し、コイルの開きは 90° で、1相にたいして2個のコイルが（A相では coil-A1 と coil-A2 ）埋め込まれている。

発電する交流電圧の周波数 f は、回転数を N_s [r. p. m.]、極数を P とすると

$$f = P N_s / 120 \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

で表わされ回転数に比例する。

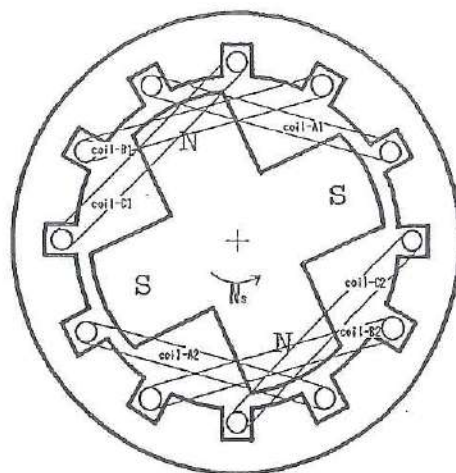


図3 回転界磁形同期発電機（極数4）

2. 2 三相同期発電機の電機子反作用と等価回路

三相同期発電機の特徴は電機子反作用によって大きく左右される。したがって同期発電機の電機子反作用の原理と理論的とりあつかいを十分に理解することが重要である。

発電機の出力端子に三相对称の外部回路（負荷）を接続すると、負荷電流は発電機の電機子コイルを流れ（これを電機子電流とよぶ）、その起磁力によって磁束を発生させる。この磁束はもともと存在する界磁磁極が発生している磁束 Φ に直接影響をあたえて、電機子コイルに発生している電圧を変化させる。この現象を電機子反作用という。電機子反作用は、界磁の磁束のみによって電機子コイルに発生している電圧（これを無負荷誘導起電力とよぶ） E 。と電機子電流 I との位相差によって影響の現われかたがことなる。すなわち

- (1) I の位相が E より 90° 遅れているときは界磁磁束を減少させる.... 減磁作用
- (2) I が E とのとき同相のときは界磁磁束を一方の側にかたよらせる.... 偏磁作用
- (3) I の位相が E より 90° 進んでいるときは界磁磁束を増加させる.... 増磁作用

が、それぞれ、現われる。そしてその影響の大きさは電機子電流 I の大きさに比例する。

電機子反作用の影響を理論的にとりあつかうためには、電機子コイルと直列に誘導リアクタンス X_a （電機子反作用リアクタンスとよぶ）が各相に接続されていると考える。したがって三相同期発電機の1つの相は、無負荷誘導起電力 E_o に相当する交流電源に、電機子反作用リアクタンス X_a 、および電機子コイルに付随して存在するもれリアクタンス X_l と抵抗 R_a が直列に接続された回路と等価で、図4のような等価回路で表わすことができる。発電機全体では図4のような回路があと2つあって、電圧、電流の位相が、それぞれ、 120° 、および 240° 遅れていると考えればよい。

電機子反作用リアクタンス X_a は実際は存在しない仮想的なものであるが、実測してその値をもとめることができる。本実験でも測定値をもとに計算によってもとめる。電機子反作用リアクタンス X_a はもれリアクタンス X_l よりもはるかに大きく、さらに X_l は電機子抵抗 R_a よりもはるかに大きいのが普通である。したがって電機子反作用は三相同期発電機の特長にもっとも重要な影響をあたえる。

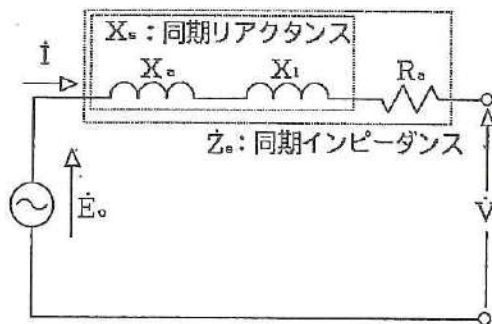


図4 1相分の等価回路

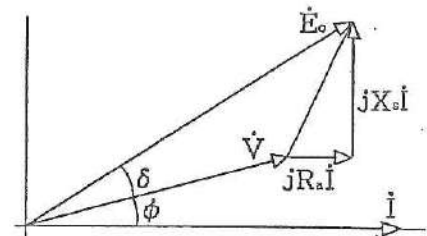


図5 ベクトル図

図4からつぎの式が成り立つ。

$$\begin{aligned} V &= E_o - (R_a + jX_a + jX_l) I \\ &= E_o - (R_a + jX_s) I = E_o - Z_s I \end{aligned} \quad (2)$$

ただし V は端子電圧（ V と E_o はともに星形結線の相電圧）。また

$$\begin{aligned} X_s &= X_a + X_l \dots\dots \text{同期リアクタンス} \\ Z_s &= R_a + jX_s \dots\dots \text{同期インピーダンス} \end{aligned} \quad \text{である。}$$

(2) 式をベクトル図で表わすと図5のようになる。図5で、 ϕ は負荷の力率角であり、 δ は負荷角または電力角とよばれ、発電機出力 P は δ をつかってつぎの式で表わすことができる。

$$P = (3 V E_o / Z_s) \sin \delta \quad (3)$$

2. 3 無負荷試験

三相同期発電機を定格回転数で運転し、端子を解放して、界磁電流 I_f を変化させ、端子電圧 V 。(線間電圧)と入力 P を測定する。無負荷(図4では $I = 0$)なので、 V_o は無負荷誘導起電力にひとしい。 V_o は、 Φ を1極の磁束、 f を周波数、 K を定数として

$$V_o = K \Phi f \quad (4)$$

で表わされる。周波数 f は回転数 N_s に比例するので回転数が一定であれば f は一定で、結局 E は磁束 Φ に比例する。したがって I_f にたいする V_o の変化は Φ の変化でもある。界磁電流 I_f を増加させると、始めは磁束 Φ (または V_o) もほぼ比例して増加するが、さらに I_f を増やすと飽和してくる。つぎに I_f を減少させると鉄心のヒステリシス特性のために増加させたときより大きな Φ (または V_o) の値をとりながら減少する(図6参照)。

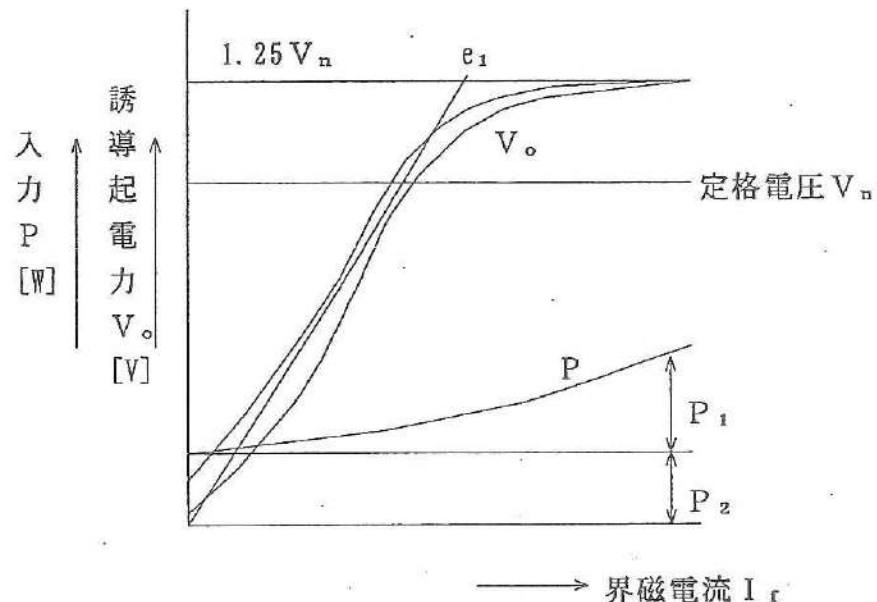


図6 無負荷特性

入力 P はこの場合すべて損失であり、界磁電流 I_f (または磁束 Φ) にかかわらず一定の機械損 P_2 と、磁束 Φ の増加とともに増加する鉄損 P_1 に分けられる。

2. 4 短絡試験

発電機を定格回転数で運転し、発電機の3つの出力端子を短絡して、界磁電流 I_f を増加させたときの短絡電流 I_s を測定する（図6参照）。 I_f にたいし I_s は直線的に増加する。端子は短絡しているので（2）式で $V=0$ であるから、

$$Z_s = E_o / I_s \quad (5)$$

となる。ただし、 $E_o = V_o / \sqrt{3}$ 。

無負荷特性試験の結果から、ある界磁電流 I_f の値にたいして無負荷誘導起電力 E_o がもとまるので、（5）式から同期インピーダンス Z_s が計算できる。図7には無負荷試験のときの無負荷誘導起電力 E_o （界磁電流 I_f の増加時と減少時の平均値）の曲線も描いている。無負荷試験で定格電圧 E_n を発生させるための界磁電流の値を I_{fv} 、短絡電流が定格電流 I_n となるときの界磁電流の値を I_{fi} としたとき、短絡比 K_s を

$$\text{短絡比 } K_s = I_{fv} / I_{fi} \quad (6)$$

で定義する。また同期インピーダンス Z_s をその発電機の定格電圧と定格電流によって正規化した値を単位法で表わした同期インピーダンスとよぶ。単位法で表わした同期インピーダンスは短絡比の逆数にひとしい。すなわち

単位法で表わした同期インピーダンス

$$Z_s [\text{pu}] = Z_s I_n / E_n = 1 / K_s \quad (7)$$

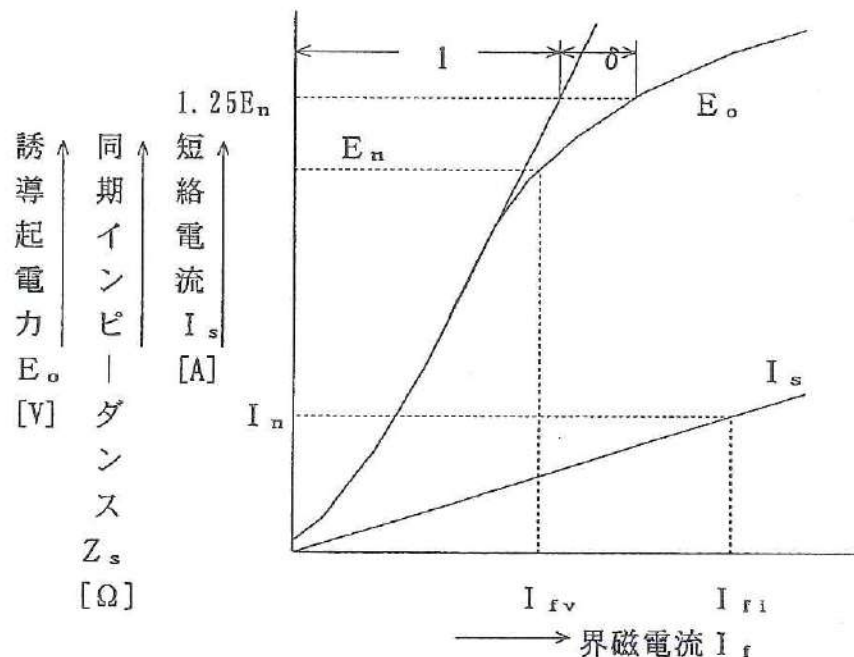


図7 短絡特性と無負荷飽和曲線

2. 5 電圧変動率

電圧変動率は発電機の性能を表わすための重要な要素のひとつであり、電機子反作用の大きさとも密接な関係がある。電圧変動率は、連続運転可能な最大出力の運転状態（定格負荷状態）から突然負荷をゼロにしたとき、端子電圧がどの程度変動するかを表わした量で、つぎの式で定義される。

$$\text{電圧変動率 } \varepsilon = (E_{on} - E_n) / E_n \times 100 \quad [\%] \quad (8)$$

ここで E_n は定格電圧、 E_{on} は定格運転状態（定格電圧、定格出力で運転している状態）における無負荷誘導起電力（線間電圧）である。電圧変動率は負荷の力率によってことなり、負荷の力率を変えながら実際に発電機に負荷をかけて測定することができれば（8）式をつかって電圧変動率を計算できる。

電圧変動率は、単位法で表わした同期インピーダンス $Z_s[\text{pu}]$ がわかればつぎの式をつかって計算することができる。この式は実際に負荷をかけて試験する必要がないので実用的である。

$$\varepsilon = \left\{ \sqrt{1 + (Z_s[\text{pu}])^2 + 2 Z_s[\text{pu}] \sin \phi} - 1 \right\} \times 100 [\%] \quad (9)$$

3. 実験

3.1 接続図

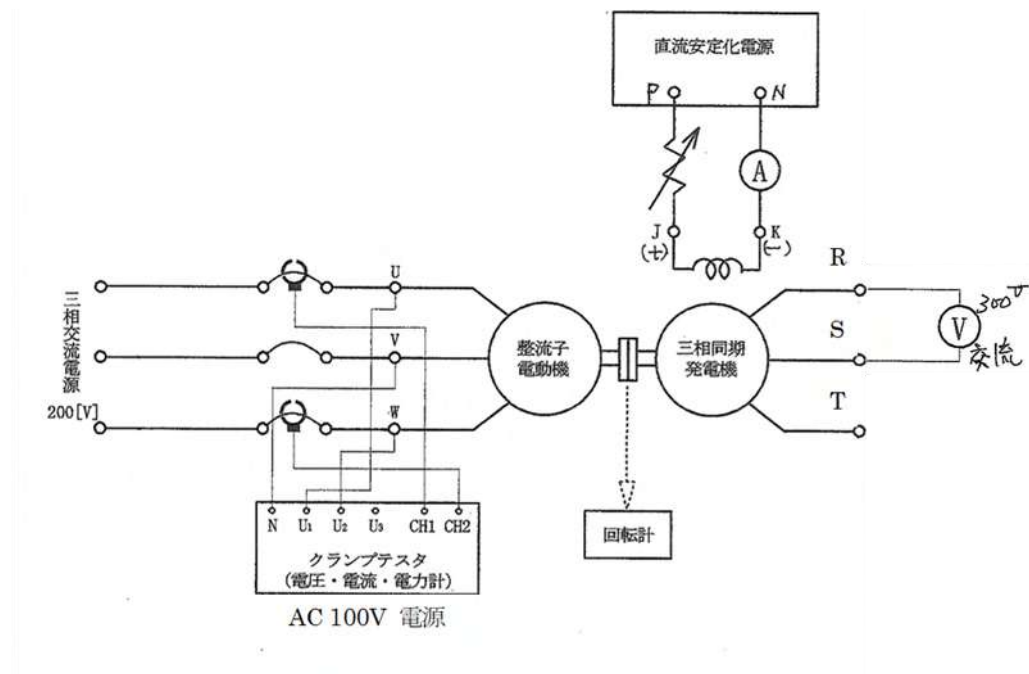


図 8-1 無負荷試験

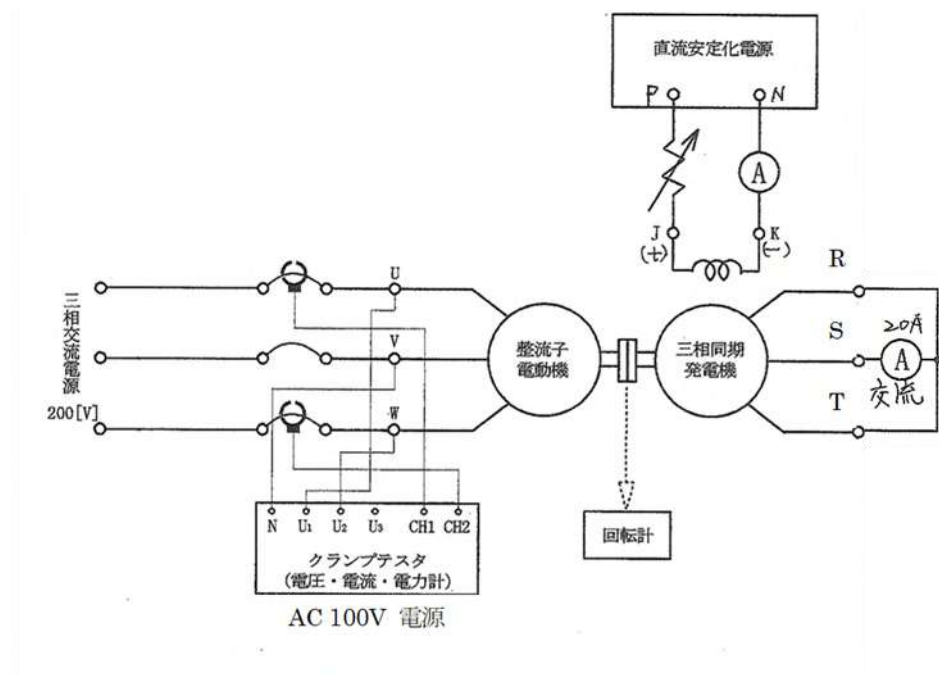


図 8-2 短絡試験

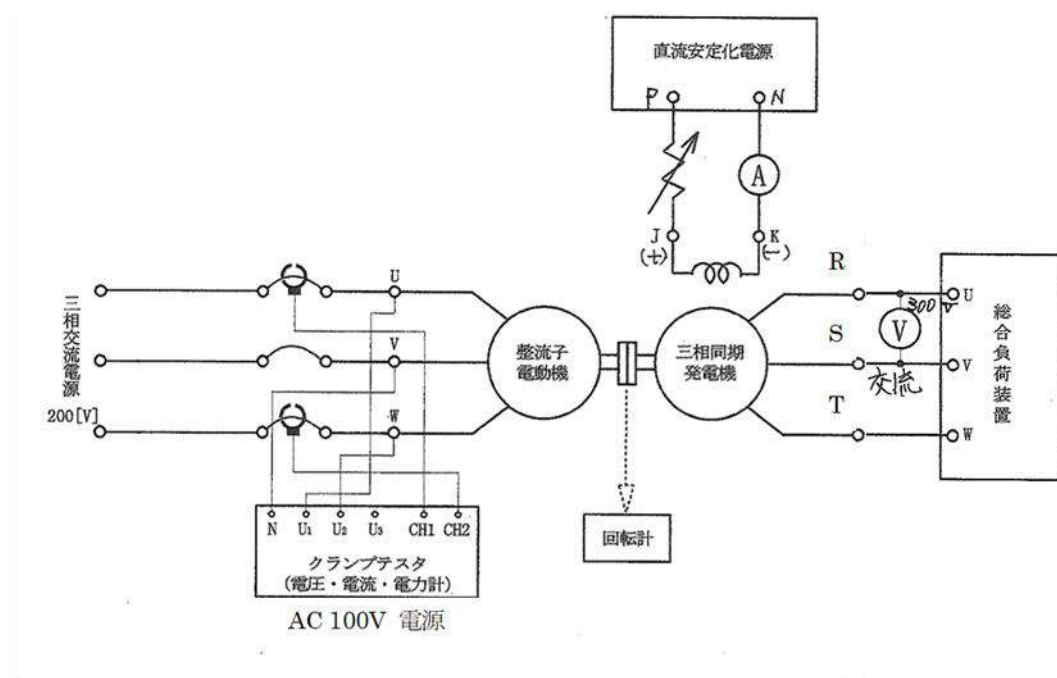


図 8-3 実負荷試験

3. 3 実験方法および結果の整理

- (a) 図 8 のように接続し、担当の先生のチェックを受ける。またこれから実験をおこなう三相同期発電機のネームプレートを見て、定格容量、定格電圧、定格電流、定格回転数などを確認、記録する。
- (b) 原動機である三相整流子電動機のダイヤルが最低速度の位置にあることを確認し、スイッチ S1 を投入して始動する。
- (c) 回転計を見ながらダイヤルを操作し、回転数を発電機の定格回転数に合わせる。

(1) 無負荷試験

- (a) S3 を開放して発電機を無負荷の状態にしておき、以下の実験をおこなう。
- (b) 界磁電流 I_f がゼロ (S2 を開放) から、起電力が定格の 1.25 倍程度になるまで増加させ、表 1 のように記録する。つづいて I_f を減少させ、同様に記録する。界磁電流を増加 (減少) させるときは、一方的に増加 (減少) させ、途中で一時的に減少 (増加) させないこと。
- (c) 測定結果から、界磁電流 I_f を横軸に、誘導起電力 V_o 。および入力 P をたて軸にとり線図をえがく (図 6 参照)。

表 1 無負荷試験結果

回転数 n [r. p. m.]	無整流子電動機 (原動機)					三相同期発電機	
	端子電圧 V_m [V]	入力電流 I_m [A]	電 力			界磁電流 I_f [A]	誘導起電力 V_o [V]
			読み	倍率	P [W]		

(2) 短絡試験

- (a) 発電機を定格回転数で運転し、スイッチ S2 を開放した状態で、S3 を閉じ、S4 を右側に閉じる。
- (b) S2 を閉じて界磁電流 I_f を増加させて短絡電流 I_s を測定する。 I_s が定格電流の 1.2 倍程度まで増加させる。
- (c) 測定結果を表 2、および図 7 のようにまとめる。表 2 の誘導起電力 E_o は無負荷試験のときの I_f 増加のときと減少のときの平均値の曲線から読みとる。同期インピーダンスは (5) 式で計算するが、 V_o は線間電圧であるので、

$$E_o = V_o / \sqrt{3}$$

であることに注意すること。

表2 短絡試験結果

励磁電流 I_f [A]	短絡電流 I_{sc} [A]	無負荷誘導起電力 E_o [V]	同期インピーダンス Z_s [Ω]

- (d) 図7から、(6)式および(7)式を用いて短絡比 K_s および単位法で表わした同期インピーダンス Z_s [pu]を計算する。

(3) 実負荷試験

- (a) 整流子電動機を始動し、定格回転数に調整する。つぎに開閉器S4を左側に閉じ、総合負荷装置の力率を遅れ80%に設定し、負荷を少しずつ増加させて定格負荷状態、すなわち定格回転数、定格電圧、定格負荷電流となるように負荷、界磁電流、発電機速度を加減する。
- (b) 負荷電流を定格値から徐々にゼロまで減少させて、各部の電圧、電流などを測定し、表3のようにまとめる。このとき発電機速度と界磁電流を一定に保ちながら測定する。
- (c) 同様の実験を負荷力率が100%、進み80%の場合についても行なう。

表3 実負荷試験

整流子電動機				三相交流発電機						
電圧	電流	力率	入力	電圧	負荷電流	力率	励磁電流	回転数	出力	効率
V_m	I_m	$\cos \theta_m$	W_m	V_g	I_g	$\cos \theta_g$	I_f	n	W_g	η
[V]	[A]	[%]	[W]	[V]	[A]	[%]	[A]	[rpm]	[W]	[%]

実験結果を表3のようにまとめ、特性を曲線によって表す(図9、図10)。

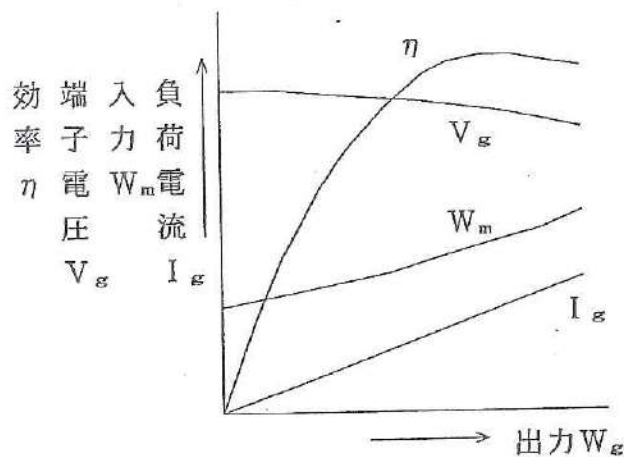


図9 出力特性

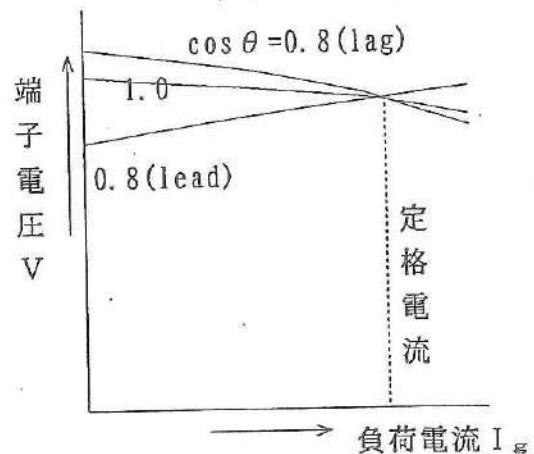


図10 電圧変動特性

5. 検討事項

- (1) 無負荷特性曲線から $E_o = K \Phi n$ の関係を考察してみよ。
- (2) 短絡比の大小より、電機子反作用、形態、価格、電圧変動率、ギャップその他の特性を考察してみよ。
- (3) 短絡電流は励磁電流になぜ比例するか。
- (4) 電圧変動率 ε をつぎの方法で求めよ(図6参照)。

無負荷試験および短絡試験から求めた図3より、 $1.2 E_n$ における飽和係数 δ を得る。 I_{fv} より OA_1 をとり、 $I_{f1}(1+\delta)$ より A_1 、 A_4 をとり、 A_1 における OA の垂線上に $A_1A_2 = I_{f1}$ をとる。 A_1A_4 、 A_1A_2 を長短の半径とする楕円弧をえがき、これと A_1A_2 と力率(定格) $\cos \phi$ より A_1A_3 の交点を A_3 とすれば OA_3 は全負荷電流 i_3 になる。 i_3 にたいする電圧 E_o を図3より求め、電圧変動率を計算する。

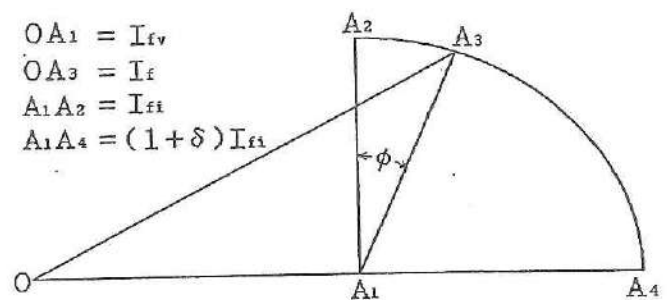


図11

- (5) 上の方法および(9)式で求めた電圧変動率と、実験結果と(8)式でもとめた電圧変動率を比較せよ。
- (6) 電圧変動率が、力率を進み80%、遅れ80%とすると、なぜ図9のようになるのか考察せよ。
- (7) 実験結果を考察せよ。