

三相誘導発電機の自己励磁現象の考察

猪上 憲治*・埴尻 貴志**・山下 英生***

(平成17年9月8日受理)

Consideration of a Self-Excitation Phenomenon of Three-Phase Induction Generator

Kenji INOUE, Takashi TAOJIRI and Hideo YAMASHITA

(Received Sep. 8, 2005)

Abstract

The accident that household electrical appliances in dozens of private houses failed happened several years ago. It seems to be caused by the abnormal voltage rise which resulted from a self-excitation phenomenon due to a condenser installed for power factor improvement of three-phase induction generators.

In order to make this case clear, we considered theoretically and experimentally the outbreak of a self-excitation phenomenon of a condenser by using an experimental machine in this paper. The result made it clear that a self-excitation phenomenon was easily generated in single-phase alternating current load compared with in three-phase one. Therefore, it is possible to consider that the self-excitation is promoted by new electromotive force induced by the magnetic field for a component of negative-phase sequence.

Key Words: self-excitation, three-phase induction generator, squirrel-cage rotor, condenser

1. ま え が き

数年前、某電力会社の配電管轄内において、数十軒の民家の電化製品（テレビジョンなど）が壊れる事故が起きた。この原因は、系統に接続された小水力発電所の三相かご形誘導発電機（250kVA）が力率改善用のコンデンサによって自己励磁現象を発生し、電圧が異常上昇したことによるものと推測されている。

本論文では、この事故の原因を明確に把握するため、実験機（2.2kVAの4極機と6極機）においてコンデンサによる自己励磁現象の発生を理論的および実験的に考察している。すなわち、コンデンサを接続した実験機の自励現象の発生領域を対称座標法によって理論的に求めた。更に、実験機において、自励現象の発生の有無をコンデンサ容量および回転速

度、また負荷の種類をそれぞれ変えて実験的に調べた。

その結果、導出した理論式による計算値は実測値と良く一致し、この理論式が自励現象発生の有無を検討する際のシミュレーションに一般的に使用可能であることがわかった。更に、実験から、コンデンサが接続された誘導発電機は、負荷の三相不平衡の度合いが大きくなるほど自励現象を起こしやすいことが明らかになった。

本文は、まず自励現象の発生領域の理論式を導出する。次に、実験機の定格および定数と実験回路について述べ、実験結果を示す。最後に、このたび得られた結果を要約し、今後の課題を示す。

2. 理 論

いま、誘導機の定数および電気諸量を次のように置くと、

* 広島工業大学工学部電気・デジタルシステム工学科

** 広島工業大学工学研究科電子工学専攻

*** 広島工業大学工学部知的情報システム工学科

コンデンサが接続された誘導機の電圧方程式は (1) 式のように表される⁽¹⁾。

- r_1, r_2 : 誘導機の固定子および回転子の毎相抵抗 [Ω]
- L_1, L_2 : 固定子および回転子の毎相全インダクタンス [H]
- M : 固定子と回転子間の毎相相互インダクタンス [H]
- ω : 任意の回転子速度に対する回転子の電氣的角速度 [rad/s]

- C : コンデンサの毎相静電容量 [F]
 - $i_{1p}(t), i_{1n}(t)$: 固定子電流の正相分および逆相分 [A]
 - $i_{2p}(t), i_{2n}(t)$: 回転子電流の正相分および逆相分 [A]
 - t : 時間 [s]
 - p : d/dt に相当するオペレータ
- ただし、回転子 (2次) 側の諸量は固定子 (1次) 側への換算値である。

$\frac{1}{Cp} + r_1 + L_1p$		Mp			$i_{1p}(t)$	= 0
	$\frac{1}{Cp} + r_1 + L_1p$		Mp		$i_{1n}(t)$	
$M(p - j\omega)$		$r_2 + L_2(p - j\omega)$			$i_{2p}(t)\varepsilon^{j\omega t}$	
	$M(p + j\omega)$		$r_2 + L_2(p + j\omega)$		$i_{2n}(t)\varepsilon^{-j\omega t}$	

..... (1)

(1) 式において、回転子側を消去すれば次のようになる。

$\frac{1}{Cp} + r_1 + L_1p - \frac{M^2 p(p - j\omega)}{r_2 + L_2(p - j\omega)}$			$i_{1p}(t)$	= 0
	$\frac{1}{Cp} + r_1 + L_1p - \frac{M^2 p(p + j\omega)}{r_2 + L_2(p + j\omega)}$		$i_{1n}(t)$	

..... (2)

(2) 式において正相分が求められれば逆相分は視察によって得られるため、まず正相分のみに着目する。いま、

$$\frac{1}{C\dot{\lambda}} + r_1 + L_1\dot{\lambda} - \frac{M^2\dot{\lambda}(\dot{\lambda} - j\omega)}{r_2 + L_2(\dot{\lambda} - j\omega)} = 0 \quad \text{..... (3)}$$

の根を $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ とし、定数を \dot{k}_1, \dot{k}_2 とすれば、 $i_{1p}(t)$ の解は次式で表される。

$$i_{1p}(t) = i_{1p} + \dot{k}_1 \varepsilon^{\dot{\lambda}_1 t} + \dot{k}_2 \varepsilon^{\dot{\lambda}_2 t} \quad \text{..... (4)}$$

(4) 式の右辺第 1 項は定常電流である。

(3) 式を $\dot{\lambda}$ について整理すれば、

$$\begin{aligned} & \dot{\lambda}^2 \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \right) + \dot{\lambda}^2 \left\{ \frac{r_1}{L_1} + \frac{r_2}{L_2} - j\omega \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \right) \right\} \\ & + \frac{\dot{\lambda}}{L_1} \left\{ \frac{1}{C} + \frac{r_1(r_2 - j\omega L_2)}{L_2} \right\} + \frac{r_2 - j\omega L_2}{CL_1 L_2} = 0 \end{aligned} \quad \text{..... (5)}$$

いま、 $1 - M^2/L_1 L_2 = \sigma$ とおけば

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\dot{\lambda}}{\omega} \right)^3 + \left(\frac{\dot{\lambda}}{\omega} \right)^2 \left(\frac{r_1}{\omega \sigma L_1} + \frac{r_2}{\omega \sigma L_2} - j \right) + \left(\frac{\dot{\lambda}}{\omega} \right) \left(\frac{1}{\omega \sigma L_1} \right) \\ & \times \left\{ \frac{1}{\omega C} + r_1 \left(\frac{r_2}{\omega L_2} - j \right) \right\} + \frac{1}{\omega^2 C \sigma L_1} \left(\frac{r_2}{\omega L_2} - j \right) = 0 \end{aligned} \quad \text{..... (6)}$$

(6) 式の近似解を求めるために、解の一つを次のように置く。

$$\left(\frac{\dot{\lambda}}{\omega} \right) = j + \alpha \quad \text{..... (7)}$$

ただし、 $\alpha \ll 1$ である。

(7) 式を (6) 式に代入し、 α の高次項を無視すれば α は次式のようなになる。

$$\alpha = \frac{r_2}{\omega l} \frac{1 - \frac{1}{\omega^2 C L_1} - j \frac{r_1}{\omega L_1}}{\frac{1}{\omega^2 C l} + \frac{r_1 r_2}{\omega^2 L_1 l} - 1 + j \left(\frac{r_1 + 2r_2}{\omega l} \right)} = \gamma_1 - j\beta_1 \quad \text{..... (8)}$$

ただし、 $l = \sigma L_1 = \sigma L_2$ であり、全漏れインダクタンスを表す。また

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{r_2}{\omega l} \frac{\left(\frac{1}{\omega^2 Cl} + \frac{r_1 r_2}{\omega^2 L_1 l} - 1 \right) \left(1 - \frac{1}{\omega^2 CL_1} \right) - \frac{r_1}{\omega L_1} \left(\frac{r_1 + 2r_2}{\omega l} \right)}{\left(\frac{1}{\omega^2 Cl} + \frac{r_1 r_2}{\omega^2 L_1 l} - 1 \right)^2 + \left(\frac{r_1 + 2r_2}{\omega l} \right)^2} \\ \beta_1 &= \frac{r_2}{\omega l} \frac{\left(\frac{r_1 + 2r_2}{\omega l} \right) \left(1 - \frac{1}{\omega^2 CL_1} \right) + \frac{r_1}{\omega L_1} \left(\frac{1}{\omega^2 Cl} + \frac{r_1 r_2}{\omega^2 L_1 l} - 1 \right)}{\left(\frac{1}{\omega^2 Cl} + \frac{r_1 r_2}{\omega^2 L_1 l} - 1 \right)^2 + \left(\frac{r_1 + 2r_2}{\omega l} \right)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

(6)式, (7)式より, λ の他の解は近似的に次式から求めればよいことになる。

$$\left(\frac{\dot{\lambda}}{\omega} \right)^2 + \left(\frac{r_1 + r_2}{\omega l} \right) \frac{\dot{\lambda}}{\omega} + \frac{1}{\omega^2 Cl} + j \frac{r_2}{\omega l} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

(10)式の根は二つあるが, 一方は逆相分となるので捨てることにすると次式の解が得られる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\dot{\lambda}_2}{\omega} \right) &= -\frac{r_1 + r_2}{2\omega l} + j \sqrt{\frac{1}{\omega^2 Cl} - \left(\frac{r_1 + r_2}{2\omega l} \right)^2} + j \frac{r_2}{\omega l} \\ &= -\gamma_2 + j\beta_2 \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

ここに

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= -\frac{r_1 + r_2}{2\omega l} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left\{ \frac{1}{\omega^2 Cl} - \left(\frac{r_1 + r_2}{2\omega l} \right)^2 \right\}^2 + \left(\frac{r_2}{\omega l} \right)^2} \\ &\quad - \frac{1}{\omega^2 Cl} + \left(\frac{r_1 + r_2}{2\omega l} \right)^2 \\ \beta_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left\{ \frac{1}{\omega^2 Cl} - \left(\frac{r_1 + r_2}{2\omega l} \right)^2 \right\}^2 + \left(\frac{r_2}{\omega l} \right)^2} \\ &\quad + \frac{1}{\omega^2 Cl} - \left(\frac{r_1 + r_2}{2\omega l} \right)^2 \end{aligned} \dots\dots\dots (12)$$

同様に逆相分電流 $i_{1n}(t)$ の解は次式で表される。

$$i_{1n}(t) = i_{1n} + \dot{k}_3 e^{j_3 t} + \dot{k}_4 e^{j_4 t} \dots\dots\dots (13)$$

ただし, i_{1n} : 定常電流, \dot{k}_3, \dot{k}_4 : 定数。

$$\left(\frac{j_3}{\omega} \right) = \gamma_1 - j(1 - \beta_1) \dots\dots\dots (14)$$

$$\left(\frac{j_4}{\omega} \right) = -\gamma_2 - j\beta_2 \dots\dots\dots (15)$$

回転子電流の正相分と逆相分は次式のようになる。

$$i_{2p}(t) = i_{2p} - \left\{ \frac{(\dot{\lambda}_1 - j\omega)M}{r_2 + (\dot{\lambda}_1 - j\omega)L_2} \right\} \dot{k}_1 e^{(\dot{\lambda}_1 - j\omega)t} - \left\{ \frac{(\dot{\lambda}_2 - j\omega)M}{r_2 + (\dot{\lambda}_2 - j\omega)L_2} \right\} \dot{k}_2 e^{(\dot{\lambda}_2 - j\omega)t} \dots\dots\dots (16)$$

$$i_{2n}(t) = i_{2n} - \left\{ \frac{(\dot{\lambda}_3 + j\omega)M}{r_2 + (\dot{\lambda}_3 + j\omega)L_2} \right\} \dot{k}_3 e^{(\dot{\lambda}_3 + j\omega)t} - \left\{ \frac{(\dot{\lambda}_4 + j\omega)M}{r_2 + (\dot{\lambda}_4 + j\omega)L_2} \right\} \dot{k}_4 e^{(\dot{\lambda}_4 + j\omega)t} \dots\dots\dots (17)$$

ここに, i_{2p}, i_{2n} はそれぞれ定常電流を表す。

k_1 ないし k_4 は初期条件によって定まるある定数であるから, (4)式ないし (17)式によってすべての解が得られたことになる。(4)式の右辺第1項は同期発電機としての定常項, 第3項は減衰項であるため, 誘導機として動作するかどうかは第2項のみを吟味すればよい。

すなわち, $\gamma_1 > 0$ ならば第2項は増大することになるため, 誘導機の端子電圧は上昇する。

したがって

$$\left(\frac{1}{\omega^2 Cl} + \frac{r_1 r_2}{\omega^2 L_1 l} - 1 \right) \left(1 - \frac{1}{\omega^2 CL_1} \right) - \frac{r_1}{\omega L_1} \left(\frac{r_1 + 2r_2}{\omega l} \right) > 0 \dots\dots\dots (18)$$

を満足するとき, (4)式の第2項は発散する。誘導機の端子電圧が上昇すれば L_1 も大きくなり γ_1 も増大し, 端子電圧は急激に上昇することになる。しかし, 電圧が上昇するにしたがって L_1 も増大するが, 最大値を過ぎてから再び減少し, $\gamma_1 = 0$ を満足する L_1 の値まで電圧が上昇して安定することになる。このときの発生周波数は $\omega(1 - \beta_1)$ に相当するものであって, 回転子角速度 ω よりすべり β_1 だけ少なく, 誘導機は明らかに発電機として動作することになる。

(18)式を満足しないときには, (4)式の右辺第2項も減衰項となるため, i_{1p} の実効値を I_{1p} , 残留磁気電圧の実効値を E_{1p} とすれば, 結局

$$i_{1p} = \sqrt{2} I_{1p} e^{j\omega t} = \left\{ \frac{\sqrt{2} E_{1p}}{r_1 - j(1/\omega C - \omega L_1)} \right\} e^{j\omega t} \dots\dots\dots (19)$$

で安定し, 誘導機は残留磁気による永久磁石式同期発電機として動作し, 回転子端子を開放した場合と全く同一となる。

固定子回路に, 固定子巻線と直列に外部抵抗 R_1 を挿入した場合の自己励磁の発生条件も同様にして求めることができ, 次式のようになる。

$$\left\{ \frac{1}{\omega^2 C l} + \frac{(r_1 + R_1)r_2}{\omega^2 L_1 l} - 1 \right\} \left(1 - \frac{1}{\omega^2 C L_1} \right) - \left(\frac{r_1 + R_1}{\omega L_1} \right) \left(\frac{r_1 + R_1 + 2r_2}{\omega l} \right) > 0 \quad \dots\dots (20)$$

(18)式、(20)式を満足する自励角速度 ω_s は共振角速度 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C}$ より明らかに大である。特に外部抵抗を挿入した場合にその差が大きくなる。固定子回路に外部抵抗を挿入した場合は、端子電圧があまり高くないため、 L_1 が比較的小さく、(20)式を満足する自励回転数は高くなる。

(18)式を ωL_1 について整理すると

$$(\omega L_1)^2 - \left\{ \frac{1}{\omega C} + \frac{r_1(r_1 + r_2)}{\omega C - \omega l} \right\} \omega L_1 - \frac{r_1 r_2}{\omega C \left(\frac{1}{\omega C} - \omega l \right)} > 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

したがって

$$\omega L_1 > \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\omega C} + \frac{r_1(r_1 + r_2)}{\omega C - \omega l} \right\} + \sqrt{\left\{ \frac{1}{\omega C} + \frac{r_1(r_1 + r_2)}{\omega C - \omega l} \right\}^2 + \frac{4r_1 r_2}{\omega C (1/\omega C - \omega l)}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

(22)式において、一般に $1/\omega C$ に対して他の量は小さいので、適当に省略すれば (22)式は (23)式ようになる。

$$\omega L_1 > \frac{1}{\omega C} + \frac{r_1(r_1 + 2r_2)}{\omega C - \omega l} \quad \dots\dots\dots (23)$$

(20)式より同様に、(24)式が得られる。

$$\omega L_1 > \frac{1}{\omega C} + \frac{(r_1 + R_1)(r_1 + R_1 + 2r_2)}{\omega C - \omega l} \quad \dots\dots\dots (24)$$

(18)式を C について整理すると、

$$C^2 (\omega^4 L_1^2 l + \omega^2 L_1 r_1^2 + \omega^4 L_1 r_1 r_2) - C (\omega^2 L_1 - r_1 r_2 + \omega^2 L_1 l) + L_1 < 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

となり、(25)式を解くと、

$$\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} < C < \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \dots\dots (26)$$

となる。ただし

$$a = \omega^4 L_1^2 l + \omega^2 L_1 r_1^2 + \omega^4 L_1 r_1 r_2$$

$$b = -(\omega^2 L_1 - r_1 r_2 + \omega^2 L_1 l)$$

$$c = L_1$$

(26)式は、外部抵抗を挿入しない場合に誘導機が自己励磁現象を発生するコンデンサ容量を表している。

3. 実 験

3.1 実験機の定格および定数

本論文で、コンデンサによる誘導発電機の自励現象発生の有無を検討するために供した実験機は、極数のことなる2台の三相かご形誘導発電機であり、それらの定格を表1に示す。

また、表2はそれら実験機の定数値である。なお、定数の決定は通常の直流電圧降下法による巻線抵抗測定、無負荷試験、拘束試験によって行った。

表1 実験機の定格

項 目	定 格 値	
相 数	3	3
極 数	4	6
周波数	60Hz	60Hz
定格電圧	220V	220V
定格電流	8.6A	9.8A
定格容量	2.2kVA	2.2kVA
定格回転数	1880min ⁻¹	1260min ⁻¹

表2 実験機の定数値

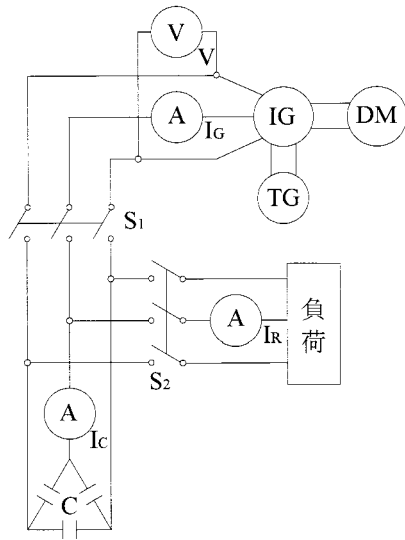
項 目	4 極機	6 極機
1次巻線抵抗： r_1	0.69 Ω	0.61 Ω
1相の等価全インピーダンス	2.98 Ω	3.12 Ω
1相の等価全抵抗	1.41 Ω	1.44 Ω
2次巻線の等価抵抗： r_2	0.72 Ω	0.82 Ω
1相の等価全リアクタンス	2.63 Ω	2.77 Ω
全漏れインダクタンス： l	3.49mH	3.67mH
全インダクタンス： L_1	104.27mH	69.25mH

3.2 実験装置および実験方法

図1に実験回路を示す。誘導発電機IGの回転軸には、それを駆動するための直流電動機DMと、回転数を測定するためのタコメータTGとが直結されている。

実験は、次の方法によった。まず、誘導発電機の端子から負荷を切り離し、端子に三相進相コンデンサのみを接続した状態で、電動機によって発電機の回転数を低速から徐々に上昇させながら端子電圧を電圧計で測定した。次に、三相進相コンデンサと並列に三相抵抗負荷を接続した状態で、上述と同様の操作を行った。更に、三相進相コンデンサと並列に単相抵抗負荷を接続した状態で、上述と同様の操作を行った。

なお、上記の実験に用いた5個の三相進相コンデンサの静電容量は20μF、50μF、100μF、150μF、250μFでこれらのコンデンサを並列に接続して容量を色々に変えた。



IG : 三相かご形誘導発電機
 DM : 直流電動機 TG : タコメータ
 V : 交流電圧計 A : 交流電流計
 S₁, S₂ : スイッチ C : コンデンサ

図1 実験回路

3.3 実験結果

3.3.1 自励現象の発生領域の理論値と実測値の比較

図2および図3は、4極の誘導発電機（4極機）および6極の誘導発電機（6極機）において、発電機にコンデンサのみを接続した無負荷状態の自励現象の発生領域を、(26)式に表2の定数値を代入して計算した理論値と実測値の比較である。

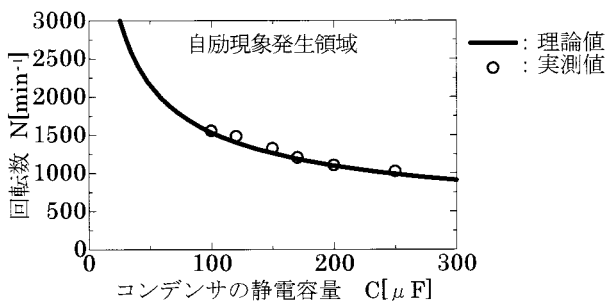


図2 4極機の自励現象発生領域の理論値と実測値の比較

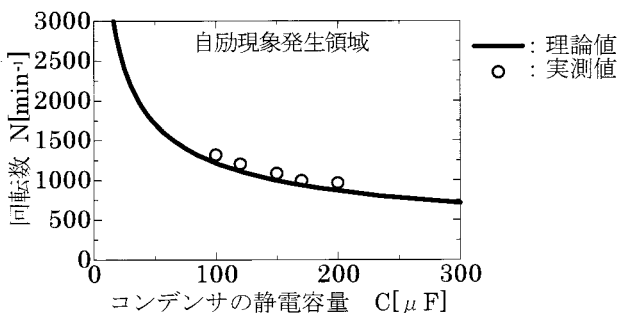


図3 6極機の自励現象発生領域の理論値と実測値の比較

これらの図から明らかなように、自励現象の発生領域の理論値と実測値は比較的良く一致している。したがって、(26)式は、一般に三相進相コンデンサによる三相誘導発電機の自励現象の発生を検討する際のシミュレーションに有用であると言える。

3.3.2 無負荷時の自励現象の発生

図4および図5は、4極機および6極機の無負荷時における自励現象発生の観測結果である。

これらの図から、発電機に接続されるコンデンサの静電容量が大きいほど、発電機は低速度で自励現象を発生して電圧が急上昇し、その後は電圧が速度にほぼ比例して上昇することがわかる。また、静電容量が大きいと、発電機は、定格速度は勿論のこと同期速度（4極機は1800min⁻¹、6極機は1200min⁻¹）以下の速度でも自励現象を発生することがわかる。

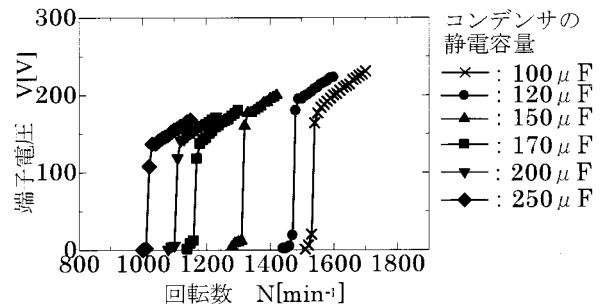


図4 4極機の無負荷における自励現象の発生

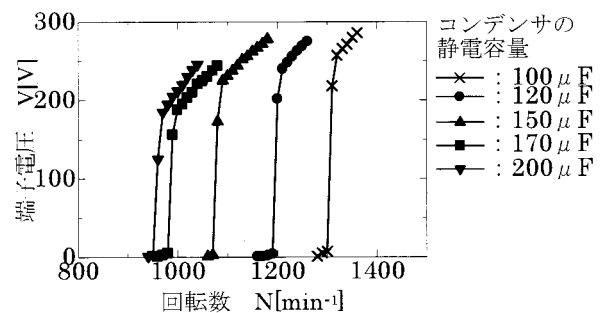


図5 6極機の無負荷における自励現象の発生

3.3.3 三相平衡負荷時の自励現象の発生

一般に、誘導機および同期機を問わず、コンデンサが接続されている発電機に抵抗負荷または遅れ力率の負荷が掛ると、コンデンサによる増磁作用が小さくなり、自励現象は起こり難くなることが知られている。また、2章の理論で述べたように、発電機の固定子巻線に外部抵抗が直列に挿入されている場合は、自励現象発生の回転数が高くなる。

このたびの三相平衡負荷時の実験は、発電機の端子に抵抗負荷をコンデンサと並列に接続して行った。この場合の抵抗負荷の作用は、固定子巻線には有効電流も流れるため、

固定子巻線と直列に外部抵抗を挿入した場合の作用と等価的に同じであるとみなすことができる。

図6および図7は、4極機および6極機において、それぞれ1相当りの抵抗値が100Ωの三相平衡の抵抗負荷を掛けて実験したときの自励現象発生の結果である。これらの図から明らかなように、無負荷時に自励現象が発生した回転数の1.3倍程度まで回転数を上げて、何れのコンデンサ容量においても自励現象は発生しなかった。これは、上述の理由を裏付ける結果になっている。

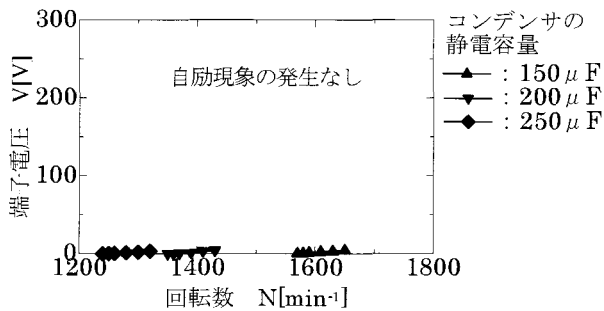


図6 4極機の三相平衡抵抗負荷における自励現象の発生

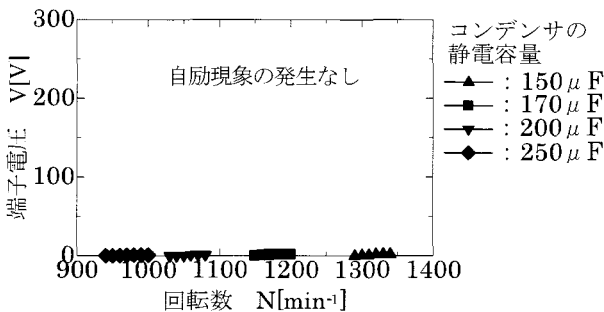


図7 6極機の三相平衡抵抗負荷における自励現象の発生

3.3.4 三相不平衡負荷時の自励現象の発生

図8および図9は、4極機および6極機において、それぞれ一つの端子間に抵抗値が100Ωの三相不平衡の抵抗負荷をかけて実験したときの自励現象発生の結果である。

これらの図から明らかなように、三相平衡負荷時には発生しなかった自励現象が、三相不平衡負荷時には何れのコンデンサ容量のときにも発生している。これは、三相不平衡電流が作る逆相分磁界によって回転子に電流が誘導され、それが作る磁界によって固定子巻線に新たな起電力が誘導し、コンデンサに電流が流れて、コンデンサによる増磁作用が増幅されるものと考えられる。

この実験結果から、前述した事故の原因は以下のように推測できる。

事故は、水力発電所の誘導発電機と連系している母線を遮断したときに起きている。常時は、配電線に三相不平衡負荷が掛っていても逆相分電流を母線が吸収し、誘導発電

機の端子電圧はほぼ三相平衡に保たれ、力率改善用のコンデンサに起因する自励現象は発生しない。しかし、母線との連系が切れると、発電機には三相不平衡負荷が直接掛り、上述した理由によって自励現象が発生し、過電圧が電化製品に加わったものと推測される。

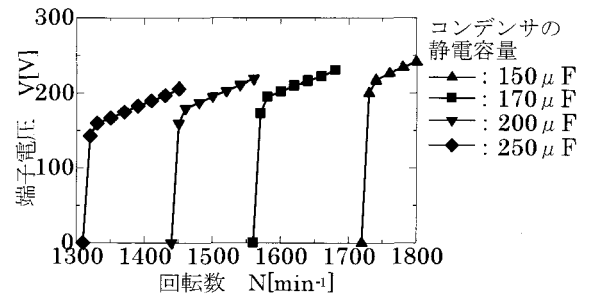


図8 4極機の三相不平衡抵抗負荷における自励現象の発生

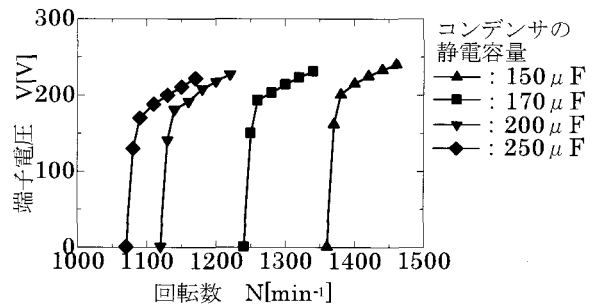


図9 6極機の三相不平衡抵抗負荷における自励現象の発生

4. あとがき

本論文では、コンデンサが接続された三相かご形誘導発電機の自己励磁現象の発生を実験機において理論的および実験的に考察した。得られた結果を要約すると次のようである。

- (1) 導出した自励現象の発生領域の理論式による計算値は実測値と良く一致することから、その理論式は誘導発電機における自励現象発生の有無を検討する際のシミュレーションに適用できる。
 - (2) 自励現象は負荷の三相不平衡の度合いが大きくなるほど発生しやすくなるということが、実験的に明らかにされた。したがって、一般に発電機に三相不平衡の負荷が掛る配電はさけることが重要である。
- 今後の課題は、異常上昇の電圧値を求める計算式を導出することにある。

参考文献

- (1) 足立良夫：「誘導機のコンデンサ自励現象」, 電気学会雑誌, Vol.80, No.864, 1236-1243 (1960)