サイリスタインバータ方式軸発電機 システムの調相機特性の選択について*

岡本孝治**・奥田 実***
新垣秀雄****

Selection of the synchronous condenser characteristics in the
Thyristor-Inverter Type Shaft Generator System

By Takaharu Okamoto, Minoru Okuda, Hideo Arakaki

Because of the importance of the synchronous-condenser (S.C) in the Thyristor-inverter Type Shaft Generator System, the characteristics of this system are examined from the view point of its effects. An expression of S.C is derived from experiments and its accuracy is verified. The results of experiments on the model of the system are

1. With no Automatic-Frequency-Control equipment, it has two conditions, stable and astable, depending on the state of S.C.
2. Both capacity and power factor characteristics of S.C have to be considered when the system is analyzed and designed.

1. ま え が き

船舶における発電システムの内、軸発電機システムは船舶の省エネルギー運航にすぐれている。その中でサイリスタインバータ方式のものでは他励式インバータの動作に必要な無効電力を供給する同期調相機（以下、調相機という）の特性が重要になる。また軸発電機システムを構成する際、調相機として既設の同期発電機を使用する場合にはその同期発電機の特性からシステムが安定に動作するかどうかを検討する必要がある。

本報告の目的は主にサイリスタインバータ方式軸発電機システムにおいて母線負荷の急激な変化がない場合に調相機がシステムにどのような影響を与えるか検討する。したがって母線負荷の変動に対する過渡的な安定性等については言及しない。また、調相機（無負荷で運転される同期電動機）の界磁電流の変化分と電機子電流の無効成分の変化分がほぼ比例関係にあるということを実験で確かめ、その結果から計算で求めた調相機の定常特性が実測値によく一致することを確めた。

2. 実験および実験結果

2.1 実験装置 図1に実験装置接続図を示す。軸発電機、調相機には定格容量2[kVA]、定格電圧200[V]、回転数1800[rpm]の三相同期発電機を使用した。軸発電機を駆動するため船の推進軸の代わりに直流電動機を使用している。インバータは他励式でありインバータが動作する以前に母線電圧は確立しておかなければならない。そのため補助発電機が必要となる。また、各回転機はスライダックを介して母線に接続してあるが、これにより母線電圧を適当に調節できると同時に母線から見た等価的な調相機容量を変化させることができる。実際のシステムでは軸発電機に自動周波数調整装置を付け母線周波数を一定に保つのであるが本実験では付けていない。調相機に付いている自動電圧調整器(AVR)は母線電圧を一定に保つためのものである。母線負荷は純抵抗負荷を用いている。

2.2 調相機特性試験 まず調相機の特性を知らなくてはならない。その定常特性はほぼV曲線により求まる。そのV曲線を測定するには以下のようにすればよい。

- (1) 図1の実験装置においてスイッチSw1を開放してインバータを母線から切り離す。
 - (2) 補助発電機で調相機を運転する。
 - (3) 回転数を一定に保ちながら補助発電機の界磁電流を変え、調相機の状態を記録する。
- つまり、補助発電機の界磁電流を変えると補助発電機の

* 原稿受付 昭和62年1月5日

昭和61年秋季学術講演(昭和61年10月30日)

** 正会員 (神戸市須磨区白川台2-39-1)

*** 正会員 (徳島県中島郡中島町東芝町1)

**** 正会員 琉球大学工学部(沖縄県中頭郡西原町字千原1)

図1 実験装置接続図

図2 調相機の端子電圧を変えて測定したV曲線

端子電圧は変化しようとするが自動電圧調整器の働きで調相機の界磁電流が調整され調相機の電機子電流が変わり母線電圧を一定に保つ。その時の調相機の界磁電流、電機子電流の値をプロットしていけばV曲線となる。この様にすると実験システムの接続がそのまま調相機特性が測定できるので便利である。この実験による測定結果を図2～6に示す。図2(a), (b), (c)には調相機の端子電圧を変えて測定したV曲線を示す。同図には調相機のスライダックの母線側の電流もプロットしている。数値は同時に測定した電流の力率を表している。スライダックの母線側と調相機側でV曲線の位置がずれるのはスライダック内部での電力消費のためである。図3は端子電圧の変化によるV曲線の変化を示している。図4は調相機の力率の変化、図5は消費電力、図6は電機子電流

の無効成分の変化を示している。

2.3 調相機特性の計算 図6より界磁電流と電機子電流の無効成分が比例することがわかるがこのことは次のベクトル図により確認できる。図7は端子電圧 V を一定にして界磁電流を変えたときの調相機の各ベクトルの変化の様子である。界磁電流 I_f の増加に従って電圧ベクトルのつくる三角形は $oab \rightarrow oab' \rightarrow oab''$ と変化する。同期インピーダンスを一定とみなすと aa' , aa'' が電機子電流の無効成分 $I_a \sin \phi$ に比例して変化する。また E_o は界磁電流にはほぼ比例しているとみてよい。一方、幾何学的には $ob' \rightarrow ob''$ のように E_o が増加するのにはほぼ比例して $aa' \rightarrow aa''$ と変換することがわかるから界磁電流と電機子電流の無効成分はほぼ比例することになる。

(c) 調相機端子電圧 220 [V]

図2 調相機の端子電圧を変えて測定したV曲線

図4 調相機力率の変化

図3 調相機端子電圧によるV曲線の変化

図5 消費電力の変化

図6 調相機電機子電流の無効成分の変化

E_o : 電機子逆起電力 δ : 負荷角
 V : 端子電圧 $\cos \phi$: 力率
 I_a : 電機子電流 I_f : 界磁電流
 Z_s : 同期インピーダンス

図7 調相機の電圧、電流ベクトル図

よって次式が得られる。

$$I_a \sin \phi = s I_f + t \quad (1)$$

s は図6のグラフにおける傾きであり実測により求める。 t は電機子電流の力率が1となるときにの界磁電流値に対応しており電機子内部誘起電圧特性から求まるが端子電圧に比例していると近似できる。次に、調相機の回転に必要な機械的パワーを P_m 、1相当りの電機子内部抵抗を R_a とすると次式が成り立つ。 P_m は実測により求めなければならない。

$$\sqrt{3} V I_a \cos \phi = P_m + 3 R_a I_a^2 \quad (2)$$

(1)、(2)式で調相機の定常特性はだいたい表わすことができる。端子電圧200[V]のときの測定結果から各定数を求めると、

$$s = 13$$

$$t = -5.43 \text{ [A]}$$

$$P_m = 150 \text{ [W]}$$

$$R_a = 2.3 \text{ [}\Omega\text{]}$$

となりこれをもとに図3～5の特性を計算で求めた結果を図8～10に示す。実測値とよく一致していると思われる。また母線負荷が純抵抗負荷の場合次のことがいえる。

- (1) 調相機の出力する無効電力はすべてインバータに供給される。
 - (2) インバータの出力する有効電力の内、調相機の回転を保つのに必要な分と自動電圧調整器の消費分を除いたものが母線負荷に供給できる電力である。
- このことより、調相機の特性が決まってしまうと母線に加えることのできる負荷が決まってしまうことになる。そこで、インバータの制御角を一定として、母線負荷に供給されなければならない有効電力と調相機の界磁電流

図8 調相機V曲線の計算結果

図9 調相機力率の計算結果

図10 調相機の消費する有効電力の計算結果

図11 調相機の特性より計算した、母線に加えることが可能な負荷の変化

の関係を計算で求めると図11のようになる。インバータの制御角が変わればこの曲線も変化する。この曲線から見る限り母線負荷は広範囲に加えることができるといえる。

2.4 軸発電機システムの運転 つぎのような実験を行う。

- (1) インバータを母線に接続する。インバータが動作した後補助発電機を切り離す。
- (2) システムにショックを与えないよう母線負荷を徐々に増加する。
- (3) 母線周波数が一定になるように軸発電機の界磁電流又は軸発電機側のスライダックを調節する。

実験を行った結果、母線電圧が140〔V〕以上ではシステムの運転が不可能であった。そこで母線電圧100〔V〕程度で実験を行った。その時の調相機の状態を図12に示

図12 軸発電機システム運転時の調相機電機子電流

図13 システム運転時の電流ベクトル

す。同図の破線は2.2で測定した調相機のV曲線の進み力率の部分である。母線負荷ゼロのとき調相機電機子電流は1.3〔A〕程度であり母線負荷の増加に伴い電機子電流は増加する。この時の母線における電流の変化をベクトルで表すと図13のようになる。調相機の電機子電流が2.0〔A〕を超えるあたりからシステムがかなり不安定になり2.5〔A〕を超える範囲でシステムを運転することは不可能であった。図4、5において斜線を引いた部分がこの不安定な領域に相当する。

3. 検討とまとめ

実験結果よりわかることは、補助発電機を切り離した後のシステムでは動作が安定している領域と安定しない

領域があるということである。まず、2.2項での測定結果から次のことがわかる。

- (1) 電機子電流が2〔A〕を超えたところでは界磁電流に対する力率の変化が緩やかである。
- (2) 回転数一定の調相機の機械的負荷は一定であるから調相機の消費する有効電力の変化はほとんどが電機子電流の2乗に比例して変化する電機子内部抵抗損失によるものでありまた電機子電流が2〔A〕を超えたところでは消費する有効電力の内電機子内部抵抗によるものも比較的大きな割合を占めるようになる。
- (3) 図11より母線負荷は比較的広範囲にとれることが予想される。

そしてこれらのことより次のように言える。

- (4) 上記(1)からシステムの運転が安定な領域と不安定な領域を判定する一つの目安として調相機の力率特性があげられる。即ち、界磁電流に対する力率の変化が緩やかな領域では動作が不安定である。
- (5) 上記(2)から調相機の電機子電流が増加するほど電機子電流に対する消費有効電力の変化が大きくなるといえる。よって電機子電流の大きな領域ほどその変化がシステムに及ぼす影響が大きい。また本実験のように、容量が小さく電機子巻線の細い機械を用いたシステムほどそのような影響を受けやすいといえる。
- (6) 上記(3)から判断すると調相機の容量がそれほど不足しているとは言えない。故に、システムの運転が不安定な領域では的確な制御を行えば運転が可能になると思われる。このことにより、システムの運転に十分な進相容量を調相機が持つかどうかを進相容量の大きさと力率特性の両方から決定するとよいと思われる。
- (7) この報告では、システムの特性を調相機の特性のみから考察しているが、やはりさらに解析を進めるにはインバータ、軸発電機をふくめた過渡特性も考慮すべきであろう。

おわりに、本研究に協力していただいた伊波技官、嘉数、川畑、茂太、当間、森川学生に厚く感謝します。

文 献

- 1) 岡本他、サイリスタインバータ方式軸発電機のシミュレーション 神戸商船大学紀要第二類商船理工学篇第31号
- 2) 武田 パワーエレクトロニクスその船用機器への応用—機関長コース(昭和57年)

〔質 疑 応 答〕

質問者 神戸商船大学 武田 幸男

〔質問〕 スライダックで母線電圧を低下させるとインバータ出力が安定するとの事ですが、この場合は変圧比の自乗に反比例して、同期調相機の等価キャパシタンスが増加していると思われます。その場合の調相機の容量はどの様に変化しているのか、ご教示下さい。

〔回答〕 本文中の図2(b)の場合について検討してみますと下記の表のようになります。母線からみた調相機の等価キャパシタンスを実測値から求めたものと、計算により求めたものがほぼ一致しているのでご指摘のとおり等価キャパシタンスは変圧比の二乗に比例して増加しているといえます。そして調相機に流入する進相有効電力進相無効電力はスライダック二次側(母線側)電圧が90～110〔V〕の範囲ではほぼ一定です。ただし、スライダック一次側(調相機側)では無効率が大きいので進相無効電力は増加しています。

$$1 \text{ 相当り等価キャパシタンス} = \frac{I^2}{W_r} \cdot \frac{1}{\omega} \quad (\text{実測})$$

W_r : 進相無効電力

I : 電流

1相当りの等価キャパシタンス(計算値)

$$= 22.22 \times \left(\frac{200}{\text{スライダック2次側電圧}} \right)^2$$

表1 調相機のAVR設定値200〔V〕、界磁電流0.54〔A〕のときの諸量

電 圧 〔 V 〕		電 流 〔 A 〕	1 相当りの 等価キャパシタンス		力 率	調相機に流 れ込む進相 有効電力 〔 W 〕	無 効 率 0	調相機に流 れ込む進相 無 効 電力 〔 var 〕
			実 測 値 〔 μ F 〕	計 算 値 〔 μ F 〕				
スライダック	90	2. 99	118. 35	109. 7	0. 667	304	0. 745	347. 23
2 次 側	100	2. 79	92. 324	88. 87	0. 597	280	0. 802	387. 55
(母 線)	110	2. 42	79. 64	73. 44	0. 68	305	0. 733	338. 0
スライダック								
1 次 側	200	1. 6	22. 22		0. 3	170	0. 954	528. 7
(調 相 機)								