同期機の並列故障時の特性*

神原 英一**・四方谷 進***

Characteristics in Synchronous Generator Trouble During Parallel Running

By Eiichi Kanbara, Susumu Yomoya

The quantitative and qualitative analysis was performed to find how much cross current (called "load unbalance cross current") was running in accordance with the unbalance rate of load share when two synchronous generators were in parallel running, how much bus voltage fluctuation and increasing rate of cross current (as troubled cross current) were caused if one generator offered defects in any modes to make external voltage abnormal.

As an example to apply the trouble characteristics in parallel running, the automatic parallel-releasing device for troubled generator is referred to protect the blackout of power source by finding out the troubled generator to be released out of the parallel. The device is recognized to operate satisfactorily when mounted on actual ship.

1. ま え が き

本文中にて条件づけたような理想的なAVR及び横流補償特性を有した2台の交流発電機が並列運転している場合、負荷分担のアンバランス率に応じてどれ程の横流(負荷アンバランス横流と呼ぶ)が流れているか、そして、1台の発電機に、外部電圧に異常をきたすような各種モードの故障を生じた場合、母線電圧は、どれ程変動し、横流は、どれ程増加(故障横流分)するかについて、定性的且つ、定量的な解析を行った。

外部電圧に異常をきたすような故障時における外部電圧特性は一般に次の3通りに分類される。

a：外部電圧の変調モード(1) 設定電圧レベルは異常(健全時レベルより上昇又は下降)となるが、単独の外部電圧特性としては正常な傾き($\tan \theta$)が、図1のごとくそのまま保たれているような故障。例えば、電圧設定抵抗器VRのセット値をずらしただけに相当する外部電圧の得られるような故障で、従って、横流補償装置は正常に働いている場合である。但し、この場合でも、並列故障後の外部電圧特性は必ずしも正常な傾きが保たれるわけではない。

b：外部電圧の変調モード(2) 外部電圧特性が異常となり、且つ、電圧の異常上昇をきたすような故障。

図 1

例えば、AVRの故障などにより、励磁の異常増大を生じ、従って、横流補償装置作用も働かなくなる場合に該当する。

c：外部電圧の変調モード(3) 外部電圧特性が異常となり、且つ、電圧の異常下降をきたすような故障。例えば、界磁巻線回路の断線などにより、励磁の異常減少を生じ、従って、横流補償装置作用も働かなくなる場合に相当する。

また、外部電圧特性としては、現状ほとんどのものがそのいずれかであることより、次の2通りに分類される。

(1) 外部電圧特性(イ) 外部電圧特性の垂下及び上昇が、無効電流分(負荷無効分+横流無効分)によって計画通り生じているもの(DCTなし横流補償装置を採用の場合)。

* 原稿受付 昭和56年7月24日

** 正会員 大洋電機(株)(岐阜県羽島郡笠松町如月町18)

*** 大洋電機(株)(岐阜県羽島郡笠松町如月町18)

(2) 外部電圧特性(ロ) 外部電圧特性の垂下及び上昇が、横流分のみによって計画値通り生じているもの(DCT付横流補償装置¹⁾)を採用の場合。なお、この場合、母線電圧の変動は負荷無効分によって生じないことはもちろんのこと、負荷アンバランスによっても生じない。

本文で使用する電流の記号は、図2に示す通りであるが、その他の主な記号の意味を次に示す。

V_0 : 発電機定格電圧, I_0 : 発電機定格電流

$\cos \phi$: 負荷力率, $\tan \theta$: 横流補償率

SCR : 短絡比, e_x : リアクタンスドロップ

解析は、次の条件の下に行う。

(1) 故障機はNo.1側とする。

(2) 電流精度のよいAVRを使用しており、その外部特性は、横流補償装置作用の働いていない時は、完全にフラットであり、又、働いている時は、その横流補償率に応じた傾きをもった完全な直線特性とする(図1参照)。

(3) 電圧設定器VRによる電圧の設定値は、単独運転時 V_0 となるようセットされている。

図 2

No.1側	No.2側	
I_1	I_2	… 出力電流
I_1'	I_2'	… 負荷電流分
I_1''	I_2''	… 横流分
I_{11}''	I_{21}''	… 負荷アンバランス横流分
I_{12}''	I_{22}''	… 故障横流分

2. 故障時の母線電圧と横流の解析

並列運転中の2台の発電機の内、1台が故障した場合の母線電圧と横流の関係は、ほぼ、図3のような故障時特性曲線のごとくなる。すなわち、今、P点で並列運転中1台の設定電圧を変調モード(1)によりどんどん下げていった場合、母線電圧は曲線PAに沿って下降し、ついにA点で整定する。又、変調モード(3)の場合もA点で整定する。一方、1台の設定電圧を変調モード(1)によりどんどん上げていった場合には、母線電圧は曲線PBに沿って上昇し、B点に至る。その後、更に設定電圧を上げた場合は、曲線BC又はBD又はBEに沿って電圧は上昇し故障機の励磁能力によって決まる点、C、D、Eで

図3 故障時特性曲線

整定することになる。変調モード(2)の場合もC、D、E点となる。なお、曲線BC、BD、BEの差は励磁方式によって異なってくるもので、次のごとくである。

- a) BC……二重巻線差動励磁方式(ブラシレス)
- b) BD……複巻分流励磁方式
- c) BE……単一巻線励磁方式

図4に各々の概略結線図を示す。

以下にA-B間及びA、B、C、D各点の算出方法について記述する。

図4 各種励磁方式

2.1 A-B間特性 AB間における母線電圧と横流の関係につき、まず作図にて検討し、次いで数式にまとめてみることにする。なお、ここでいう母線電圧変動量(ΔE_2)とは、次のことを意味する。

ΔE_2 = 故障後母線電圧(E_2)

—故障前の母線電圧(E_1)

外部電圧特性(イ)の場合にあっては、VR設定は一定であっても並列時母線電圧は負荷状態(相手機との負荷アンバランス率も含む)によって変化し一定しないが、外部電圧特性(ロ)の場合の母線電圧は、VRによる設定電圧値と等しい。次に作図上での条件は次の様である。

(1) 故障前後における状態は表1の通り

(2) 運転状態のa及びbは、No.1及びNo.2機の単独運転時状態である。

表 1

		故 障 前		→		故 障 後	
		No. 1 機		No. 2 機			
運 転 状 態		$a' \longrightarrow a''$				$b' \longrightarrow b''$	
電 流	横 流 分	$I_{11}'' \longrightarrow I_{11}'' + I_{12}''$				$I_{21}'' \longrightarrow I_{21}'' + I_{22}''$	
	無効電流分	$I_1' \sin \phi^* + I_{11}'' \longrightarrow I_1' \sin \phi + I_{11}'' + I_{12}''$				$I_2' \sin \phi^* + I_{21}'' \longrightarrow I_2' \sin \phi + I_{21}'' + I_{22}''$	
母 線 電 圧		$E_1 \longrightarrow E_2 (= E_1 + \Delta E_2)$					

* 故障前のNo. 1 及びNo. 2 機の負荷電流分を I_1' 及び I_2' とする。

(3) $\overline{I_{11}''} = \overline{I_{21}''}$, $\overline{I_{12}''} = \overline{I_{22}''}$ となるよう作図する。

2.1.1 外部電圧特性(イ)と外部電圧変調モード(1)の組合せの場合 図5は題記で且つNo. 1 機上昇の場合における ΔE_2 と横流量の関係を作図によって求めたものである。

2.1.2 外部電圧特性(ロ)と外部電圧変調モード(1)の組合せの場合 図6に示す。

2.1.3 外部電圧特性(ロ)と外部電圧変調モード(2)の組合せの場合 図7に示す。

図 5

図 6

$$\ast \Delta E_1 = -\frac{I_1' - I_2'}{2} \sin \phi \times \tan \theta$$

図 7

の組合せの場合 図7に示す。

2.1.4 総合結果 以上3通りのケースについて検討したが、その他のケースも含め、その結果を数式にまとめると、いずれのケースも次のような一定の関係式で表示することができる。

$$I_{11}'' = I_{11}'' + I_{12}'' \\ = -\frac{I_1' - I_2'}{2} \sin \phi + \Delta E_2 \times \frac{1}{\tan \theta} \quad (1)$$

$$I_{22}'' = I_{21}'' + I_{22}'' \\ = -\frac{I_2' - I_1'}{2} \sin \phi - \Delta E_2 \times \frac{1}{\tan \theta} \quad (2)$$

以上の式は、外部電圧特性(イ)、(ロ)共に同一になるが、故障後、母線電圧 E_2 の定格電圧 V_0 からの変動量 $(V_0 - E_2)$ については、両者は次式のごとく異なる。

外部電圧特性(イ)：

$$V_0 - E_2 = (V_0 - E_1) - \Delta E_2 \\ = \frac{V_0 (I_2' \sin \phi + I_{21}'')}{I_0} \tan \theta - \Delta E_2$$

外部電圧特性(ロ)：

$$V_0 - E_2 = -\Delta E_2$$

又、健全機の電流 I_2 は次式となる。

$$I_2 = \sqrt{(I_2' \cos \phi)^2 + \left(\frac{I_2' + I_1'}{2} \sin \phi - \Delta E_2 \times \frac{1}{\tan \theta} \right)^2} \quad (3)$$

但し、各値の正(負)は次のことを意味する。

ΔE ：上昇(下降)

I_{11}'', I_{12}'' ：No. 1 機より見て遅れ(進み)

I_{21}'', I_{22}'' : No.2 機より見て遅れ(進み)

2.2 A 点の求め方 A 点は変調モード(3)により, No.1 機の界磁が無励磁になった場合に相当する. 今, No.1 機が無励磁になると, その出力電圧は零になる. (残留電圧は無視する)すると, 電圧差により, No.2 機より No.1 機へ横流が流れるが, この横流は発電機の同期インピーダンスを負荷とするので, No.2 機にとってはほとんど 90° の遅れ, No.1 機にとっては, ほとんど 90° の進み電流となる.

2.2.1 無負荷時 無負荷時において, この状態を No.2 機について考えてみると, No.2 機の励磁回路は健全なので, その電圧電流特性は, 図 8 のごとく AVR の横流補償率で決まる特性となる. 一方, No.1 機については横流=進み電機子電流が流れることにより, 増磁作用を受けて, 図 9 のごとく進み電流による飽和曲線に沿って電圧が上昇する. ここで, No.1 機が故障した後の整定状態について考えてみると, 両機には同一の横流が流れて両機の端子電圧を等しくしているはずである. 従って, 図 8 と図 9 を同一スケールで, 図 10 のごとく描いた時, m, n 両曲線の交点 A (I_c, V_c) が整定値である. 以上は作図により詳細に数値を求める方法であるが, m 曲線を直線として近似することにより, 概略値, I_c, V_c は次式で求めることができる. 図 10 において, 電圧を y 軸, 横流を x 軸とすると m の近似式は

$$y_m = \frac{1}{I_0}(e_x + V_0/SCR)x \quad (4)$$

n の式は

図 8 No.2 機の特 性

図 9 No.1 機の特 性

図 10 A 点の求め方

$$y_n = V_0 \left(1 - \frac{1}{I_0} \tan \theta \cdot x\right) \quad (5)$$

となる. この両曲線の交点を I_c, V_c として求めると次式が得られる.

$$I_c = \frac{I_0}{\frac{e_x}{V_0} + \frac{1}{SCR} + \tan \theta} \quad (6)$$

$$V_c = V_0 \left(1 - \frac{I_c}{I_0} \cdot \tan \theta\right) \quad (7)$$

従って, この A 点は発電機の短絡比, 横流補償率などによって変化し, 短絡比が大きい程, 故障横流は大きく整定電圧は低くなる.

2.2.2 負荷時 負荷時において, 負荷アンバランスによる横流 (I_{11}'') を考慮に入れた No.1 機のベクトル図は, 図 11 のごとくなる. 周知の通り, このベクトル図と, 励磁量のベクトル図は相似形になるので誘起電圧 V_0 (端子電圧 $= V_0 + e_x \times \frac{I_{12}''}{I_0}$) を維持し, 負荷電圧 I_1' , 負荷アンバランス横流 I_{11}'' を流すに要する励磁量に相当する進み電流(故障横流) I_{12}'' を求めるベクトル図は, 図 12 のごとく表わすことができ, I_{12}'' は, 次式で求められる.

図 11 発電機ベクトル図

図 12

$$I_{12}'' = \sqrt{(I_0 \times SCR + I_{11}''^2 + I_1'^2 - 2(I_0 \times SCR + I_{11}'') \times I_1' \cos(\frac{\pi}{2} + \phi))} \quad (8)$$

一方、負荷電流は電圧に比例するものと考え、電圧と進み横流の関係は、ほぼ直線となり、図 13 のごとく表わすことができる。但し、

$$\tan \alpha = \frac{V_0 + e_x \times \frac{I_{12}''}{I_0}}{I_{12}''} \quad (9)$$

外部電圧特性(口)の場合は、No.1 機は、図 14 に示した通り、進み横流により、曲線 m から電圧が上昇する。一方、No.2 機については、故障横流が流れていな

図 13

図 14

い時は、定格電圧 V_0 であり、遅れ力率の故障横流が流れると、横流補償率に従って、電圧は直線 n のごとく垂下する。そして、故障後、両機は m と n の交点 A で整定することになる。点 A の横流を I_c 、電圧を V_c とし、これを数式で求める場合は、以下のようになる。

直線 n の式は

$$y_n = V_0 (1 - \frac{1}{I_0} \tan \theta \times x) \quad (5)$$

m の式は

$$y_m = \frac{1}{I_0} (e_x + \frac{V_0}{I_{12}''/I_0}) x \quad (10)$$

以上から

$$I_c = \frac{I}{\frac{e_x}{V_0} + \frac{I_0}{I_{12}''} + \tan \theta} \quad (11)$$

$$V_c = V_0 (1 - \frac{I_c}{I_0} \tan \theta) \quad (12)$$

2.3 B 点の求め方 今、変調モード(1)により、No.1 機の励磁を強めると、No.1 機の電圧が上昇するので、その電圧差により、No.1 機から No.2 機へ横流が流れる。この状態を No.2 機についてみると、No.2 機の励磁回路は健全なので、AVR は横流補償率で決まる電圧を維持するように働く。一方、前述のごとく、No.2 機には進みの電機子電流が流れるので、その増磁作用により電圧は上昇し、この両者の特性は、図 15 のごとくなる。すなわち、 I_c' なる横流が流れると、その増磁作用により電圧は V_c' まで上昇するが、この値は横流補償率によって決まる横流と電圧の関係に一致しているので、この点では、励磁量は零でよいことになる。この点が B 点であって、更にこれ以上横流が流れる場合は、 PB 間の特性とは異なり電圧は急上昇することになる。従って、この m' 、 n' 曲線の交点を B 点として求めればよい。なお、この B 点は、No.1 機の過励磁量が $I_{12}'' = I_c'$ なる横流を流しても、 V_c' 以上の電圧を維持していると仮定した場合である。すなわち、No.1 機は過励磁されて、横流が

図 15 No.2 機の特

流れない時は V_T なる電圧であるが、横流=零力率遅れ電流が流れることにより、図16のごとく電圧は下降する。ここで、 $I_{12}'' (=I_c')$ なる横流を流した時の電圧を V_{12}'' とすると、 $V_c' < V_{12}''$ の時、B点は m' と n' 曲線の交点。 $V_c' > V_{12}''$ の時、B点は l と n' 曲線の交点となる。以上は、作図により、B点 (I_c' , V_c') を求める方法であるが、この概略値を数式により求めることができる。なお、 m' 曲線を電圧が $(V_0 + e_x \cdot SCR)$ 以上では、 $1/(1+\sigma)$ なる傾きをもった直線と仮定する(但し、 $1+\sigma$: 飽和率)。

又、通常は、 $V_c' \leq V_{12}''$ なので、この場合について求めるものとする。

図 16 No. 1 機特性

2.3.1 無負荷時 図17において、電圧を y 軸、横流を x 軸とすると、 m' の近似式は

$$y_{m'} = \frac{1}{I_0(1+\sigma)} (e_x + \frac{V_0}{SCR}) x + \frac{\sigma(V_0 + e_x \cdot SCR)}{1+\sigma} \quad (13)$$

n' 曲線の式は、

$$y_{n'} = V_0 (1 + \frac{1}{I_0} \tan \theta \cdot x) \quad (14)$$

となる。この両曲線の交点を I_c' , V_c' として求めると、次式が得られる。

$$I_c' = \frac{\frac{V_0 - \sigma \cdot e_x \cdot SCR}{1+\sigma}}{e_x + \frac{V_0}{SCR} - \frac{V_0 \cdot \tan \theta}{I_0(1+\sigma)}} \quad (15)$$

$$V_c' = V_0 (1 + \frac{I_c'}{I_0} \tan \theta) \quad (16)$$

従って、このB点は発電機の短絡比、横流補償率などによって変化し、短絡比が大きい程、故障横流は大きく電圧は高くなる。

2.3.2 負荷時 No. 2 機について、2.2.2 と同様にして、誘起電圧 V_0 (端子電圧 $= V_0 + e_x + \frac{I_{22}''}{I_0}$) を維持し、負荷電流 I_2' 、負荷アンバランス横流 I_{21}'' を流すに必

図 17 No. 2 機特性

要な進み電流(故障横流)を求めると、次式となる。

$$I_{22}'' = \sqrt{(I_0 \times SCR + I_{21}''^2 + I_2'^2 - 2 \times (I_0 \times SCR + I_{21}'') \times I_2' \times \cos(\frac{\pi}{2} + \phi))} \quad (17)$$

外部電圧特性が(口)の場合、No. 2 機特性は、図17のごとくになり、 m' , n' 曲線の交点がB点になる。これを数式で求めると、次のごとくなる。 n' 曲線は無負荷時と同一で、(14)式で与えられ、 m' 曲線については、次式となる。

$$y_{m'} = \frac{1}{I_0(1+\sigma)} (e_x + \frac{V_0}{I_{22}''/I_0}) x + \frac{\sigma(V_0 + e_x \cdot \frac{I_{22}''}{I_0})}{1+\sigma} \quad (18)$$

この両曲線の交点より、 I_c' , V_c' が求められる。

$$I_c' = \frac{\frac{V_0 - \sigma \cdot e_x \cdot \frac{I_{22}''}{I_0}}{1+\sigma}}{\frac{e_x + \frac{V_0}{I_{22}''/I_0}}{I_0(1+\sigma)} - \frac{V_0}{I_0} \tan \theta} \quad (19)$$

$$V_c' = V_0 (1 + \frac{I_c'}{I_0} \tan \theta) \quad (20)$$

3. モデル機の計算例および実機による実測例

以上の方法(但し、B-C間は割愛してある)によりモデル機について故障時特性曲線を算出した結果を図18に示す。なお、計算には当社の発電機を考慮し、外部電圧特性(口)、二重巻線差動励磁方式とし、 F_1 励磁量(過励磁量)は無負荷時で127~138%の電圧を維持し、故障横流が約200%で定格電圧となるよう仮定している。また、数値は、 $SCR=0.5 \sim 1.0$, $e_x=10\%$, $1+\sigma=1.4$, $\tan \theta=1/6.6$ を用いた。

次に、実機(375 kVA, 445 V, 900 rpm, $SCR=0.74$, $e_x=7.0\%$, $1+\sigma=1.2$, $\tan \theta=1/6$, 外部電圧特性(口)、二重巻線差動励磁方式)についても実測を行ったので、その結果を図18に示す。

図18 モデル機故障時特性曲線

注) 各指示点, 指示範囲は変調モード(2), (3)の場合の整定点を示して
おり変調モード(1)の場合は曲線上の途中の点で整定する。

4. 故障機自動解列装置

以上の解析結果に基づいて, 並列運転中の1台故障時における母線電圧と横流の変化を検出し, 故障機を並列より解列させるための故障機自動解列装置について述べる。

4.1 動作原理 並列運転中に健全機側のACBもトリップさせるような発電機故障時には, 故障機側に出る出力電圧の異常変化があり, そのために前述したとき母線電圧と横流に変化を伴い, 次の関係が成立する。出力電圧に上昇を来す故障では母線電圧も上昇し, 故障横流が故障機より健全機の方へ, また, 逆に出力電圧に下降を来す故障では母線電圧も下降し, 故障横流が健全機より故障機の方へ流れる。従って, 故障機判別の基本原則としては, 母線電圧の異常上昇時には故障横流の供給側が, また, 逆に母線電圧の異常下降時には故障横流の被供給側が故障機であると判別できる²⁾。

本装置の基本原則もこれに準じ, 図19に示すごとく母線電圧異常信号部による母線電圧変化方向の判別信号(27X, 59X)と故障横流信号部による故障横流の被供給側の判別信号(AX₁, AX₂)の2組の信号要素を組合せ故障機側を判別し故障機検出信号(AX₁₁, AX₂₁)を出し, この信号によって負荷の優先シャ断と故障発電機の消磁を行わせ, その後, 若干の時限を経て, ACBをトリップさせる。

4.2 故障検出

(1) 母線電圧異常信号部 電圧リレーを用い, 母線電圧が定格電圧の $\pm 5\%$ 変動した時点で発信させる。

(2) 故障横流信号部 故障横流信号部の発信ポイントは, 前述の故障時特性曲線のA-B間で行うようにするが, A-B間における母線電圧変動量 ΔE_2 と全横流

(負荷アンバランス横流+故障横流)の関係は, 前述で明らかなごとく, 図20に示すようになるので, 故障検出ポイントを $\Delta E_2 = \pm 5\%$ 時におくと, その時の全横流は $\pm(3 \sim 63)\%$ となり, $\Delta E_2 = 0$ 時の $-30 \sim +30\%$ と重なって区別が付かない。従って, 故障横流信号部としてはできるだけ故障横流のみを検出し, これをもとに発信のできるものでなくてはならず, 当社では, 図21に示すごとく差動変流器を用いた方式のものを採用している。差動変流器の2組の2次巻線は図に示すような関係で接続されており, 一方の巻線に流れる電流 $i_{13}(=i_{23})$ は, ほぼ故障横流に比例した大きさとなる。これらの電流によって生ずる電圧 $E_{12}(=-E_{22})$ を電圧 $E_{11}(=E_{21})$ と合成してとり出した電圧 E_{13} および E_{23} , 並びにこれらからの変換量 E_{17} および E_{27} と ΔE_2 との関係は,

例えば, 図22に示すごとくできる。

そこで, AX₁, AX₂, リレーの動作ポイントを E_{17} , $E_{27} = 12V$ 時とすれば, 負荷力率および負荷アンバランスの大きさのいかんにかかわらず母線電圧上昇方向の故障時には $\Delta E_2 = +42 \sim +5.5\%$, 母線電圧下降方向の故障時には $\Delta E_2 = -5.1 \sim -6.7\%$ の変動時点ではAX₁, AX₂の中の故障横流の被供給側の方が発信する。

(3) 故障機検出信号(AX₁₁, AX₂₁) AX₁₁, AX₂₁の発信は27X, 59XとAX₁とAX₂の両方の発信時点。従って母線電圧の $+5 \sim +5.5\%$, または, $-5.1 \sim -6.7\%$ の変動時点で行われる。なお, 負荷の投入, シャ断時におけるごとく母線電圧の変動に対しては, 両機の電圧差に基づく変動でないので, 故障横流も流れなく, 図20, 22においては, $\Delta E_2 = 0$ の場合に相当し, 27X, 59Xは動作しても, AX₁, AX₂は動作しない。従って, 故障

図19 基本原理図

但し、次の条件による

- ① 外部電圧特性(□)(DCT式横流補償装置付で、負荷電流による電圧垂下は生じない)
- ② 横流補償率 $\tan \theta = 1/6.6$
- ③ 負荷力率=0.8

図20 故障時母線電圧変動量－全横流の関係図

図21 内部接続図

機検出信号， AX_{11} ， AX_{21} は発信されない。

5. おわりに

同期機の並列故障時の静的特性の解析を行い、これに基づく、自動解列装置の概要について述べた。すなわち、

励磁方式の相異，故障モードの相異によって生じる母線電圧，電流の変化に応じて，故障機を判別するための回路条件を設計時点で推定するために必要な解析を行ったものである。実用に当っては，この外に，並列機の一台中除去による負荷の優先しゃ断装置との連動がもちろん考

- 1) a : 負荷アンバランス=0 の場合
b : 負荷アンバランス最大(一方100%, 他方0%負荷)の場合
- 2) ()外はNo.1 機が故障の場合, ()内はNo.2 機が故障の場合です
- 3) 本図は負荷力率には関係なし

図 22 動作特性図

慮されねばならないが、これは、既存の技術でもって容易に行う事が出来るので、本文では省略した。なお、ここで紹介した故障時特性曲線の実測例は、実船にとう載した発電機の船内テストによるもので、また、故障機自動解列装置は、その発電機用に装備したもので、良好な動作をすることが確認されていることを申し添えます。

文 献

- 1) 武田ほか, 舶機学誌, 10-2 (昭50-2), 34.
- 2) 武田ほか, 舶機学誌, 10-2 (昭50-12), 25.