差動横流補償装置による定電圧制御系の設計

武田 幸男**・坂本 研也**・根岸 道明***

概 要

大容量化する船舶電源装置では、発電機を常時並列運転することが一般化してきた。並列運転時に発生する無効横流を抑制するために横流補償装置が用いられるが、負荷時には母線電圧を低下するように作動するから、従来は横流補償率を大きくすることが出来なかった。それゆえ、低い横流補償率の場合は並列運転システムの安定度が低下し、負荷の増加によって乱調を発生する場合がある。

本文は、大きな横流補償抵抗と、差動変流器(DCT)を組合せた差動横流補償装置(DCC)を用いて、極めて安定で、かつ、電圧変動率の小さい電源構成が得られることを示したものである。すなわち、差動変流器を横流補償回路に導入した場合の動態安定度と定態安定度の解析を行なって、動態安定度は差動変流器の有無に関係しないこと、及び、横流補償度(横流補償率とAVRの制御ゲインの積)の最低制限値が定態安定度から求められることなどを明らかにした。又、その結果に基づいて、差動横流補償装置の設計方針を示し、単独・並列運転のいずれにおいても母線の電圧変動率を $\pm 1\%$ 以内とする安定な電源設計例を示した。本装置はすでに多数の船舶に装備され、その効果は確認されている。

Design Procedure of Constant Voltage Regulating System with Differential Cross-current Compensator

By Yukio Takeda
Kenya Sakamoto
Michiaki Negishi

Abstract

Recently, continuous parallel running of several generators becomes more popular with expanding development of marine power plants. The cross-current compensator (CCC) is generally applied to suppress wattless cross-current component flows between generators on parallel running. Since the CCC reduces the bus voltage on load, large compensating factor can not be applied to the system. Therefore, in some cases under small compensating factor, parallel running system works showing unstable condition or hunting caused by increasing load.

This paper presents that absolutely stable power system with very small voltage drop can be obtained by using Differential Cross-current Compensator (DCC) by combining Differential Current Transformer (DCT) with large value of Cross-current Compensating Resistance (CCCR). In other words, this paper makes it clear that the dynamic stability is not affected by DCT and that minimum value of the cross-current compensating ratio can be evaluated from steady state stability, based on the analysis of dynamic and steady state stabilities when DCT is applied in the compensator. The design plans of DCC and the examples of power plant design which show voltage regulation within $\pm 1\%$ in both isolated and parallel operations are also described. These power plants are already equipped on many merchant ships and their superiorities are proved well.

* 原稿受付 昭和49年7月5日

昭和49年春季学術講演(昭和49年5月16日)

** 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 正会員 (株)根岸製作所(大阪市東淀川区田川通2-13-1)

1. ま え が き

近時、ディーゼル機関駆動自励交流発電機の並列運転が一般に行なわれるようになり、並列運転系の安定性に関心が払われるようになった。最近、糸井氏はこれに関して、動的定態安定度をくわしく解説され¹⁾、特に横流補償度が安定度に及ぼす影響について検討され、結論として「電圧変動率が小さい発電機は負荷増加時に乱調を生じやすい」ことを示しておられる。

並列運転時に発生する無効横流を抑制するために横流補償装置が用いられるが、通常の遅れ力率負荷時にも横流補償抵抗の両端に電圧降下を生じるから、自動電圧調整器は母線電圧を低下させるように動作する。従って、横流補償率は電圧変動率による制限からあまり大きくすることが出来ないし、これが低すぎる場合、不安定となりやすい。

横流補償装置による電圧降下性を改善するために、差動変流器(DCT)を用いた差動横流補償装置²⁾³⁾(Differential Cross-current Compensator, DCC)が効果的であることは古くから知られているが、電圧調整系の制御ゲインが低いときはあまり効果がないため、あまり実用化されず、また、その詳細についても報告されていない。これに関し、筆者らは先にDCTを用いた場合の電圧変動率、並列時の突入電流、負荷分担などの定常特性について解析を行ない、また、実験結果も合わせて報告した⁴⁾。

本文は、大きな横流補償抵抗と、その両端に接続された差動変流器(DCT)によるDCCを用いて、極めて安定で、かつ、電圧変動率の小さい電源構成が得られることを示したもので、既に100隻以上の船舶で、いろいろの電源形式について、自励式或はブラシレス式で異なる容量、異なった原動機種の組合せにおいてその効果が確認されている。

本文では始めに自励交流発電機について動的定態安定度の計算を行なっているが、これは文献1との比較の便宜を考慮したためで、ブラシレス発電機についても同様の結論が得られている。同期機モデルは自励回路を直流側に換算した等価他励磁モデル⁵⁾⁶⁾で、これに界磁磁束が変化する様な過渡状態における電圧方程式³⁾⁷⁾⁸⁾を適用し、更に、DCCをもつ自動電圧調整器(AVR)の過渡時方程式を求め、微小なじょう乱によって並列系統に電力動揺を発生する動的定態安定度の計算を行なっている⁹⁾。

その結果は、動的定態安定度は差動変流器の有無に関係しないこと、及びこれから求められた横流補償度 K_C の制限値は極めて小さく、 K_C の値は、定態安定度計算から求めねばならないことを示した。また、これらの検討結果に基づいて、差動横流補償装置の設計法を示し、単独・並列運転のいずれにおいても、母線の電圧変動率を $\pm 1\%$ 以内とする安定な電源設計例を示している。

2. 分流制御自励交流発電機の動的定態安定度

本節は、無限大母線に連結する2機並列運転系を対象として、差動横流補償装置(DCT)をもつ場合の横流補償度による動態安定度の解析を行なったものである。

2.1 自励回路 自励交流発電機は、自己の出力端子から直列リアクタンス X_{SR} 及び変流器CTを通して励磁電流を得る形式で、CTの巻数比を適当に定めることによって、自動電圧調整器AVRなしでも、ほぼ定電圧特性を得ることができる。しかしながら、並列運転を行なうときにはいろいろの要因によって発生電圧に差異を生じ、発電機相互間に無効横流が流れて安定な運転ができないため、AVRを用いて出力電圧ならびに無効横流制御を行なっている。同形機の場合は界磁均圧線が用いられるが、異機種の場合は設計が複雑となり一般的でない。

図1は分流制御形AVRで、界磁分流電流 I_{FB} はAVRの入力電圧 V_c によって制御される。図2は分流制御の特性図である。界磁抵抗線と無負荷飽和曲線の差が分流すべき電流となり、AVR分流特性との交点が発電機端子電圧を定める⁹⁾。

図3は自励回路の等価他励磁モデル⁶⁾及び分流時のベク

図1 分流制御AVRをもつ自励交流発電機

図2 分流制御AVRの特性図

図3 分流制御

トル図を示す。自動回路に加わる励磁電圧 V_{fS} は、

$$V_{fS} = K |\dot{V} + j X_{SR} / a \cdot \dot{I}|$$

$$= K |\dot{V} + j K_2 X_d \dot{I}| \quad (1)$$

ただし、

K : 直流側への換算係数

a : CTの巻数比

K_2 : 同期リアクタンス補償率, $K_2 = \bar{X}_d / X_d$

X_d : 同期リアクタンス, $\bar{X}_d = X_{SR} / a$

$K_2=1$ に選べば、同期リアクタンスによる発電機の端子電圧降下が完全に補償されて、AVRなしでも定電圧特性を示す。分流制御を行なうときには X_{SR} を小さくして流入電流 I_{fS} を増加させ、必要な界磁電流 I_f との差 I_{fB} を分流する。

図3(a)について方程式をたてると、

$$V_{fS} = (r_f I_f + p \phi_f) + \bar{X}_{SR} (I_f + I_{fB})$$

$$= (r_f + \bar{X}_{SR}) I_f + p \phi_f + \bar{X}_{SR} I_{fB} \quad (2)$$

ただし、

$\bar{X}_{SR}$: X_{SR} の直流換算値

r_f, ϕ_f : 界磁巻線抵抗および界磁磁束

(2)式の両辺に、 $X_{af} / (r_f + \bar{X}_{SR})$ をかけてまとめると、界磁方程式は次のようになる。

$$V_f' = E_q + T_{deq} p E_q' + K_B I_{fB} \quad (3)$$

ただし、

X_{af} : 電機子-界磁相互リアクタンス

$E_q = X_{af} I_f$: 内部誘導電圧

$E_q' = X_{af} / X_f \cdot \phi_f = E_q - (X_d - X_d') I_d$: 過渡リアクタンス背後電圧

$V_f' = X_{af} / (r_f + \bar{X}_{SR}) \cdot V_{fS}$

$T_{deq} = X_f / (r_f + \bar{X}_{SR})$: 等価界磁時定数

$K_B = X_{af} \bar{X}_{SR} / (r_f + \bar{X}_{SR})$

つぎに、図4発電機のベクトル図を用いて、(1)式の V_{fS} を求めると、

$$V_{fS} = K \sqrt{[(X_q - K_2 X_d)^2 I_q^2 + \{E_q' + (K_2 X_d - X_d') I_d\}^2]}$$

$$\approx K \{E_q' + (K_2 X_d - X_d') I_d\}$$

$$= K \{E_q - (1 - K_2) X_d I_d\} \quad (4)$$

(4)式が、自動交流発電機の励磁電圧を与える式である。定数 K を求めるために、無負荷定格電圧発生時を考えれば、このとき、 $E_q = V_n = 1$, $I_{f0} = 1$, e_f (界磁巻線電圧)=1と定めれば、 $X_{af} = 1$, $r_f = 1$ となり、(3), (4)式から、

$$K = (1 + K_{B0}) (1 + \bar{X}_{SR} / r_f) \quad (5)$$

図4 発電機のスペクトル図

ただし、

$$K_{B0} = K_B I_{fB0} \quad (6)$$

I_{fB0} は図3(b)に示すように、無負荷時の分流電流で、通常 I_{fB0} (=1pu)の20%程度を選ぶ。

したがって、単位法表示によれば界磁の式は、

$$(1 + K_{B0}) \{E_q - (1 - K_2) X_d I_d\}$$

$$= E_q + T_{deq} p E_q' + K_B I_{fB} \quad (7)$$

(7)式の左辺は界磁電圧に、右辺第3項目はAVR動作に相当する。AVRは、AVR入力電圧 V_c によってのみ分流電流 I_{fB} を定めるものとすれば、図2から、

$$I_{fB} = K_A (V_c - V_{c0}) \quad (8)$$

となる。 K_A はAVR利得で、 V_{c0} は設定電圧に係数。したがって、(7), (8)式がAVR動作を含めた自動交流発電機の界磁方程式となる。

2.2 横流補償回路 図5は端子電圧検出および横流補償回路である。横流が流れると横流補償抵抗 R の両端に電圧降下を起し、AVR入力電圧 V_c が高くなって、等価的に端子電圧が上昇した信号となり、界磁電流を低下させて横流を消失させるよう動作する。差動変流器(DCT)がないときには、負荷電流によっても R の両端に電圧降下を起すことになり、横流補償を強くするために R を大きくするときには当然、端子電圧の垂下が大きくなり、定電圧電源としての機能からはずれずる。DCTを接続するときには、 R 両端の電圧降下 $\dot{V}_R$ は、 $\dot{I}$, $\dot{I}'$ を各機電流として、

図5 差動横流補償装置(DCC)の構成

$$\dot{V}_R = \eta R \dot{I} + (1-\eta) R (\dot{I} - \dot{I}')/2 \quad (9)$$

ただし、DCTの巻線抵抗を r として、

$$\eta = r/(r+R) \quad \text{電圧変動改善率} \quad (10)$$

DCTがないとき、 $r = \infty$ であるから $\eta = 1$ 、したがって、

$$\dot{V}_R = R \dot{I} \quad (\text{DCTなし}) \quad (11)$$

発電機が等負荷分担しているときには、(9)式の右辺第2項目は0となって、 $\dot{V}_R$ はDCTつきの場合 $V_R = \eta R I$ となり、 $\eta \ll 1$ とするのは容易であるから、 R による電圧垂下を大幅に小さくできる。この意味で η を電圧変動改善率とよんでいる。図6はDCTつきの場合のAVR入力電圧ベクトル図である。

図6 DCTつきAVRの入力電圧 V_c

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= \dot{V}_e + \dot{V}_R \\ &= \dot{V}_e + \eta R \dot{I} + (1-\eta) R (\dot{I} - \dot{I}')/2 \end{aligned} \quad (12)$$

二機が負荷電流 $\dot{I}_n$ (力率角 ϕ_n) を供給しているとき、 $\dot{I}_n = \dot{I} + \dot{I}'$ であるから、

$$\dot{V}_c = \dot{V}_e + R \dot{I} - (1-\eta) R \dot{I}_n/2 \quad (13)$$

したがって、

$$\begin{aligned} V_c &= \sqrt{V_e^2 + 2V_e \{ R I \sin \phi - (1-\eta) R I_n \sin \phi_n/2 \} \\ &\quad + \{ R I \sin \phi - (1-\eta) R I_n \sin \phi_n/2 \}^2 \\ &\quad + \{ R I \cos \phi - (1-\eta) R I_n \cos \phi_n/2 \}^2} \end{aligned} \quad (14)$$

$R I \ll V_e$ として展開すると、

$$V_c \simeq V_e + \{ R I \sin \phi - (1-\eta) R I_n \sin \phi_n/2 \} \quad (15)$$

2.3 安定度解析 無限下母線に連結する並列二機系の動態安定度を考えるために、発電機の基本式と、AVR動作を含めた界磁の(7)式を組合せる。

まず、図4発電機ベクトル図を参照して、発電機の方程式を求める。

発電機電圧、電流については次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} E_q &= E_q' + (X_d - X_d') I_d \\ V_d &= V \sin \delta = X_q I_q \\ V_q &= V \cos \delta = E_q' - X_d' I_d \\ I_d &= I \sin(\phi + \delta) \\ I_q &= I \cos(\phi + \delta) \\ I &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

発電機の電気的出力 P_e は、

$$P_e = V I \cos \phi = V_d I_d + V_q I_q \quad (17)$$

回転系の運動方程式は、 P_m を機械的入力として、

$$T_m p^2 \delta = P_m - P_e \quad (18)$$

ただし、

$$T_m = M (\text{慣性定数}) / \omega_0 (\text{同期角速度})$$

並列運転時の動態安定度は、各々の発電機の方程式を組合せて解析せねばならないが、母線電圧が一定に保たれ、かつ、AVR入力電圧を(15)式で近似すれば、近似的に単機-無限大母線系として取扱うことができる。したがって、一機系について平衡状態付近の微小変動を考え、機械的入力 ΔP_m について内部相角 $\Delta \delta$ が収束するか否かを判断すればよいから、 $\Delta P_m \rightarrow \Delta \delta$ 間の伝達関数を求めることにする。

平衡点まわりのずれを Δ を付して表わし、(16)式において、 $E_q \rightarrow E_q + \Delta E_q$ 、 $I_d \rightarrow I_d + \Delta I_d$ 等において整理すると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta I &= \sin(\phi + \delta) \Delta I_d + \cos(\phi + \delta) \Delta I_q \\ \Delta I_d &= \Delta E_q' / X_d' - V \sin \delta \cdot \Delta \delta / X_d' \\ \Delta I_q &= V \cos \delta \cdot \Delta \delta / X_q \\ \Delta E_q &= \Delta E_q' + (X_d - X_d') \Delta I_d \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

(17)、(19)式を用いて、

$$\begin{aligned} \Delta P_e &= \Delta (I_d V \sin \delta + I_q V \cos \delta) \\ &= a_1 \Delta E_q' + a_2 \Delta \delta \end{aligned} \quad (20)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= V \sin \delta / X_d' \\ a_2 &= V I \sin \phi + V^2 (\sin^2 \delta / X_d' + \cos^2 \delta / X_q) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

自励時の界磁方程式(7)式より、

$$\begin{aligned} T_{deq} S \Delta E_q' + K_B I_{fB} \\ = K_{B0} \Delta E_q - (1 + K_{B0})(1 - K_z) X_d I_d \end{aligned} \quad (22)$$

ただし、 S はラプラス演算子を表わす。(22)式左辺第2項はAVR寄与分であり、(15)式から、

$$\Delta V_c \simeq R K_\phi \Delta I = K_R K_\phi \Delta I \quad (23)$$

ただし、

$$\begin{aligned} K_R &= R I (V_n / I_n) : \text{単位法で表わした横流補償度} \\ K_\phi &= \sin \phi \end{aligned}$$

また、負荷移行および平衡運転にわたり、AVRの電圧設定を変えないとき、(8)式から、

$$\begin{aligned} \Delta I_{fB} &= K_A \Delta V_c \\ &= K_A K_R K_\phi \Delta I \\ &= K_C K_\phi \Delta I \end{aligned} \quad (24)$$

$$K_C = K_A K_R : \text{横流補償率} \quad (25)$$

したがって、(22)、(24)および(19)式を組合せて $\Delta \delta$ 、 $\Delta E_q'$ について整理すると次式が得られる。

$$(T_{deq} S + a_3) \Delta E_q' = a_4 \Delta \delta \quad (26)$$

ただし、

$$\begin{aligned} a_3 &= [K_C K_B K_\phi \sin(\phi + \delta) + \{1 - K_z(1 + K_{B0})\} X_d] / X_d' \\ a_4 &= (V \sin \delta / X_d' \{-K_C K_B K_\phi \sin(\phi + \delta) \\ &\quad + \{(1 + K_{B0}) K_z - 1\} X_d - K_{B0} X_d'\} \\ &\quad - (V \cos \delta / X_q) K_C K_B K_\phi \cos(\phi + \delta)) \end{aligned} \quad (27)$$

ただし、

K_A : AVRのゲイン K_G : 発電機のゲイン
 V_{ref} : 設定値 ΔI_{fs} : 外乱

ΔI_{fs} は設定値が一定のとき、負荷時の自動励磁回路の複巻変流器CTの補償の程度によって生じる発電機設定電圧値からの偏差を与えるような励磁電流で、 $\Delta I_{fs}/K_A$ はオフセットを与える。例えば、遅れ力率0.8、100%負荷時に定格電圧を発生するようにCTの巻数比 a を選ぶとき、発電機の飽和のために高力率で過補償（電圧上昇）、低力率で不足補償（電圧低下）となる。この場合の定格値からの偏差は最大で20%を見れば十分であり、従って、AVRのオフセットを0.5%とするためには、 $\Delta I_{fs} = 0.2$ として、

$$K_A = \Delta I_{fs} / \Delta V = 0.2 / 0.005 = 40$$

となる。実用のAVRでは K_A として40~100が採用されており、電圧変動率 P_S は0.5~1.0%としている。

3.2 並列投入時の突入電流 図9の並列時のブロック線図は概念的なものである。各並列発電機の電圧設定差によって端子電圧 V_t と誘導起電力 V_g との電圧差で電機子巻線に負荷電流が流れ、横流補償回路に電圧降下を与え、AVR入力電圧 V_e が生じるとしている。実際には負荷電流 I は発電機の電力分担と電圧設定による励磁電流値によって変化するから、前節の動的定態安定度の計算では、任意の負荷力率について計算する時、電力の負荷状況に無関係に電圧設定値を等しいとして計算している。

今、各発電機の電圧設定が等しく、1号機が運転を行っているとき、2号機を並列投入した場合の突入電流（無効電流） I_{c0} は並列前の1号機負荷電流を I_{10} 、負荷力率角を ϕ とすると次式で近似される。

$$I_{c0} \cong (I_{10}/2) \sin \phi \quad (36)$$

その結果、投入機の遅れ無効電流は実船においては20~30%程度であり、1号機では進み無効電流のために高力率となり皮相電流は減少するので問題は生じない。

並列投入時の無効突入電流を少なくするためには発電機の電圧設定を調整し、投入時の母線電圧と発電機端子電圧を等しくし、かつ、周波数を一致させれば良い。このため、自動同期投入操作のシーケンスに電圧設定値調整機構(90R)をつけ加えれば良いが、母線電圧の変化が小さいときは90Rは必ずしも必要としない。むしろ、すべての運転状態において電圧設定を一定とし、母線電圧変動を小さく保つことは、発電機操作と制御系操作を単純化し、かつ、いろいろの操作状態における電力、無効電力などの過渡的動揺を確実に推定して系統全体の保護形式を定める上にも好都合である。

3.3 AVRの電圧設定が異なる場合の無効電力分担 実際の並列運転系では設定値の偏差によって無効電流、無効電力の偏差を生じると共に、各設定値が等しい場合でも界磁抵抗の温度変化、AVR特性のヒステリシスなどの非直線的電圧変動特性によって誘導起電力

に差を生じ、無効電力偏差を生じる。設定値を制御して発電機の定力率制御や定KVA制御を行なうことは、陸上発電所では一般に行なわれており、発電機の可能出力曲線について励磁制御のいろいろの制限を考慮する必要がある。

発電機の設定値 V_{ref1} 、 V_{ref2} が異なる時、端子電圧 V_t はほぼ両者の算術平均値となる。

$$V_t \cong (V_{ref1} + V_{ref2}) / 2 \quad (37)$$

従って、AVR入力回路において $\Delta V = \Delta(V_{ref1} - V_t)$ の偏差と無効横流 ΔI 及び K_R の関係は、(23)式において力率が低いと仮定すると、 $K_\phi \cong 1$ であるから次式となる。この場合、等電力分担を仮定している。

$$\Delta I = \frac{1}{K_R} \cdot \Delta V \quad (38)$$

図10は設定値偏差 ΔV に対する無効電流 ΔI (V をほぼ一定と考えると無効電力偏差 ΔQ に等しい。)を、 K_R をパラメータとして示したもので、 K_R を大にすれば同一 ΔV に対して ΔI が減少する。 ΔI に対するIEC規則によれば、最大で定格無効電流の10%(0.06pu)であるから、 K_R を大とすることが効果的なことがわかる。DCTを使用しない場合、母線の漸変電圧降下を5%とする様な K_R の値は0.08となり、図10より設定電圧偏差 ΔV に対する制限は0.48%となり、IEC規則を保持するには高感度、低ドリフトのAVRが必要となる。

DCTを使用する時は、電圧変動改善率が $\eta (= \frac{r}{R+r})$ 倍に低減するので、設定電圧偏差内に保つことは容易であると同時に、電圧変動や無効電力偏差も極めて減少する。

図10の縦軸は ΔI (pu)の代りに ΔQ (pu)とすることもできる。従って、 ΔV と ΔI 、 ΔQ の関係は K_R をパラメータとして比例的に表現されるから、図11以下では ΔQ

図10 設定差による横流

IEC制限値: $Q_n/10$

$\Delta I = \Delta V / K_R$

について表わしている。

3.4 並列運転時の電力線図 図11は2台の発電機が定格出力 P_n (P_n , KVA) で運転している状態から、両機間に無効電力分担の不平衡 ΔQ が発生した場合、1号機の出力 P_1 を最大値 (1 pu, KVA) に保ち、かつ、各機の有効電力分担 ($W_1 = W_2$, pu, kW) を等しく保つよう制御した場合の2号機の出力 P_2 (pu, KVA) が点線のように変化することを示している。

今、 $P_1 = P_n$, $W_1 = W_2$, 皮相電力平衡時の無効電力を Q_0 , 負荷力率角を ϕ_n とすると、無効電力偏差 ΔQ (1号機に遅れ, 2号機に進み電流) がある場合の各電流量間の関係式は次式となる。各記号は図11に示している。

$$\left. \begin{aligned} W_1/W_n &= Q_0/Q_n, \\ W_n &= P_n \cos \phi_n, & Q_n &= P_n \sin \phi_n \\ Q_1 &= Q_0 + \Delta Q, & Q_2 &= Q_0 - \Delta Q \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

$$P_1 = P_n = \sqrt{Q_1^2 + W_1^2}, \quad P_2 = \sqrt{Q_2^2 + W_2^2} \quad (40)$$

(40) 式を (39) 式の関係を用いて表わすと、

$$\Delta Q^2 + 2Q_0 \Delta Q + Q_0^2 \left\{ 1 + \left(\frac{W_n}{Q_n} \right)^2 \right\} - P_n^2 = 0 \quad (41)$$

(41) 式より ΔQ を求めると、

$$\Delta Q = -Q_0 \pm \sqrt{P_n^2 - Q_0^2 (W_n/Q_n)^2}$$

(39) 式の関係代入して整頓し正根のみをとると、

$$\Delta Q = -W_2 \tan \phi_n + \sqrt{P_n^2 - W_2^2} \quad (42)$$

W_2 について整頓すると、

$$\begin{aligned} W_2 &= \frac{-\Delta Q \tan \phi_n + \sqrt{P_n^2 (1 + \tan^2 \phi_n) - \Delta Q^2}}{1 + \tan^2 \phi_n} \\ &= \cos \phi_n \sqrt{P_n^2 - \Delta Q^2 \cos^2 \phi_n} - \Delta Q \sin \phi_n \cos \phi_n \end{aligned} \quad (43)$$

P_2 , ϕ_1 , ϕ_2 を求めると、

$$P_2 = \sqrt{W_2^2 + (W_2 \tan \phi_n - \Delta Q)^2} \quad (44)$$

$$\phi_1 = \cos^{-1}(W_2/P_n) \quad (45)$$

$$\phi_2 = \cos^{-1}(W_2/P_2) \quad (46)$$

図11の P_2 (点線) は (46) 式から求められる。

(39), (43) 及び (44) 式より、 ΔQ が増加するときの各機の各電力分担の変化を求めると図12になる。等電力分担を行なっていると仮定しているから、 $W_1 = W_2$ は ΔQ の増加と共に減少し、無効電力 Q_1 は増加し、 Q_2 は減少して $\Delta Q = 0.416$ で0となり、以後 Q_2 は進み力率となる。 P_2 は $\Delta Q = 0.559$ において最低値 0.5 となるが、この

図11 並列運転時の電力線図

図12 無効横流による各出力分担 ($\Delta I = \Delta Q$)

点において図11の P_1 , P_2 ベクトルのなす角 θ は $\pi/2$ となり、これ以後は脱調する。いわゆる進相運転限界を示すものであって、 ΔQ としては、臨界値 0.559 に対して余裕のある低い値にとどめねばならない¹⁰⁾。なお、電力線図に関しては回転子コイル及び固定子コイルの温度上昇限度による制限などがある¹¹⁾。

発電機が定格負荷でなく、図11の P_0 で平衡しているとき、設定電圧偏差によって無効電力偏差を生じた場合は、各機の皮相電力 P_1 , P_2 の軌跡は同図の ΔQ 線上 ($W_1 = W_2$) にあり、(42) 式で示される最大無効電力偏差に達した後は前と同様に点線上をたどることになる。

発電機が定格負荷状態から、無効電力偏差 ΔQ によって各機の無効電力 Q_1 , Q_2 は次式によって変化する。これらは (39), (42) 及び (43) 式より求められる。

$$\begin{aligned} Q_1, Q_2 &= \sin \phi_n \sqrt{P_n^2 - \Delta Q^2 \cos^2 \phi_n} \\ &\quad - \Delta Q (\sin^2 \phi_n \mp 1) \end{aligned} \quad (47)$$

負号は Q_1 , 正号は Q_2 を示す。(47) 式と (38) 式から、電圧設定値偏差 ΔV を一定として K_R を可変とした時の各機の無効電力分担は次式から計算される。

$$\begin{aligned} Q_1, Q_2 &\cong \sin \phi_n \sqrt{P_n^2 - \left(\frac{\Delta V}{K_R} \right)^2 \cos^2 \phi_n} \\ &\quad - \left(\frac{\Delta V}{K_R} \right) (\sin^2 \phi_n \mp 1) \end{aligned} \quad (48)$$

定格状態から電圧偏差を 0.5%~5% とした時の K_R と Q_1 , Q_2 の関係を示すと図13となる。

K_R が小さい場合にはわずかな設定偏差 ΔV であっても大きな無効電力分担の不平衡が生じることがわかる。設定偏差 ΔV は、電圧変動特性の非直線性によっても生じるから、無負荷から全負荷に至る電圧変動特性の直線性からのずれが $\pm 1.0\%$ 以上の場合には、 $K_R = 0.08$ とするとき約 0.25 pu の無効電力偏差 ($Q_1 - Q_2$) を両機間に生じることになる。この意味から、原動機の変速率及び負荷分担に関する規格のように、発電機の電圧変動率に対

図 13 設定電圧差による無効電力分担

しても無効横流制限のために直線性を定義する必要があると思われる。定義するとすれば、電圧変動率の 1/10 以内の直線性が技術的に妥当であろう。

3.5 横流補償率 K_R の選定と差動変流器の設計

各国船級規格の大部分が電圧変動率 $P = \pm 2.5\%$ を規定しており、 K_R をこれから求めると、DCT なしの場合、 $K_R \leq 0.08$ としなければならない。他方、DCT を接続した場合は、実際の電圧変動率 P_{0d} は

$$P_{0d} \cong \eta \cdot P_0, \quad \eta = r / (R + r) \quad (49)$$

に改善されるから、横流補償抵抗 R を十分大きく選び、固有の電圧変動率 P_0 を大きくすることが出来る。図 14 直線 P_0 は、 K_R (単位法で表わした R と等しい) に対する固有電圧変動率を示す。同図の曲線群 P_{0d} は、DCT の巻線抵抗 r (pu) の各値に対する電圧変動率を示したもの

図 14 並列運転時の電圧変動率

P_0 : DCT なし

P_{0d} : DCT 付き

で、同じ K_R に対する P_0 が DCT を接続することによりどの程度改善されるかを示している。例えば、 $K_R = 0.2$ 、 $r = 0.01$ とすると $P_{0d} = 0.006$ (0.6%) であり、これと単独運転時の電圧変動率 $P \leq 0.01$ (1%) を加えて、総合電圧変動率は 1.5% 程度となる。以上の考察から K_R の最適値として 0.1~0.3 が選ばれる。

図 15 は多機並列運転時の 3 巻線 DCT を用いた場合の結線図の一例で、電流検出用 CT₁ の二次電流を直接に横流補償抵抗 R に加えるときは CT₁ の VA 負担が大きくなるので、CT₁ としては二次 5A 定格の標準形を使用すると 3 巻線 DCT の VA 定格が小さくなる利点がある。

 図 15 n 機並列運転時の DCT の接続

DCT の設計には電圧変動改善率 η の値をいかに選定するかが最初に検討されねばならないが、図 14 より、 $r \leq 0.01$ (pu) (AVR 回路では図 15 の PT₁ 二次電圧を 1 pu として良い) が巻線加工から見ても容易な数値であり、 R 両端の電圧 V_R の値が DCT の飽和電圧以下であれば K_R の値はいかに大きく選んでもよい。

DCT の飽和電圧 V_{SDCT} は変圧器に関する基礎公式から、直ちに次式で示される。

$$V_{SDCT} = 4.44 f B S N_2 \times 10^{-8} \text{ (V)} \quad (50)$$

ただし、 f : 電源周波数 (Hz)

B : コアの飽和磁束密度 (gauss)

S : コアの断面積 (cm^2)

N_2 : 二次巻線数

例えば、定格 5VA の DCT として冷間圧延硅素鋼 z-11 を使用した場合、 $B = 18 \text{ kgauss}$ 、 $S = 1.5 \text{ cm}^2$ 、 $N_2 = 150$ T として、飽和電圧は約 10V となる。従って、AVR 検出入力電圧を 24V とすれば $K_R \approx 0.4$ までとれ、十分な横流補償ができる。図 13 から明らかなように $K_R = 3$ の場合の無効電力偏差は設定偏差 1% に対し 8.5% となる。

3.6 定電圧制御系の設計 横流補償度 $K_C = K_A \cdot K_R$ について動的安定度より求めた制限値は 0.1 以上であり、他方、固有定態安定度からは $K_A = 40$ 、 $K_R = 0.1$ とすると $K_C = 4$ 程度の値が得られる。

表 1 は 2 機並列運転時において、AVR の制御ゲイン $K_A = 20$ のものを I 型、40 のものを II 型と呼ぶこととし、設定電圧偏差 ΔV (ほぼ固有電圧変動率 P_S に等しい) をそ

表 1 : 2機並列運転時の解析値

(単位は pu)

AVR	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
ΔV	.01	.005	.01	.005	.01	.005	.01	.005	.01	.005
K_A	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
K_R	.025	.0125	.05	.025	.10	.05	.20	.10	.40	.20
K_C	0.5		1.0		2.0		4.0		8.0	
$\Delta I = \Delta Q$	0.4		0.2		0.1		0.05		0.025	
P_2	0.566		0.764		0.88		0.94		0.97	
$\cos \phi_1$	0.566		0.694		0.749		0.775		0.788	
$\cos \phi_2$	1.0		0.910		0.851		0.824		0.812	
$\sin \phi_1$	0.824		0.720		0.662		0.632		0.616	
$\sin \phi_2$	0.024		0.320		0.462		0.532		0.566	

ただし, $\cos \phi_n = 0.8$, $\sin \phi_n = 0.6$, $P_n = P_1 = 1$, $W_1 = W_2$, $V_1 > V_2$ (pu)

れぞれ 1%, 0.5% とした場合について, K_R , K_C , 無効電力偏差 ($\Delta I = \Delta Q$)などを計算したものである。 K_C の値を定めると $K_R = K_C / K_A$ として定まるから, これらの K_R に対して (38) 式より ΔI 又は ΔQ が, また, (48) 式から Q_1 , Q_2 を求め, (44)~(46) 式より P_2 などが求められる。

$K_C = 0.5$ は $P_2 = 0.566$ となり図 12 の安定限界に近くなり, 無効電力不平衡が大で使用できない。 IEC の制限値として $\Delta Q < 0.06$ を適用するならば $K_C > 4$ でなければならない。

表 2 は $K_C \cong 4$ とした場合の実例で, AVR 回路の各要素の記号の意味は図 16 に示している。 単独運転時の電圧

表 2 : 定電圧制御系の実例

AVR		横 流 補 償 回 路								電圧変動率	
形式	K_A	単独変動率 P_2	V_e	R_1	V_R	K_R	r	η	K_C	P_0	P
	pu	%	V	Q	V	pu	Q	pu	pu	%	%
I	20	1	24	15	5	0.21	<1	0.07	4.2	13.7	2
II	40	0.5	33	10	3.5	0.11	<1	0.1	4.2	6.7	1

図 16 差動横流補償装置の記号

V_e : PT2 次定格電圧
CT : 2 次定格電圧 (5A)
DCT : 5 VA, 2 次定格電流 0.5A
コア : 冷間圧延硅素鋼 Z-11
 $B = 18 \text{ kGau}$, $S = 1.5 \text{ cm}^2$
 $N_1 = N_2 = 15 / 150 \text{ T}$
 $V_{SDCT} = 10 \text{ V}$

変動率 P_2 をそれぞれ 1%, 0.5% とするとき, PT, CT, DCT などの設定常数を示している。 この場合の性能については既に前節までの検討で明らかであるが, 並列運転時の総合電圧変動率 $P \cong P_2 + P_{od}$ は I 形, II 形についてそれぞれ 2% 及び 1% が得られる。 これらの結果は実船において確かめられている。

4. あとがき

交流発電機の並列運転時の安定性について検討を行ない, 特に横流補償装置が安定性に及ぼす影響を詳しく求め, その

結果, 差動変流器 (DCT) を導入することが, 最も安定で, かつ, 電圧変動率が極めて低い電源構成となることを示した。 並列運転系を固有定態, 動的定態の面から安定度解析を行ない, その結果より, 定電圧制御系の設計において最も基本的な定数, 横流補償抵抗値 $R (= K_R, \text{ pu})$, プンプゲイン K_A , 横流補償度 $K_C (= K_A \cdot K_R)$ 及び差動変流器の巻線抵抗 r などの選定根拠を示し, 更にこれらを組合せた設計例を示した。 主要な結論をあげると次のようである。

- (1) 大きな横流補償抵抗と差動変流器とを組合せた差動横流補償装置によって, 安定で, 電圧変動率の小さい並列電源系を構成することができる。 この結論は発電機の容量, 励磁形式, 原動機種の相違などに関係なく, 一般的に適用できる。
- (2) 差動変流器を導入することによって, 横流補償率を十分大きくして, しかも, 電圧変動率を任意に小さくし, 並列運転時の無効電力分担の不平衡が極めて少ない定電圧運転を行なうことができる。
- (3) 動的定態安定度は差動変流器の有無に関係しない。 これから求めた横流補償度 K_C の最低値は 0.1 (pu) として十分である。
- (4) 横流補償度 K_C を大きくするときは, 動的にも静的にも安定な並列運転ができる。 実用機では $K_C \geq 4$ ($K_A = 20 \sim 100$, $K_R = 0.1 \sim 0.4$) が実際の設計値である。
- (5) K_C の増加と共に電圧変動率は大きくなるが, 差動変流器を用いて $1/10 \sim 1/20$ 程度の電圧変動率に改善することが出来るので, 単独, 並列のいずれにおいても $\pm 1\%$ 以内の電圧変動率となるような実例を示した。
- (6) 高感度, 低ドリフトの自動電圧調整器と併用すれば, 単独運転, 同期投入, 負荷移行, 解列などのすべての電源運転状態において, 電圧動揺及び電圧変動が極めて小さく, かつ, 安定な運転が実施できる。 そして AVR の設定抵抗は半固定として各種電源操作の自動化シーケンス機構を単純化することができる。
- (7) 自動電圧調整器は並列運転時には横流補償装置に

より自動無効電力調整装置(AQR)として動作し、無効横流の抑制に極めて効果的であり、差動変流器の導入によってAQR動作に影響を与えることなく、自動電圧調整器としての本来の定電圧制御機能を果たすことができる。

最後に、ご指導いただいた大阪大学工学部西村正太郎教授に謝意を表します。

文 献

- 1) 糸井, 日本舶用機関学会誌, Vol. 8, No. 11 (昭 48-11)
- 2) 谷合, 電圧調整器, p. 298, 修教社刊 (昭 2)
- 3) E.W. Kimbark, Power System Stability III, Wiley (1956)
- 4) 武田ほか, 日本舶用機関学会誌, Vol. 4, No. 7 (昭 44-9)
- 5) 電気学会技術報告, II 部 5 号 (昭 43)
- 6) 武田ほか, 日本舶用機関学会誌, Vol. 8, No. 3 (昭 48-3)
- 7) 梅津, 電気学会雑誌, Vol. 81, 403~412 (昭 36-3)
- 8) F. P. Demelo & C. Concordia, IEEE Trans., Vol. PAS-88, No. 4, (1969-4)
- 9) 武田ほか, 日本舶用機関学会誌, Vol. 3, No. 3, (昭 43-6)
- 10) W. Haller, Brown Boveri Rev. 2-70 (1970)
- 11) 電気工学ハンドブック, 22 編送電, p. 1166 (昭 42)