UDC 620.178.82 : 621.824 : 621.313.322
621.315.051.2.077.8

論 文

51-B 77

直列コンデンサ補償系統における同期機の 軸ねじれ共振現象とその抑制

日新電機株式会社

日新電機株式会社

室 谷 金 義

浅 野 正 邦

1. ま え が き

直列コンデンサは、超高压長距離送電線の送電容量増大対策として広く使用されているが、直列コンデンサ補償系統の系統条件によっては様々な回路現象が発生するので、現象の発生機構、解析手法、抑制方法について十分検討し、系統の安全性を高める必要がある。

この直列コンデンサ補償系統の不安定現象の1つとして、同期機の自己励磁現象があり、数10年前より数多くの機関で研究されているが、筆者らは、発電機の界磁電圧を適当な制御系で制御することにより自己励磁現象を抑制する方法（NDSと仮称）を考案し、理論的・実験的にその効果を確認し、直列コンデンサ適用技術を高めた⁽¹⁾⁽²⁾。

しかしながら、最近アメリカの実系統において、軸ねじれ共振を伴う自己励磁現象により、発電機-励磁機間のシャフトが過熱され、コレクター部が絶縁破壊したことが報告され⁽³⁾、直列コンデンサ補償系統の新たな問題として、同期機の軸ねじれ共振現象*について検討する必要が生じてきた^{(3)~(10)}。軸ねじれ共振現象は、直列コンデンサを含む電気系の固有振動周波数が回転機の軸系の機械的共振周波数に近い場合に、両者の相互結合作用により引起こされる現象で、電気振

動と機械系の軸ねじれ振動とが、共に負制動となり、軸系が破損に至る危険性がある。又、振動が減衰性の場合でも、系統事故・直列コンデンサそう入などの一時的な系統じょう乱により、軸ねじれ振動が長時間持続し、軸の疲労、寿命低下となるおそれがある。

本論文は、この軸ねじれ共振現象が発電機の入出力トルクの差に起因していることに着目し、タービン、発電機の入力トルク、又は、出力トルク（電気的出力）を制御し、軸ねじれ共振現象を抑制する方法（TRSと仮称）を提案するものであり、ディジタル計算機、アナログ計算機を使用した理論解析により、その効果を確認した結果を報告し、更に、これの具体化についての数例の具体案も提案している。

2. 同期機の自己励磁現象と界磁制御による抑制⁽¹⁾⁽²⁾

電力系統の同期機の安定問題には、

- (1) 定態安定度、又は、動態安定度を対象とした安定問題
 - (2) 同期機の乱調による安定問題
 - (3) 同期機の自己励磁現象による安定問題
 - (4) 軸ねじれ振動に基づく安定問題
- があり、通常、(2)~(4)を負制動現象と称するが、(1)を含めている論文⁽¹¹⁾もある。

直列コンデンサの補償度を上げることによって、(1)の安定度は向上するが、逆に、(2)、(3)は不安定に向う傾向があり、直列コンデンサ補償度の上限を決定する要因となる。(4)は本稿の主題であり、第3章に詳述する。

これらの不安定現象は、同期機に対するParkの式と外部回路の式とを連立することにより、統一的に取

Subsynchronous Resonance Oscillations in Series-Compensated Transmission Systems, and their Suppression. By Kaneyoshi Murotani, Member & Masakuni Asano, Member (Electrical Power Sys., Ltd., R & Dept., Nissin Electric Co., Ltd.)

室谷金義：正員，日新電機株式会社研究開発部電力系統研究室
浅野正邦：正員，日新電機株式会社研究開発部電力系統研究室

*：アメリカでは Self-Excited Torsional Frequency Oscillation と称した論文⁽⁴⁾もあるが、最近では、簡単に Subsynchronous Resonance (SSR) と称している。本論文では、現象を主体にして軸ねじれ共振現象と表現することにする。

第 1 図 負制動現象発生領域

Fig. 1. Stability borderlines for negative damping oscillations.

第 2 図 500kV モデル系統における自己励磁現象発生領域と NDS による効果

Fig. 2. Stability borderlines for self-excited oscillations in model 500kV system with and without NDS.

扱うことができ、アナログ計算機やデジタル計算機により正確に予測できることは、実験結果との比較において検証されている。

(2)、(3)の発生領域は一般に、第1図に示すようであり、(2)は回路抵抗が大きい程発生しやすく、逆に(3)は回路抵抗の小さい方が発生しやすい。

(3)の自己励磁現象の発生機構は、誘導発電機モデルで説明することができる。この現象が発生すると、系統の有効電力、無効電力、及び、発電機界磁電流に低周波の振動が現われる。これらの変動要素を検出して、界磁電圧を制御することが、自己励磁現象抑制装置(NDS; Negative Damping Stabilizer)の考え方で

ある。第2図、500kV モデル系統での安定判別曲線計算結果を示す。NDS をそう入すると、破線で示すように安定領域が拡大されている。

3. 軸ねじれ共振現象

〈3・1〉 計算モデル系統と発生機構 第3図に軸ねじれ現象を考察するための等価回路を示す。記号の

第 3 図 軸系を含むモデル系統

Fig. 3. The model system for analyzing the subsynchronous resonance oscillations (SSR).

第 1 表 計算定数と記号の説明

Table 1. Symbols and data.

	記 号	記 号 内 容	モデル 系統 A	モデル 系統 B	Hydro System ⁽¹⁾
機 械 系 定 数	H_T	タービン単位慣性定数	2.22	0.667	2.4825
	H_G	発 電 機 "	0.633	1.333	4.1375
	H_E	励 磁 機 "	—	0.0667	—
	K_{GT}	軸のばね定数	25	25	22.5
	K_{GE}	"	—	9	—
	D_T	機械的制動係数	0.5	0.5	1.0
	D_G	"	0.5	2.0	0.0
	D_E	"	—	0.0	—
	D_{GT}	"	0.6	0.6	0.6
D_{GE}	"	—	0.25	—	
発 電 機 の 電 気 系 定 数	r_a	電 機 子 抵 抗	0.0015	同 左	0.005
	X_l	電機子漏れリアクタンス	0.20		0.153
	X_d	直軸同期リアクタンス	1.50		1.0
	X_q	横軸 "	1.49		0.66
	X_d'	直軸過渡リアクタンス	0.31		0.346
	T_{d0}'	" 開路時定数	7.2		7.42
	X_d''	" 次過渡リアクタンス	0.25		0.2405
	T_{d0}''	" 開路初期時定数	0.043		0.0347
	X_q''	横軸次過渡リアクタンス	0.25		0.3249
	T_{q0}''	" 開路初期時定数	0.21		0.0598
外 部 回 路 定 数	r_E	r_a を含む全外部回路の抵抗	変数	同 左	変数
	X_T	変圧器漏れリアクタンス	0.135		0.0
	X_L	線 路 "	0.905		1.1224
	X_S	背後系統 "	0.30		0.0
	X_E	$= (X_T + X_L + X_S)$	1.34		1.1224
	X_C	直列コンデンサ	変数		変数

内容と計算に使用した定数を第1表にまとめて示す。電気系の定数は第2図と同じ⁽¹⁾であるが、機械系の定数は適当に仮定したものである。

図示されたように、タービン・発電機・励磁機は、軸のねじれ方向について力学的に見た場合、慣性体(H_T など)がばね(軸)でつながり合わせた振動系として表わされる。従って、各慣性体間には、ばねと慣性定数により、機械的共振現象の発生する周波数が存在しこの値 f_M は第3図で $H_G \cdot H_T$ 間のみを考えた場合次式で与えられる。

$$f_M = \sqrt{\frac{K_{GT}}{4\pi f_0 H_G H_T / (H_G + H_T)}} f_0 \dots (1)$$

一般に、この周波数は系統の基本周波数(f_0)より低い値である。

系統に直列コンデンサをそう入すると、次式で表わされる f_n の振動が発生する。

$$f_n = \sqrt{X_c / (X_E + X_2)} f_0 \dots (2)$$

但し、 X_E : 発電機以外のリアクタンス、

X_2 : 発電機の逆相リアクタンス

電機子に f_n の電流が流れると、界磁巻線にすべり周波数($f_E = f_0 - f_n$)の電流が誘起され、回転子に f_E で脈動するトルクが発生する。

$f_E = f_M$ の場合、このトルク振動により、軸系の振動が誘発され、軸ねじれ振動が持続する。更に、この f_E の軸ねじれ振動は、電気系に($f_n = f_0 - f_E$)の周波数の電流を誘起するので、 f_n の振動はますます大きくなる⁽⁴⁾。

このように、電気系と機械系の結合が強い場合には、電気系の振動、機械系の軸ねじれ振動が共に発散性となり、電気系では直列コンデンサに過電圧が印加され、機械系では軸疲労となり、これを軸ねじれ共振現象と称している。

〈3・2〉 解析手法 軸ねじれ共振現象の理論的解析には、他の研究者と同様、系を微小変動に対する特性方程式で表わし、デジタル計算機でその特性根を求める方法を採用した。Concordia 氏らが、文献(4)で、Hydro System の軸ねじれ共振現象の発生領域を紹介しているが、筆者らもこの系統について安定判別計算を行ない、第4図の結果を得た。発電機出力および機械系の単位が不明であることもあって、両者の発生領域に幾分差があるが、解析手法の妥当性は、確認できたものと考えている(定数は第1表に示す)。

この特性根による安定判別法は、軸ねじれ共振現象の発生限界を理論的に求めるには便利であるが、系統じょう乱により発生する過渡振動トルクの大きさなど

第4図 Hydro system の軸ねじれ共振現象発生領域

Fig. 4. Stability borderlines for SSR in hydro system.

(a) モデル系統A (b) H_T と H_G を逆にしたもの

第5図 機械系の定数と軸ねじれ共振現象発生領域(10GVA ベース)

Fig. 5. Stability borderlines for SSR in the model system with two inertia constants.

の計算には不適當であるので、系全体を示す非線形連立微分方程式をアナログ計算機でシミュレーションする解析法も併用した。

〈3・3〉 モデル系統における軸ねじれ共振現象発生領域 モデル系統Aの軸ねじれ共振現象発生領域を第5図(a)に、タービンと発電機の慣性定数を逆にしたケースの発生領域を(b)に示す。両図の比較から明らかなように、電気系とつながる H_G が小さく、振動子となる H_T の大きい方が安定領域が広がることが判る。

モデル系統Bの軸ねじれ共振現象発生領域を第6図

第 6 図 モデル系統 B における軸ねじれ共振現象の発生領域 (10GVA ベース)

Fig. 6. Stability borderlines for SSR in the model system with three inertia constants.

に示す。慣性体が 3 つあるため、 H_T, H_G 間の共振モードと、 H_G, H_E 間の共振モードがあり、各々、 X_C が 0.8 pu, 0.4 pu の近傍で発生している。

H_T, H_G 間の振動では $H_G < H_T$ であるから不安定領域が大きく、 H_G, H_E 間の振動では $H_G > H_E$ であるから不安定領域は小さい。これは第 5 図 (a), (b) の関係と同じ傾向を示している。

4. 軸ねじれ共振現象の抑制

〈4・1〉 考え方 簡単のため第 7 図に示すように慣性体がタービンと発電機の 2 つであるケースについて考察する。

一般にタービン発電機の機械系の方程式は、次の式で表わされる。

$$2H_T P \Delta \omega_T = T_M - T_{GT} - D_T \Delta \omega_T + D_{GT} \Delta \omega_{GT} \dots\dots\dots (3)$$

$$2H_G P \Delta \omega_G = T_{GT} - T_E - D_G \Delta \omega_G - D_{GT} \Delta \omega_{GT} \dots\dots\dots (4)$$

第 7 図 軸ねじれ共振現象抑制方式 (TRS) の原理図

Fig. 7. Principle diagram of TRS (Torsional Resonance Stabilizer).

$$P \delta_G = \Delta \omega_G \dots\dots\dots (5)$$

$$P \delta_T = \Delta \omega_T \dots\dots\dots (6)$$

但し、

$$T_{GT} = K_{GT} (\delta_G - \delta_T) \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta \omega_{GT} = \Delta \omega_G - \Delta \omega_T \dots\dots\dots (8)$$

軸ねじれ共振現象は、第 10 図 (a) に示すように軸トルク T_{GT} が機械系の共振周波数で大きく振動する現象であるが、機械的入力 T_M は一定であるので、電氣的出力 T_E の変動に起因していることが、同図及び上記方程式より明らかである。

ここでは、軸ねじれ共振現象を抑制する手段として次のものを考えてみる。

(i) T_E の変化に対応して、タービンの蒸気入力 T_M を制御する (第 7 図参照)。

(ii) T_E が一定となるように電気系に接続したエネルギー蓄積装置 (Pc) を制御する (第 7 図参照)。

(iii) 界磁制御により、系統じょう乱時の過渡振動を速やかに減衰させる。

この内、(i), (ii) は有効電力に関係する要素を直接制御しようとするものであり、以下これらを TRS (Torsional Resonance Stabilizer) と仮称することにする。又、(iii) は前述の NDS で界磁制御を行なって電気系の振動制御を行なっていることから、TRS と対象的に無効電力制御と考えることができよう。以下を制御する方式について少し詳しい理論検討を行なう。

〈4・2〉 TRS の理論検討 TRS の入力信号や、伝達関数としては、種々のものが考えられる。この中より最適な制御系を選定することが必要であり、これを次のような方法で求めた。

第 2 表は、入力信号の種別として ΔP など 4 種、伝達関数として 6 種類を選定して、安定判別計算を行なったものである。第 3 表は、入力信号として $\Delta \omega_G$ を使用したときの、固有値の動きを示すものである。系統条件は、モデル系統 A であり、 $X_c = 0.81 \text{ pu}$, $R_E = 0.045 \text{ pu}$ とした。固有値の虚数部は、振動の周波数を示し、実数部はその周波数の振動の減衰・増加を示す時定数に関係するもので、これが正になると増加、即ち、発散性であることを示す。

これより次のことが言える。

(1) 入力信号源としては、 ΔQ は不適當であり、 ΔP , $\Delta \omega_G$, $\Delta \omega_T$ が適當である。

(2) 伝達関数は微分回路が望ましい。

以上より、伝達関数の形を選定したが、次に、利得の大きさを選定するため、次式のような 2 階微分回路形 (P^2) とし、 K_{TRS} と固有値の関係を求めた。

第2表 各種 TRS における安定判別計算結果

Table 2. Suppression of subsynchronous resonance with various kinds of TRS.

伝達関数	入力信号 TRS	$-\Delta P$	$+\Delta\omega_G$	$-\Delta\omega_T$	$-\Delta Q$	備 考
なし		×	×	×	×	定励磁
NDS		×	×	×	×	なし
P^2+NDS		×	○	○	×	$50 \times (0.04S/1+0.04S)$ $\times (0.02S/1+0.02S)$ $\times (0.06S/1+0.06S)$
P^2+NDS		○	○	○	×	$50 \times (0.04S/1+0.04S)$ $\times (0.02S/1+0.02S)$
$P+NDS$		○	○	○	×	$50 \times (0.04S/1+0.04S)$
$D+NDS$		×	×	×	×	20
$I+NDS$		×	×	×	×	$50 \times (1+0.001S/S+0.01)$
I^2+NDS		×	×	×	×	$50 \times (1+0.001S/S+0.01)^2$

(1) ○は安定, ×は不安定を示す。

(2) $-P^2$, $-P^2$ など伝達関数の符号を逆にしたものは全て不安定となる。(3) モデル系統 A, $N_G=0.81$ pu, $R_E=0.045$ pu

第3表 各種 TRS と固有値の変化

Table 3. The changing of each eigenvalue with various kinds of TRS.

伝達関数	固有値の種類(第4表参照)			
	ND	TR	CNDS	HT
なし	$-0.025 \pm j0.29$	$+0.018 \pm j0.29$	—	$-0.001 \pm j0.024$
NDS	$-0.042 \pm j0.32$	$+0.008 \pm j0.30$	$-0.003 \pm j0.076$	$-0.003 \pm j0.024$
P^2+NDS	$-0.042 \pm j0.31$	$-0.0008 \pm j0.30$	$-0.003 \pm j0.076$	$-0.12 \pm j0.016$
P^2+NDS	$-0.043 \pm j0.31$	$-0.002 \pm j0.30$	$-0.003 \pm j0.076$	$-0.11 \pm j0.039$
P^1+NDS	$-0.044 \pm j0.31$	$-0.004 \pm j0.30$	$-0.003 \pm j0.075$	$-0.003 \pm j0.027$

(注) 入力信号は $-\Delta\omega_G$ で, *は不安定な根であることを示す。他の件は第2表と同じ。

TRS 伝達関数

$$=K_{TRS} \frac{0.04S}{1+0.04S} \frac{0.02S}{1+0.02S} \dots\dots\dots (9)$$

第8図に $\Delta\omega_G$ 信号の場合の固有値の根軌跡を示す。ここに示されたように, 固有値の種類により, 利得に対する固有値の変化様相が異なり, ある根は安定方向へ, 別の根は不安定方向に移動するので, 全ての根が安定である制御系を選定する必要がある。

第4表は, 利得 K_{TRS} を大きくした場合の, 各固有値の動きを示すものである。ここに固有値の種類を表わす名称は, 固有値の性質を表わすために, 根軌跡の動きよりつけたものである。

このような固有値の動きを考慮して, 全ての根が安

No.	NDS 利得	TRS 利得	判定
0	0	0	×
1	500	0	×
2	"	25	×
3	"	100	○
4	"	250	○
5	"	500	×

第8図 TRS の利得変化による固有値の軌跡
Fig. 8. The loci of eigen-values where the gain value of TRS is increased.

第4表 利得を大きくしたときの各固有値の動き

Table 4. Influence of the TRS over each eigenvalue with increasing the gain value of the TRS.

記 号	固有値の種類	ΔP 入力	$\Delta\omega_G$ 入力	$\Delta\omega_T$ 入力
ND	自己励磁の根	○	$\Delta(\times)$	$\Delta(\times)$
TR	軸ねじれ共振の根	○	○	○
CNDS	NDS 制御系による根	Δ	Δ	Δ
CTRS	TRS 制御系による根	×	×	Δ
HT	ハンチングの根	$\Delta(\times)$	$\Delta(\circ)$	$\Delta(\times)$

(注) ○: 安定化に変化, Δ : ほとんど変化せず, $\times$ 不安定化に変化。
() 内の○は若干安定化, $\times$ は若干不安定化を示す。
固有値の名称は, 根の動きなどより適当につけたものである。

第5表 全ての根が安定となる利得の範囲

Table 5. The proper values of the gain-value of the TRS which make every oscillation to damp.

入力信号の種類	ΔP 入力	$\Delta\omega_G$ 入力	$\Delta\omega_T$ 入力
利得 K_{TRS} の範囲	25~250	40~350	10~250

定となる利得の範囲を求めると第5表のようになる。即ち, ΔP , $\Delta\omega_T$ の最適利得は 100 程度, $\Delta\omega_G$ 入力の場合は 200 程度である。

なお, TRS の選定には, 発電機の持っている他の制御系との協調, 及び動態安定度, 過渡安定度に及ぼす影響などを考慮する必要がある。

〈4・3〉 軸ねじれ共振現象の抑制効果 モデル系統 A に対し, 軸ねじれ共振現象の抑制効果を NDS 及び TRS について計算し, 第9図の結果を得た。(a)

第 9 図 モデル系統 A における各抑制装置の効果

Fig. 9. Stability borderlines for SSR in the model system with and without NDS and TRS.

は定励磁の場合、(b)は NDS(伝達関数は第 2 図と同じ)でありの場合、(c)は TRS 有りの場合の安定判別曲線である。TRS の入力信号は $\Delta\omega_G$ で伝達関数は (10) 式に示すものを使用した。

TRS 伝達関数

$$= 200 \frac{0.04S}{1+0.04S} \frac{0.02S}{1+0.02S} \dots\dots\dots (10)$$

NDS 使用時の不安定領域は定励磁の場合とほとんど同じであるのに対し、TRS 使用時には不安定領域

がなくなっている。これは軸ねじれ共振現象が有効電力制御の支配を受け易いことを示しているものと見られる。

軸ねじれ共振現象は、現象が拡大発散するのが問題であるばかりでなく、減衰が遅いことも軸疲労の面で無視できないため、第 6 図 X, Y で示す不安定領域に非常に近接した 2 点を選んで、直列コンデンサの短絡 (0.08 秒間)、再入をしない、系統じょう乱発生時の過渡軸トルク振動に対する効果をモデル系統 B で計算した。

第 10 図はケース X の場合で、タービン・発電機間の軸共振周波数に近く、タービン・発電機間のトルク変動 (T_{GT}) が大きくなっている。この場合には TRS による抑制効果は非常に大きいですが、NDS による抑制効果はほとんど期待できない。これに対し第 11 図はケース Y の場合で、発電機・励磁機間の軸共振周波数に近く、発電機・励磁機間のトルク変動 (T_{GE}) が大きくなっている。この場合には NDS の効果が認められるが、逆に TRS の効果が小さくなっている。これは、ここで検討した TRS が、発電機・励磁機間の軸振動に対し、タービンの蒸気入力进行抑制するという間接的な形をとっているためと考えられる。

第 7 図に P_c で示すような、電気的エネルギー蓄積装置の制御により、発電機出力トルク変動を小さくすれば、このような現象に対しても、有効な抑制効果を示すであろう。

〈4.4〉具体化の構想 タービンの機械入力を高速で制御することは、現用の調速機を対象に考える

第 10 図 過渡振動に対する NDS, TRS の効果 (10GVA ベース, 計算条件は第 5 図ケース X)

Fig. 10. Transient oscillations in the model system (case X in Fig. 5.) with and without NDS and TRS.

第 11 図 過渡振動に対する NDS, TRS の効果 (10GVA ベース, 計算条件は第 5 図ケース Y)

Fig. 11. Transient oscillations in the model system (case Y in Fig. 5) with and without NDS and TRS.

第 12 図 各種軸ねじれ共振現象抑制装置の原理図

Fig. 12. The principle diagram of various kinds of TRS equipment.

と、その時間遅れ特性より考えて効果がない。

従って、今後の技術革新により、高速制御の調速機制御装置が開発されれば、これを適用すれば良いが、これが困難な場合には、次のような高速制御が、比較的容易に実施できる方式として考えられる。

即ち、第 7 図に ΔT_M で示すものの具体化案について、その 1 例を第 12 図(a)に示す。これは、タービン (T) に直結して、小容量の制御用同期発電機 (SG) を接続し、その出力端に抵抗器を接続し、この SG の出力

電圧を、高速の界磁制御装置で制御する方式である。

又、第 7 図に P_c で示すものについては、第 12 図 (b)~(d)に、その具体的な原理図を示す。(b)は、リアクトル・コンデンサ・バッテリー (蓄電池) をエネルギー蓄積装置として利用し、(c)は変動分だけを抵抗で消費するもの、(d)は直流連系がある場合に、それを利用して、直流連系側の変換電力を高速に制御するものである。

これらの抑制装置を、実際に開発するには技術的に検討すべき点が多くあり、又、経済性も考慮の上、適当な方式を選定する必要がある。又、第 12 図 (e) に示すような、他の研究者より提案されている方式⁽⁵⁾との比較を行なう必要もあるが、これらは別の機会に検討することにする。

5. む す び

直列コンデンサ補償系統では、電気系の振動周波数と機械系の振動周波数が近づくと、非常に危険であることは、1970 年アメリカにおける事故発生⁽³⁾以来、クローズアップされて来た問題で、種々の研究が行なわれている^{(4)~(10)}。

本稿はこの軸ねじれ共振現象の抑制方式を研究したもので、次のような点を明らかにした。

- (1) 軸ねじれ共振現象を解析する方法を開発し、既に報告されている論文⁽⁴⁾と一致する結果を得た。
- (2) 同期機の界磁電圧制御 (NDS)⁽¹⁾⁽²⁾は、電気系の自己励磁現象に対しては、抑制効果を持つ。しかし、この NDS は、軸ねじれ共振現象に対しては、電

気系と機械系の結合が弱い系統条件でのみ、効果を発揮することが判った。

(3) 電気系と機械系の結合が強い場合の抑制方式としては、 P , ω_G , ω_r を入力信号として、発電機の機械入力、又は、電気出力を直接制御する方式(TRS)を考案した。

(4) 500kV モデル系統により、TRS による軸ねじれ共振現象の制御効果を計算した結果、軸ねじれ共振による不安定性領域を、ほとんど安定化させることができることを、解析により確認した。又、系統じょう乱による軸トルク振動も、TRS の採用により、早く減衰させることができることを、シミュレーション計算結果で明らかにした。

(5) TRS の具体化は、高速の調速機が開発されれば、容易であるが、これが困難な場合の案として、「発電制御」、「負荷制御(1),(2)」、「並列直流送電」を提案した。しかし、これらの具体化には今後の研究開発が必要である。

最後に、本研究の解析手法の開発に御協力頂いた福井工業高等専門学校の守川稔助教授に感謝する。

なお、界磁制御により自己励磁現象の抑制装置⁽¹⁾⁽²⁾は、東京電力(株)と三菱電機(株)、日新電機(株)グループとの間で行なわれた「50万V 大容量長距離送電の安定技術に関する大容量直列コンデンサ方式」についての共同研究の成果である。

(昭和50年7月17日受付)

文 献

- (1) Saito, et al.: IEEE PES Winter Meeting No. T 75, 180-5 (1975-2)
- (2) 齊藤, 他: 昭 50 電気学会全国大会 No. 993
- (3) S. Goldberg, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. **PAS-92**, 1649 (1973)
- (4) C. Concordia, et al.: *ibid*, **PAS-92**, 1688(1973)
- (5) C. Concordia, et al.: American Power Conference(1973-5)
- (6) R. A. Hedin, et al.: *ibid* (1973-5)
- (7) L. A. Kilgore, et al.: *ibid* (1973-5)
- (8) E. R. Taylor, et al.: CIGRE No. 21-29 (1974-8)
- (9) S. Goldberg, et al.: IEEE PES Winter Meeting No. C-73, 135-1 (1973-2)
- (10) D. N. Walker, et al.: IEEE PES Winter Meeting No. T 75, 176-3 (1975-2)
- (11) C. Concordia, et al.: AIEE Trans. Power Apparatus Syst. **PAS-60**, 116 (1941)