UDC 621.311.1.016.352: [621.314.25+621.319.4.062.2]

論 文

51-B17

直列コンデンサおよび移相器を用いた過渡安定度の向上

新潟大学 貝 津 弘 幸
大阪府立大学 谷 口 経 雄

1. ま え が き

電力系統の安定度向上策については古くから幾多の方法論があるが⁽¹⁾、近年技術開発の進展に伴い、その一つである直列コンデンサを用いた安定度対策が一部実用化されている⁽²⁾。

直列コンデンサを用いた安定度向上策の考え方には定態および動態安定度の大幅な向上を目的とした直列コンデンサ補償方式⁽³⁾⁽⁴⁾と、過渡動揺時、その動揺を直列コンデンサの投入により最小時間で抑制せんとする異常時投入方式、いわゆる Bang-Bang 制御方式⁽⁵⁾⁽⁶⁾等がある。最近、移相器のそう入により過渡安定度を向上させる制御方式⁽⁷⁾が報告されている。この方法は移相角制御によって等価的に系統の安定領域を移行させて安定度を向上させるところに特徴があり、安定度向上の程度については、直列コンデンサ補償方式のそれに比べくもないが、故障発生後の制御過程における回路変更に伴う電力潮流変化は前二者の方式に比して比較的小範囲に抑制できる利点がある。電力潮流変化は回路内の電力・需給バランスを損ない、電圧あるいは周波数変動となり系統負荷に対しても当然何らかの影響を与えることになるので、これが大きるとき安定度制御過程において、たとえば回路切換えのタイミングあるいは Bang-Bang 制御系における最適制御量設定に修正を加えねばならないという煩雑さが生じる。

筆者らは、系統の過渡動揺時、回路変更に伴う電力潮流変化を極力抑制し系統負荷に及ぼす過渡動揺の影響を軽減するための一方式として、並行 2 回線送電線路で連係される系統を対象に、直列コンデンサおよび移相器それぞれの特徴を用いた安定度向上策を提案し、その解析および検討結果について報告する。本方式は、送電線路故障時、まず故障回線除去および直列コンデンサ投入によって故障発生後初期の急激な過渡動揺を抑え、次に移相器をそう入してその移相角制御によって順次動揺を抑制せんとするもので、その特徴の概要は次のとおりである。

(1) 直列コンデンサは故障回線シャ断によって変化する系統の回路リアクタンスを補償して、故障前の回路リアクタンスと等しくなるものを設定する。これは故障除去即時再閉路を等価的に行なうことに対応させるものであり、これによって系統の動揺を抑制することとし、故障前の回路に復帰させる時間（現用の再閉路時間）については第二義的な問題として取り扱うことを可能にする。

(2) 移相器そう入時において、移相角切換え操作（以下移相操作と呼称）による系統の発電機出力変動幅は他の方式に比較するとはるかに小さいので、系統全体に及ぼす影響を軽減するとともに、系統負荷の安定度に及ぼす影響も減殺され過渡安定度向上のための制御をより有効ならしめている。

なお、移相器そう入による基本的移相操作は系統の発電機間相差角および角速度偏差を計測し、これに基づいて移相角制御あるいは回路切り換えの判断指令を行なうものであり、段階的移相操作とブロック移相操作の方法を提案している。前者は周波数変動を小範囲に抑制できるとともに制御機構も論理判断回路で構成

Improvement of Power System Transient Stability Using Series Capacitor and Phase Shifter. By Hiroyuki Kaizu, Member (Faculty of Engineering, Niigata University) & Tsuneo Taniguchi, Member (Faculty of Engineering, University of Osaka Prefecture)

貝津弘幸：正員，新潟大学工学部電気工学科
谷口経雄：正員，大阪府立大学工学部電気工学科

できる利点があり、後者は制御機構に演算回路を付加する必要はあるが、短時間で動揺を抑制できる利点がある。

2. 過渡安定度制御の基本原理解および動作

直列コンデンサおよび移相器（移相変圧器）の組合せによる安定度制御の基本原理解とその動作について本章では簡単化した1機無限大母線系統を対象に論じる。

〈2・1〉 例題系統 1 第1図に示す例題系統1において、

$\dot{E}_1$: 発電機 G_1 の過渡リアクタンス背後電圧（大きき一定）

$\dot{E}_2$: 無限大母線電圧（基準）

δ : $\dot{E}_2$ 基準による $\dot{E}_1$ の相差角

u : 直列コンデンサのリアクタンス（以下、制御量 u と呼称）

T_{r1} : 移相変圧器（移相角を α で表わし、以下制御量 α と呼称）

CB_u : 制御量 u の投入あるいは除去のためのしゃ断器

CB : 故障回線除去あるいは再投入のためのしゃ断器

とする。

〈2・2〉 制御の方法 いま、第1図の(F)点に三線地絡故障(3LG)が発生した場合を考える。このとき本安定度制御の方法は、相差角 δ および角速度偏差 $\dot{\delta} = d\delta/dt$ (ただし、 t : 時間) の値を計測して、次のような手順によって安定度の向上をはかるものである。なお、 $\dot{\delta}$ の検出量 $\hat{\delta} = 0$ については

$\hat{\delta}_{+0}$: $\dot{\delta} > 0$ から $\dot{\delta} < 0$ に変化したときの $\hat{\delta} = 0$

$\hat{\delta}_{-0}$: $\dot{\delta} < 0$ から $\dot{\delta} > 0$ に変化したときの $\hat{\delta} = 0$

なる記号で区別して用いている。

(1) 故障発生後 t_0 秒で故障回線しゃ断(CB 開路)および制御量 u を投入 (CB_u 開路)。この状態を以下制御 u と呼ぶことにする。

(2) 制御 u において $\hat{\delta}_{+0}$ を検出した時点で移相操作により所望の移相角 α をそ入する。この状態を以

下制御 α と呼ぶことにする。

(3) 制御 u および制御 α を経て系統動揺が抑制され、計測量 $\hat{\delta}$ により故障前の安定平衡状態（平常運転の状態）に回復したと判断した時点 ($\hat{\delta} = 0, |\hat{\delta} - \hat{\delta}_s| \leq \Delta\delta$ を検出、ただし、 $\hat{\delta}_s$: 平常時の相差角、 $\Delta\delta$: あらかじめ与える小さな正の値) で移相操作を終了（移相角除去）し、除去回線再開路および制御量 u 除去を行なう。

なお、上記(2)から(3)に至る制御手順には種々の操作方法が考えられるので、その詳細については〈2・4〉節で述べる。また、制御 α を開始してから終了までに要する時間を、以下 τ_α で表わす。

以上の方法の動揺解析式は次のとおりである。まず系統の相差角動揺方程式を

$$\frac{M_1}{\omega} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m1} - P_1 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_1 : 発電機 G_1 の電氣的出力、 P_{m1} : G_1 の機械的入力（一定）、 M_1 : G_1 の慣性定数、 ω : $2\pi f$ (ただし、 f : 定格周波数、本文では 60Hz とする)

なる近似式で表わす。

上式において電氣的出力 P_1 は系統状態に応じて次のように表わされる。

平常時(故障発生前の回路); 平常時回路のリアクタンスを X として、

$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \dots\dots\dots (2)$$

故障中; 本例の故障想定は1回線送電線路上 G_1 側高圧母線の 3LG であるから P_1 は

$$P_1 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

制御 u ; 故障回線しゃ断の状態(1回線送電)における回路の全リアクタンスを x とすると

$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{x - u} \sin \delta \dots\dots\dots (4)$$

制御 α : 移相操作による電圧比の変化および変圧器漏れリアクタンスの変化を簡単のため無視すると

$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{x - u} \sin(\delta - \alpha) \dots\dots\dots (5)$$

となる。なお、上述の各系統状態における相差角と角速度偏差 $\dot{\delta}$ の関係は(1)式の両辺に $2(d\delta/dt)$ を乗じて時間積分することにより

$$\dot{\delta}^2 = \frac{2\omega}{M_1} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_{m1} - P_1) d\delta + (\dot{\delta}^2)_{\delta=\delta_0} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 δ_0 : 現在の系統状態への変更直前の相差角

〈2・3〉 制御量 u の設定 制御量 u の一般的な設

第1図 例題系統 1

Fig. 1. Power system model 1.

定法は、第1章に述べたように故障回線しゃ断によって増加した回路リアクタンスを補償して、故障前の回路リアクタンスに等しくなるように設定するものである。一般に送電線の抵抗分はリアクタンス分と比較して小さいので、系統は故障前とほぼ等しい回路条件を満たすことになる。このように u の値を設定することによって得られる利点は、故障発生による系統の急激な初期動揺を抑制する効果とともに、再閉路時間を安定度向上という観点から切り離して第二義的な問題として扱うことを可能にする点にあると考える。したがって、単に故障前の回路に復帰させるという意味における再閉路は、消イオン時間を考慮して行なわねばならないのはもちろんであるが、むしろこの場合、系統動揺が抑制された時点で余裕をもって実行すればよいこととなる。

第2図は故障発生から制御 u を経て δ_{+0} を検出するまでの電力-相差角曲線および δ - $\dot{\delta}$ 位相平面(以下単に位相面と呼称)を示し、図において

δ_{CL} : 故障発生後 t_u 秒(故障回線除去および制御量 u 投入)における相差角

δ_{max} : 制御 u において δ_{+0} を検出した時点の相差角

第2図 制御 u の電力-相差角曲線および位相面

Fig. 2. Power-angle curve and phase-plane diagram of control u .

第1表 系統機器定数および初期条件
(例題系統1)

Table 1. System parameters and initial conditions. (Power system model 1)

発電機 G_1	過渡リアクタンス	0.2017	
	慣性定数	14.4(s)	
移相変圧器のリアクタンス		0.0756	
送電線路 (1 回線) のリアクタンス		0.5581	
E_1	E_2	$\delta_s(\text{rad})$	P_{m_1}
1.3083	1.0	0.7543	1.6102

注: 200 MVA, 250 kV 基準による p. u. 値

である。このとき面積 a_1 および a_2 の間には $a_1=a_2$ の関係がある。なお、系統機器定数および初期条件は第1表のとおりであり、 t_u として、以後0.1sを例に計算を行なっている。

〈2.4〉 制御量 α の設定および移相操作の方法

(1) ブロック移相操作と最適移相角 この移相操作の基本的な考え方は1回の移相角そう入によって系統動揺を抑制せんとするものであって、第2図に示した制御 u に続く制御 α において最適移相角 α_{opt} は、第3図の電力-相差角曲線で示すように面積 a_3 および a_4 の間に $a_3=a_4$ の等式条件を成立させる移相角であり、計測量 δ_s および δ_{max} に対して α_{opt} に関しては

$$\begin{aligned} & \int_{\delta_s}^{\delta_s+\alpha_{opt}} [P_{m1} - P_e \sin(\delta - \alpha_{opt})] d\delta \\ &= \int_{\delta_s+\alpha_{opt}}^{\delta_{max}} [P_e \sin(\delta - \alpha_{opt}) - P_{m1}] d\delta \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $P_e = E_1 E_2 / (x - u)$

が成立する。上式を δ について積分し、 $P_{m1}/P_e = \sin \delta_s$ なることを考慮して整理すると

$$k_1 \cos \alpha_{opt} + k_2 \sin \alpha_{opt} - k_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここに

$$\begin{cases} k_1 = \cos \delta_s - \cos \delta_{max} \\ k_2 = \sin \delta_s - \sin \delta_{max} \\ k_3 = (\delta_{max} - \delta_s) \sin \delta_s \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。このとき $0 < \delta_s < \delta_{max} < \pi - \delta_s$ の範囲で $\alpha_{opt} (\delta_s < \delta_s + \alpha_{opt} < \delta_{max})$ について解くと

第3図 最適移相角 α_{opt} によるブロック移相操作の電力-相差角曲線および位相面

Fig. 3. Power-angle curve and phase-plane diagram of block phase-shift by optimal shift-angle α_{opt} .

$$\alpha_{\text{opt}} = \sin^{-1} \frac{k_2 k_3 + k_1 \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}}{k_1^2 + k_2^2} \dots (10)$$

で求められる。本移相操作の制御機構は、 $\hat{\delta}=0$ の検出回路と、計測量 $\hat{\delta}$ および δ_{max} から α_{opt} 算定の演算回路が必要となる。

本ブロック移相操作による位相面の軌跡は第3図に示すとおりである。本法は次項で述べる段階的移相操作の場合に比し周波数変動が大となるが、短時間で動揺を抑制できる利点がある。

(2) 段階的移相操作 周波数変動幅を小範囲に抑制しながら制御 α を実行する方法として段階的移相操作が考えられる。この方法は適当な間隔に移相角を設定したタップを順次切換えていく移相操作であって、タップ移相角設定の違いにより

(A) 等間隔タップ移相角設定

(B) 不等間隔タップ移相角設定

の場合を検討する。

本移相操作の一例として、次のようなタップ選定の方法を考察する。いま、設定タップの移相角を α_i ($i=1, 2, \dots, n$) とすれば、設定値における相差角は

$$\delta^{(i)} = \delta_s + \alpha_i \dots \dots \dots (11)$$

ただし、 $i=0$ のとき $\alpha_0=0, \delta^{(0)}=\delta_s$ である。

本操作のタップ切換えは、相差角 δ の区間 $\delta_s < \delta < \pi - \delta_s$ において $\hat{\delta}_0$ を検出したときの相差角を $\delta_{\text{max}} \textcircled{1}$ で表わし、以後制御 α によって $\hat{\delta}_0$ を検出する順序に従がい、 $\delta_{\text{max}} \textcircled{2}, \delta_{\text{max}} \textcircled{3}, \dots$ で表わすことにする。したがって、 k 回目のタップ切換え時の相差角が $\delta_{\text{max}} \textcircled{k}$ となるとき、タップを次のように選定させるものとする。

(i) $\delta^{(i-1)} < \delta_{\text{max}} \textcircled{k} \leq \delta^{(i)}$ においては $(i-2)$ 番目のタップ α_{i-2} を選択。ただし、 $i \geq 2$ 。

(ii) $\delta_{\text{max}} \textcircled{k} \leq \delta^{(i)}$ においては、タップ切換え終了。すなわち移相角を除去する。なお、 $\delta_{\text{max}} \textcircled{k} > \delta^{(n)}$ においては n 番目のタップ α_n を選択。

以上によるタップ選定法を $n=10$ として位相面で例示すると第4図のように表わすことができる。

第4図 位相面によるタップ選択の例

Fig. 4. The example for selecting the tap by phase-plane diagram.

さて、タップ移相角設定の例として次のような場合を考察する。

(a) 等間隔タップ設定に対しては、タップ間移相角を $\Delta\alpha$ とおいて、 $\Delta\alpha=5^\circ$ ステップに設定する。たとえば、 m 番目のタップ移相角は $\alpha_m=5^\circ \times m$ となる。

第2表 タップ番号とその移相角

Table 2. Tap number and its shift-angle.

タップ番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
移相角(度)	2	3	5	7	10	15	20	30	40	60

第5図 等間隔タップ移相角設定 ($\Delta\alpha=5^\circ$) による段階的移相操作の電力-相差角曲線および位相面

Fig. 5. Power-angle curve and phase-plane diagram of incremental phase-shift with the tap setting equal shift-angle ($\Delta\alpha=5^\circ$).

第6図 不等間隔タップ移相角設定(第2表)による段階的移相操作の電力-相差角曲線および位相面

Fig. 6. Power-angle curve and phase-plane diagram of incremental phase-shift with the tap setting unequal shift-angle (Table 2).

(b) 不等間隔タップ設定としては、第2表に示すように移相角を設定する。

上記、(a)および(b)のタップ設定による段階的移相操作の電力-相差角曲線および位相面軌跡を第5図および第6図に示す。(a)の場合、 $\Delta\alpha$ を小さくすることによって周波数変動幅および電力潮流変動幅を小範囲に抑える制御 α が可能となるが、反面 $\delta_{\max}$ から δ_s へ相差角を移行させるに要する操作時間はタップの切換え回数が多くなるのでやや長くなる。(b)の場合の特徴は、(a)の場合より移相操作の始めは周波数変動幅および電力潮流変動幅が大きい、制御 α 終了後に残る動揺を小さくできることである。動揺が抑制されたと判断するのは、 $\dot{\delta}=0$ 、 $|\delta-\delta_s| \leq \Delta\delta$ を検出した時点であったが、この場合 $\Delta\delta=\alpha_1$ である。

本操作の制御機構は、 $\dot{\delta}=0$ の検出回路と、平常時の相差角 δ_s と過渡動揺時の相差角の比較回路等の論理回路構成で行なえ、特別な演算回路は必要としない。

なお、(1)に示したブロック移相操作は移相角連続調整可能な理想的な移相器を想定した論議であって、タップ切換えにより移相角をそう入する場合は α_{opt} 近傍のタップを選択することとなり、目標値 δ_s の近傍に相差角をまず移行させ、目標値からの偏差が許容値 $|\delta-\delta_s| \leq \Delta\delta$ を満足しない場合の修正に、段階的移相操作のそれを用いる併用方式をとることが考えられる。

3. 一般2機系統への適用

安定度制御による回路変更において電力潮流変化が大なるとき、系統負荷に影響を与えるとともに、その制御効果にも何らかの影響をもたらすものと考えられる。

本章では次節に示す誘導電動機のような回転機負荷を含む一般2機系統を対象に本移相角制御の適用の可否について検討を加える。

〈3.1〉 例題系統2 第7図に示す例題系統2において、系統負荷構成は一例として、誘導電動機負荷IM 60% および定インピーダンス負荷 Z_{LOAD} 40% からなるものとする。図において

$\dot{E}_2$: 発電機 G_2 の過渡リアクタンス背後電圧 (大きき一定, 基準)

$\dot{V}$: 負荷点電圧

T_{r2}, T_{r3} : G_2 側変圧器および3巻線変圧器

であり、他は例題系統1の場合と同様である。なお、故障発生後の系統動揺解析は付録に示す計算式で実行する。系統機器定数および初期条件はそれぞれ第3表および第4表に示した。

第7図 例題系統2

Fig. 7. Power system model 2.

第3表 系統機器定数 (例題系統2)

Table 3. System parameters. (Power system model 2)

発 電 機	過渡リアクタンス	G_1	0.2017	G_2	0.1042	
	慣性定数		14.4(s)		18.82(s)	
変 圧 器	リアクタンス	T_{r1}	0.0756	T_{r2}	0.0722	
		T_{r3}	1次	0.0290	2次	0.0087
			3次	0.0058		
送電線路 (1回線)	抵 抗	350 km	0.0622	25 km	0.0166	
	リアクタンス		0.5581		0.1070	
誘導電動機 負荷	抵 抗	1次	0.0135	2次	0.0135	
	自己リアクタンス		1.2001		1.1923	
	相互リアクタンス	1.1597				
	慣性定数	7.26(s)				

注: 200 MVA, 250 kV 基準による p.u. 値

第4表 初期条件 (例題系統2)

Table 4. Initial conditions. (Power system model 2)

E_1	E_2	V	δ_s (rad)	P_{m1}	P_{m2}	s_0
1.3083	1.0910	1.0	0.5001	1.5707	1.2112	0.0241

注: (1) P_{m1}, P_{m2} : G_1 および G_2 の機械的入力

s_0 : 誘導電動機負荷のスリップ

(2) 200 MVA, 250 kV 基準による p.u. 値

系統の初期の出力配分は第4表の P_{m1}, P_{m2} の値から明らかのように、本モデル系統は負荷側系統 (154 kV 系) が 275 kV 系の故障に対し直ちに影響をうけるような過こくな系統構成であるが、これは系統負荷の影響を顕著に引き出し本制御法の適否を検討したいがためである。

〈3.2〉 段階的移相操作の場合 前章において、本操作方式によれば移相角制御に移行してからの電力潮流変動幅は比較的小範囲に抑制できることから、系統内の電圧変動幅もそれに伴って抑制され、系統の電圧、周波数変動の負荷に及ぼす影響の軽減が予想される。第8図は不等間隔タップ移相角設定による制御例の位相面軌跡を示す。タップ切換えは、〈2.4〉節の

第 8 図 段階的移相操作を用いた制御の位相面
Fig. 8. Phase-plane diagram of the control with incremental phase-shift.

{2}における方法、タップの移相角は第2表による。なお、以下に述べる理由で、移相角除去の判定は同一タップが2回以上指定された場合とした。

一般2機系統を対象とすると、誘導電動機のような回転機負荷を含むので、動揺抑制後の安定平衡状態における相差角は一般に故障前の平常運転時の相差角 δ_0 と異なってくる。これは誘導電動機の機械的出力特性に起因するもので、本例では機械的出力一定と仮定しているので初期状態と異なる電圧、スリップで出力一定が満足されるからである。最終的には一次変電所における電圧調整により初期状態の δ_0 に復帰されるべきものであるが、本制御過程においては第8図に示されるように、一時的には別の相差角で安定状態に落ち着く。以上は過こくな系統構成で負荷特性考慮のもとに段階的移相操作を行なったが、本制御法で十分対応できることがわかる。

〈3・3〉 ブロック移相操作の場合 系統負荷の応答特性を考慮する場合、系統の駆動点および伝達アドミッタンスの値は動揺時変化するもので、前章で述べた最適移相角 α_{opt} の算定は容易ではない。しかしながら何らかの方法によって α_{opt} に相当する値……本章では以後この値を α_{opt}' とする……を指示できるならば、短時間で動揺を抑制せんとする本操作のメリットが生かせる。そこで、 α_{opt}' の算定法として、制御 α の開始時、すなわち δ_{+0} を検出した時点における系統負荷状態を等価アドミッタンスで表現し、この値を以後不変と仮定して得られる電力特性式をもとにして、〈2・4〉節の(1)の場合と同様の手法により α_{opt}' を求めてみた。いま、 δ_{+0} 検出時点における負荷点電圧を V 、有効電力を P_3 および無効電力を Q_3 とすると、系統負荷の等価アドミッタンス $\dot{Y}_3$ は

$$\dot{Y}_3 = (P_3 + jQ_3)/V^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 Q_3 : 遅れのととき負符号

で表わされる。

そこで、 $\dot{Y}_{z11}$, $\dot{Y}_{z22}$ をそれぞれ $\dot{E}_1$, $\dot{E}_2$ から系統をみたときの駆動点アドミッタンス、 $\dot{Y}_{z12}$ を伝達アドミッタンスとして

$$\dot{Y}_{zij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (i, j=1, 2) \quad \dots\dots\dots (13)$$

とおく。このとき、発電機 G_1 および G_2 の電氣的出力 P_1 および P_2 は(付1), (付2)式を参照して、

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= G_{11}E_1^2 + E_1E_2(G_{12}\cos\delta + B_{12}\sin\delta) \\ P_2 &= G_{22}E_2^2 + E_1E_2(G_{12}\cos\delta - B_{12}\sin\delta) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

で表わされる。いま(付3)式の第1式を変形すると、

$$\frac{\sqrt{M_1M_2}d^2\delta}{\omega dt^2} = \frac{M_2P_{m1} - M_1P_{m2}}{\sqrt{M_1M_2}} - \frac{M_2P_1 - M_1P_2}{\sqrt{M_1M_2}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

で表わすことができる。

そこで、等価的な電氣的出力 P および機械的入力 P_m を $M = \sqrt{M_1M_2}$ として

$$\left. \begin{aligned} P &= (M_2P_1 - M_1P_2)/M \\ P_m &= (M_2P_{m1} - M_1P_{m2})/M \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

で定義すると、 P は(14)式を用いて

$$P = P_0' + P_e'\sin(\delta - \phi) \quad \dots\dots\dots (17)$$

のように表わすことができる。ここに

$$\left. \begin{aligned} P_0' &= (M_2G_{11}E_1^2 - M_1G_{22}E_2^2)/M \\ P_e' &= E_1E_2\sqrt{B_{12}^2(M_1 + M_2)^2 + G_{12}^2(M_1 - M_2)^2}/M \\ \phi &= \tan^{-1} \frac{G_{12}(M_1 - M_2)}{B_{12}(M_1 + M_2)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (18)$$

である。

さて、(17), (18)式で表現した δ_{+0} 検出時の系統において、制御 α に対する相差角の見掛け上の目標値……以後 δ_s' とする……は $P = P_m$ として

$$\delta_s' = \phi + \sin^{-1}(P_m - P_0')/P_e' \quad \dots\dots\dots (19)$$

であり、(7)式と同様にして α_{opt}' を次式より解く。

$$\begin{aligned} &\int_{\delta_s'}^{\delta_s' + \alpha_{opt}'} \{P_m - [P_0' + P_e'\sin(\delta - \phi - \alpha_{opt}')] \} d\delta \\ &= \int_{\delta_s' + \alpha_{opt}'}^{\delta_{max}} \{ [P_0' + P_e'\sin(\delta - \phi - \alpha_{opt}')] - P_m \} d\delta \quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

上式は δ 以外を定数と仮定しているから δ について積分し、(10)式と同様にして $0 < \delta_s' < \delta_{max} < \pi - \delta_s'$ の範囲で α_{opt}' ($\delta_s' < \delta_s' + \alpha_{opt}' < \delta_{max}$) について解くと

$$\begin{aligned} &\alpha_{opt}' \\ &= -\phi + \sin^{-1} \frac{k_2'k_3' + k_1'\sqrt{k_1'^2 + k_2'^2 - k_3'^2}}{k_1'^2 + k_2'^2} \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

第9図 α_{opt}' を用いた制御による過渡動揺の計算結果

Fig. 9. Calculated results of transient swing by the control with shift-angle α_{opt}' .

で求められる。

ここに、 $(P_m - P_0')/P_s' = \sin(\delta_s' - \phi)$ を用い

$$\left. \begin{aligned} k_1' &= \cos \delta_s' - \cos \delta_{max} \\ k_2' &= \sin \delta_s' - \sin \delta_{max} \\ k_3' &= (\delta_{max} - \delta_s') \sin(\delta_s' - \phi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

である。

例題システム2に対し、本手法によって導出した α_{opt}' を用いた制御例の計算結果を第9図に示す。図において、 V は負荷点電圧、 P_L は負荷の全電力である。図によると、移相角そう入時の P_1, P_2, P_L および V の変化は小さく、また、制御 α によって負荷への電力 (P_L) 供給が一様に回復し、その際の負荷点電圧 (V) の変動も小さいことがわかる。このことから、 δ_{+0} 検出時の系統負荷状態をもとにして、(12)~(22)式の手法によって算定した α_{opt}' は α_{opt} 近傍の値を与える一方法と考える。このとき、(16)式で表現した等価電力を用いた電力-相差角曲線と位相面軌跡を示すと第10図のように表わされる。図によると、制御 α の電力-相差角曲線は、 δ_{+0} 検出時点の等価アドミタンスをもとに求めた(17)式の電力特性を δ 軸について α_{opt}' だけ移行した曲線に極めてよく合致し、相差角を見掛け上の目標値 δ_s' の近傍にまず到達させ、動揺を十分抑制できることがわかる。

以上の手法は必ずしも最良のものとはいえず、より

第10図 α_{opt}' を用いた制御の電力-相差角曲線および位相面

Fig. 10. Power-angle curve and phase-plane diagram of the control with shift-angle α_{opt}' .

適切な α_{opt}' の算定が望ましいというまでもないが、本手法は δ_{+0} 検出時の情報量で、直接算法の可能な点および系統負荷の応答特性に対応する相差角の目標値 δ_s' を与える点で実用的と考える。

4. む す び

以上により本安定度向上方式は、電力系統の過渡動揺状態の計測量（相差角 δ 、角速度偏差 $\deltȧ$ 等）を用いて過渡安定度を向上させる有効な対策と考える。

本方式を要約すると次のとおりである。

- (1) 本方式の基本的な考え方は、回路切換えによる過渡時の電力潮流変化を極力抑制せんとするものであり、これは動揺時、系統負荷特性の影響を考慮すべき一般2機系統に対しても有効な対策と考える。
- (2) 回路切換えのタイミングについて
 - (i) 直列コンデンサ投入のタイミングは故障回復直後と断時とする。
 - (ii) 移相角そう入および移相角タップ切換えは角速度偏差 $\deltȧ$ が零となる時点とする。
- (3) 移相角切換え操作に対しては、基本的には
 - (i) 周波数変動の抑制をねらいとする段階的の移相操作
 - (ii) 短時間で動揺抑制をはかるブロック移相操作が考えられる。前者の制御機構は論理判断回路で構成

でき、後者のそれには、演算回路を付加する必要がある。

本文では、まず1機無限大母線系統を対象に本安定度向上方式の基本原理解析し、次に本方式を系統負荷を含む一般2機系統に適用できることを示し、その基本的な動作について述べるにとどまったが、本方式に対する最適制御理論面からの検討、また、AVR、ガバナなどの制御系と本方式との協調、さらに多機送電系統への適用等については今後研究を進めたい。

なお、本文においては、回路切換えに要する時間等についてはこれを無視した理想的な条件下で解析を進め、また再開路失敗についてもふれなかったが、系統負荷特性を考慮すべき系統においては、回路切換えによって系統の安定領域自体が変動するので、實際上これらの時間遅れあるいは再開路失敗が過渡安定度向上に及ぼす影響、またその影響が本方式の操作自体に与える効果等についても検討する必要があると考えられる。この件については稿を改めて報告したい。

最後に、本研究を行なうにあたって、適切なご助言とご討論をいただいた、大阪府立大学工学部 中村正雄教授に深く感謝致します。なお、数値計算には大阪府立大学計算センタを利用させていただいたことを付記し、謝意を表する。

(昭和50年2月24日受付、同50年11月4日再受付)

文 献

- (1) たとえば、E. W. Kimbark: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-88, No. 5, 773 (1969)
- (2) 岸尾・畑: 電気評論 59, 377 (昭 49-4)
- (3) 齊藤, 他: 東芝レビュー 30, 289 (昭 50-4)
- (4) 藤本・渡辺・堀内: 東芝レビュー 30, 302 (昭 50-4)
- (5) N. RamaRao, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-89, No. 5, 975 (1970)
- (6) D. K. Reitan, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-93, No. 1, 303 (1974)
- (7) D. O'Kelly, et al.: Proc. Instn Elect. Engrs 120, No. 2, 247 (1973)
- (8) 谷口・中村: 電気学会論文誌 92-B, 323 (昭 47-5)

付 録

例題系統2に対する動揺計算 回路のアドミッタ

ンスの一般形を $\dot{Y}_{ij}$ ($i, j=1, 2, 3$) で表わし、誘導電動機負荷の内部電圧を $\dot{E}_3$ で表わすと、系統の電流・電圧関係式は

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^3 \dot{Y}_{ij} \dot{E}_j \quad (i, j=1, 2, 3) \dots\dots\dots (付1)$$

で表わすことができる。ここに、 $\dot{Y}_{ij}=\dot{Y}_{ji}$ である。また、上式の電流 $\dot{I}_3$ は電動機負荷により負符号をつける。このとき各回転機の電力は

$$P_i = \text{Real}[\bar{\dot{E}}_i \dot{I}_i] \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots (付2)$$

で計算される。ここに、 $\bar{\dot{E}}_i$ は $\dot{E}_i$ の共役複素量である。したがって、相差角動揺方程式および誘導電動機回転子の運動方程式は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \omega \left[\frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{P_{m2}}{M_2} \right] - \left(\frac{P_1}{M_1} - \frac{P_2}{M_2} \right) \\ \frac{ds}{dt} &= \frac{1}{M_3} (P_{m3} - P_3) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付3)$$

ここに、 P_{m2}, M_2 : 発電機 G_2 の機械的入力(一定) および慣性定数、 P_{m3}, M_3, s : 誘導電動機の機械的出力(一定)、慣性定数およびスリップ

とする。さらに誘導電動機の内部電圧 $\dot{E}_3$ は

$$\frac{d\dot{E}_3}{dt} = -js\omega\dot{E}_3 - \frac{1}{T_0} \{ \dot{E}_3 - j(x_{s1} - x_{s'})\dot{I}_3 \} \dots\dots\dots (付4)$$

x_{s1} : 1次側リアクタンス、 $x_{s'}$: 過渡リアクタンス、 T_0 : 開回路時定数

で表わす⁽⁸⁾。

本例題系統2における故障は例題系統1と同様 G_1 側高圧母線(1回線送電線路上)の3LGとして、制御 u および制御 α の操作手順も同様とする。ただし本例では、送電線路の抵抗および誘導電動機負荷の1次巻線抵抗を考慮している。

そこで、故障中、制御 u 、制御 α および故障前に対する回路のアドミッタンスをそれぞれ与え、系統動揺の計算を(付1)～(付4)式によって実行する。