UDC 621.311.1.016.352: 517.977

論文

55-B17

近似切換線による交直並列送電システムの安定化制御

正員 一柳 勝宏 (愛知工大)

正員 小林 英夫 (愛知工大)

正員 掛布 英辰 (愛知工大)

1. まえがき

近年の電力需要の増加は、目覚ましいものであり、これに伴い、大電力を原子力発電所や火力発電所から遠隔地にある需要地に輸送するための送電系統は超高压化、長距離化してきており、電力系統事故時における過渡安定対策が強く望まれる。

電力系統の安定度向上をはかるために、最適制御理論などの適用により、交流送電線にそう入した直列コンデンサや、並列抵抗の適切な開閉操作を行ったり⁽¹⁾⁻⁽³⁾、直流送電システムを取入れ、この直流送電システムの高速応答性を積極的に利用し、最適な直流電力潮流制御を行なう、など種々の方法がある⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。

最大原理を利用した制御操作は、2度の切換えによる簡単なバングバング制御となり、かつ、過渡安定度制御の効果は大きい。しかし、これを用いて、計算機によるオンライン制御を行なう場合、境界値問題を瞬時に解いて、制御操作指令を発することは困難であり実運用上不可能なことである。

この研究では、一機無限大母線系の交直並列送電システムモデルにおける交流系統路故障時の系統動揺を抑制するために、制御の最適切換線をべき級数近似して簡単に求められる制御切換線を用いることにより、オンライン制御を可能にする方法を提案し、良い計算結果と実験結果を得ている。

2. 最適制御切換線

問題の対象とするモデル系統としては、交流送電線

に直流送電システムが並置されるような交直並列送電系統とする(第1図参照)。電力系統の故障による系統動揺は次式で表わされる。

$$(M/\omega_0)\dot{\omega} + (D/\omega_0)\omega = P_m - P_{em}\sin\delta - Pd \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M : 慣性定数、 D : 制動係数、 P_m : 機械的入力、 P_{em} : $E_1 E_2 Y_{12}$, $E_1 \angle \delta$, $E_2 \angle 0$: 発電機内部端子および無限大母線電圧の大きさと位相、 Y_{12} : 発電機内部端子と無限大母線の間の伝達アドミタンスの大きさ、 Pd : 直流系送電電力、 ω_0 : 基準角周波数、 $\omega = \dot{\delta}$

なお、発電機は円筒形で、動揺中、過渡リアクタンس背後の起電力が一定であるとして取扱い、AVRやガバナは考慮しない。また、交流線路や発電機の抵抗は無視できるものとする。直流系はその応答速度が交流系の動揺周期に比べて速いので、直流系の遅れを無視できるものとし、直流系電力のみにより直流系が表わされるものとする。

交流線路の地絡故障などによるじょう乱発生後、最小時間で安定運転状態を取戻すために、最大原理を適用した最小時間制御がある⁽⁸⁾。ここでは、制御変数として、(1)式中の直流送電電力 Pd を用いる。直流送電システムの順変換器や逆変換器の電圧や電流の定値制御を行なっている制御装置の設定値を変化させることにより、直流送電電力の制御は可能となる。

第1図のモデル系統において、交流線路の3線しゃ断事故を想定し、その事故が $t_f = 0.1s$ または $0.15s$

第1図
モデル系統

$Pd = P_{d0} \times 1.3$
 $Pd = P_{d0} \times 0.1$
 $Pd_0 = 0.8$ (定常時の直流系送電電力)
1000 MVA ベース, p.u. 値

Fig. 1. Model system.

Stabilizing Control of Parallel AC-DC Power Transmission Systems by Approximate Switching Curve. By Katsuhiro Ichiiyanagi, Member, Hideo Kobayashi, Member & Hidetatsu Kakehu, Member (Department of Electrical Engineering, Aichi Institute of Technology)

一柳勝宏: 正員, 愛知工業大学電気工学科

小林英夫: 正員, 愛知工業大学電気工学科

掛布英辰: 正員, 愛知工業大学電気工学科 (現在, 豊田工業高等専門学校)

間継続した後、交流線路が再開路され、健全復帰する場合を考える。このときの系統状態から、計算の初期値 $\delta(t_0)=\delta_0$, $\dot{\delta}(t_0)=\dot{\delta}_0$ が与えられる。また制御終了後の直流送電電力を $P_{d\infty}$ とすると、系統の最終状態は $\delta(t_{fin})=\delta_{fin}=\sin^{-1}(P_m-P_{d\infty})/P_{em}$, $\dot{\delta}(t_{fin})=0$ である。

なお、直流電力制御の上下限値を $\overline{Pd}$ および $\underline{Pd}$ とすると、制御変数 Pd には、次の拘束条件がある。

$$\underline{Pd} \leq Pd \leq \overline{Pd} \quad \dots\dots\dots (2)$$

最大原理を適用し(付録1参照)、この2点境界値問題を試行錯誤することにより解き、そのデジタルシミュレーション結果を第2図に示す。いずれの場合も制御開始時($t=t_f$)において、制御は上限値 $\overline{Pd}$ を用いることになり、これ以後2回の制御切換え($\overline{Pd} \rightarrow \underline{Pd}$ および $\underline{Pd} \rightarrow P_{d\infty}$)により、最適な安定化制御を行なうことができる。

すなわち、故障による系統じょう乱の原因が取除かれた瞬時における系統の状態は、 $\delta-\omega$ 位相平面の第1象限内にあって、直流電力は上限値を用いることになる。また、第4象限内に存在すると考えられる最適切換え線と系統の状態が交差した時点で $\overline{Pd} \rightarrow \underline{Pd}$ の切換えが行なわれることになり、更に第1象限内に移動した時点での切換えを行ない、制御終了とする。

3線しゃ断から健全復帰による再開路までの時間 t_f の種々の値に対し、先の最大原理による最適制御の計算を繰返し行なうことにより、 $\overline{Pd}$ から $\underline{Pd}$ への制御切換え線を $\delta-\omega$ 位相平面上で求め、その結果を第2図中 L^* で示す。この L^* が最適制御切換え線であり、これは、 $\underline{Pd}$ への制御切換え操作以後の位相面軌道と一致していることがわかる。従って、(1)式において系

第2図 最適直流送電電力制御の位相面軌道と最適切換え線

Fig. 2. Phase plane trajectory of optimal DC power control and optimal switching curve.

統の最終定常点 $\delta=\delta_{fin}$, $\omega=\omega_{fin}=0$ を初期値とし $Pd=\underline{Pd}$ を与え、逆時間法を用いて得られる位相面上の解軌道の結果から、 L^* が求められる。最適切換え線と考えられるこの位相面解軌道のべき級数近似法について、以下に述べる。

3. べき級数近似した最適切換え線による バングバング形準最適安定化制御

(3.1) 最適切換え線のべき級数近似法 前述の結果より、最適切換え線は $\delta-\omega$ 位相平面の第4象限内に存在しており、これは(1)式において、 $Pd=\underline{Pd}$ とおいた式の解軌道より求まることがわかる。ここではこの最適切換え線を最終定常点においてべき級数近似し求める方法について考える。すなわち、 $x=\delta-\delta_{fin}$, $\delta_{fin}=\sin^{-1}(P_m-P_{d\infty})/P_{em}$ としたとき、最適切換え線を最終定常点において次式で表わされるものとする。

$$x(\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \alpha_n \omega^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\alpha_n = d^n x / d\omega^n (x=0, \omega=0)$

更に、(1)式の動揺方程式において、 $Pd=\underline{Pd}$ とすると次式を得る。

$$(M/\omega_0) \dot{\omega} = P_m - \underline{Pd} - (D/\omega_0) \omega - P_{em} \sin(x + \delta_{fin}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、 $\dot{\omega} = d\omega/dt = (d\omega/dx)(dx/dt) = (d\omega/dx)\omega$, $dx/d\omega = x'$ とおくことにより

$$\dot{\omega} = \omega (d\omega/dx) = \omega (dx/d\omega) = \omega/x'$$

となる。従って(4)式より次式を得る。

$$x' = \frac{(M/\omega_0) \omega}{P_m - \underline{Pd} - P_{em} \sin(x + \delta_{fin}) - (D/\omega_0) \omega} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $x=0, \omega=0, x'=\alpha_1$ であるから(5)式より $\alpha_1=0$ となる。更に(5)式を ω で微分すると、

$$x'' = \frac{(M/\omega_0) \{P_m - \underline{Pd} - P_{em} \sin(x + \delta_{fin})\} * \{- (D/\omega_0) \omega\} - (M/\omega_0) \omega \{ - P_{em} \cos(x + \delta_{fin}) x' - (D/\omega_0) \}}{\{P_m - \underline{Pd} - P_{em} \sin(x + \delta_{fin}) - (D/\omega_0) \omega\}^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $x=0, \omega=0, x'=\alpha_1=0, x''=\alpha_2$ であるから、

$$\alpha_2 = \frac{M/\omega_0}{P_m - \underline{Pd} - P_{em} \sin \delta_{fin}}$$

更に、(6)式を ω で微分することにより α_3 を求めることができる。このようにして順次任意の係数 α_n を求めていくことができる。

$$\alpha_n = \frac{d^{(n-1)}}{d\omega^{(n-1)}} \left\{ \frac{(M/\omega_0) * \{P_m - \underline{Pd} - P_{em} \sin(x + \delta_{fin})\}}{\{P_m - \underline{Pd} - P_{em} \sin(x + \delta_{fin}) - (D/\omega_0) \omega\}^2} \right\}$$

第 1 表 べき級数近似係数
Table 1. Power series coefficients.

n	α_n
1	0
2	$\frac{M/\omega_0}{P_m - P_d - P_{em} \sin \delta_{fin}}$
3	$\frac{2D\alpha_2/\omega_0}{P_m - P_d - P_{em} \sin \delta_{fin}}$
4	$\frac{3P_{em} \cos \delta_{fin} \alpha_2^2 + 3D\alpha_3/\omega_0}{P_m - P_d - P_{em} \sin \delta_{fin}}$
5	$\frac{10P_{em} \cos \delta_{fin} \alpha_2 \alpha_3 + 4D\alpha_4/\omega_0}{P_m - P_d - P_{em} \sin \delta_{fin}}$
6	$\frac{P_{em} \cos \delta_{fin} (16\alpha_2 \alpha_4 + 10\alpha_3^2) - 15P_{em} \sin \delta_{fin} \alpha_2^3 + 5D\alpha_5/\omega_0}{P_m - P_d - P_{em} \sin \delta_{fin}}$
⋮	⋮

$$\left. \begin{aligned} & * \frac{\omega_0 \omega}{\delta_{fin}} - (D/\omega_0) \omega \right\} (x=0, \omega=0) \\ & \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

係数 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ を第 1 表に示す。最適切換線を p 次まで考慮した場合の近似切換線を δ_p^* とおくと

$$\begin{aligned} \delta_p &= x(\omega) + \delta_{fin} \\ &= \sum_{n=1}^p \frac{1}{n!} \alpha_n \omega^n + \delta_{fin} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

となる。

〈3・2〉 適用例と考察 前章と同じモデル系統(第 1 図)を用いて、最適切換線のべき級数近似曲線を 1 次の項のみ考慮した場合から、6 次の項まで考慮した場合について計算し、その結果を第 3 図に最適切換線(実線)とともに、曲線①～⑥で示す。これによると、高次の項まで考慮するほど近似曲線は最適曲線に接近することがわかる。しかし、偶数次の項まで考慮した場合の方が、それより 1 次高い奇数次の項までの場合よりも近似度は良い。このことは、 $P_m > P_d > P_{em} > 0$ 、 $P_m - P_d - P_{em} \sin \delta_{fin} > 0$ であることから、 $\alpha_n > 0$ ($n=1 \sim \infty$) であるので、位相平面の第 4 象限 ($\omega < 0$) において、奇数次まで考慮した近似曲線の値は、それより 1 次低い偶数次まで考慮した場合よりも小さい値をとることから、

$$\delta_{2n+1} < \delta_{2n} \quad (n=1, 2, \dots)$$

となると考えられる。また、制動係数 $D=0$ のとき、 $\alpha_{2n+1}=0$ となることから、 δ_{2n+1}^* が δ_{2n}^* より小さくなる割合は、 D の値が大きいくほど、大きくなる。従って、(8)式において、偶数項のみ考慮することにし、これを δ_{2p}^0 で表わすと

$$\delta_{2p}^0 = \left(\sum_{n=1}^{2p} \frac{1+(-1)^n}{2} \cdot \frac{\alpha_n}{n!} \omega^n \right) + \delta_{fin} \dots (9)$$

となる。第 3 図中に 4 次の項および 6 次の項まで考慮

第 3 図 べき級数近似切換線

Fig. 3. Approximation of switching curves by power series.

した場合について、各々、記号 $\circ, \Delta$ として示す(2 次項まで考慮した場合については、 $\alpha_1=0$ であるゆえ $\delta_2^* = \delta_2^0$ である)。実系統の制動係数 D の値は比較的小さく、無視されることが多いが、ここで、計算例として用いた D の値も、小さくとってあるので、 δ_{2p}^* と δ_{2p}^0 の差は小さく、偶数項のみ考慮する場合の最適切換線への接近の効果は小さい。以下の計算結果における近似の切換線は δ_p^* を用いている。なお、近似切換線を用いる安定化制御は、系統じょう乱発生後の各瞬時において、状態の観測値 δ および ω より決定される。すなわち、系統じょう乱発生により、 $\delta-\omega$ 位相平面の第 1 象限内に位置していた状態は、制御 $Pd = \bar{P}d$ により第 4 象限内に移動し、制御切換線と交さした時点で、制御 $Pd = \bar{P}d$ に切換え、以後この制御を続け、 $\omega \geq 0$ なる条件が満足される瞬時に制御は $Pd = P_{em}$ とし、制御終了とする。

系統じょう乱として、前章と同じく交流線路の 3 線しゃ断を想定し、元の健全状態に復帰するまでの時間 t_f も、0.10s および 0.15s で同じとする。この場合(8)式を用いて、2 次項および 6 次項まで考慮したべき級数近似切換線を用いる安定化制御の計算結果を第 4 図、第 5 図に示す。 t_f が比較的小さい場合(0.1s 以下)は、2 次項まで考慮するのみで十分であるが、これが大きくなると(0.15s 以上)、位相面軌道は最終定常点のまわりで大きなリミットサイクルとなり、高次項まで考慮する必要がある。

第 3 図の近似曲線の計算結果からわかるように、最終定常点から離れるに従って、その近似度は悪くなる。この最終定常点 $\delta = \delta_{fin}$, $\omega = 0$ における近似曲線に沿って下方に近似点を移動することにより、制御切換点近傍の近似度を良くすることができる。すなわち近似点を $\delta = \delta_a$, $\omega = \omega_a$ とし、 $x = \delta - \delta_a$, $y = \omega - \omega_a$ と

第 4 図 近似切換線 δ_2^* による直流送電電力制御の位相面軌道

Fig. 4. Phase plane trajectory of DC power control by approximate switching curve δ_2^* .

第 5 図 近似切換線 δ_6^* による直流送電電力制御の位相面軌道

Fig. 5. Phase plane trajectory of DC power control by approximate switching curve δ_6^* .

おくことにより、べき級数近似式は(3)式に対応して次式となる。

$$x(y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} a_n y^n \quad \dots\dots\dots (10)$$

更に、(4)式は

$$(M/\omega_0) \dot{y} = \{P_m - (D/\omega_0) \omega_a\} - P_d - (D/\omega_0) y - P_e m \sin(x + \delta_a) \quad \dots\dots (11)$$

となり、この場合のべき級数近似の係数 a_n は第 1 表の α_m 式中の P_m を $P_m - (D/\omega_0) \omega_a$ と置換えることにより求まる。ゆえに、 p 次まで考慮した近似切換線 δ_p^A は

$$\delta_p^A = x(y) + \delta_a = \sum_{n=1}^p \frac{1}{n!} a_n y^n + \delta_a$$

$$= \sum_{n=1}^p \frac{1}{n!} a_n (\omega - \omega_a)^n + \delta_a \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。

第 3 図の最終定常点で求めた近似曲線上の下方の点 $\delta_a = 0.7 \text{ rad}$, $\omega_a = -2.61 \text{ rad/s}$ において (10) 式より近似切換線を求め、その結果を第 6 図に示す。第 3 図と比較すると、 $\omega < \omega_a$ において、近似精度が改善されていることがわかる。前述したのと同じ系統じょう乱を想定し、(12) 式の 2 次項まで考慮した場合の近似切換線を用いて、安定化制御の計算機によるシミュレーション結果を第 7 図に示す。第 4 図と比較することにより、近似点を移動したことによる効果がわかる。

第 6 図 べき級数近似切換線 ($\delta_a = 0.7 \text{ rad}$, $\omega_a = -2.61 \text{ rad/s}$.)

Fig. 6. Approximation of switching curves by power series. ($\delta_a = 0.7 \text{ rad}$, $\omega_a = -2.61 \text{ rad/s}$.)

第 7 図 近似切換線 δ_2^A による直流送電電力制御の位相面軌道

Fig. 7. Phase plane trajectory of DC power control by approximate switching curve δ_2^A .

4. 交直模擬送電装置による実験的考察

前章では、デジタルシミュレーションにより、べき級数近似した制御切換線を用いた安定化制御を試み良い計算結果を得ているが、更に、この手法を実運用面で用いることができる可能性を調べるために、当研究室の交直模擬送電装置および小形計算機を用いてオンライン制御による実験的検討を行なう。

〈4・1〉 交直模擬送電装置 使用した交直模擬送電装置を第8図に示す。ここで、発電機 S.G. (3kW, 220V, 60Hz) の原動機は直流分巻電動機 (3.7kW, 100V, 1,800r.p.m) を使用し、また、原動機電源はサイリスタレオナード電源を用いているが、フィードバックを速度から流入電流に変更することにより、S.G. の機械的入力が一定となる様にしてある。直流系順変換器 (以下、 R_c と略す) は定電圧制御装置、逆変換器 (以下、 I_n と略す) は定電流制御装置を有している。直流送電電力の変更は、 I_n の電流設定値を変更することにより行なっている。従って、 I_n の電流設定値を直流系送電電力の設定値と見なすものとする。更にこの模擬送電装置には、小形計算機 (記憶容量 8kW) やシーケンスコントローラを接続してある。また、S.G. 軸と同軸に連結したタコジェネレータの端子電圧と無限大母線電圧を入力信号として用いた $\delta-\omega$ 位相検出器 (精度 16bit) を製作しこれを使用している。なお、近似切換線の係数を求めるために用いる系のパラメータ値は、別に非線形系のパラメータ推定⁽⁹⁾を行なうことにより求めてあり、その結果は次のようになる。

$$M=2.15s, D=0.00122, P_{em}=0.241p.u. \quad (13)$$

〈4・2〉 最適切換線の実測 最大原理を用いた電力設定値の最適切換は、第2章の結果から、制御の許容上下限值 $\overline{P_d}$ と $\underline{P_d}$ のみを用いたバングバング制御となることがわかる。ここでは、バングバング制

第8図 交直模擬送電装置

Fig. 8. AC-DC power system simulator.

御を試行錯誤することにより、小形計算機を用いて入力した δ, ω 情報をシンクロスコープにアナログ出力して得られる $\delta-\omega$ 位相面軌跡を見ながら最適制御切換点を求める。その結果を第9図中、×印で示す。なお、図中 ( ) 内数値は、系統じょう乱を先のデジタルシミュレーションの場合と同じとし、このときの交流線路を3線しゃ断した後、再閉路による健全復帰までの時間 (s) を表わす。

更に、第9図中実線は制御 $\underline{P_d}$ を用いて、逆時間法により(1)式を解いて得られる位相面軌道であり、実測した×印は、これに近い位置にあることから、この実線が最適切換線と考えることができる。

〈4・3〉 べき級数近似法の適用 ここでは、交直模擬送電装置を用いて、先の最適制御切換線のべき級数近似法を適用しその有効性を確める。第9図に(13)式のパラメータ推定結果を用いて得られる近似曲線を記号1～6で示す。いずれの近似曲線も先のデジタルシミュレーション結果と同じ傾向である。以後の実験では、計算時間および計算のための使用記憶容量が少なくすむように、最終定常点において2次の項まで考慮したべき級数近似曲線を用いることにする。系統じょう乱は、これまで取り扱ってきたものと同じであるとして、ここでは、交流線路のしゃ断時間を0.2sとする。このときのオンライン制御結果を第10図に示す。これによると、位相面軌道は最終定常点の周囲で大きなリミットサイクルとなっている。交流線路のしゃ断時間を変えて行なった場合についても、同様の結果となり、あまり安定化制御の効果は得られていない。これは、制御切換え ($\overline{P_d} \rightarrow \underline{P_d}$ および $\underline{P_d} \rightarrow \overline{P_d}$) が遅れたことによるものと考えられる。この制御切換遅れの原因として、(i) δ, ω 情報は1/60sごとのサンプリング周期でしか得られないこと、(ii) 得られた ω

第9図 最適切換線と近似切換線

Fig. 9. Optimal and approximate switching curves.

(a) 位相面軌道

(b) 動揺曲線

第 13 図 近似切換線 δ^* による直流送電電力制御 ($t_f=0.3s$)Fig. 13. DC power control by approximate switching curve ($t_f=0.3s$).

(a) 位相面軌道

(b) 動揺曲線

第 14 図 近似切換線 δ^* 直流送電電力制御 ($t_f=0.3s$)Fig. 14. DC power control by approximate switching curve ($t_f=0.3s$).

が小さくなると、 β 値は大きくする必要がある。特に、 $(P_m - P_d)/P_{em} \leq 1$ のとき、位相平面の $0 \leq \delta \leq \pi$ においてその最適切換線が ω に対して 2 値関数となり、このときの近似切換線の精度は著しく悪くなる。しかしこの場合、 P_m が小さく、軽負荷の場合であり、系の動揺そのものも小さいので、安定化制御は行なわないことにする。

β および ε による修正を行なう場合のべき級数近似切換線を用いた安定化制御のためのオンライン制御の計算フロー図を第 12 図に示す（詳細については、付録 2 参照のこと）。

$P_m=0.34$, $P_{d-}=0.17$, $\bar{P}_d=P_{d-}$, $\underline{P}_d=0.067$, $\beta=2.5$, $\varepsilon=1.5 \text{ rad/s (p.u. 値, 200 V, 3,000 VA ベース)}$ の場合について、3 線しゃ断時間を $0.2s$ および $0.3s$

としたとき、オンライン制御の実験結果を第 13 図、第 14 図に示す。いずれの場合も動揺は急速に抑制されて最終定常点に落ち着くことがわかる。

5. むすび

交直並列送電システムの交流系線路事故時の安定化制御について、直流送電電力の最適制御切換線をべき級数近似し用いることによるバングバング形最適制御を行ない、種々の検討を加えた。この研究の特徴をまとめると、次のとおりである。

(1) 最適制御切換線近似の係数は、あらかじめ求めておくことができるので、事故発生による系統動揺時には簡単な代数計算のみですみ、緊急時の系統制御が可能である。

(2) 2 次項まで考慮した低次のべき級数近似を用いる場合でも、最終定常点における近似曲線に沿って近似点を移動したり、適当な修正係数を乗ずることにより、最適制御に近い制御結果が簡単に得られる。

(3) ここで取扱う制御変数は、系統の状態変数の関数で表わされるというフィードバック制御法則の形式をとっているので、系統の潮流状態 (P_m, P_{em}, P_{d-}, P_d) が与えられると交流線路のしゃ断や短絡などによる故障の種類や継続時間に関係なく、制御切換線は同一でよい。

なお、制御切換線は、発電機に加速エネルギーを与えるような制御を用いて決定されるものであるので、直流送電系の存在しない交流電力系統の場合には、線路に直列にそう入した抵抗⁽¹⁰⁾や、リアクター⁽¹¹⁾を用いることにより、ここで提案する手法が利用できると考えられる。また、この研究で用いた電力系統モデルは、一機無限大母線系の交直並列送電系統であるが、現実には、多機の複雑な系統構成であり、制御切換線

は簡単に求められないが、力学重心になぞらえた位相角的距離に基づいて、多機系の一機無限大母線系への等価簡略が可能ならば⁽¹²⁾⁽¹³⁾、ここで述べた手法と同様の取扱いができると考えられる。

(昭和 54 年 1 月 25 日受付, 同 54 年 10 月 2 日再受付)

文 献

- (1) E.W. Kimbark: "Improvement of System Stability by Switched Series Capacitors" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-85, 2, 180 (1966)
- (2) 吉田・福西・青井: 「巨大電力輸送に伴う系統安定用制動抵抗装置 (SDR) の開発研究について」 電学誌, 91, 5, 940 (昭 46-4)
- (3) 小林・一柳: 「過渡動揺時における電力系統の準最適安定化制御」 電学論 B, 95, 1, 17 (昭 50-1)
- (4) D.B. Goudie: "Stability Analysis of Parallel H.V. AC-DC Power Transmission System" *Proc. Inst. Elect. Engrs.* 119, 2, 216 (1972)
- (5) 小林・一柳: 「交直並列送電系統の Bang-Bang 形最適電流制御」 電学論 B, 97, 5, 247 (昭 52-5)
- (6) 小林・一柳・藤田: 「準最適制御による交直並列電力系統動態安定度向上」 電学論 B, 98, 4, 339 (昭 53-4)
- (7) T. Machida: "Improving Transient Stability of AC System by Joint Usage of DC System" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-85, 3, 226 (1966)
- (8) J. T. Tou: 「現代制御理論」 中村, 他訳 (コロナ社)
- (9) 一柳・小林: 「交直並列送電系統のパラメータ推定」 昭 53 電気関係学会東海支連大 No. 188 (昭 53-10)
- (10) 中村・河戸・武藤: 「制動抵抗の準最適 Bang-Bang 制御による過渡安定度の向上」 情報処理研究会資料 IP-77-40 (昭 52-9)
- (11) D.K. Reitan & N. RamaRao: "A Method of Improving Transient Stability by Bang-Bang Control of Tie-line Reactance" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-93, 1, 303 (1974)
- (12) 一柳・小林・渡部: 「多機電力系統における最適再閉路方式」 愛知工業大学研究報告, 10, 19 (昭 50)
- (13) A. Rahimi, et al "Dynamic Aggregation and the Calculation of Transient Stability Indices" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-85, 2, 180 (1966)

付 録

1. 最大原理による直流系電力の最適制御 系統じょう乱発生後、最小時間で安定運転状態を取戻すために直流系送電電力の変更によるバングバング形最適制御を行なう目的として、最大原理を適用する⁽¹⁴⁾。

(1) 式において、 $x_1 = \delta$, $x_2 = \omega$, $x_3 = \int_{t_0}^{t_{fin}} dt$ とすると、 $\dot{x}_1 = x_2$

$$\dot{x}_2 = (P_m - P_{em} \sin x_1 - Pd - D/\omega_0 \cdot x_2)\omega_0/M$$

$$\dot{x}_3 = 1$$

ハミルトン関数は次式となる。

$$H = p_1 x_2 + p_2 (P_m - P_{em} \sin x_1 - Pd - D/\omega_0 \cdot x_2)\omega_0/M - 1$$

但し、 $\dot{p}_1 = -\partial H/\partial x_1$, $\dot{p}_2 = -\partial H/\partial x_2$ である。直流送電電力を制御するとき、上式中の制御変数 Pd に対する制約条件は、本文中(2)式で与えられている。

従って、最適制御 Pd^* はハミルトン関数 H を最大にすることにより決定される。

$$Pd^* = \bar{Pd} \quad (-p_2 \geq 0), \quad Pd^* = Pd \quad (-p_2 < 0)$$

2. 安定化制御のための計算アルゴリズム べき級数近似切換線を用いる安定化制御のための計算アルゴリズムを第 12 図に示す計算フロー図に従って、以下に説明する。

(1) P_m, Pd, δ_{fin} を用いて係数 α_2 を計算しておく*。これにつづいて交流線路のしゃ断、短絡、地絡などの故障発生の情報を受取るまで、CPU はスタート後、待ち状態となる。

(2) 更に、故障の原因が除去されるまで、CPU は待ち状態となる。

(3) 故障発生前の定常状態において、無限大母線へ供給する電力 (P_m) 値が比較的小さくて、 $(P_m - Pd)/P_{em} \leq 1$ のとき、ステップ(10)へ。 $(P_m - Pd)/P_{em} > 1$ のとき、次のステップへ。

(4) $\dot{\omega}$ の符号、 $SGN(\dot{\omega})$ を計算するため、 ω_{old} に初期値 (=999) 代入。制御 Pd への切換終了を確認するための情報 IS に初期値 (=1) を代入。

(5) 系統の状態 δ, ω (アナログ量) 情報を入力するため、AD コンバータより割込信号を受取るまで CPU は待ち状態となる。

(6) ω_{new} に ω 値を代入する。

(7) 制御の下限值 $\bar{Pd}$ より最終制御 Pd_{∞} への切換え判断を行なう。 $SGN(\dot{\omega}) \leq 0$ であつ、 $\omega \geq -\varepsilon$ のとき、ステップ(10)へ。そうでなければ、次のステップへ。

(8) ω_{old} に ω_{new} を代入し、 $IS=0$ ならステップ(5)へ戻り、そうでなければ、次のステップへ

(9) 制御切換線の修正式 $\delta^0(\omega) = \beta(1/2)\alpha_2\omega^2 + \delta_{fin}$ を計算し、 $\delta - \delta^0 \geq 0$ なら $Pd = \bar{Pd}$, $\delta - \delta^0 < 0$ なら $IS=0$, $Pd = Pd$ としステップ(5)へ戻る。

(10) 制御 $Pd = Pd_{\infty}$ とし、 δ, ω 情報を CPU メモリーに必要量だけ格納し、格納終了後 P_m, Pd, δ_{fin} を用いて、係数 α_2 を計算する*。

(11) DA コンバータにより、 δ, ω の位相面軌跡をシンクロスコープに出力する。

(12) 故障発生による情報を受取るまで、ステップ(11)へ戻る。故障発生による情報を受取ったとき、ステップ(2)へ戻り、以後同じ手順を繰返す。

*: 実際には、定常運転時において、一定の時間間隔 (例えば、サンプリング周期 10ms 程度) ごとく外部割込信号を受けて、系統の状態の値 ($P_m, Pd, P_{em}, \delta_{fin}$) を用いて、級数近似の係数を常時計算しておくことになる。