多機電力システムにおける TCSC 制御

正員 藤 田 吾 郎 (芝浦工大)

正員 白 鳥 悟 史 (東京電力)

正員 白 井 五 郎 (法政大)

TCSC Control for Multi-machine Power System

Goro Fujita, Member (Shibaura Institute of Technology)

Satoshi Shiratori, Member (Tokyo Electric Power Company)

Goro Shirai, Member (Hosei University)

This paper describes an optimal TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) control method which can be applied to a large-scale power system to suppress system disturbances. TCSC is introduced from time to time for increasing the transmission capability. The main objective of introducing TCSC is that it can be used for improving the system stabilization along with the existing equipment, thus cost involvement is very less. However, the practical control method should meet some requirements, such as simple and unique design, it should be applicable to a multi-machine system. The proposed method is based on the optimal regulator theory with quadratic performance index. And sensitivity coefficient to relate TCSC states and swing equations of the generators are used to the formulation. So the design is very easy.

The improved transient performances of frequency deviations are shown in the simulation tests with 9-machine 38-bus system model. Three different cases of the selection index of TCSC allocations, namely relative angle, line length, and sensitivity coefficient are compared. Thus, using sensitivity coefficient is best method to find out the best allocations. Another considerations, tuning of the weighting matrix and a response example for a heavy fault are also discussed.

キーワード: FACTS, TCSC, 安定度, 電力系統制御, 最適レギュレータ

1. はじめに

FACTS (Flexible AC Transmission System)^{[1][2]}は系統に設置された機器を利用し,系統の安定化と既存設備の有効活用を目指した構想である。本研究で対象とするのは,この構想の中心となっている TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) である。これは従来のコンデンサにパワーエレクトロニクス機器であるサイリスタを並列に接続して,モジュレーション制御を行うことで,等価アドミタンス分を高速かつ連続に変化させることができる。これを送電線に挿入すると,系統に発生した小外乱に対する動揺抑制と,安定度向上による設備投資の軽減が可能となる。

TCSC および位相器など,送電線に挿入することを前提とした FACTS 機器の制御設計に関する従来の研究はいくつかに分けられる。設置位置に関して分類すると図 1 の様になる。

まず(a)は,発電機近傍に単独に設置された FACTS 機器を対象とした制御である^{[3]-[7]}。FACTS 機器より系統側を等価発電機または無限大母線と見なして制御設計が行われる。この方法は発電機の詳細な特性を考慮できるという特徴があるが,発電機近傍に FACTS 機器が設置され系統が等価的に縮約されることを前提としているため,複数箇所の機器設置には対応していない。さらに FACTS 機器の設置位置も発

電機端に限定されてしまう。

次に(b)は系統間の動揺抑制を対象とした例である^{[8]-[10]}。制御入力として,両系統を代表する情報量を使用する。(a)と同様,設置場所は限定される。

そして(c)はループを含んだ系統内に設置する例である^{[11]-[15]}。これはループ内潮流の調整と電力動揺の抑制という面から考えると,最も現実的であると考えられる。このうち[11][12]はエネルギー関数法に基づいて制御則を決定してい

図 1 FACTS 制御の分類

Fig.1. FACTS control classifications.

るため、複数のTCSC設置にも有効であることが特徴である。ただし、[11]ではゲイン決定の指針が明確でなく、[12]ではゲインが一意的に定まってしまうため、制御効果の調整は難しいと考えられる。[13]は系統構成の変更まで考慮しており、もっとも実用的と考えられる。ただし中心となる制御則はPIDであり、この調整には工夫を要すると考えられる。

本論文の制御設計は集中制御である最適レギュレータを使用している^{[14][15]}。この方法は複数 TCSC 設置時の安定性を保証できる。また後述している感度係数法を使用しているため TCSC を任意の送電線に設置することが可能となる。そして制御全体の設計が非常に簡単である。以下では 9 機 38 母線系統に 5 台の TCSC を設置した場合について検討を行っている。

まず TCSC の 3 ケースの設置場所決定方法の比較を行っている。これは設置場所により制御効果が大きく違うためである。制御効果が悪い場所を選ぶと大規模な電力システムでは動揺を抑制するために多くの TCSC が必要となる。逆に制御効果が良い場所を選定できれば TCSC の数を最小限に抑えることもでき、経済的な効果が期待できる。

次に最適レギュレータを適用するために必要となる重み行列と、応答結果を比較し、適切な重み行列の選定方法について考察する。そして、提案方法によって、過酷事故時に発電機の脱調を防ぐことができる例について述べている。

2. 制御設計

〈2・1〉 A 行列の作成 最適レギュレータ理論を適用するため、 n 機系モデルにおける状態変数ベクトルを次のように設定する。

$$x = [\Delta\delta_1, \dots, \Delta\delta_n, \Delta\omega_1, \dots, \Delta\omega_n]^T \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\Delta\delta_i$ [rad] は発電機 i と発電機 1 の相角度偏差、 $\Delta\omega_i$ [rad/s] は発電機 i の角速度偏差である。各状態変数は、以下の運動方程式のみによって支配されていると仮定する。

$$\frac{d}{dt} \Delta\delta_i = \Delta\omega_i - \Delta\omega_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega_i = -\frac{1}{M_i} (\Delta P_{ei} + D_i \Delta\omega_i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

M は慣性定数、 D は制動係数である。ここで発電機の電氣的出力 ΔP_e は、送電線の抵抗分を無視することで、以下によって求められる。ここで E_i は発電機 i の端子電圧、 X_{ij} は系統の縮約アドミタンスの各虚数分の逆数である。

$$\Delta P_{ei} = \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij} (\Delta\delta_{i1} - \Delta\delta_{j1}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$g_{ij} = \frac{|E_i| |E_j| \operatorname{Re}(E_i - E_j)}{X_{ij} |E_i - E_j|} \quad \dots\dots\dots (5)$$

なお、これ以外の方法として、発電機諸機器(ガバナ, AVR 等)の状態変数を考慮する方法も考えられる。しかし、この場合、 x が大きくなり、例えば後述の 9 機システムでは 17 から 53 に増加する。状態量の増加は計算精度の点からは望ましくない。また、TCSC の設置場所によっては (A, B) の可制御性を失う場合もある。

しかし、相角度と角速度だけを使用した場合には、可制御性を維持できる。相角度と角速度はシステム全体にとって支配的な状態量でもあり、これらだけを使用することにした。

〈2・2〉 TCSC モデル TCSC は高速かつ連続に制御可能で、上下制限のある等価サセプタンスであると仮定した。そして、送電線のサセプタンス分に対する TCSC のサセプタンス変動分を、補償率として定義している。この制約は、送電線のサセプタンス分に比較して小さく、線形性を保てる範囲で、かつ、系統動揺の抑制になるべく効果を有するように選定し、 $\pm 30\%$ に設定した。以下のシミュレーションでは、補償率 0% が動作開始点となっている。

通常、TCSC を系統に適用する場合、定常時には直列コンデンサとして使用する。これは定常時において送電線補償と潮流調整をフルに実施できるからである。

しかし、本研究においては、TCSC は定常状態を基準として、正負のどちらにも動作する必要がある。そこで、モデルとして与えている設置送電線のリアクタンス値は、既に TCSC がある一定の初期補償をしている状態であると想定する。そして、本論文で定義している補償率による TCSC 変動量が、実際の装置における初期補償からの増減分であるとしている。

〈2・3〉 感度係数と B 行列の作成 系統に設置された TCSC の数を l 台とし、そのアドミタンス変化分を制御入力

$$u = [\Delta b_1, \dots, \Delta b_l]^T \quad \dots\dots\dots (6)$$

とする。TCSC が加わった場合、電氣的出力の変化分 ΔP_{ei} は、(4) のかわりに

$$\Delta P_{ei} = \sum_{j=1}^n g_{ij} (\Delta\delta_{i1} - \Delta\delta_{j1}) + \sum_{j=1}^l \beta_{ij} \Delta b_j \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表すことができる。ここで β は以下に導出する感度係数^{[12][15][17]}である。この係数の導出については[12]で詳しく述べられているため、ここでは制御設計の観点から簡単に説明する。

一般に、電力システムの任意の地点で送電線のアドミタンスが微小変化すると、それに応じて、各送電線の潮流も変化し、発電機の出力も変化する。

この現象に着目すれば、そこで、各発電機を電圧源と仮定し、第 j 番目の TCSC のサセプタンスが微小量 Δb_j 変化したとき、第 i 番目の発電機の電氣的出力変化量が ΔP_{ei} であるとする、感度係数 β_{ij} は次式で近似することができる。

$$\beta_{ij} = \frac{\Delta P_{ei}}{\Delta b_j} \quad \dots\dots\dots (8)$$

この値は、直流法が成り立つような軽負荷状態であれば、発電機および負荷が変化してもほぼ一定値となる。そのため TCSC 設置以前からその値を計算することができ、設置台数や場所を変更した際も、改めて計算する必要はない。

〈2・4〉 最適レギュレータによる制御則 以上を整理することによりシステムの状態方程式

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \dots\dots\dots (9)$$

を構成することができる。ここで評価関数を

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \dots\dots\dots(10)$$

とする。 Q, R は重み行列と呼ばれ、これを調整させることで制御操作量の大きさを決定する。ここで(10)を最小にする制御入力 u は次式の状態フィードバックで与えられる。 $F(x[2n-1])$ は以下のフィードバック則に対する最適フィードバックゲインである。

$$\begin{cases} u = Fx \\ F = -R^{-1} B^T P \end{cases} \dots\dots\dots(11)$$

ここで P は、次のリカッチ方程式の正定対称解である。
 $A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \dots\dots\dots(12)$

＜3・5＞ 重み行列の決定 最適レギュレータ理論の評価関数は(10)で与えられている。この式は状態量と制御入力のトレードオフを、重み行列 Q, R で決めることを示している。 Q は半正定値、 R は正定でなくてはならない。したがって、この重み行列の決める際は、対角要素に正値を代入、他はゼロとする方法が一般にとられ、本論文でもこのようにしている。重み行列による応答結果の違いについては＜3.4＞にて考察を行っているが、 Q が R に対して大きすぎるとTCSCが飽和するばかりで最悪の場合は収束しない場合もある。 Q が R に対して小さすぎると、TCSCは飽和に達することはないが、動揺抑制の改善がほとんど見られなくなる。したがって上記の中間の特性を示すように、重み行列を決定する必要がある。これには試行錯誤が必要であるが、その結果、 $Q = \text{diag.}[10 \dots 10], R = \text{diag.}[1 \dots 1]$ に設定することとした。

3. モデル系統とシミュレーション結果

＜3・1＞ モデル系統 図2は本研究で用いたモデル系統図である。また図3は発電機機器のブロック線図である。表1には各発電機の定数を示した。TCSCによる動揺抑制効果を調べるために以下の事故を想定した。

- 0.10[s] 3相地絡事故が送電線2-34の母線34至近端で発生
- 0.15[s] 事故除去のため送電線2-34をルートシャ断
- 0.20[s] 再閉路により復旧

＜3・2＞ TCSC設置場所の違いによる応答結果 最適なTCSCの設置場所を考えるため、3通りの指標を考え、次の3ケース

を検証した。
 ケースA: 両端の相差角が大きい送電線
 ケースB: 線路の距離が長い送電線
 ケースC: 感度係数の絶対値の和が大きい送電線
 感度係数は、1つの送電線に対し、発電機の数だけ定義される。そこで、その絶対値の総和をとっている。表2はこれらの指標を示す。

そしてTCSCは合計5台設置することとした。この数は、前述のとおり1台あたりの能力が±30%であると仮定したとき、様々な事故を検討した際に必要と考えられる最小値である。本提案方法では設置台数が増しても問題はないが、設置コストが当然増えることとなる。

ここではTCSCの設置場所として上記の指標で上位5カ所を選択した。表2では、それぞれのケースにおける設置場所をTCSC1～5としている。

提案する制御量決定則では、 $n=9, l=5$ であり、ゲイン F の大きさは (5×17) となる。ゲインの数値例として、各ケースにおけるゲインを表3に示した。

図4～7は無制御時・ケースA・ケースB・ケースCにおける相差角応答特性であり、発電機1に対する発電機2～8の相差角を示している。また、それぞれのTCSCの補償率を図8～10に示す。

表2 最適なTCSC設置位置選定の指標
 Table 2. Indices for optimal TCSC allocation.

設置送電線	ケースA	ケースB	ケースC
	相差角[deg]	距離[km]	感度係数の絶対値総和
1-11	4.93 (TCSC1)	20	14.198 (TCSC1)
3-38	4.18 (TCSC2)	20	11.937
4-15	3.99 (TCSC3)	30	17.516 (TCSC2)
7-28	4.69 (TCSC4)	30	26.382 (TCSC3)
13-23	3.10	50 (TCSC1)	10.754
25-26	3.45 (TCSC5)	50 (TCSC2)	23.198 (TCSC4)
25-33	1.39	50 (TCSC3)	6.947
34-35	3.03	50 (TCSC4)	14.644 (TCSC5)
35-38	0.68	50 (TCSC5)	1.685

※それぞれの指標により選定された送電線にTCSC1～5を設置

表1 発電機定数
 Table 1. Parameters of generators

要素	定数名	記号	単位	水力	水力	水力	火力	火力	火力	火力	火力
				G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
発電機回路	定格容量	P_g	MVA	700	500	1000	600	650	500	800	600
	過渡リアクタンス	X_d'	p.u.	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	変圧器リアクタンス	X_t	p.u.	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
	単位慣性定数	H	MWs/kVA	3.5	3.5	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	制動定数	D	p.u.rad/s					0.008			
ガバナ	速度調定率	P_c	rad/s/p.u.	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	ガバナ時定数	T_g	s	24.0	24.0	24.0	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	リミッタ							±0.03			
励磁系	発電機時定数	T_d	s	5.0	5.0	5.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
	AVR時定数	T_a	s					0.2			
	AVRゲイン	K_a						10.0			
	リミッタ							3			

※各定数は自己容量基準で表示

図2 9機38母線モデル系統図
Fig.2. 9-machine 38-bus system model.

図3 発電機のモデル
Fig.3. Generator model.

表3 各ケースにおけるゲイン
Table 3. Gains for each case.

ケース	$\Delta\delta_1$	$\Delta\delta_2$	$\Delta\delta_3$	$\Delta\delta_4$	$\Delta\delta_5$	$\Delta\delta_6$	$\Delta\delta_7$	$\Delta\delta_8$	$\Delta\delta_9$	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$	$\Delta\omega_5$	$\Delta\omega_6$	$\Delta\omega_7$	$\Delta\omega_8$	$\Delta\omega_9$
A	TCSC1	-5.5189	3.1089	-0.2680	1.5585	0.0912	-0.2995	0.3178	0.6350	2.9877	-0.6939	-0.0712	-0.0505	-0.3320	-0.0010	0.0462	-0.0084	0.0139
	TCSC2	-0.9318	0.6465	-0.1445	2.0139	0.1453	0.1422	0.3384	0.3855	0.0322	-0.6974	2.7987	0.0349	0.1940	0.1435	0.2448	0.2114	0.3268
	TCSC3	2.2295	0.7541	0.5354	-6.7200	0.7243	-0.2728	0.9094	1.2414	0.0822	-0.1933	-0.0017	3.0501	-0.2883	-0.0034	0.0698	-0.0523	-0.0991
	TCSC4	0.3584	0.8671	0.7419	2.1530	-11.5778	1.0598	2.2706	3.6615	0.1146	0.0261	0.2003	0.0308	0.0215	-0.5222	3.5851	-0.2408	-0.3634
	TCSC5	2.0131	-1.6498	0.3183	1.5458	-1.1356	2.3988	-1.3275	-0.8615	-0.8633	-1.0013	-0.9131	-0.1919	0.1628	0.7564	0.7508	0.7898	1.0018
B	TCSC1	-0.6263	-0.8557	0.2485	1.2543	-0.5128	-0.3457	-0.1821	-0.0717	-0.5128	-0.3250	0.0286	-0.3775	1.2330	0.2851	0.4301	0.3223	0.4340
	TCSC2	-0.6428	-1.2147	0.4650	2.1942	-1.2989	0.0261	-0.3355	0.2903	-0.8959	-0.8554	-1.1426	-0.1365	0.0999	0.7707	1.1040	0.7744	0.9889
	TCSC3	-0.2990	-0.0385	0.3717	0.2982	0.3768	-0.6366	-0.0978	0.1712	-0.0725	-0.0644	-0.0193	-0.1119	-0.1988	-0.4502	-0.6561	1.2640	0.5321
	TCSC4	4.4141	1.7267	-2.4945	-3.3696	0.6978	1.0827	0.1372	0.4075	0.7529	2.1966	-1.8396	0.2196	0.3595	-0.0300	-0.0473	-0.0155	-0.0383
	TCSC5	-0.7038	-0.0201	0.3695	0.3301	-0.0274	-0.1088	0.0169	-0.0141	-0.0518	-0.1147	0.4737	-0.0343	-0.0440	0.0173	0.0226	0.0184	0.0296
C	TCSC1	-2.8133	1.3284	-0.2737	0.3984	0.1179	-0.1881	0.3521	0.6237	2.8681	-0.7063	-0.0515	-0.0258	-0.2779	0.0170	0.0703	0.0180	0.0573
	TCSC2	2.2153	0.2018	0.6105	-6.7451	0.7996	-0.1056	0.9439	1.2780	0.1275	-0.1407	-0.0940	3.0863	-0.2576	0.0290	0.1130	-0.0143	-0.0413
	TCSC3	0.2220	0.9556	0.7059	2.0273	-11.5826	1.1330	2.2671	3.6502	0.1472	0.0518	0.1949	0.0631	0.0507	-0.4921	3.6083	-0.2087	-0.3155
	TCSC4	0.9770	-0.7017	0.1708	1.0806	-1.0407	2.5941	-1.2528	-0.7555	-0.5869	-0.8507	-1.2516	-0.1384	0.1607	0.7889	0.7921	0.8225	1.0501
	TCSC5	-0.0845	0.5133	-0.3367	-3.2927	0.1071	-0.0367	0.2706	0.4382	0.6740	1.8312	-1.6059	0.3447	0.0174	-0.0059	0.0604	-0.0310	-0.0443

(a) 相差点変動(G2~G5) (a) Relative angle deviation(G2-G5). (b) 相差点変動(G6~G9) (b) Relative angle deviation(G6-G9).

図4 無制御時の応答

Fig.4. Response without control.

(a) 相差点変動(G2~G5) (a) Relative angle deviation(G2-G5). (b) 相差点変動(G6~G9) (b) Relative angle deviation(G6-G9).

図5 ケースAの応答

Fig.5. Response of case A.

(a) 相差点変動(G2~G5) (a) Relative angle deviation(G2-G5). (b) 相差点変動(G6~G9) (b) Relative angle deviation(G6-G9).

図6 ケースBの応答

Fig.6. Response of case B.

(a) 相差点変動(G2~G5) (a) Relative angle deviation(G2-G5). (b) 相差点変動(G6~G9) (b) Relative angle deviation(G6-G9).

図7 ケースCの応答

Fig.7. Response of case C.

図8 ケースAの制御量
Fig.8. Control amount of case A.

図9 ケースBの制御量
Fig.9. Control amount of case B.

図10 ケースCの制御量
Fig.10. Control amount of case C.

ケースA(図5)とケースC(図7)では、無制御時の図4に対して、動揺の収束に改善が見られる。一方、ケースB(図6)ではTCSCが動作しているにも関わらず、動揺抑制の効果はほとんど見られない。また、いずれのケースでも、TCSCの補償率が上下限值に達している場合があるものの、余分な発振等を発生することなく、最終的には確実にゼロに収束する。これは最適レギュレータがロバスト性に優れているためである。また、他の場所で事故が起きた場合についても、同様な動揺抑制効果が得られる。よって、適切なTCSC設置場所を選択できれば、本手法により動揺抑制が実施できることがわかる。

では、この適切な設置場所はどのように決定すればよいであろうか。筆者らは、これまで3機9母線モデルや4機11母線モデルに対し本手法の検討を行った^{[14][15]}。そこではケースCが最も効果的であることが示されている。また今回のケー

スではケースAとケースCはほぼ同じ効果である。これは表2に見られるとおり、TCSC5台のうち、4台までが同じ場所に設置されているためである。

ケースCで用いている感度係数は、線路のアドミタンスを微小変化させたときの電氣的出力の割合を表している。この係数が大きければ(16)における電氣的出力を大きく変えることができるため制御効果を向上できると考えられる。

前述したように、直流法が成立する軽負荷時には、感度係数は負荷や発電機の状態によらず、ほぼ一定値となる。つまり潮流分布とは関係なく定義され、常に効果の高い場所を選び出すといえる。一方、ケースAの相差角は、潮流状態により変わってしまうため、指標としては信頼性に欠く。

以上、3ケースのTCSC設置を比較検討した結果、ケースCが一番動揺抑制効果が優れており、かつ潮流状態によらず信頼性のある指標となる。よって感度係数に着目してTCSC設置場所を選定することがよいと結論できる。

〈3・3〉重み行列の違いによる応答結果 重み行列の調整方法については〈2.5〉において説明しているが、ここではその違いが過渡安定度にもどのように影響をおよぼすかを述べる。

R は対角要素1のまま一定とし、 Q の対角要素を1,100,10000と変更した場合の応答結果を図11～13に示す。なお紙面の都合により、G6～G9は省略し、G2～5の相差角、および各TCSCの制御量を見ていくこととする。事故条件は前記と同じ、TCSCの設置場所は前記の検討結果から、ケースCと同一にしている。また以下ではTCSCの動きを見やすくするため、シミュレーション時間を5[s]とした。

まず図11の $Q=\text{diag.}[1\cdots 1]$ の場合には、TCSCの制御が飽和に達することではなく、 $\pm 10\%$ にほぼ収まる。その結果、動揺の改善はほとんど見られず、図4(a)の無制御と大差ない。

次に図12の $Q=\text{diag.}[100\cdots 100]$ の場合には、相差角の動揺は図7の $Q=\text{diag.}[10\cdots 10]$ のケースとほぼ同じとなる。図10と比較するとTCSCの収束に少し時間がかかり、また定常偏差が大きくなる。この傾向は図13の $Q=\text{diag.}[10000\cdots 10000]$ の場合にはさらに顕著となり、相差角の動揺はこれ以上改善されない。

このように重み行列を調節しても、動揺抑制には限界があることがわかる。この例では上記の試行錯誤の結果、 $Q=\text{diag.}[10\cdots 10]$ が適切と考えられる。TCSCの設置台数の変更など、条件が変更となった場合には、同様の手順を踏むことにより、適切な重み行列を選定することができる。

〈3・4〉過酷な事故の例 最後にTCSCを用いることによって脱調を防げる例を述べる。TCSCの設置位置は、やはりケースCの5ヶ所とした。そして、特に過酷な事故状態を作るため、重負荷状態の系統とするために、まず図2の系統モデルの線路長を一律に5倍とした。そして前述までの事故条件の時間を

0.10[s] 3相地絡事故が送電線2-34の母線34至近端で発生

0.30[s] 事故除去のため送電線2-34をルート1しゃ断

0.50[s] 再閉路により復旧

とした。重み行列は〈3.3〉で選択した $Q=\text{diag.}[10\cdots 10]$ としている。

(a) 相変角変動(G2~G5) (a) Relative angle deviation(G2-G5). (b) 制御量 (b) Control amount.

図 11 重み行列 $Q=\text{diag.}[1\cdots 1]$ の時の応答

Fig.11. Response for $Q=\text{diag.}[1\cdots 1]$.

(a) 相変角変動(G2~G5) (a) Relative angle deviation(G2-G5). (b) 制御量 (b) Control amount.

図 12 重み行列 $Q=\text{diag.}[100\cdots 100]$ の時の応答

Fig.12. Response for $Q=\text{diag.}[100\cdots 100]$.

(a) 相変角変動(G2~G5) (a) Relative angle deviation(G2-G5). (b) 制御量 (b) Control amount.

図 13 重み行列 $Q=\text{diag.}[10000\cdots 10000]$ の時の応答

Fig.13. Response for $Q=\text{diag.}[10000\cdots 10000]$.

(a) 相変角変動(G2~G5) (a) Relative angle deviation(G2-G5). (b) 制御量 (b) Control amount.

図 14 重大事故時(制御あり)の応答

Fig.14. Response against heavy fault with control.

図 15 重大事故時(制御なし)の応答

Fig.15. Response against heavy fault without control.

図 14 は TCSC 制御がある場合の応答結果である。このような重大な事故であるにもかかわらず、相差角は約 2[s]で定常状態に戻り、TCSC の動作も振動的にならず収束に向かう。

ここで TCSC には数%の定常偏差が残る。これは事故によりガバナが働き、発電機出力が初期状態から変化するためである。

一方、TCSC のない図 15 では、相差角は大きく振動する。そして約 2[s]で G2 が脱調に至る。このように、提案する TCSC 制御を用いることによって、脱調の抑制もはかれることがわかる。

4. むすび

本論文では、任意数の TCSC が設置された多機電力システムにおいて、最適レギュレータ理論を用いた TCSC 制御方式を提案し、大規模電力システムモデルを用いて数値シミュレーションによる検討を行った。その結果から、

- (1)大規模システムにおいて有効な動揺抑制効果を得られる
- (2)感度係数に着目すれば適切な設置場所を選定できる
- (3)応答を調べながら重み行列を調節する必要がある
- (4)脱調の防止にも寄与できる

ことが示された。

この感度係数の使用は非常に有効であるが、系統構成の変更があった際には計算をし直す必要がある。多少の変動があった際にも正常に動作させるためには、システムのパラメータ変動に対するロバスト制御の適用が有効だと考えられる。また重負荷時には、線形性が成り立ちにくくなるため、この点を補償した手法の開発が必要である。

また既に用いられている PSS との関連について、例えば、発電機に設置される PSS と、送電線に設置される TCSC とを、協調して運転させることが可能であるかどうか研究の余地が残されている。

将来的にはこれらの点を勘案して、より実用的な TCSC 制御法の開発を目指したいと考えている。

(平成 10 年 4 月 7 日受付, 平成 11 年 1 月 25 日再受付)

文 献

- [1] FACTS Terms & Definitions Task Force of the FACTS Working Group of the DC and FACTS Subcommittee, 'Proposed Terms and Definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)' IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.4, Oct.1997

- [2] 栗田篤, 「米国電力研究所の FACTS 構想 -基礎調査と試算-」, 電力中央研究所報告, T92020, 電力中央研究所(1993-3)
- [3] 千住智信・上里勝実, 「直列可変インピーダンス機器による電力システムの安定化制御」, 電気学会論文誌(B), Vol.114-B, No.2 (1994-2)
- [4] 貝津弘幸・佐藤孝雄・沼田謙二・横山和哉, 「一機無限大母線系統の位相制御による過渡動揺抑制効果の実験と解析」, 電気学会電力・エネルギー部門誌(B), Vol.115-B, No.6 (1995-6)
- [5] 北條昌秀・三谷康範・辻穀一郎, 「直列可変インピーダンスを用いた発電機電力の直接制御によるロバスト系統安定化制御」, 電気学会電力・エネルギー部門誌(B), Vol.117-B, No.7 (1997-7)
- [6] D. J. Trudnowski, M. K. Donnelly, J. F. Hauer, 'Estimating Damping Effectiveness of BPA's Thyristor Controlled Series Capacitor by Applying Time and Frequency Domain Methods to Measured Response', IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.2, May 1996.
- [7] Rajesh Rajaraman, Ian Dobson, 'Damping Estimates of Subsynchronous and Power Swing Oscillations in Power Systems with Thyristor Switching Devices' IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.4, November 1996.
- [8] J. F. Hauer, W. A. Mittelstadt, R. J. Piwko, 'Modulation and SSR Tests Performed on the BPA 500kV Thyristor Controlled Series Capacitor Unit at Slatt Substation', IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.2, May 1996.
- [9] Glauco N. Taranto, Joe H. Chow, 'A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers', IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.3, August 1995.
- [10] M. Klein, L. X. Li, G. J. Rogers, S. Farrokhpooy, N. J. Balu, 'H_∞ Damping Controller Design in Large Power Systems', IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.1, February 1995.
- [11] 藤田秀樹・紅林久之・野原哈夫・後藤益雄・鬼頭幸生, 「高速移相器によるループ系統制御」, 電気学会論文誌(B), Vol.114-B, No.5 (1994-5)
- [12] 岡本浩・横山明彦・関根泰次, 「可変インピーダンス型電力システムの安定化制御手法とその可変直列コンデンサ補償系統への応用」, 電気学会論文誌(B), Vol.113-B, No.3 (1993-3)
- [13] 尾形達紀・藤田吾郎・竹内茂・白井五郎, 「可変直列コンデンサを用いた多機電力システムの安定化制御」, 電力技術研究会資料, PE-94-176, (1994-10)
- [14] 白鳥悟史・藤田吾郎・竹内茂・白井五郎, 「AVR, ガバナを考慮した FACTS 機器による電力システムの安定化制御」, 平成 8 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, No.213 (1996-8)
- [15] 白鳥悟史・藤田吾郎・竹内茂・白井五郎, 「大規模電力システムに対する可変直列コンデンサを用いた安定化制御」, 電力技術研究会研究資料, PE-96-111 (1996-9)
- [16] 黄 崇能・齋藤浩海・豊田淳一, 「線路の過負荷を解消する直列コンデンサのインテリジェント化に関する研究」, 平成 8 年電気学会全国大会講演論文集, No.1343 (1996-3)
- [17] 小林直樹・原築志, 「ローカル信号に基づく可変直列コンデンサの多機系ダンピング向上制御」, 電気学会電力・エネルギー部門誌(B), Vol.116-B, No.12, pp.1500-1507 (1996-12)
- [18] X. R. Chen, N. C. Pahalawaththa, U. D. Annakkage, C. S. Kumble, 'Output Feedback TCSC Controllers to Improve Damping of Meshed Multi-machine Power Systems', IEE Proc. -Gener. Transm. -Distrib., Vol.144, No.3, May 1997.

藤 田 吾 郎 (正 員) 1970 年 1 月 12 日生。1992 年法政大学

工学部電気工学科卒業。1994 年同大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1997 年同博士課程修了。博士(工学)。同年東京都立大学研究生。1998 年 4 月より芝浦工業大学工学部電気工学科専任講師。電力システムの制御に関する研究に従事。IEEE, SICE 会員。

白 鳥 悟 史 (正 員) 1973 年 2 月 12 日生。1995 年 3 月法政

大学工学部電気工学科卒業。1997 年 3 月同大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。電力システムの安定化制御に関する研究に従事。1997 年 4 月より東京電力(株)勤務。

白 井 五 郎 (正 員) 1941 年 6 月 21 日生。1970 年早稲田大

学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年法政大学工学部研究助手, 現在, 同教授。工学博士。電力システムの安定化制御, 需給運用制御, 電圧安定性などの研究に従事。IEEE, SICE 会員。