

多機系統における同期発電機の超電導限流器

による安定化に関する検討

—— 2機無限大母線系統による解析 ——

学生員 矢神 雅規* 非会員 柴田 真輔*
正員 村田 年昭* 正員 田村 淳二*

An Analysis of Superconducting Fault Current Limiter for Stabilization of Synchronous Generators in Multi-Machine System —— Two-Machine-Infinite Bus System ——

Masaki Yagami*, Student Member, Shinsuke Shibata*, Non-Member,
Toshiaki Murata*, Member, Junji Tamura*, Member

This paper presents the results of analyses of the effectiveness of a superconducting fault current limiter (SFCL) to stabilize the synchronous generators, suppress turbine shaft torque oscillations, and limit the fault current in a two-machine-infinite bus system. In this study, the system model with two SFCLs having shunt resistance installed at each generator terminal was used taking 3LG (three lines to ground) fault at 12 fault points into account. These analyses were performed using EMTP/ATP. It is concluded that the use of SFCL with shunt resistance value of 1.1 pu is most effective for all fault points for the stabilization of synchronous generators, the suppression of turbine shaft torque oscillations, and the limitation of fault current.

キーワード：超電導限流器、同期発電機、限流素子抵抗、タービン軸トルク、故障電流、EMTP

Keywords : superconducting fault current limiter, synchronous generator, shunt resistance, turbine shaft torque, fault current, EMTP

1. はじめに

故障電流抑制装置である超電導限流器 (Superconducting Fault Current Limiter : 以下 SFCL と略記) は、超電導技術の進歩と限流器ニーズの高揚を背景に、近年、各方面で盛んに研究開発が行われている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。短絡故障時に発生する故障電流の増大化は、電力需要の増加や分散電源の導入増加など電力系統の拡大連系が進む上で必至であることから、母線分離等による故障電流対策に加え、電力系統への限流器導入が必要であると考えられている⁽⁵⁾。限流器には種々の動作方式があるが、中でも SFCL はその高速動作と自己起動特性から有力な装置として期待されている。

また、SFCL は同期発電機の安定度の改善に対しても有効な装置として知られている。故障電流抑制のために発生する限流インピーダンスが、故障により低下した発電機出力を上昇させ安定度を向上させる。これは、制動抵抗方式による安定化原理と基本的に同じであり、インピーダンスの

電力消費量を調整することで発電機のエネルギー入出力量のバランスを改善している。一般に、S/N (Superconducting / Normal) 転移型限流器の場合、超電導コイルに並列に限流素子を接続し、超電導コイルの常電導抵抗と限流素子インピーダンスとの合成インピーダンスにより故障電流を抑制する。コイルの常電導抵抗値は一定であるため、故障電流の抑制効果および電力消費量はこの限流素子により変化することになる。従って、SFCL を効果的に利用するためには、限流素子に関する十分な検討が必要である。

著者らはこれまでに、1機無限大母線系統において故障電流の抑制、同期発電機の安定度の改善、並びにタービン軸系のねじれトルク振動の抑制の面で効果的な SFCL の限流素子について検討を行ってきた⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。その結果、1.0~2.0pu 程度の限流素子抵抗が上記の観点において効果が大きいことがわかっている。また、これまでの研究から 1 機無限大母線系統での SFCL の基本的な動特性および効果が確認できた。

本論文では、多機系統解析として 2 機無限大母線系統における SFCL の限流特性および安定度の改善効果に関する検討結果を報告する。SFCL を各発電機の端子母線に接続

* 北見工業大学 電気電子工学科
〒090-8507 北見市公園町 165 番地
Department of Electrical and Electronic Engineering, Kitami
Institute of Technology
165 Koen-cho, Kitami 090-8507

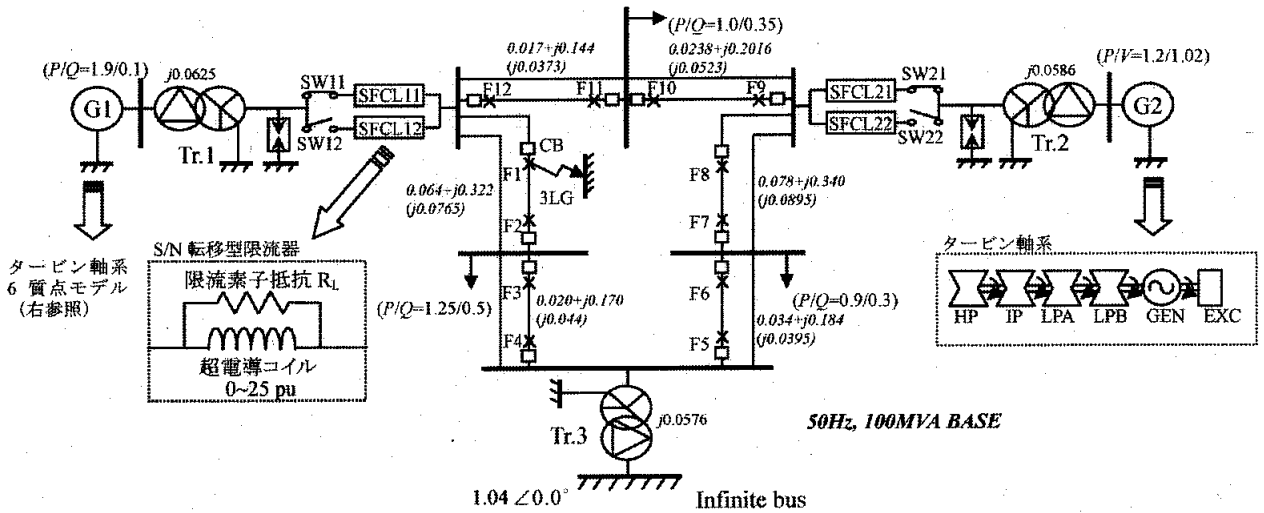


図1 2機無限大母線システムモデル
Fig. 1. Two machine infinite bus model system.

し、12ヶ所の故障点に対し3線地絡故障を想定した。このモデルシステムにおいて故障電流の抑制、同期発電機の安定度の改善、並びにタービン軸系のねじれトルク振動の抑制効果が最大となるSFCLの限流素子抵抗値について検討する。また、SFCLによる過渡安定度の改善として故障継続時間の延長化に関する検討も行った。なお、シミュレーションには、EMTP/ATPを使用した。

2. 電力系統構成

図1に本研究で使用した2機無限大母線システムモデル⁽⁹⁾ (オリジナルモデルを一部修正している)を示し、各発電機の定数を表1に示す。各発電機および変圧器のY側中性点は共に直接設置とし、変圧器は漏れインダクタンスのみ考慮し励磁インダクタンスは無視している。図中に示してある線路定数は、一回線あたりの $R+jX (jB/2)$ を表している。SFCLは、正相、逆相電流のみならず零相電流を効果的に抑制するために変圧器Y側に設置し、再閉路失敗の対策および超電導コイルの超電導復帰時間の短縮を図るためにそれぞれ2台並列に接続している。また、本来は故障電流が過大となる箇所にもSFCLを設置する必要があるが、本研究では同期発電機の安定化を主な目的としていることから、今回は発電機端子側にのみ設置して解析を行った。また、限流時に発生する過大な過渡電圧を抑制するために各変圧器Y側に避雷器を設置した。なお、避雷器は酸化亜鉛 (ZnO) ギャップレス非直線抵抗型を想定し、放電開始電圧は相電圧波高値が1.84 pu (定格値の1.3倍)を超えた時点としている。SFCLは、限流素子抵抗 R_L と超電導コイルとが並列に接続された転流型を想定し、超電導コイルは、クエンチ後、1msで25 pu (各発電機容量ベース)まで指数関数的に上昇するものとした。また、タービン軸系として図1に記されている6質点モデルを使用し、そのパラメータ⁽¹⁰⁾を表2に示す。図2は、各発電機の制御系として用いた一次遅れの

表1 G1, G2の発電機定数

Table 1. Generator parameters of G1 and G2.

G1			
MVA			200
R_a (pu)	0.003	X'_d (pu)	0.171
X'_l (pu)	0.102	X_d (pu)	0.13
X_q (pu)	1.651	T_{do} (s)	5.9
X'_q (pu)	1.59	T'_{do} (s)	0.535
X_d (pu)	0.232	T_{do} (s)	0.033
X_q (pu)	0.38	T'_{do} (s)	0.078
X'_d (pu)	0.171	H (s)	9
G2			
MVA			130
R_a (pu)	0.004	X'_d (pu)	0.134
X'_l (pu)	0.078	X_d (pu)	0.13
X_q (pu)	1.22	T_{do} (s)	8.97
X'_q (pu)	1.16	T'_{do} (s)	1.5
X_d (pu)	0.174	T_{do} (s)	0.033
X_q (pu)	0.25	T'_{do} (s)	0.141
X'_d (pu)	0.134	H (s)	6

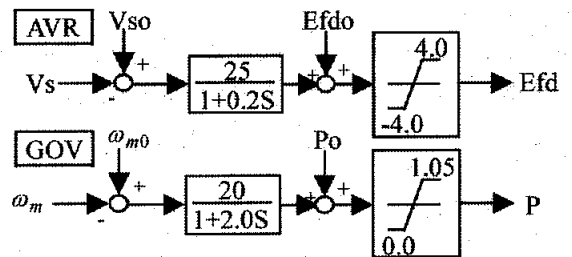


図2 AVRとガバナーモデル
Fig. 2. AVR and governor models.

AVRおよびガバナーモデルを示している。

シミュレーション条件は、図3に示すタイムシーケンスに従い、図1に記した12の故障点 (F1~F12) で $t=0.1$ secにそれぞれ3LG (3線地絡) 故障発生、 $t=0.2$ secに遮断器 (CB) により故障線両端を遮断、 $t=1.0$ secに再閉路とした。また、SFCLは、 $t=0.2$ secの故障線遮断と同時にSW12とSW22を

表2 タービン軸系定数
Table 2. Turbine shaft parameters.

	慣性定数 (s)		ばね定数 (pu T/rad)	
	G1	G2	G1	G2
HP	0.288890	0.192593	19.303	19.303
IP	0.483849	0.322566		
LPA	2.670287	1.780191	34.929	34.929
LPB	2.749726	1.833151	52.038	52.038
Generator	2.700840	1.800560	70.858	70.858
Exciter	0.106406	0.070937	2.82	2.82

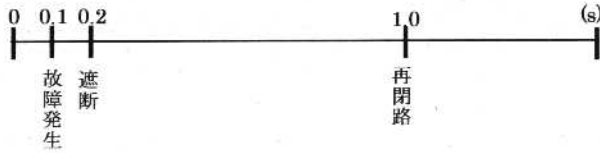


図3 シミュレーションのタイムシーケンス
Fig. 3. Time sequence of simulation.

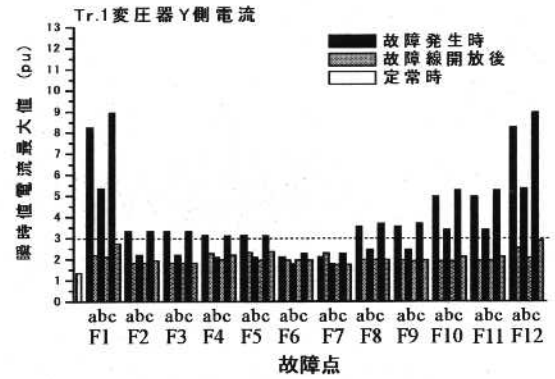
閉じ、SW11 と SW21 を開放して予備機へそれぞれ動作切替を行うこととした。なお、計算のきざみは 50 μ s である。

3. シミュレーション結果

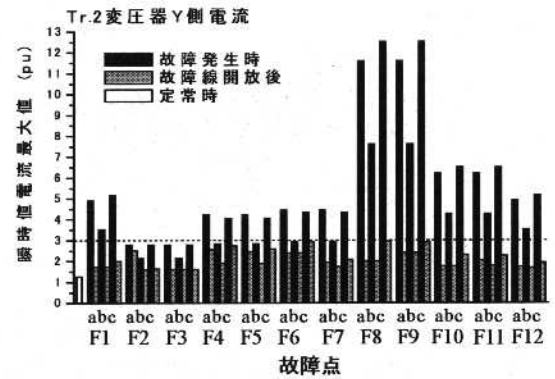
〈3・1〉 臨界電流値の設定 SFCL を導入する場合、故障発生後、故障回線の故障相のみ動作させ健全相は動作させない必要がある。それ故、SFCL の臨界電流値 (クエンチを開始する電流値) は健全相の最大電流以上としなければならない。また、再開路失敗の対策として予備機である SFCL12 および SFCL22 を再開路時まで動作可能状態にしておく必要があることから、故障線の遮断時に発生する瞬間的な過渡電流に対して動作しないように設定しなければならない。

図4 (a)および(b)は、各故障点における故障に対して変圧器 Tr. 1 と Tr. 2 の Y 側に流れる各相の瞬時値電流最大値 (各発電機ベース) をそれぞれ示している。なお、 $t=0.1s$ の故障発生時間は、両発電機共に b 相の発電機端子電圧がほぼ最大となる瞬間となっており、故に b 相電流には直流分がほとんど重畳せず a 相と c 相電流に大きな直流分が重畳するケースとなっている。図4 と上記の設定条件を考慮して本系統では両 SFCL の臨界電流値を 3.0 pu (各発電機ベース) に設定した。実際には多回線故障も含む不平衡故障時における故障電流の特性も考慮に入れて臨界電流値を決定する必要があるが、本論文では簡単のため 3LG 故障のケースのみを対象に臨界電流値を決定した。臨界電流値を 3.0 pu としたとき、図4 から各故障点に対する各相の SFCL の動作状態を予測することができる。SFCL の動作状態を各故障点に対してまとめたものが表3 となる。これより、故障点によっては故障電流が臨界電流値に達しない場合があり、各相の SFCL 全てが動作するわけではないことがわかる。

〈3・2〉 故障電流の抑制 図5に、故障点 F1 で3LG故



(a) Tr. 1 側



(b) Tr. 2 側

図4 各故障点に対する最大電流

Fig. 4. Maximum current for each fault point.

表3 各故障点に対する SFCL の動作状態

Table 3. Operating state of SFCL for each fault point.

		F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	F 10	F 11	F 12
SFCL11	a	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○
	b	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
	c	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○
SFCL12	a	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	b	○	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○
	c	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○: 動作する ×: 動作しない

障を発生させた場合の変圧器 Tr. 1 および Tr. 2 の Y 側に流れる故障電流 (a 相) の波形を示す。なお、限流素子抵抗値 R_L は、各設置母線の発電機容量ベース値である (以下の全ての図において同様)。さらに、このようなベース値のもとで、発電機 G1、G2 の端子に設置される SFCL の R_L の pu 値をそれぞれ同じ値に設定した。同図において、SFCL の導入により故障電流が抑制され、また、限流素子抵抗値によって限流効果が異なっているのがわかる。そこで各限流素子抵抗値に対する限流効果を確認するために、図6に故障点 F1 のケースにおける各限流素子抵抗値に対する電流最大値を示す。なお、 $R_L=0.0$ は、SFCL なしを意味する。限流素子

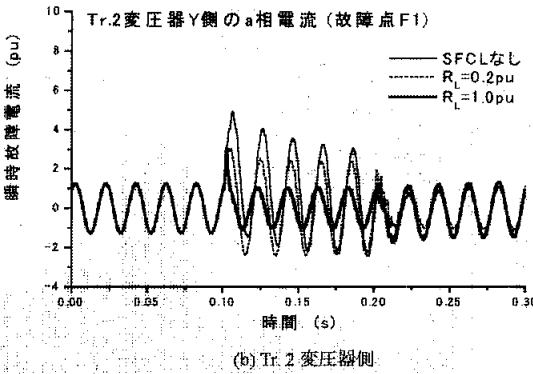
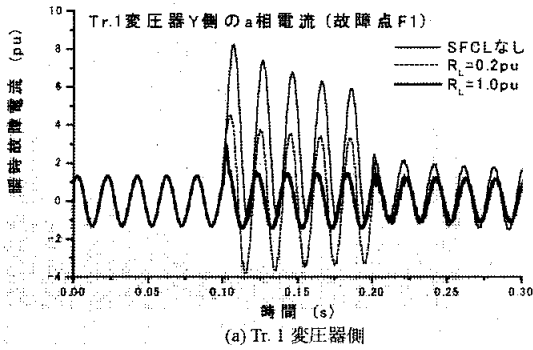


図5 各限流素子抵抗値に対する電流波形 (故障点 F1)
Fig. 5. Current waveforms for each shunt resistance (fault point fl).

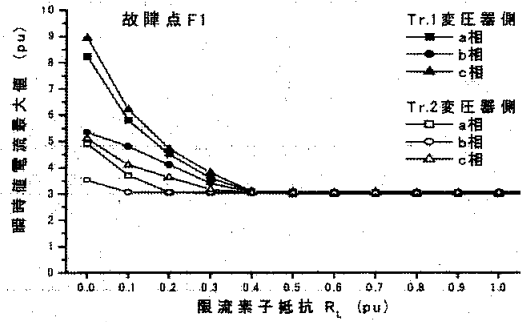


図6 各限流素子抵抗値に対する最大電流 (故障点 F1)
Fig. 6. Maximum current for each shunt resistance (fault point fl).

抵抗値が 0.4 pu 以上で、各変圧器に流れる三相全ての電流が設定臨界電流値 (3.0 pu) 以下に抑制された。三相全ての故障電流を臨界電流値以下に抑制できる限流素子抵抗値を各故障点に対してまとめたものが表 4 となる。表中に記されている '*' は、SFCL なしの場合も含む全ての限流素子抵抗値に対して常に故障電流が 3.0 pu 以下であったことを意味する。同表より、限流素子抵抗値を 0.5 pu 以上とすることで全ての故障点に対して故障電流を臨界電流値以下に抑制できることがわかった。

(3-3) 安定度の改善 多機系統において安定度判定

表 4 各故障点のケースにおける故障電流を臨界電流値以下に抑制できる限流素子抵抗値

Table 4. Shunt resistance value which can limit the fault current within the critical current value in each fault point.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
SFCL11	0.4pu~	0.2pu~	0.2pu~	0.1pu~	0.1pu~	*
SFCL21	0.4pu~	*	*	0.3pu~	0.3pu~	0.3pu~
	F7	F8	F9	F10	F11	F12
SFCL11	*	0.2pu~	0.2pu~	0.4pu~	0.4pu~	0.4pu~
SFCL21	0.3pu~	0.5pu~	0.5pu~	0.4pu~	0.4pu~	0.4pu~

* : 全ての R_L 値に対して電流最大値が 3.0pu 以下

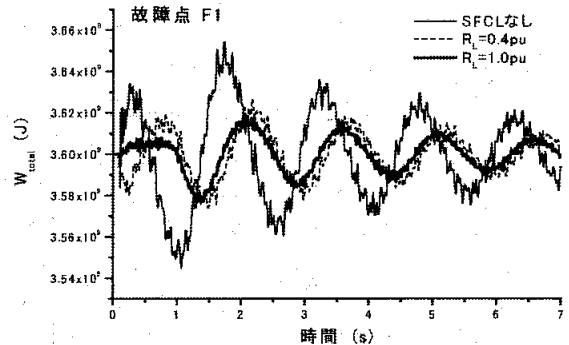


図7 各限流素子抵抗値に対する W_total (故障点 F1)
Fig. 7. W_total for each shunt resistance (fault point fl).

を行う際、系統全体の安定度を対象とした判定方法が必要である。そこで、本論文では、以下に示す各発電機の運動エネルギーを足し合わせた総運動エネルギー W_total を安定度判定に利用する。

$$W_i = \frac{1}{2} J_i \omega_{mi}^2 \quad (J)$$

$$W_{total} = \sum_{i=1}^N W_i \quad (J) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、W_i は各発電機の運動エネルギー (J)、J_i は慣性モーメント (kgm^2)、\omega_{mi} は回転角速度 (rad/s)、N は発電機数である。これにより、発電機ごとの容量の違いも適切に考慮した形で発電機全体の運動エネルギーが得られるため、系統全体の安定度の判定が正確に行えると考えられる。

図 7 は、故障点 F1 のケースで、各限流素子抵抗値に対する G1 の運動エネルギーと G2 の運動エネルギーを足し合わせた総運動エネルギー W_total (J) を示している。同図から、SFCL の導入により W_total の振動が抑制されているのがわかる。これは SFCL 導入により系統全体の安定度が改善されていることを示している。

次に、各限流素子抵抗値に対する安定度の改善効果の相違をより明確なものとするため、次に示す安定度判定の指標 W_c を使用する。但し、T=7.0 sec とした。

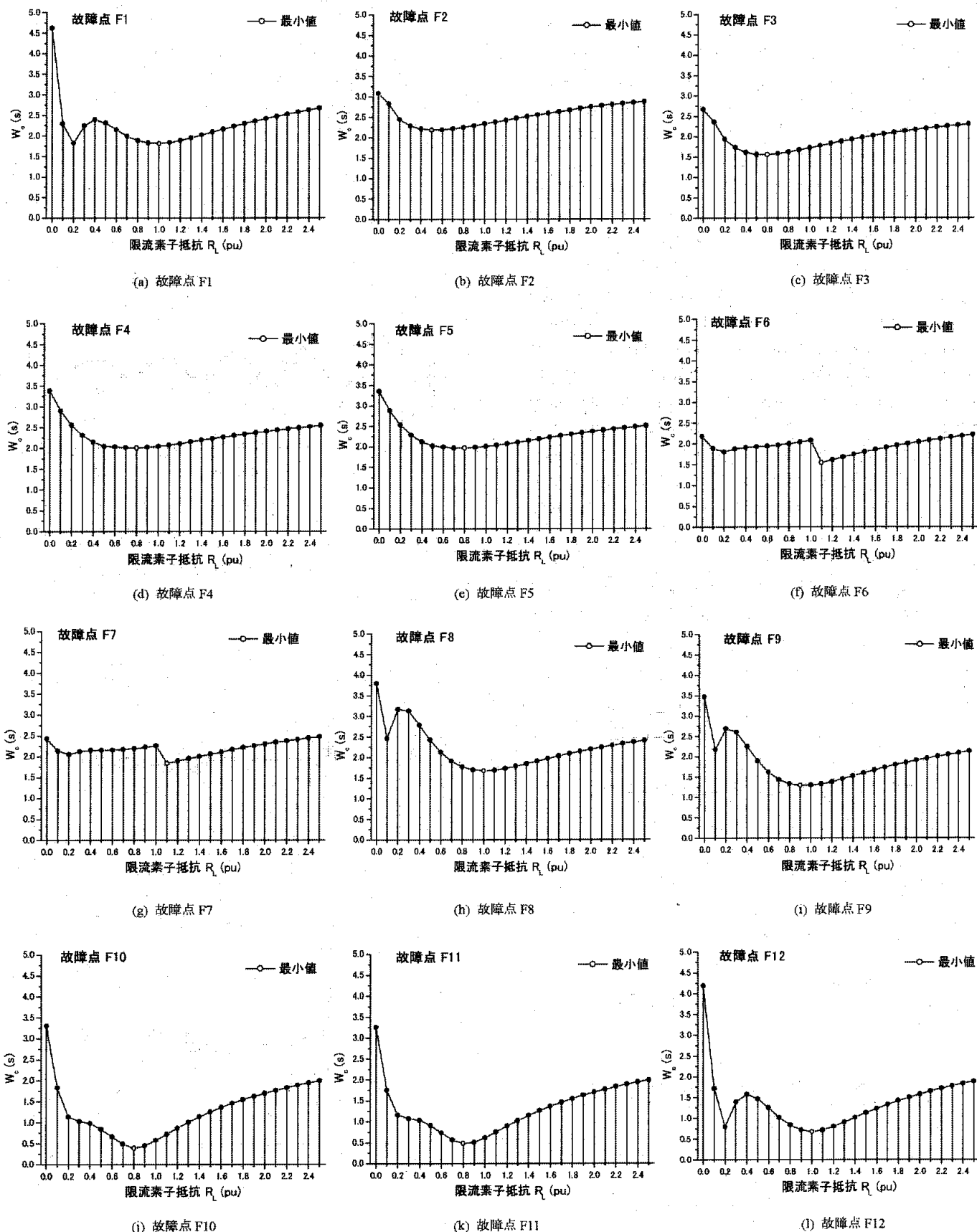


図8 各限流素子抵抗値に対する W_c
 Fig. 8. W_c for each shunt resistance.

$$W_c \text{ (sec)} = \int_0^T \left| \frac{d}{dt} W_{total} \right| dt / \text{系統ベース電力} \dots\dots\dots (2)$$

W_c は、発電機の回転子と系統との間でやり取りされるエネルギーの変化分の累積積分であり、従ってこの値が小さいほど過渡的な動揺が小さいことを意味し、各発電機のトータル的な動揺が小さいと判断できる。図 8 に、各故障点のケースにおける各限流素子抵抗値に対する W_c を示す。これらの結果から、安定度が効果的に改善される限流素子抵抗値は 0.6~1.1 pu であることがわかる。また、 W_c の安定度指標としての有効性を示すために、安定度の改善効果が大きい図 8(k) ($R_L=0.8pu$ 使用時と SFCL なしの場合とを比較して $W_c=2.75s$ の改善) のケースと改善効果が小さい図 8(f) ($R_L=1.1pu$ 使用時で $W_c=0.6s$ の改善) のケースの発電機負荷角応答をそれぞれ図 9, 10 に示す。図 9 の故障点 F11 のケースでは、負荷角が抑制され安定度が非常に改善されているのに対し、図 10 の故障点 F6 のケースでは、安定度の改善効果が小さい。これは図 8 に示した W_c の特性と類似しており、故に W_c は安定度指標として有効であると考えられる。

図 11 は、故障点 F1 のケースにおける各発電機のアギャップトルクの応答を示している。SFCL なしの場合、故障発生後に非常に大きなトルク振動が発生しているが、SFCL を導入した場合は振動が抑制されている。さらに、限流素子抵抗値 $R_L=1.0 pu$ の場合、SFCL 動作後のトルクが初期値付近に抑制されている。図 8(a) の故障点 F1 のケースでは $R_L=1.0 pu$ が安定度の改善において最適であったことから、アギャップトルクが SFCL 動作後に初期値付近になるよ

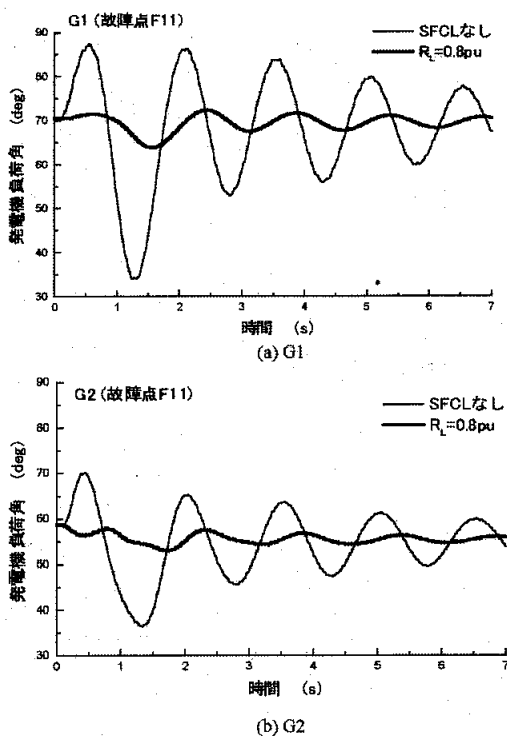


図 9 故障点 F11 のケースにおける発電機負荷角
Fig. 9. Load angle waveforms in the case of fault point f11.

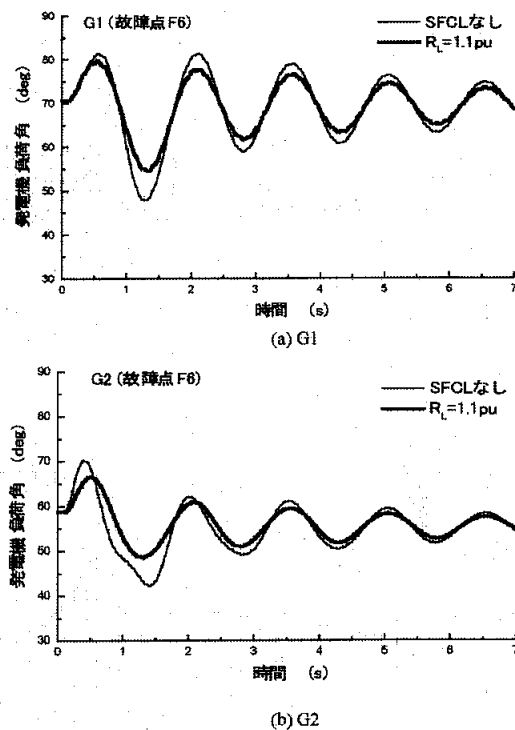


図 10 故障点 F6 のケースにおける発電機負荷角
Fig. 10. Load angle waveforms in the case of fault point f6.

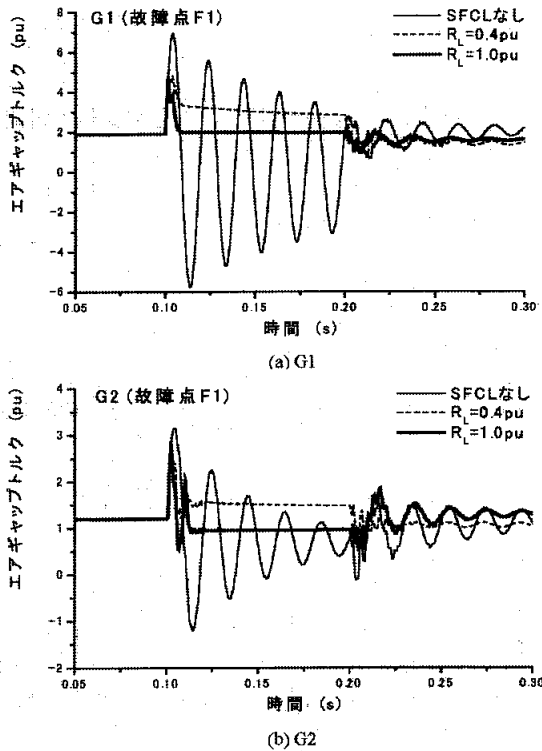


図 11 各限流素子抵抗値に対する発電機負荷角 (故障点 F1)
Fig. 11. Load angle waveforms for each shunt resistance (fault point f1).

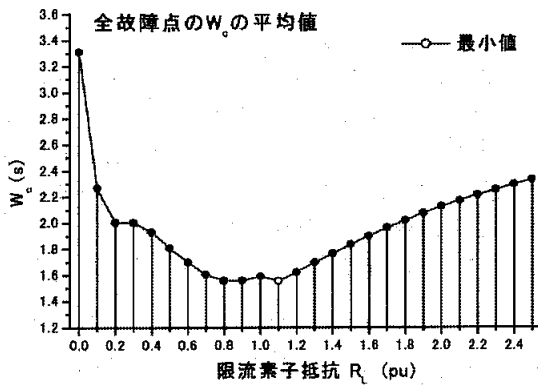


図 12 各限流素子抵抗値に対する全故障点の W_c の平均値

Fig. 12. Mean value of w_c in all fault points for each shunt resistance.

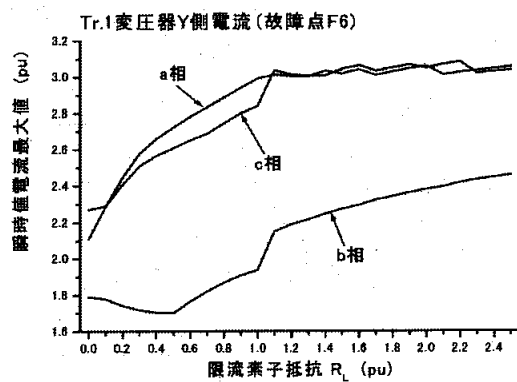


図 13 各限流素子抵抗値に対する Tr.1-Y 側最大電流 (故障点 F6)

Fig. 13. Tr.1 Y-side maximum currents for each shunt resistance (fault point F6).

うな限流素子抵抗値が安定度の改善において有効であることがわかる。

図 12 は、図 8 に示した各故障点における W_c を全故障点に対して平均した値を示している。これより、本系統において安定度の改善に最も効果的な限流素子抵抗値は 1.1 pu と考えられる。

〈3・4〉 故障電流の上昇 図 8 (f) および (g) の W_c の特性から、限流素子抵抗値 $R_L=1.1$ pu 使用時に W_c の値が急に減少しているのがわかる。これは、 $R_L=1.1$ pu 未満の限流素子抵抗値に対しては動作しない SFCL が、 $R_L=1.1$ pu 使用時に動作したためである。例として、図 13 に故障点 F6 のケースにおける各限流素子抵抗値に対する Tr. 1 変圧器 Y 側に流れる各相の電流最大値を示す。限流素子抵抗値が増加するに従って各相の電流最大値もまた上昇し、 $R_L=1.1$ pu 使用時に a 相と c 相の電流最大値が 3.0 pu に達している。また、表 3 の SFCL の動作状態からわかるように、同様な動作状態にある故障点 F2 や F3 のケースの W_c の応答結果 (図 8 (b), (c))

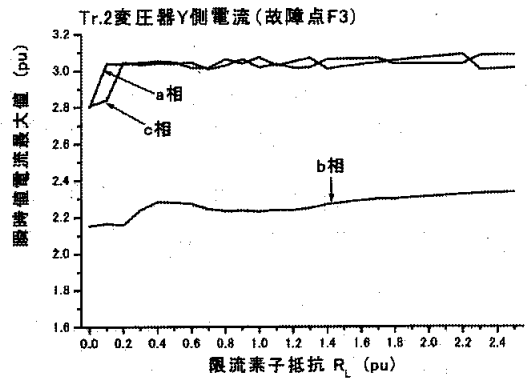


図 14 各限流素子抵抗値に対する Tr.2-Y 側最大電流 (故障点 F3)

Fig. 14. Tr.2 Y-side maximum currents for each shunt resistance (fault point F3).

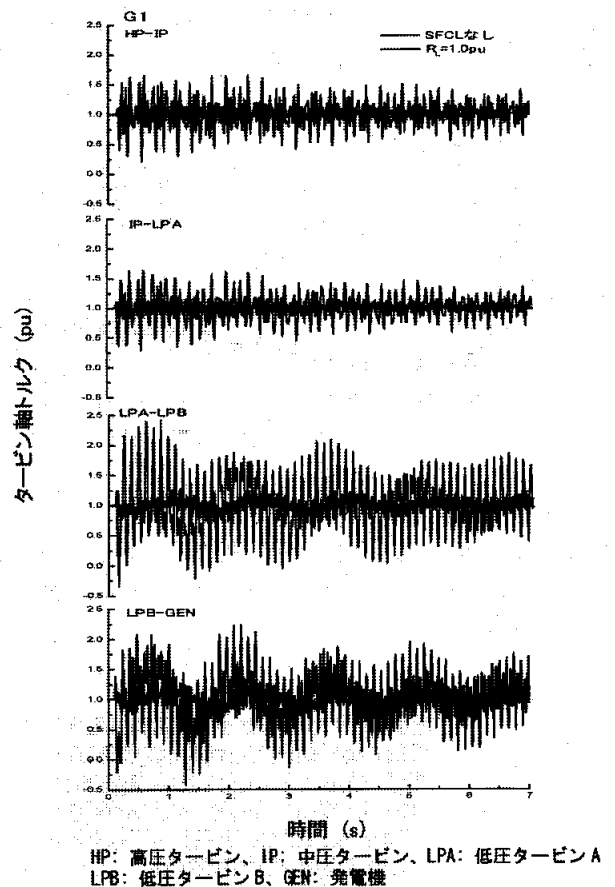


図 15 発電機 G1 のタービン軸トルク (故障点 F1)

Fig. 15. turbine shaft torques of generator G1 (fault point F1).

が F6 や F7 の故障点のケース (図 8 (f), (g)) と大きく異なっている。図 14 に故障点 F3 のケースにおける各限流素子抵抗値に対する Tr. 2 変圧器 Y 側に流れる各相の電流最大値を示す。この図からわかるように、限流素子抵抗値の増加とともに故障電流も上昇しているが、SFCL なしの場合におい

る電流最大値がすでに約 2.8 pu であるため限流素子抵抗値 $R_L=0.2$ pu 使用時には a 相と c 相の電流が共に 3.0 pu に達した。従って、 W_c の応答は故障点 F6 や F7 ではなく故障点 F4 や F5 (SFCL11, SFCL21 共に a, c 相が動作) のケースに似た特性となる。

(3.5) タービン軸トルク振動の抑制 タービン軸系は、短絡故障や線路開閉のようなトルク変化を引き起こす

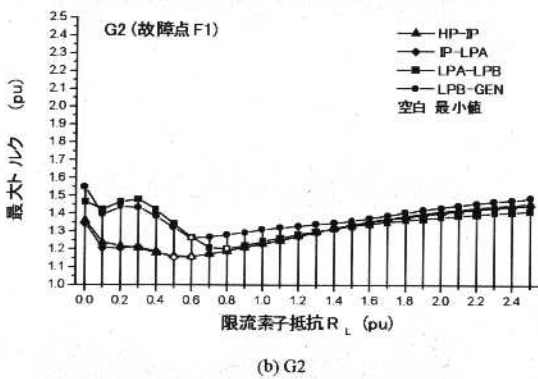
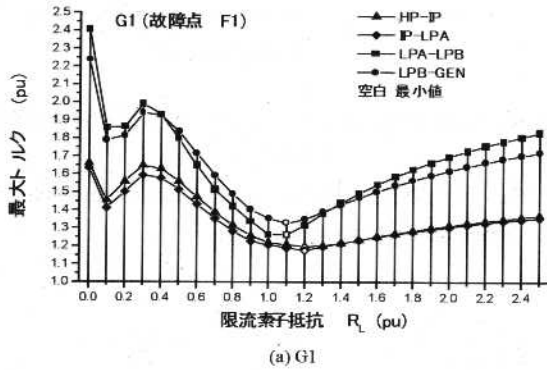


図 16 各限流素子抵抗値に対する最大トルク (故障点 F1)
Fig. 16. Maximum torque for each shunt resistance value (fault point F1).

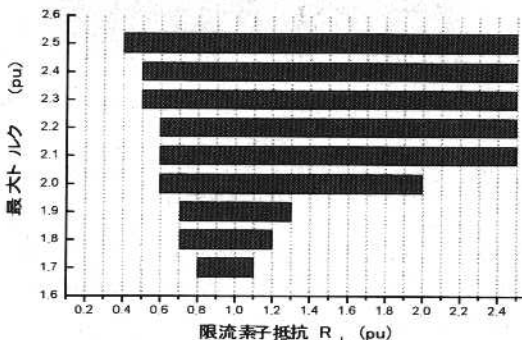


図 17 全故障点のケースにおいて、発電機最大トルクを指定値以下に抑制できる限流素子抵抗値
Fig. 17. Shunt resistance value which can limit the maximum torque within the specified value in all fault points.

外乱によってねじれトルクが増大するため、場合によっては軸疲労による損傷を被る可能性がある。それ故、過渡現象発生時における軸系の保護対策は重要である。図 15 に故障点 F1 のケースに対する発電機 G1 のタービン軸トルク応答 (各質点間の定常トルクベース) を示す。これより、SFCL なしの場合に比べ、限流素子抵抗値 $R_L=1.0$ pu を使用した場合は各質点間の軸トルク振動が非常に抑制されているのがわかる。図 16 に、故障点 F1 のケースにおいて、各限流素

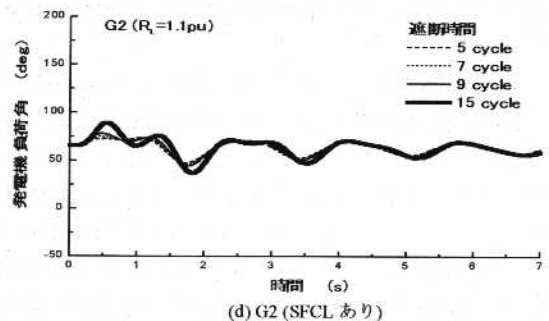
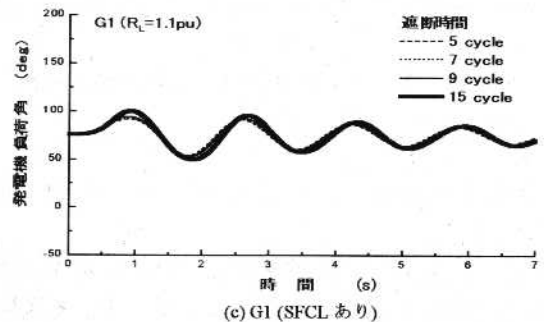
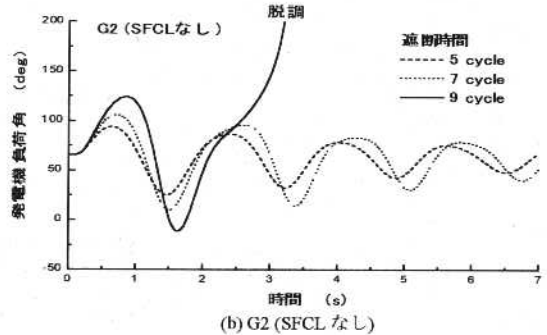
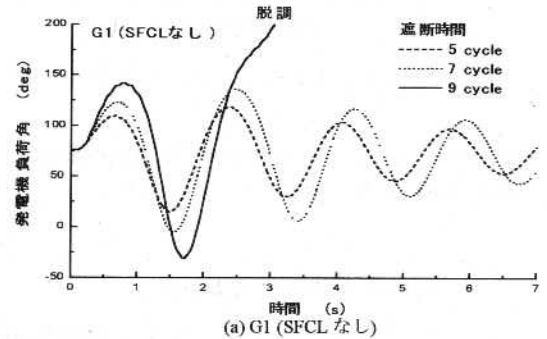


図 18 発電機が脱調するケースでの発電機負荷角応答
Fig. 18. Load angle waveforms in the case of out-of-step of the generator.

子抵抗値に対する G1, G2 両発電機の各質点間軸トルク振動の絶対値の最大値を示す。同様に、他の故障点のケースに対しても各質点間の最大トルク値を計算し、これら結果から全てのケース（全故障点および質点間）を対象として、最大トルクを各最大トルク値（2.5pu~1.6pu, 0.1pu すぎみ）以下に抑制できる限流素子抵抗値の範囲を示したものが図 17 となる。全てのケースに対して最大トルク値を 1.6pu 以下に同時に抑制できる限流素子抵抗値はなく、故に最大トルクを 1.7pu 以下に抑制できる限流素子抵抗値が最適値となり、同図より 0.8pu~1.1pu となる。

4. 過渡安定度の改善（故障継続時間の延長）

次に、SFCL なしの場合に発電機群が脱調するケースを検討する。シミュレーションは、図 1 のモデル系統において発電機 G1 の発電機出力を 2.0pu, G2 を 1.3pu に、変圧器 Tr.1 および Tr.2 のインピーダンスを $j0.075pu$ と $j0.1154pu$ にそれぞれ変更して計算を行った。シミュレーションの条件としては、 $t=0.1s$ に故障点 F1 において 3LG 故障が発生、任意の時間に遮断器により故障線を遮断し、その後、無電圧時間を 40cycle 一定として再開路することとした。

図 18 は、各遮断時間に対する SFCL なしの場合とあり ($R_L=1.1pu$) の場合の発電機 G1, G2 の負荷角応答を示している。SFCL なしの場合、両発電機共に 9cycle 遮断で脱調したが、SFCL ありの場合では 15cycle 遮断でも同期を維持している。これは、SFCL による安定度の改善効果が、故障継続時間の長さが安定度に与える影響に比べて非常に大きいことを示している。これより、先の研究⁽¹⁾において再開路失敗の発生確率を減らすために SFCL によって無電圧時間の延長化が可能であることを示したが、それに加えて SFCL による故障継続時間の延長、すなわち臨界故障除去時間の延長も可能であることがわかった。但し、故障継続時間が長くなると SFCL の限流素子に流れる電流の通電時間も増えることから、限流素子の温度特性に留意する必要がある。

5. あとがき

本論文では、故障電流の抑制、同期発電機の安定度の改善、並びにタービン軸系のねじれトルク振動の抑制を最も効果的に行える超電導限流器 (SFCL) の限流素子抵抗値について、2組の SFCL が設置された 2 機無限大母線系統モデルを基に 12 の故障点を想定して検討を行った。また、SFCL による過渡安定度の改善（臨界故障除去時間の延長）の効果についても検討を行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 故障電流は、0.5 pu 以上の限流素子抵抗値を使用することで設定臨界電流値以下になる。
- (2) 同期発電機の安定度の改善に最も適している限流素子抵抗値は、1.1 pu である。
- (3) タービン軸系のねじれトルク振動の抑制に最も適している限流素子抵抗値は、0.8pu~1.1pu である。
- (4) SFCL による安定度の改善効果が大きいと、過渡

安定度の改善（臨界故障除去時間の延長）が可能である。

上記(1)~(3)の結果より、1.1 pu の限流素子抵抗が故障電流の抑制、安定度の改善ならびにタービン軸系のねじれ応力の低減において最適であると考えられる。なお、本解析では、SFCL を 2 組設置し、故障箇所によっては SFCL の動作特性が種々変化するケースでの解析であるが、結果的にこれまでの 1 機無限大母線系統モデルにおける検討結果（1.0pu~2.0pu 程度の限流素子抵抗値が効果的）に含有される形となった。これは、本解析では各 SFCL の限流素子抵抗値を同値 (pu) にして解析を行っており、さらに全ての故障点での結果を平均して結論を導出したためと考えられる。また、本研究では、簡単のため 1 回線 3 線地絡故障のみ想定して臨界電流値を決定し故障計算を行ったが（本論文には示していないが 1 回線での不平衡故障を想定した故障計算も行い、本論文で設定した臨界電流値の妥当性を確認している）、多回線にまたがる多重故障を想定すると故障電流の特性が変化し、臨界電流値の設定に影響を与える可能性があると考えられる。それ故、今後の課題として、多回線故障を含む不平衡故障を対象として臨界電流値の設定など限流器の仕様に関する検討を行う他、遺伝的アルゴリズム等を用いて SFCL ごとの限流素子抵抗の最適値を個別に決定する研究を行う予定である。

最後に、本研究は科学研究費補助金、基盤研究 (C) の補助を受けたことを付記する。

(平成 14 年 2 月 28 日受付, 平成 14 年 8 月 26 日再受付)

文 献

- (1) Y.Goto, T.Niimi, K.Yukita, K.Mizuno, K.Ichyanagi, Y.H.Guo, Y.Yokomizu, and T.Matsumura: "Experimental Studies on Effect of Superconducting Fault Current Limiters on Improvement of Power System Stability", *T. IEE Japan*, Vol. 119-B, No. 11, pp.1241-1248 (1999-11) (in Japanese)
後藤・新實・雪田・水野・一柳・郭・横水・松村:「系統安定度に及ぼす超電導限流器導入効果の実験的検討」, 電学論 B, 119, 11, pp.1241-1248 (1999-11)
- (2) Y.H.Guo, Y.Yokomizu, T.Matsumura, and H.Fujita: "Difference of effect of Superconducting Fault Current Limiter Introduced into Electric Power System due to Resistive-Type, Reactive-Type and Their Introduction Location", *T. IEE Japan*, Vol. 120-B, No. 6, pp.791-800 (2000-6) (in Japanese)
郭・横水・松村・藤田:「電力系統における超伝導限流器効果の抵抗型とリアクトル型および設置位置による相違」, 電学論 B, 120, 6, pp.791-800 (2000-6)
- (3) R.F.Giese, and M.Runde, "Assessment Study of Superconducting Fault Current Limiters Operating at 77K", *IEEE Trans. Power Delivery*, 8, No.3 (1993)
- (4) Eddie M. Leung, "Superconducting Fault Current Limiters", *IEEE Power Engineering Review*, pp.15-30 (2000-8)
- (5) 故障電流抑制用限流技術調査専門委員会:「故障電流抑制用限流技術の現状と展望」, 電気学会技報, No.709 (1999)
- (6) M.Kubo, and J.Tamura: "An Analysis of Superconducting Fault Current Limiter for Stabilization of Synchronous Generators", *T. IEE Japan*, Vol. 119-B, No. 1, pp.63-72 (1999-1) (in Japanese)
久保・田村:「超電導限流器による同期発電機の安定化に関する検討」, 電学論 B, 119, 1, pp.63-72 (1999-1)
- (7) M.Yagami, T.Murata, and J.Tamura: "An Analysis of Superconducting Fault Current Limiter for Stabilization of Synchronous Generators under

Unbalanced Faults”, *T. IEE Japan*, Vol. 119-B, No. 12, pp.1510-1516 (1999-12) (in Japanese)

矢神・村田・田村:「不平衡故障時における同期発電機の超電導限流器による安定化に関する検討」, *電学論 B*, **119**, 12, pp.1510-1516 (1999-12)

- (8) K.Sentei, M.Yagami, T.Murata, and J.Tamura: “An Analysis of Superconducting Fault Current Limiter for Stabilization of Synchronous Generators under Unbalanced Faults (Part 2)”, *T. IEE Japan*, Vol. 120-B, No. 12, pp.1624-1634 (2000-12) (in Japanese).

泉亭・矢神・村田・田村:「不平衡故障時における同期発電機の超電導限流器による安定化に関する検討(続報)」, *電学論 B*, **120**, 12, pp.1624-1634 (2000-12)

- (9) 関根泰次: 電力系統過渡解析論, p.397, オーム社
- (10) IEEE Subsynchronous Resonance Task Force of the Dynamic System Performance Working Group Power System Engineering Committee, “First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance”, *IEEE Trans. Power Apparatus & Syst.*, **PAS-96**, No.5, pp.1565-1572 (1977)

- (11) M. Yagami, T. Murata, and J. Tamura: “A Consideration on the Extension of the Dead Time by Superconducting Fault Current Limiter”, *T. IEE Japan*, Vol. 122-B, No. 1, pp.147-148 (2002-1) (in Japanese).

矢神・村田・田村:「超電導限流器による無電圧時間の延長に関する検討」, *電学論 B*, **122**, 1, pp.147-148 (2002-1)

矢神 雅規

(学生員) 1975年10月10日生。2000年3月北見工業大学大学院電気電子工学専攻博士前期課程終了。2001年4月同大学大学院システム工学専攻博士後期課程に入学、現在に至る。主として、EMTPを用いた同期機、ならびに電力系統の解析に関する研究に従事。



柴田 真輔

(非会員) 1979年5月25日生。2002年3月北見工業大学電気電子工学科卒業。在学中はEMTPを用いた同期機、ならびに電力系統の解析に関する研究に従事。



村田 年昭

(正員) 1943年4月27日生。1966年3月北海道大学工業教員養成所電気工学科卒業。同年合同容器(株)入社。現在、北見工業大学助教授。主として、最適制御理論を応用したベクトル制御系の制御系構成法の研究に従事。工学博士。



田村 淳二

(正員) 1957年1月17日生。1984年3月北海道大学大学院博士課程修了。現在、北見工業大学教授。主として、同期機および電力系統の解析に関する研究に従事。電気設備学会、日本風力エネルギー協会会員。IEEE Senior Member。工学博士。

