琉球大学学術リポジトリ

直列制動抵抗(SDSR)による電力システムの過渡安定度の向上

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2008-04-01 キーワード (Ja): キーワード (En): Damping Resistor, Transient Stability, Lyapunov Method 作成者: 上里, 勝実, 千住, 智信, 当銘, 秀之, 高原, 景滋, Uezato, Katsumi, Senjyu, Tomonobu, Toume, Hideyuki, Takahara, Keiji メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/5507

直列制動抵抗（SDSR）による電力システムの過渡安定度の向上

上里勝実* 千住智信*
当銘秀之** 高原景滋***

Improvement of Transient Stability of Power System by System Damping Series Resistor (SDSR)

Katsumi Uezato* Tomonobu Senjyu*
Hideyuki Toume** Keiji Takahara***

Abstract

The system damping resistor is one of the method for improving the transient stability of power systems. The main circuit is the simple construction so that is low cost and is few abnormal surge, and is superior in ability of economy, reliability and maintenance. Conventionally, most of all system damping resistors have adopted the paralleled resistor, whereas the series resistor is used little.

In this paper, we investigate the characteristics of the series resistor by comparing with the paralleled resistor. The new control method for system damping series resistor is proposed for improving the transient stability of power systems.

Key Words: Damping Resistor, Transient Stability, Lyapunov Method.

1．まえがき

最近の電力系統では，旺盛な需要増加に対処するために大規模な電源開発が必要となっているが，相次ぐ用地難と公害問題などから，電源地点は需要地域を遠く離れて，多数の大容量発電所を集中的に開発し，これを長距離大容量送電線で輸送する傾向にある。この発電所立地の遠隔化，発電機単機容量の増大，およびそれらに伴う超々高圧による送電は，電源から負荷に至る単位リアクタンスの増大及び発電機の単位慣性定数の減少をもたらし，送電線故障に対する安定送電の耐力とも言える過渡安定度の悪化の要因となっている。

受付1989年10月31日
*工学部電気工学科
Dept.of Electrical Engineering, Fac.of Eng.
**大学院工学研究科電気・情報工学専攻
Graduate Student, Electrical and Information Engineering.
***沖縄電力株式会社
Okinawa Electric Power Co.,Ltd.

過渡安定度とは同期機が運転中負荷の急変，線路の開閉，短絡故障などにより過渡現象を生じ，その過渡状態が経過した後なお安定な運転を維持できる程度をいう。この過渡安定度向上の一手段として，制動抵抗（*System Damping Resistor*）による方法がある[1]~[4]。この制動抵抗（SDR）は系統故障発生時に，短時間定格の大容量抵抗器を一時的に対象とする発電所母線に挿入し，その消費電力により発電機の加速を抑制し系統安定度を向上させるもので，特に系統故障直後の回転子の位相角動揺の第1波の抑制に効果があり，経済性，信頼性，保護性の面でも優れている。

主に採用されている従来の制動抵抗は負荷と並列に投入される並列制動抵抗（*System Damping Parallel Resistor : SDPR*）方式であり，送電線に直列に挿入する直列制動抵抗（*System Damping Series Resistor : SDSR*）方式[5]はほとんど用いられていない。これは，直列制動抵抗が並列方式と比較して設備費が高く，並列方式と同じ制御法では直列方式の特徴を生かした制御が行われないことによるものである。近年は直列方式が見直され，この方式も検討され始めている[6]。

本論文では，直・並列制動抵抗の特徴を明らかにするとともに，直列制動抵抗の特徴を生かした新しい制御法を提案する。過渡安定度の評価に重要な安定性判別には，リヤプノフ法を適用している。

2．発電機の電気的出力

従来の並列制動抵抗の制御法は，故障回線を除去した後に制動抵抗を投入する手法が用いられてきた。このため，制動抵抗投入後の発電機出力は増加するが，その投入まで長時間必要とするため，制動効果が十分いかされていなかった。また，並列制動抵抗を投入すれば，母線電圧が低下するという欠点を有している。さらに，電力系統の故障はほとんどが一時的なものであり，そのような故障に対しては回線を短時間で再閉路することが行われているが，このような故障に対して故障の除去ならびに再閉路するまでは送電能力が低下することになる。このような一時的故障に対しては回線を除去する必要がないことは明白である。しかし，並列制動抵抗方式では，もし再閉路不能の場合故障回線を除去して制動抵抗を投入しなければ，発電機の電気的出力が事故時より低下する。このため，再閉路可能なシステムが再閉路時間を短縮するためには，故障回線を除去することなく，系統の安定性を保つような制動方式が望まれる。

本章では，制動抵抗方式として，直列制動抵抗方式を提案し，従来の並列制動抵抗制御方法と電気的特性を比較することにより，この方式の有用性を示す。

直列制動抵抗の新しい制御法を示す前に，次の条件における発電機の電気的出力式を導出する。

(1) 方法1：故障回線除去後にSDRを投入する方法

(2) 方法2：故障中にSDRを投入する方法

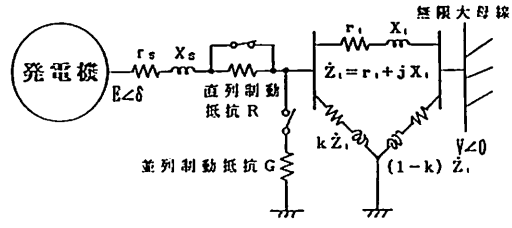

図1．故障発生時のモデル系統図

Fig 1 Single machine infinite bus system with fault.

モデル系統は図1の2回線一機無限大母線系統を想定する。故障は3線地絡のみを考え，その故障地点は係数kによって表示する。k＝0で送電端、k＝1で受電端で故障が発生したことを示す。

方法1，2の電気的出力P_{e1}，P_{e2}を各々計算すれば次式が得られる[7]。

$$P_{e1}=\left(\frac{E}{Z}\right)^2\times U_1+\frac{EV}{Z}G\sin(\delta-\gamma)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ただし，$Z=\sqrt{A^2+B^2}$，$U_1=A(Sr_t+G)+BSX_t$

$A=Sr_tG+RG+r_sG+Sr_tR+Sr_tr_s-SX_tX_s$

$B=SX_tG+X_sG+SX_sr_t+Sr_sX_t$

$\gamma=\tan^{-1}\frac{A}{B}$

$$P_{e2}=\left(\frac{E}{Z}\right)^2\times U_2+\frac{EV}{Z}\times U_3\sin(\delta-\gamma)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

ただし，$Z=\sqrt{A^2+B^2}$，$U_2=A(r_2+r_3)+B(X_2+X_3)$，

$U_3=\sqrt{r_3^2+X_3^2}$

$A=(r_1r_2+r_2r_3+r_1r_3)-(X_1X_2+X_2X_3+X_1X_3)$

$B=r_2X_1+r_1X_2+r_3X_2+r_2X_3+r_1X_3+r_3X_1$

$\gamma=\tan^{-1}\frac{Ar_3+BX_3}{AX_3-Br_3}$　　$\alpha=Gk(2-k)r_1+2$

$\beta=GkX_1(2-k)$

$$r_1=r_S+R+\frac{k(\alpha r_1+\beta X_1)}{\alpha^2+\beta^2}$$

$$X_1=X_S+\frac{k(\alpha X_1-\beta r_1)}{\alpha^2+\beta^2}$$

$$r_2=\frac{\frac{G}{2}k^2(1-k)}{\alpha^2+\beta^2}((r_1^2-X_1^2)\alpha-2r_1X_1\beta)+\frac{1-k}{2}r_1$$

$$X_2=\frac{\frac{G}{2}k^2(1-k)}{\alpha^2+\beta^2}(2r_1X_1\alpha-(r_1^2-X_1^2)\beta)+\frac{1-k}{2}X_1$$

$$r_3=\frac{k(1-k)(\alpha r_1+\beta X_1)}{\alpha^2+\beta^2}$$

$$X_3=\frac{k(1-k)(\alpha X_1-\beta r_1)}{\alpha^2+\beta^2}$$

故障により低下した電気的出力 P_e を機械的入力 P_m に近づけることが過渡安定度向上の重要なポイントである。そこで，先に導出した出力特性から前記の二つの制御法の特性を比較検討する。

故障が発生すると出力が低下して発電機は加速する。そこでSDRを投入すれば出力が上昇して加速を抑制できる。一般に同期発電機の電気的出力は負荷角に対して凸形で変化するため，脱調を抑制するためには，その電気的出力特性の最大値と平均値が重要である。図2は，故障回線を除去して後に，制動抵抗を投入する従来の制御方式（方法1）を用いた場合の出力－負荷角特性を示している。同図では故障前後の電気的出力の変化を明らかにするために1，2回線健全時の特性も示している。図からわかるように，1回線に直・並列制動抵抗を投入すれば，電気的出力が全体的に大きくなり過渡安定度が向上できる。出力の最大値は，並列制動抵抗の方が直列式と比較して大きいが，負荷角が大きい部分ではその大小が逆転していることが分かる。これは，並列方式の出力の最大値が負荷角の小さい方に，直列方式のそれは比較的負荷角の大きい所に存在するためである。総合的にみると，並列方式の出力が大きいことになる。後章で述べるが，並列方式は制動抵抗投入時に母線の電圧降下が大きいという欠点がある。しかし，直列方式ではその減少はそれほど大きくない。従って，直列方式の出力特性さえ改善できれば，並列方式よりも良好な制御特性が得られるものと考えられる。

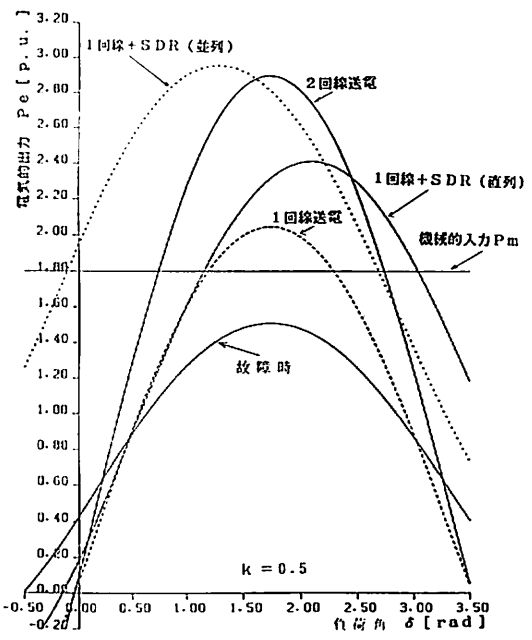

図2．方法1の出力特性曲線

Fig. 2　Output characteristic curve of method 1.

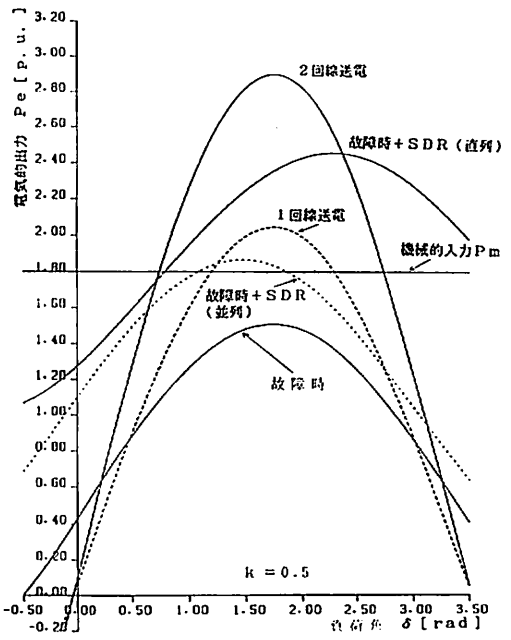

図3．方法2の出力特性曲線

Fig. 3　Output characteristic curve of method 2.

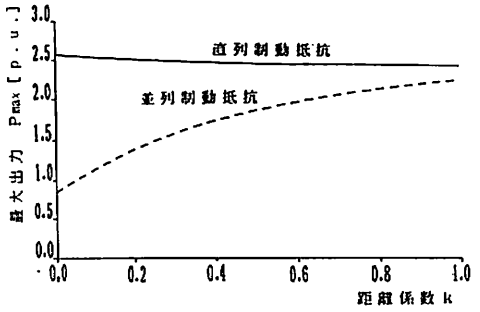

図4．故障位置に対する電気的出力の最大値
Fig. 4　Maximum electrical output versus fault position.

故障中に制動抵抗を投入した場合（方法2）の発電機の出力－負荷角特性を図3に示す。故障時にSDRを投入する方法2の電気的出力とSDR投入時の出力特性は，故障地点によって変化する。図3はk＝0.5（線路中央）地点で故障が生じた場合の出力特性を示している。直列方式の電気的出力は方法1と比較すると全体的に大きくなっていることがわかる。反対に並列方式の出力は方法1と比較すると約半分に減少している。また，この方法2は故障点を除去することなく制動抵抗を投入するため，故障位置により出力特性が変化する。図4は，故障点が変化した場合の電気的出力の最大値 P_{max} を示している。この図から分かるように，直列方式は故障地点が大きく変化してもP_{max}はほぼ一定であるが，並列方式ではかなり変化する。このことから，送電端で故障が発生すれば，並列方式では制動効果がほとんど発生しないことになる。

以上のことから，直列方式は方法2の制御法を用いれば，過渡安定度向上に効果的であることは明白である。ここで，筆者らは直列制動抵抗の制御法として，故障中に直列制動抵抗を挿入する方法（方法2）を提案する。直列方式の有用性の詳細は後章において述べることにする。

3．制動抵抗制御方式の諸特性

前章では発電機の出力式を導出し，出力－負荷角特性の大小により各制御方式の比較を行なったが，制動抵抗の重要な機能として過渡安定度の向上，発電機端子諸量の安定化なども考慮しなければならない重要な事項である。本章では各制御方式の安定領域とそれに付随する臨界故障除去時間（Critical Clearing Time：CCT）ならびに制動抵抗投入時の母線電圧等の比較により直列制動抵抗制御方式の有用性を明らかにする。

3．1　解析のための基本式

一機無限大母線系統における同期発電機の運動方程式は，次式で表される。

$$\frac{d^2\delta}{dt^2}+K_d\frac{d\delta}{dt}+g(\delta)=0 \quad \cdots\cdots(3)$$

ただし，$K_d=\frac{D}{J}$，　$g(\delta)=\frac{1}{J}(P_e-P_m)$

J：タービン発電機慣性定数，D：タービン発電機制動係数，δ：負荷角（rad），t：時間（sec），P_e：電気的出力，P_m：機械的入力

なお，電力系統の発電機には普通過渡安定度を向上させるためガバナ，自動電圧調整器（PSS付）が付加されているが，本研究では制動抵抗の制御効果が他の制御装置の影響を受けないようにするため，上記の制御装置は考慮していない。また，発電機モデルは次の条件の基で記述する。

(1) 同期機の動揺中の過渡リアクタンス背後電圧は一定。
(2) 同期機への機械的入力P_mは一定。
(3) 同期機の慣性，制動トルクは一定。
(4) 同期期の損失，飽和は無視する。

(3)式を用いて数値解析すれば，系統の臨界故障除去時間（CCT）は得られるが，本研究ではCCTのみでなく，制動抵抗投入時の安定領域を過渡安定度向上の指標とするため，系統の安定領域も示すことにする。(3)式により安定領域を得るためには，複雑な数値計算を必要とする。そこで，ここでは非線形システムの安定領域が短時間で得られるリヤプノフ法を用いることにする。リヤプノフ法は安定性の十分条件のみしか満足しないという欠点を持つが，宮城らによって提案されたラグランジュ・シャルピ法[8]を用いれば，真の領域に近い安定領域が得られるため，本研究ではこの手法により構成されたリヤプノフ関数を用いることにする。文献(8)で構成されたリヤプノフ関数を次式に示す。

$$V=\frac{1}{2}(x_2+\alpha' L(x_1))^2+\frac{1}{2}\alpha'(1-\alpha')(L(x_1))^2+\int_0^{x_1} h(x_1)dx_1+2\int_0^{x_1}\sqrt{\alpha'(1-\alpha')K(x_1)h(x_1)L(x_1)}\,dx_1 \quad \cdots\cdots(4)$$

ただし，$K(x_1)=K_d$,
$h(x_1)=g(\delta_0+x_1)$,
$L(x_1)=\int_0^{x_1}K(x_1)dx_1$,
$0\leqq\alpha'\leqq 1$

ここで，α' は任意の定数であるが本研究では $\alpha'=0.5$ 一定とする。(4)式のリヤプノフ関数により系統の安定領域が得られる。

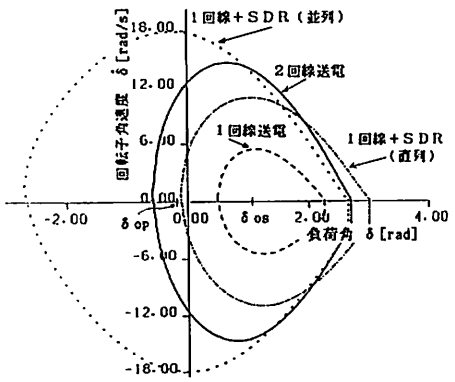

図5．方法1を用いた時の安定領域
Fig. 5　Stability boundaries for method 1.

3．2　系統の安定領域

図5は故障点を除去して制動抵抗を投入する従来の手法（方法1）を用いた場合の安定領域を示している。故障点除去後は2回線または1回線で送電するものとし，制動抵抗開放時の各送電方式の安定領域も同様に示してある。前述のように，図中の安定領域は(4)式のリヤプノフ関数を用いて描いている。図からわかるように，この制御法では並列方式の安定領域が直列方式と比較して大きい。しかし，通常，系統の故障が発生した場合，解軌道は第一象限を右上がりに移動していくため，その象限の安定領域は大きいことが好ましい。並列方式の安定領域は1.6（rad）程度までは直列方式のそれよりも大きいが，その値を越えた領域では直列方式の安定領域が大きい。CCTを表1に示す。各々の方式をCCTの観点から比較してみると，直列方式がわずかではあるが，CCTの値は大きい。また，通常の電力系統では短時間の内に再閉路を行うので，その前に制動抵抗を開放しなければならないが，並列方式の安定領域は第2，3象限まで大きく広がっているため，開放時間が不適切であると発電機が脱調するおそれがある[8]。これに対し，直列方式のそれは，1回線送電，2回線送電時の安定領域の中間的な大きさであるため，どの点で制動抵抗を開放しても安定化できることになる。図中には1回線に制動抵抗を並列及び直列に投入した場合の安定平衡点（δop：並列制動抵抗投入時の安定平衡点，δos：直列制動抵抗投入時の安定平衡点）をそれぞれ示している。δosは1，2回線時の安定領域内に位置しており，δopは2回線の安定領域内にのみ含まれている。このことは，解軌道がδop，δosに収束した後に制動抵抗を投入した場合，直列方式では1，2回線どちらに復旧しても共に安定になるが，並列方式では2回線に復旧した場合は安定となっても，1回線では発電機が不安定になることを意味している。

表1　臨界故障除去時間による各手法の比較
Table－1　Comparing with various method for cirtical clearing time.

k ＝ 0．5（送電線中央）	臨界故障除去時間（CCT）［s］
方法1（並列）	0.27
方法1（直列）	0.30
方法2（直列）	0.34

方法1：故障回線除去後にSDR投入する。
方法2：故障中にSDRを投入する。

図6は故障を除去せずに制動抵抗を投入する手法（方法2）を用いた場合の安定領域を示している。なお，方法2で並列方式を用いた方式の電気的出力は極端に小さくなり，安定性の向上が見込まれないので，この方式は用いないことにする。前章で示したように，方法2では故障回線を除去しないため，故障点に応じて発電機の電気的出力は変化する。そこで図中にはkが1.0と0.5の場合の安定領域を示している。安定領域は2回線時の安定領域とほぼ等しい。また，この方法は方法1と同様に第1象限における負荷角の大きい部

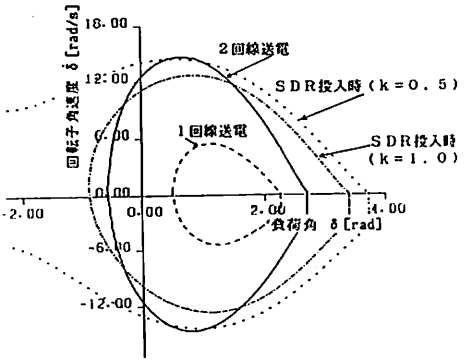

図6．方法2（直列）を用いた場合の安定領域

Fig. 6　Stability boundaries for method 2.

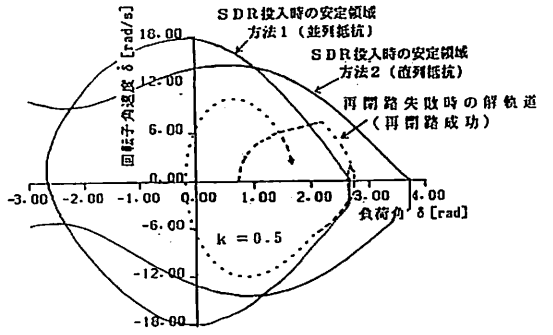

図7．再閉路失敗時の解軌道

Fig. 7　Trajectory at failing of reclose the line.

分の安定領域が大きくなっており，過渡安定度を向上できることがわかる。この制御法のCCTの値（k＝0.5）を表1に示す。前記した方法1の値よりも大きくなっており，この手法で過渡安定度を改善できることがわかる。

他方，この方法は方法1と比較して，次のような利点がある。すなわち方法1では，制動抵抗を投入するために故障回線を必ず除去しなければならないが，方法2ではその回線を除去することなく制動抵抗を投入することができるため，方法1と比べて回線の除去に要する時間の分だけ早く制動抵抗を投入できるので，過渡安定度は飛躍的に向上することになる。また，短時間の故障（雷等による故障）では故障の消滅と同時に再閉路に成功することになるため，電力供給の面ではるかに都合がよい。もし，その事故が長時間継続する場合でも，すでに制動抵抗を投入しているため，発電機は脱調することはなく，長時間の故障であることを認識できた時点で故障回線を除去してから直列制動抵抗を開放して1回線送電すればよいことになる。

再閉路失敗時（再々閉路成功時）は両方法の優劣がさらに明らかとなる。図7は方法2（直列方式）で再閉路に失敗し再々閉路に成功した場合の解軌道ならびに制動抵抗投入時の安定領域を示している。方法1（並列方式）において，制動抵抗を開放して再閉路する最適な位置は負荷角の増加から減少に転じた直後，すなわち角速度が零の付近とされている[9]。このため，方法1の並列方式で再閉路に失敗し，再々閉路を試みる場合，その部分の安定領域は方法2の直列方式よりかなり狭く，さらに回線の閉，開路動作にかなり時間を要するため不安定に陥る可能性が十分ある。方法2の直列方式は，図に示すように，再々閉路に成功していることがわかる。この理由は前述したように，この方式は第1象限の右部分の安定領域が大きく，さらに回線操作のための時間を必要としないためである。安定限界状態を考えれば，この方式の有利性は明白である。

このように，方法2の直列方式は，従来の手法である方法1の並列方式より過渡安定度，再閉路に対して有利であることがわかる。

3．3　系統の電気的特性

前節では各制動抵抗制御方式の有用性を過渡安定度向上の観点から比較して検討を行なった。電力系統では，系統の安定度を維持することが第一前提であるが，供給電力の質として発電機端子の諸量は一定であることが望ましい。本節では，制動抵抗投入時の送電端母線電圧，発電機電流の時間的変化について解析する。なお，制動抵抗投入時の特性を明らかにするため，前章で仮定したように発電機にはAVR，ガバナを考慮していない。

図8は，k＝0.5の地点で故障が発生してから再閉路に成功するまでの送電端母線電圧の時間的変動の様子を示している。図中の番号①，②，③は故障発生，制動抵抗投入，制動抵抗開放をそれぞれ示している。図からわかるように，故障発生から制動抵抗の投入までは，故障により母線から見た系統のインピーダンスが低下しているため，電圧は大きく低下していることがわかる。制動抵抗の投入点②から③の間は，直列方式，特に方法1がインピーダンスを大きくできるため

電圧の低下が最も小さい。再閉路成功後は電圧は振動しているが，システムは安定であるため，故障前の値に収束していく。

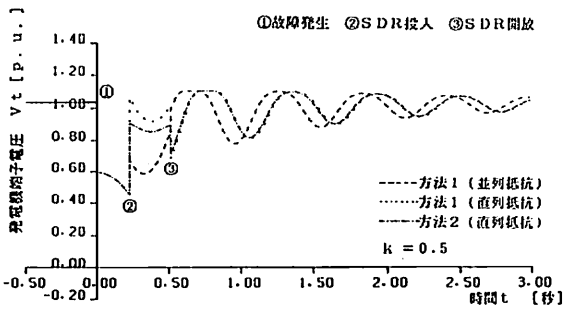

図8．故障発生時の発電機端子電圧

Fig. 8　Terminal voltages of generator with fault.

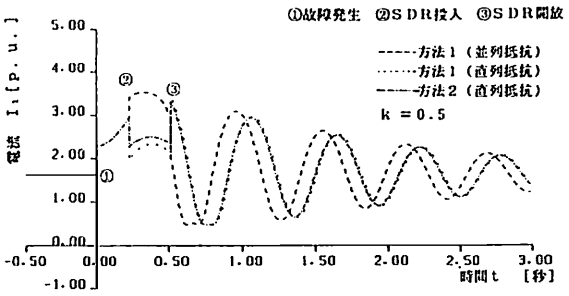

図9．故障発生時の発電機電流

Fig. 9　Currents of generator with fault.

図9は回線の発電機の電流を示している。図から，方法1の並列方式の電流の値が約3.5（p.u.）と最も大きくなっていることがわかる。電流値は，変圧器，遮断器，発電機の寿命等に大きく影響するため，電流の値が小さい直列方式が望ましい。

4．むすび

電力系統で従来用いられていた制動抵抗は，負荷に並列に投入される並列方式が主であった。本研究では，これまで並列制動抵抗方式に劣るとされていた直列制動抵抗の新しい制御法を提案し，その制御法が過渡安定度向上に有効であることを，発電機出力ならびに系統の安定領域により明らかにした。本論文で得られた知見をまとめると次のようになる。

(1) 故障回線を除去して制動抵抗を投入する従来の手法では，並列制動抵抗を用いた方が安定領域は大きいが，過渡安定度に重要な第一象限の一部では直列制動抵抗による安定領域が広くなる。また，臨界故障除去時間の比較によっても，直列制動抵抗によるものが多少大きいという数値計算結果が得られた。さらに，故障時の発電機の端子電圧，電流の変動は直列制動抵抗方式が小さいことがわかった。

(2) 本論文で提案した直列制動抵抗方式は，故障回線を除去しないで，制動抵抗を投入するため，制動抵抗の投入動作が短時間で実行できるので過渡安定度が飛躍的に向上する。特に，故障が短時間で消滅する場合，再閉路動作は制動抵抗の開放のみであるため，その制御は容易になる。さらに，臨界除去時間や発電機電圧・電流の変動は従来の並列制動抵抗方式と比較すると改善されている。

以上示したように，本論文で提案した直列制動抵抗方式は，電力系統の信頼性向上に大きく貢献できる制動方式である。今回は，直列制動抵抗方式の基礎的な解析のみを取扱ったが，次報では故障後の系統動揺を短時間で抑制するための制動抵抗制御法について報告する予定である。

本論文をまとめるにあたり種々の手伝いをいただいた卒研生の伊勢義弘君，宮城亮君，徳嶺一宏君，国仲元一君に感謝します。

参考文献

(1) 中村光一，武藤三郎：「直・並列抵抗の最適Bang-Bang制御による電力系統の過渡安定度向上」，電気学会論文誌B，96巻，3号，147－154（昭51－3）

(2) 吉田弘一，福西道雄，他：「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」，電気学会雑誌，91巻，5号，940－949（昭46－5）

(3) 村野英夫，竹内茂，白井五郎：「制動抵抗の開閉タイミングによる過渡安定化の一手法」，電力技術研究会資料，PE－88－97，31－40（1988）

(4) 大脇洋，有働宗幸：「制動抵抗方式，タービン高速バルブ制御方式」，電気学会雑誌，106巻，7号，646－651（昭61－7）

(5) R.C.Bergvall:″Series Resistance Method of Increasing Transient Stability Limit″, Trans.A.I.E.E, 490 (1931)
(6) 田中裕幸：「安定度向上技術」，電気学会雑誌，104巻，11号,952－955（昭59－11）
(7) 上之園親佐：「現代電力工学」，オーム社
(8) H.Miyagi:&T.Taniguchi:″Lagrange—Charpit method and stability problem of power systems″, IEE Proc., Vol.128, Pt.D, No.3 (1981)
(9) 難波江，他：「電気機器学」（昭60）電気学会
(10) 石原啓司，都築旋二，他：「電力系統工学演習」，朝倉書店

付　録

系統の機器定数

回路定数はすべて単位法（p.u.）を用いており，次の値を基準量としている[7]。

発電機の定格容量：100（MVA），系統電圧：154（kV）

送電線のパラメータは次の値をとるものとする。

2回線，距離：200(km)，1(km)あたりのインピーダンス：0.08+j0.47（Ω／km），1(km)あたりのアドミタンス：$j3.49\times10^{-6}$(s／km)

基準インピーダンスを求めると，

$(154(kV))^2 \div 100(MVA) = 237.16(\Omega)$

が得られ，1回線あたりのインピーダンスZ_ℓは，

$Z_\ell = 0.076 + j0.43$ (p.u.)

となる。これより抵抗分R_ℓ，リアクタンス分X_ℓはそれぞれ

$R_\ell = 0.076$ (p.u.)，$X_\ell = 0.43$ (p.u.)

と求まる。発電機の電機子抵抗r_s，過渡リアクタンスX_sは次の値に選定した[8]。

$r_s = 0.05$ (p.u.)，$X_s = 0.3$ (p.u.)

E，V，M，Dについては次の値を用いた[1][8]。

$E = 1.25$ (p.u.)，$V = 1.0$ (p.u.)

$M = 0.016$ (s^2／rad)，$D = 0.02$ (s／rad)

P_eの最大値がほぼ 3.0(p.u.) となるようにR，Gを決定した。

R=0.3（p.u.），G=3.0（p.u.）

また，P_mは

$P_m = 1.8$ (p.u.)

としてある。