ニューラルネットワークを用いた 適応型発電機制御による多機系統のダンピング向上

正員 小林 武則 (東芝)

正員 森岡 靖夫 (関西電力)

正員 横山 明彦 (東京大学)

Damping Enhancement of Multi-Machine Power System
Using Adaptive Generator Control System with Neural Networks

Takenori Kobayashi, Member (Toshiba Corporation), Yasuo Morioka, Member (The Kansai Electric Power Co., Inc.), Akihiko Yokoyama, Member (University of Tokyo)

The authors proposed a nonlinear adaptive generator control system with neural networks for improving damping of power systems and showed its effectiveness in a one-machine infinite bus test power system in the previous paper. The proposed neuro-control system adaptively generates appropriate supplementary control signals to the conventional controllers such as automatic voltage regulator and speed governor so as to enhance transient stability and damping of the power system.

In this paper, the applicability of the proposed neuro-control system to multi-machine power systems is discussed. Digital time simulations are carried out for a 4-machine test power system, where one or several synchronous generators are equipped with the neuro-control system. As a result, also in the multi-machine power system, the proposed adaptive neuro-control systems improve the system damping effectively and they work adaptively against the wide changes of the operating conditions and the network configuration.

キーワード: ニューラルネットワーク, 発電機制御, 多機系統, ダンピング向上, 適応制御, 多変数制御, 分散制御

1. はじめに

電力系統は、近年の電力需要の増加に伴って大規模・複雑化の傾向にあり、その信頼性の確保はますます重要な課題となっている。なかでも系統安定度の維持・向上は、安定した電気エネルギー供給のために不可欠であり、すでに古典制御理論に基づく調速機 (GOV)、自動電圧調整装置 (AVR)、系統安定化装置 (PSS) などが発電機に導入されている。しかしこれらの制御系は、本来非線形である電力系統を線形化したモデルに対して設計されるため、想定していない運用状態や動揺モードに対しては必ずしも十分な効果が得られないといった問題がある。

そのような問題に対して近年、並列処理能力、学習能力、非線形特性などから注目を集めているニューラルネットワークを、発電機の安定化制御に適用した研究も報告されるようになってきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。これらは、PID コントローラや最適レギュレータ等の既存制御系の動作パターンや設定パラメータをニューラルネットワークに学習させることによって、より適応的な制御性能をニューロコントローラ

に獲得させようとする試みである。一方、制御工学分野においてもニューラルネットワークへの期待は大きく⁽⁴⁾、最近では、不確かさを有する非線形プラントを制御対象とした場合の、ニューラルネットワークを用いた非線形レギュレータ⁽⁵⁾や非線形オブザーバ⁽⁶⁾の設計法に関する興味深い検討が行なわれている。しかしながらこれらの文献における適用例は、いずれも比較的簡単な差分方程式によって表現される非線形システムを対象としており、より実際のプラントへの適用を指向した検討が望まれている。このことは、前述の電力系統の発電機制御への適用研究に関しても同様で、いずれも一機無限大母線システムを用いた検討に留まっているのが現状である。

著者らもすでに、電力系統の安定度をよりフレキシブルな形で向上させることを目的として、ニューラルネットワークを用いた非線形適応型発電機制御手法に関する検討を行っており、一機無限大母線システムへの適用を通じてその有効性を確認している⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。本論文では、著者らの提案している適応型ニューロ制御系 (Adaptive Neuro-Control System; ANCS) を、さらに進めて多機系統へ適用

図1 出力フィードバック型ANCSの構成

Fig. 1. ANCS of output feedback type.

する。ANCSは、系統の全状態量が測定できないような場合でも、適当な観測量を用いた出力フィードバックを行うことにより、系統の運用状態変化に対する適応的なダンピング向上制御を実現している。そのため多機系統に対しても、一機無限大母線系統の場合とほぼ同様の方式による適用が可能で、制御効果も期待できる。

以下では、まず第2章でANCSの構成および制御アルゴリズムについて説明する。そして第3章で、ANCSを多機系統に適用する際の検討事項について簡単にまとめた後、第4章において、4機串型系統を例題系統としてデジタルシミュレーションを行なった結果を示す。

2. 適応型ニューロ制御系 (ANCS)

本章では、著者らの提案しているANCSについて簡単に述べるが、詳細は文献(7)を参照されたい。

(2.1) 出力フィードバック型ANCS 図1に、出力フィードバック型ANCSの構成を示す。ここで、各変数は離散時間系として表現されており、下添字 k は第 k ステップにおける値であることを表している。また記号 $\underline{\cdot}$ はベクトルを表している。

図1中のニューロ同定器 (Neuro-Identifier; NI)、ニューロ制御器 (Neuro-Controller; NC) は、ともにユニット伝達関数としてシグモイド関数を用いたフィードフォワード型ニューラルネットワークで、それらの内部結合荷重をそれぞれベクトル $\underline{w}^I$ 、 $\underline{w}^C$ と表す。また、 $\underline{x}$ 、 $\underline{y}$ はそれぞれ電力系統の状態変数、観測変数の定常値からの変動分、 $\underline{u}$ はNCが生成する系統への制御入力、そして $\hat{\underline{y}}$ はNIによる $\underline{y}$ の推定値である。ここで、AVRやGOV等の既存制御系の信号は系統の状態変数 $\underline{x}$ の中を含め、 $\underline{u}$ には含めないとする。

図1では、状態変数 $\underline{x}$ と観測変数 $\underline{y}$ の関係を非線形写像 g を用いて表しているが、特に写像 g が恒等写像であるとき、 $\underline{y} = \underline{x}$ となり、図1のANCSは全状態フィードバック型と

なる。

(2.2) オンライン制御アルゴリズム 図1に示したANCSの目的は、事故等の外乱に際して、 $\underline{y}$ の値をできるだけ速やかに零へと収束させるような制御入力 $\underline{u}$ を適切に生成し、系統の安定度をより向上させることにある。そこで第 k ステップにおいて、次の評価指標:

$$J_k^I \triangleq (\underline{y}_{k+1} - \hat{\underline{y}}_{k+1})^T P (\underline{y}_{k+1} - \hat{\underline{y}}_{k+1}) / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$J_k^C \triangleq (\hat{\underline{y}}_{k+1}^T Q \hat{\underline{y}}_{k+1} + \underline{u}_k^T R \underline{u}_k) / 2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 J_k^I 、 J_k^C はそれぞれNI、NCに関する評価指標、 P 、 Q 、 R はいずれも正定対角行列を考える。指標 J_k^I はNIによる予測同定誤差の度合いを表し、また指標 J_k^C は、NIが予測した、次ステップにおける系統の定常値からの変動度合いを表している。

いまNI、NCは可微分な写像関数であるので、

$$\frac{\partial J_k^I}{\partial \underline{w}_k^I} = -(\underline{y}_{k+1} - \hat{\underline{y}}_{k+1})^T P \frac{\partial \hat{\underline{y}}_{k+1}}{\partial \underline{w}_k^I} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial J_k^C}{\partial \underline{w}_k^C} = (\hat{\underline{y}}_{k+1}^T Q \frac{\partial \hat{\underline{y}}_{k+1}}{\partial \underline{u}_k} + \underline{u}_k^T R) \frac{\partial \underline{u}_k}{\partial \underline{w}_k^C} \quad \dots\dots\dots (4)$$

は解析的な計算により求めることができる⁽⁵⁾。したがって、慣性項を考慮した最急降下法:

$$\Delta \underline{w}_k^s = -\epsilon^s \frac{\partial J_k^s}{\partial \underline{w}_k^s} + \mu^s \Delta \underline{w}_{k-1}^s \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $s \in \{I, C\}$ 、 ϵ^s : 学習係数、 μ^s : 慣性項係数

を用いて、各ステップごとに J_k^I 、 J_k^C の値を減少させるように内部結合荷重 $\underline{w}^I$ 、 $\underline{w}^C$ をオンラインで更新していけば、系統動揺抑制のための制御が系統状態の変化に応じて適応的に実現できる。ただし本論文では、NI、NCの出力は瞬時に行なえととし、また情報の伝送時間遅れは無視できると仮定する。

(2.3) ANCSの特徴 以上で説明したANCSは、ニューラルネットワークの並列情報処理能力、適応学習能力、非線形特性などの諸性能を、AVR、GOV等の従来発電機

制御系に付加するための補助制御信号生成機構であり、その特徴は以下のようにまとめられる。

- ANCS は、制御器と同定器それぞれに対応する 2 つのニューラルネットワークによって構成されており、全体として多変数による非線形発電機制御を実現する。
- 系統の運用状態や構成の変化に対してその過渡的な動揺を抑制するように、2 つのニューラルネットワークの内部結合荷重をオンラインで更新する適応型制御系である。
- PSS のように、AVR や GOV 等の従来制御系を残した上でそれらの制御性能をさらに向上させることが可能なため、実用性が高い。また万一 ANCS に何らかの問題が発生した場合でも、ANCS の動作をロックするだけで従来通りの制御系に復帰できる。

3. 多機系統への適用における検討事項

本論文では、出力フィードバック型 ANCS を用いた適応型発電機制御を、多機系統において実施することを試みる。しかしながらその場合、1 機無限大母線系統への適用時には考える必要のなかった幾つかの問題点を考慮する必要がある。ここでは、多機系統に ANCS を適用する際の検討事項を簡単に述べる。

(i) ANCS 設置発電機の選定

多機系統においては、ANCS を設置する発電機として当然複数の候補が存在するが、それら複数の発電機のどれに、あるいは何機に設置すべきなのかといった問題について検討を行なう必要がある。

(ii) ANCS の出力制御信号の選定

一機無限大母線系統における著者らのこれまでの検討では、ANCS は、AVR のみに対する補償制御系として用いられてきた。しかし、多機系統における電力動揺の抑制のためには、励磁系に加えてガバナ系に対しても補償制御を行なうことが有効であると考えられる。そのため、ニューラルネットワークの並列情報処理能力を利用して、ANCS による AVR/GOV への同時補償制御を行なった場合の効果についても検討する必要がある。

(iii) ANCS の入力情報の選定

適切な系統安定化制御を行なうために必要な ANCS への入力情報の数や種類は、適用対象系統および ANCS 設置発電機ノードの性質により、異なってくることが考えられる。また、(i)とも関連するが、ANCS を各発電機ごとに設置する場合（分散制御型）と一つの ANCS で全系を一括して扱おうとする場合（集中制御型）との比較についても検討しておく必要がある。

(iv) 運用状態/系統構成の大幅な変更への適応性

多機系統では、負荷および潮流分布の変化による運用状態の変更に加えて、送電線の投入/遮断等の切替え操作による系統構成の変更が行なわれる。そのため、ANCS の制御対象である系統の構造が大幅に変化

図 2 4 機串型系統 (275kV 系統)

Fig. 2. Four-machine test power system.

して、系統の動揺モードも劇的に変化する可能性がある。そのようなケースに対しても ANCS のニューロ同定部 NI が有効に機能し、ANCS 全体として所望の適応制御性能を発揮できるのか否かは、多機系統適用時における大きな課題である。

4. 4 機串型系統への適用

(4.1) モデル系統 本論文では、図 2 に示す 4 機串型系統を例題系統として、ANCS の多機系統への適用検討を行なう。ここで送電線はいずれも 2 回線とするが、Line 7, Line 8 については、特に断らない限り投入しないこととする。また各発電機は、その動特性を Park の 3 次モデル (e'_q モデル) で表現し、いずれも 1 次遅れ系で模擬された AVR, GOV を備えるものとする。したがって図 2 のモデル系統は、合計 20 (各発電機につき 5) の状態変数によって表現される動的システムとなる。本論文で使用する機器定数を表 1 に示すが、記号等の詳細については文献 (7) を参照されたい。

以下では、発電機 G2~G4 にそれぞれ ANCS を設置することを考える。発電機 G1 は基準発電機とみなすため ANCS は設置しない。したがって本論文では、1 機のみに設置した場合から 3 機すべてに設置した場合まで、計 7 ケースを想定する。そして各発電機 G_i , $i \in \{2, 3, 4\}$ に設置された ANCS を ANCS(G_i) と表し、ANCS(G_i) の入力観測変数を y^{G_i} , 出力制御信号を u^{G_i} と表す。

また本論文では ANCS の適用方式として、図 3 に示すように、ANCS によって (a) AVR のみの補償制御を行なう場合と、(b) AVR/GOV の同時補償制御を行なう場合の 2 通りを考える。なお図 3 において、 Δ は各変数の初期定常値からの変動分、 u_e は AVR への補助入力信号、 u_g は GOV への補助入力信号である。

(4.2) ANCS の設定 NI, NC としては、シグモイド関数を用いた 3 層フィードフォワード型ニューラルネットワークを使用する。これらのニューラルネットワークに関する諸設定はまとめて付録に示す。

NC の制御信号出力間隔 Δt は 0.02[s] とし⁽¹¹⁾, NI, NC

表 1 機器定数
Table 1. Machine constants.

$M = 8.00 \text{ s}$	$D = 0.0$	$\omega_b = 100\pi \text{ rad/s}$
$T'_{d0} = 5.0 \text{ s}$	$x_d = 1.60$	$x_q = 1.60$
$x'_d = 0.30$	$K_A = 25.0$	$T_A = 0.10 \text{ s}$
$K_G = 25.0$	$T_G = 2.0 \text{ s}$	

(注) 単位は自己容量ベースの PU 値, 各発電機共通

図 3 ANCS と AVR/GOV
Fig. 3. ANCS and AVR/GOV.

の結合荷重の更新はこの Δt の間にそれぞれ(5)式を1回ずつ適用して行なう。なお本論文では、系統事故として送電線3相地絡事故を扱うが、理想的な状況を考えて、事故継続中はANCSを動作させずに $\underline{u} = \underline{0}$ に固定する。

ANCSによるオンライン制御を行なう前に、図4に示すようなNI、NCのプリチューニング⁽⁷⁾をオフラインで実行する。事故データには、送電線Line 6の負荷母線L6至近端での1回線3相地絡事故(3LG、継続時間 $t_f=0.06[s]$)の際の事故後約10秒間のデータを用いる。プリチューニング用事故データにおける各発電機の位相角動揺(発電機G1を基準)の様子を図5に示す。NIに関してはこの10秒間分のデータのランダム提示学習を50セット行い、NCに関しては $\underline{u}_k < 10^{-5}$ になるように調整した。

〈4.3〉 ANCS 出力制御信号による比較 本節では、発電機G4のみにANCSを設置したケースについて検討を行なう。

(1) AVR のみ補償制御の場合 まず1機無限大母線系統の場合⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と同様に、AVRのみをANCSで補償したときの制御効果について検討する。ここでANCS(G4)の入出力変数は、ローカル情報を用いて、

$$\begin{cases} \underline{y}^{G4} \triangleq [\Delta\delta_{41}, \Delta\omega_4, \Delta P_{g4}, \Delta V_4, \Delta V_7]^T \\ \underline{u}^{G4} \triangleq [u_{e4}] \end{cases} \dots (6)$$

無制御時の適当な事故データを学習

定常状態で零出力となるように調整

図 4 NI、NC のプリチューニング
Fig. 4. Pre-tuning of NI and NC.

図 5 プリチューニング用事故時の発電機動揺データ (連系線3LG 事故)

Fig. 5. Generator angles as pre-tuning data.

ここに、 δ 、 ω : 発電機の内部位相角および回転角速度、 P_g : 発電機出力、 V : 母線電圧

とする。ただし、各下添数字は対応するノード番号を示し、 $\delta_{41} \triangleq \delta_4 - \delta_1$ とする。また、ANCSの評価指標(1)、(2)式中の重み行列は、 $P = \text{diag}(2.0, 1000.0, 2.0, 20.0, 20.0)$ 、 $Q = \text{diag}(1.0, 100.0, 1.0, 10.0, 10.0)$ 、 $R = \text{diag}(20.0)$ とする。なお、これらの値は1機無限大母線系統適用時の値⁽⁷⁾を参考に決定した。

プリチューニング終了後のANCS(G4)を用いて、プリチューニングに用いたのと同じ3LG事故に対するオンライン制御シミュレーションを行なった。そのときの各発電機位相角の動揺曲線を図6に示す。図5、6から、この3LG事故に対して、ANCS(G4)が系統動揺のダンピングを向上させていることが確認される。

次に図6のシミュレーション終了後のANCS(G4)に対して、2回目の事故として、今度は同一事故を送電線1回線開放により除去した場合(3LG-O、 $t_f=0.06[s]$ 、再閉路なし)のシミュレーション結果を図7に示す。図7では、系統の不安定化は回避されているものの、あまり良いダンピングは得られていない。これは、送電線Line 6の1回線開放により、系統の動揺モードに変化が生じたためと考えられる。

ANCS あり (1 回目)

図 6 AVR のみ補償制御 (連系線 3LG 事故)

Fig. 6. Effects of supplementary AVR control.

ANCS あり (2 回目)

図 8 AVR/GOV 同時補償制御 (連系線 3LG-O 事故)

Fig. 8. Effects of supplementary AVR/GOV control.

(a) ANCS なし

(b) ANCS あり (2 回目)

図 7 AVR のみ補償制御 (連系線 3LG-O 事故)

Fig. 7. Effects of supplementary AVR control.

(a) ANCS なし

(b) ANCS あり (2 回目)

図 9 AVR/GOV 同時補償制御 (G4 至近端 3LG-O 事故)

Fig. 9. Effects of supplementary AVR/GOV control.

(2) AVR/GOV 同時補償制御の場合 図 7 のような動揺モードの異なる事故に対しては、ANCS による AVR/GOV の同時補償制御が有効であると考えられるが、これはニューラルネットワークの並列情報処理能力を利用することで容易に実現できる。そこで (6) 式において、

$$\underline{u}^{G4} \triangleq [u_{e4}, u_{g4}] \dots \dots \dots (7)$$

として、AVR/GOV 同時補償制御の効果を調べてみた。ただし、 $R = \text{diag}(20.0, 1000.0)$ とする。

AVR のみ補償制御の場合と同様にプリチューニングおよび 1 回目の事故シミュレーションを行なった後、Line 6 の 3LG-O 事故を 2 回目の事故として、AVR/GOV 同時補償制御によるシミュレーションを行なった。結果を図 8 に示す。同図では、図 7 に比べて優れたダンピングが得られている。また、異なる地点での事故ケースとして、発電機 G4

至近端における送電線 Line 4 の 3LG-O 事故 ($t_f = 0.06[s]$) を 2 回目の事故としてシミュレーションを行なった結果を図 9 に示す。発電機 G4 にとっては厳しい事故であるこのケースでも、ANCS(G4) は AVR/GOV 同時補償制御により系統を安定化させている。

図 8, 9 からわかるように、ANCS による AVR/GOV 同時補償制御は、送電線の 1 回線開放によって生じる異なるモードの系統動揺に対して有効であり、多機系統のダンピングをより一層向上させることができる。そこで以下の検討では、ダンピング向上効果の優れている AVR/GOV 同時補償制御ケースのみを考えることにする。

(4.4) 複数発電機への ANCS 設置による検討 次に本節では、ANCS を複数発電機に分散設置した場合の系統動揺抑制効果について検討する。ここで各 ANCS の入

出力変数は、

$$\begin{cases} \underline{y}^{G2} \triangleq [\Delta\delta_{21}, \Delta\omega_2, \Delta P_{g2}, \Delta V_2, \Delta V_5]^T \\ \underline{u}^{G2} \triangleq [u_{e2}, u_{g2}]^T \\ \underline{y}^{G3} \triangleq [\Delta\delta_{31}, \Delta\omega_3, \Delta P_{g3}, \Delta V_3, \Delta V_6]^T \\ \underline{u}^{G3} \triangleq [u_{e3}, u_{g3}]^T \\ \underline{y}^{G4} \triangleq [\Delta\delta_{41}, \Delta\omega_4, \Delta P_{g4}, \Delta V_4, \Delta V_7]^T \\ \underline{u}^{G4} \triangleq [u_{e4}, u_{g4}]^T \end{cases} \dots\dots (8)$$

とする。ただし、 $\delta_{ij} \triangleq \delta_i - \delta_j$ とし、ANCSの評価指標(1), (2)式中の重み行列を、各ANCS共通に $P=\text{diag}(2.0, 1000.0, 2.0, 20.0, 20.0)$, $Q=\text{diag}(1.0, 100.0, 1.0, 10.0, 10.0)$, $R=\text{diag}(20.0, 1000.0)$ とする。

(1) ANCS設置箇所による比較 まず、プリチューニング終了後1回目の事故として、発電機G2至近端の送電線Line 2の3LG-O事故を考える。ANCSの各設置ケースについてオンライン制御シミュレーションを行なった結果を図10に示す。

図10(a)は、ANCSなしの場合の位相角動揺曲線であるが、プリチューニングに用いた事故データ(図5)とはまったく異なる動揺モードが現れている。

このような事故に対して(b)~(d)は、発電機1機だけにANCSを設置したケースであり、それぞれ、設置された発電機の位相角動揺が抑制されている。しかしながら、ANCS(G2)はG3, G4の動揺をあまり抑制できず、逆にANCS(G3), ANCS(G4)はG2の動揺を抑制することができない。また、これらの中ではANCS(G3)による効果が最も小さい。

そして2機の発電機にANCSを設置した(e)~(g)では、いずれも1機の場合の利点を組み合わせた形で制御効果が向上していることがわかる。これらの制御効果は、(f) > (e) > (g)の順になっているが、これは、G2とG4あるいはG2とG3を組み合わせることで、G2側の動揺とG3およびG4側の動揺とをともに抑制できるためだと考えられる。この両者の優劣は、ANCS(G3)単独の場合とANCS(G4)単独の場合との差がそのまま現れている。さらに、ANCSをG2~G4のすべてに設置した(h)では、各ANCSの利点がすべて活かされて、全7ケース中、最もよい制御効果が得られている。

このように、系統内にANCSを複数設置した場合の制御効果は、それぞれの単独設置の場合の効果を組み合わせた形で現れてくる。このことは、各ANCSがローカルな情報を利用することにより、系統全体としての分散型ダンピング向上制御を実現していることを示す結果といえる。

(2) 重負荷運用状態への変更 次に、モデル系統の新しい運用状態として、各ノードの潮流指定値をすべて25%増加させた重負荷状態を考える。すなわち、

$$\begin{cases} G2 \sim G4: & 0.80 \rightarrow 1.00 \text{ [pu]} \\ L5: & 1.20 + j0.24 \rightarrow 1.50 + j0.30 \text{ [pu]} \\ \vdots & \end{cases}$$

などを変更する。このとき、図10(b)~(h)の各シミュレーション終了時点を実験初期状態として、送電線Line 6の負荷母線L6至近端での3LG-O事故(連系線事故, $t_f=0.06$ [s])に対するオンライン制御シミュレーションを、それぞれのケースについて行った。結果を図11に示す。

図11で対象としている重負荷時の連系線事故は、同図(a)からわかるとおり、ANCSを設置しないと系統は不安定になりすぐにG3とG4が脱調してしまうようかなり厳しい事故である。この事故に対しては、ANCSをG3とG4とに設置した(g)と全機に設置した(h)の場合だけが、弱ダンピングながらも系統を安定化することに成功している。(g)と(h)の制御効果に差がないのは、この事故に対してはANCS(G2)の効果がほとんどないためである。また、ANCS(G3)およびANCS(G4)も、それぞれ単独では効果がなく、同時に動作させることによりはじめて有効な結果が得られている。

すなわち、図10, 図11からわかるように、多機系統では一般に事故地点によってANCS設置箇所の重要度が異なってくる。したがって、図2のモデル系統では、G2~G4のすべてにANCSを設置することによって、系統全体としての適応制御能力は最も向上され、効果的なダンピング向上制御を実現することができる。

(3) ANCSの出力制御信号について 図10(h)におけるANCS(G4)の出力 u_{e4} , u_{g4} を図12(a)に示す。図12(a)では、制御初期段階においてANCS出力に高周波の変動がみられるが、これはANCSが、プリチューニング時点では獲得できなかった $\underline{u}_k$ と $\underline{y}_{k+1}$ の相関を、この期間に学習していることによる。ただしこれらの高周波変動は、AVRやGOVの時定数(それぞれ0.1秒および2秒)によってカットされるため、系統への影響はほとんどない。

また図12(b)は、1回目の事故としてLine 5のL7至近端での3LG-O事故(無制御時には微弱ダンピングのケース)のオンライン制御を経験させた上で、G2至近端での3LG-O事故を起こしたときのANCS(G4)の出力である。このように2回目以降の事故では、1回目の事故の際にみられる高周波の変動はほぼなくなっているが、その制御効果に関しては、1回目とほとんど違いのないことが確認されている。

(4・5) 系統構成の大規模な変更 最後に、系統構成の変更が前節までよりもはるかに大幅に行なった場合の制御シミュレーション結果を示す。前節までの検討から、ここではG2~G4のすべての発電機にANCSを設置した場合を考える。各ANCSの初期状態としては、図10(h)のシミュレーション終了時点の値を用いる。

(1) 送電線インピーダンスの変更 まず、図2のモデル系統において、送電線インピーダンスを、

$$\begin{cases} \text{Line 2:} & 0.20 \rightarrow 0.15 \text{ [pu]} \\ \text{Line 5:} & 0.15 \rightarrow 0.10 \text{ [pu]} \\ \text{Line 6:} & 0.15 \rightarrow 0.30 \text{ [pu]} \end{cases}$$

図 10 発電機 G2 至近端 3LG-O 事故 (1 回目)

Fig. 10. Simulation results of generator control by multiple ANCSs.

と変更した場合を考える。L5 至近端での Line 6 の 3LG-O 事故に対するシミュレーション結果を図 13 に示す。図 13 からわかる通り、このケースでは、これまで ANCS が全く経験していない動揺モードが発生する。しかしこの場合も各 ANCS により系統は安定化されており、このことから、著者らの提案している ANCS の適応的な制御能力を

確認することができる。

(2) 送電線新規投入+負荷配分変更 次に、図 2 のモデル系統において、新たに送電線 Line 7 (発電機 G3-G4 間) を投入してループを形成した上で、負荷配分を、

$$\begin{cases} \text{L5:} & 1.20 + j0.24 \rightarrow 0.40 + j0.08 [\text{pu}] \\ \text{L7:} & 0.40 + j0.08 \rightarrow 1.20 + j0.24 [\text{pu}] \end{cases}$$

(a) ANCS なし

(e) G2, G3 に設置

(b) G2 に設置

(f) G2, G4 に設置

(c) G3 に設置

(g) G3, G4 に設置

(d) G4 に設置

(h) G2, G3, G4 に設置

図 11 連系線 3LG-O 事故 (重負荷時, 2 回目)

Fig. 11. Simulation results of generator control by multiple ANCSs under heavily loaded condition.

と変更した場合を考える。この場合、連系線潮流はこれまでとは逆に右向きに流れることになる。

このとき、Line 6 の L6 至近端における 3LG-O 事故に対するシミュレーション結果を図 14 に示す。図 14 より、新しく送電線が投入されたり、潮流分布に変更が生じたようなケースにおいても、ANCS の設置によって系統の動揺ダン

ピングが向上し、過渡動揺が速やかに定常値へと収束していることが確認できる。

5. おわりに

本論文では、ニューラルネットワークを用いた適応型発電機制御手法を、これまで著者らが検討してきた一機無限

(a) 1 回目の G2 至近端 3LG-O 事故

(b) 2 回目の G2 至近端 3LG-O 事故
(1 回目は L7 至近端 3LG-O 事故)

図 12 ANCS の出力信号波形 (G2, G3, G4 に設置)

Fig. 12. ANCS output signals.

(a) ANCS なし

(b) G2, G3, G4 に設置

図 13 送電線インピーダンス変更ケース

Fig. 13. Simulation results for different line impedance.

(a) ANCS なし

(b) G2, G3, G4 に設置

図 14 送電線新規投入+負荷配分変更ケース

Fig. 14. Simulation results for different network configuration and load distribution.

大母線系統とほぼ同様の出力フィードバック方式で、多機系統に適用した。そして 4 機串型系統における種々のデジタルシミュレーションを通じて、適応型ニューロ制御系 (ANCS) による AVR/GOV 同時補償制御が、系統の動揺抑制に効果的であることを示した。また、複数発電機に ANCS を設置することによって分散型の多機系統安定化制御が実現され、ANCS 設置発電機数を増やすことで系統全体としてのダンピングもいっそう向上できることも示した。さらに、多機系統において特に問題になると思われる運用状態や系統構成の大幅な変更に対しても、ANCS が適応的に動作し有効であることを確認した。

今後は、第 3 章で述べた検討事項のうち、本論文では扱わなかった (iii) の問題についても検討を行なうとともに、

ループ系統やさらに大規模な系統への適用についても検討していく予定である。

(平成 6 年 10 月 25 日受付)

文 献

- (1) D. J. Sobajic, Y.-H. Pao, and D. T. Lee. "Autonomous Adaptive Synchronous Machine Control". *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 14, No. 2/3, pp. 166-174, April/June 1992.
- (2) D. C. Kennedy and V. H. Quintana. "Neural Network Regulators for Synchronous Machines". *Proc. of ESAP '93*, pp.

- (3) T. Hiyama. "Application of Neural Network to Real Time Tuning of Fuzzy Logic PSS". *Proc. of ANNPS '93*, pp. 421-426, April 1993.
- (4) K. S. Narendra and K. Parthasarathy. "Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks". *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 1, No. 1, pp. 4-27, March 1990.
- (5) Y. Iiguni, H. Sakai, and H. Tokumaru. "A Nonlinear Regulator Design in the Presence of System Uncertainties Using Multilayered Neural Networks". *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 2, No. 4, pp. 410-417, July 1991.
- (6) 金城, 大松, 山本. 「ニューラルネットワークを用いた非線形システムの近似最適制御」. 電気学会論文誌C, Vol. 113, No. 6, pp. 394-401, 1993.
- (7) 小林, 森岡, 横山. 「ニューラルネットワークを用いた非線形適応型発電機制御に関する基礎的検討」. 電気学会論文誌B, Vol. 114, No. 9, pp. 843-851, 1994.
- (8) T. Kobayashi, A. Yokoyama, and Y. Sekine. "Nonlinear Adaptive Control of Synchronous Generator Using Neural Network Based Regulator". *Proc. of ISAP '94*, Vol. 1, pp. 55-61, September 1994.
- (9) 小林, 横山. 「適応型発電機ニューロ制御系のオンライン制御アルゴリズムに関する考察」. 平成6年電気学会全国大会, No. 1187.
- (10) 小林, 横山. 「系統安定化を目的とした適応型ニューロ制御系のオンライン運用に関する検討」. 平成6年電気学会全国大会, No. 1264.
- (11) 大塚, 植木, 上之園, 田中, 榎里, 横川. 「発電機励磁/ガバナ多変数最適制御」. 電気学会論文誌B, Vol. 104, No. 11, pp. 733-740, 1984.
- (12) 小林, 横山. 「適応型発電機ニューロ制御による多機システムの安定化に関する検討」. 電気学会電力技術研究会資料, PE-94-10, 1994.

付 録

ニューラルネットワークの設定

本論文で使用するニューラルネットワーク NI, NC における各層ユニット数, 入出力変数, および(5)式中の更新パラメータ値を付表1に示す。なお, 入力層を除く各層のユニット伝達関数には, シグモイド関数: $f(z) = 1/(1 + e^{-z})$ を用いている。

また, NI, NC 内部では, モデルシステムの諸変数 $\underline{y}$, $\underline{u}$ をいずれも $[0,1]$ の値に収まるように正規化しておく必要がある。本論文で使用する諸変数の正規化に関する設定を付表2に示す。

付表1 ニューラルネットワークの設定 (各 ANCS 共通)
app Table 1. Neural networks data.

		AVR のみ 補償制御		AVR/GOV 同時補償制御	
		NI	NC	NI	NC
ユ ニ ツ ト 数	入力層 (入力変数)	6 ($\underline{y}_k, \underline{u}_k$)	5 ($\underline{y}_k$)	7 ($\underline{y}_k, \underline{u}_k$)	5 ($\underline{y}_k$)
	中間層	30	20	30	20
	出力層 (出力変数)	5 ($\hat{\underline{y}}_{k+1}$)	1 ($\underline{u}_k$)	5 ($\hat{\underline{y}}_{k+1}$)	2 ($\underline{u}_k$)
学習係数 ε		1.0	1.0	1.0	1.0
慣性項係数 μ		0.1	0.1	0.1	0.1

付表2 諸変数の正規化 (各 ANCS 共通)
app Table 2. Normalization of variables.

	実際の値	正規化された値
$\Delta\delta$	-0.60 ~ +0.60	0.20 ~ 0.80
$\Delta\omega$	-0.02 ~ +0.02	0.20 ~ 0.80
ΔP_g	-0.60 ~ +0.60	0.20 ~ 0.80
ΔV	-0.15 ~ +0.15	0.20 ~ 0.80
u_e	-0.20 ~ +0.20	0.20 ~ 0.80
u_g	-0.02 ~ +0.02	0.20 ~ 0.80

小林 武 則

(正員) 1967年2月21日生。1989年3月東京大学工学部電気工学科卒業。1991年3月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。1995年2月同専攻博士課程修了。工学博士。1994年4月(株)東芝入社。現在、重電技術研究所電力系統技術担当に勤務。

森岡 靖 夫

(正員) 1954年10月9日生。1977年3月京都工芸繊維大学工学部電気工学科卒業。1994年7月同大学大学院工学科学研究科博士後期課程修了。工学博士。1977年4月関西電力(株)入社。現在、総合技術研究所勤務。主として電力システムの安定度解析および安定度対策に関する研究に従事。計測自動制御学会, IEEE 会員。

横山 明 彦

(正員) 1956年10月9日生。1984年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年4月同大学工学部電気工学科助手, 1985年同講師, 1989年同助教授, 現在に至る。1987年2月~1989年2月テキサス大学アーリントン校客員研究員, この間1988年2月~同年12月カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。主に電力システム工学の研究に従事。計測自動制御学会, 日本応用数理学会, IEEE, CIGRE 会員。