標準 1 機無限大系統モデルの平衡点解析に基づく非線形発電機制御

学生員 張 建* 学生員 藤本 幸治*
正 員 川本 俊治*

Nonlinear Generator Control Based on Equilibrium Point Analysis for Standard One-Machine Infinite-Bus System Model

Jian Zhang*, Student Member, Koji Fujimoto*, Student Member, Shunji Kawamoto*, Member

The aim of this letter is to show that the unstable equilibrium point of the Japanese standard one-machine infinite-bus system model is eliminated by adding a simple nonlinear complementary control input to the AVR, and then the critical clearing time of the system can be more enhanced in comparison with the PSS by introducing the proposed nonlinear generator control.

キーワード：電力システム，AVR，PSS，平衡点，発電機制御，非線形制御

Keywords: power system, AVR, PSS, equilibrium point, generator control, nonlinear control

1. まえがき

負荷と分散型電源が混在する状況下，電力自由化が急進展する中で電力システムはさらに高い安全性と信頼性が求められている。したがって，例えば発電機を非線形制御することは，今後の電力の安定供給に重要な役目を果たすものと思われる。

筆者らは電力システムの平衡点と過渡安定度の関係に注目し，簡単なモデルシステムの平衡点解析に基づく非線形制御の方法を提案してきた⁽¹⁾。さらに標準 1 機無限大系統モデル⁽²⁾へと発展させ，その動揺方程式を近似しないでそのまま非線形連立微分方程式の平衡点を解析した。その結果，PSS の代わりに AVR・GOV の補助制御入力を加えると，不安定平衡点を消去することができ，リミッタを考慮しても PSS の場合に比較して臨界故障除去時間 t_{cr} をかなり改善できることが分かった⁽³⁾。

本レターでは，発電機の角速度偏差のデータのみによる補助制御入力 u_a を AVR に加え，さらに u_a に非線形項を追加することにより，非線形発電機制御として過渡安定度をかなり向上できることを報告する。

2. システムの平衡点解析と非線形制御

図 1 に標準 1 機無限大系統モデルを示す。F 点において 3 相短絡故障を想定すると，故障回線除去時間 t_c 後の動揺方程式は 12 次元非線形連立微分方程式

$$\dot{x} = f(x, u(x)) \cdots \cdots (1)$$

で与えられる。PSS の代わりに AVR に線形補助制御入力 $u_a = -(f_{1a}x_1 + f_{2a}x_2)$ を加えると，平衡点解析により位相角偏差 x_1 のゲイン f_{1a} を変えて不安定平衡点を消去できる。しかも角速度偏差 x_2 のゲイン f_{2a} は平衡点の座標に無関係で，界磁電圧を急速に高めて制御応答を改善するように選択

図 1 標準 1 機無限大系統モデル

Fig. 1. Standard 1-machine infinite-bus system model.

図 2 制御応答 ($t_c = 0.07(\text{sec})$)

Fig. 2. Control responses ($t_c = 0.07(\text{sec})$).

* 大阪府立大学大学院 工学研究科
〒599-8531 堺市学園町 1-1
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1, Gakuen-cho, Sakai 599-8531

図3 AVR 非線形補助制御入力 u_a

Fig. 3. Nonlinear complementary control input u_a for AVR.

表1 PSS と提案法の t_{cr}

Table 1. t_{cr} of PSS and the proposed method.

	u_a		t_{cr} (sec)
	f_{1a}	f_{2a}	
PSS	—	—	0.18
Proposed (Nonlinear)	-20	0	0.23
	-20	3	0.24
	-20	6	0.23

図4 平衡点

Fig. 4. Equilibrium points.

する⁽³⁾。GOV は従来通り補助的な役目を果たすよう補助制御入力には加えない。図2に4サイクル遮断 $t_c = 0.07(\text{sec})$ の場合の応答を示す。さらに線形 u_a に非線形項 x_2^3 を加えて

$$u_a = -(f_{1a}x_1 + f_{2a}(x_2 + x_2^3)) \dots \dots \dots (2)$$

とすると、平衡点座標は変わらず、界磁電圧を急速に高めて電機子電流を急増させることができる。ただし、図3に示すように、データ $x_2(t)$ を積分するのでリセット回路を必要とするが、データに含まれるノイズは積分により減らすことが期待できる。

3. シミュレーション

平衡点解析に基づいて得られた結果を表1にまとめている。PSS の場合は $t_{cr} = 0.18(\text{sec})$ であるのに対し、(2) 式 of 非線形 u_a によれば t_{cr} がかなり向上する。図4には(1), (2) 式より得られる平衡点を示し、提案法で f_{1a} を変化させると不安定平衡点を消去できることが分かる。そして図5では f_{2a} による各 t_{cr} での位相角偏差 $x_1(t)$ 、内部誘起電圧偏差 $x_7(t)$ 、界磁電圧偏差 $x_8(t)$ の応答を比べている。PSS の代わりに提案法の非線形 u_a によれば、特に $f_{2a} = 3$ の場合、リミッタを考慮した条件下においても $x_7(t)$ および $x_8(t)$ を急

図5 制御応答

Fig. 5. Control responses.

増させ、制御応答をかなり改善できることが分かった。ただし(2)式において、 $f_{1a} = 0$ として x_1 を入力しない u_a の場合は不安定平衡点が現れ、非線形項 x_2^3 を加えても t_{cr} は改善されない。

4. あとがき

本レターでは標準1機無限大システムモデルを取り扱い、PSS と提案法による非線形発電機制御を検討し、過渡安定度評価として t_{cr} を比較した。特に u_a に非線形項 x_2^3 を加えることにより t_{cr} をかなり改善できることが分かった。したがって u_a は測定可能な x_2 のデータのみで構成でき、今後は実用化を目指して実機での検証を進めたい。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費(基盤研究(c)No.17560263)の助成を受けていることを付記する。

(平成17年8月26日受付, 平成17年10月25日再受付)

文 献

- (1) S. Kawamoto, A. Kuwata, and T. Yamada: "Equilibrium Point Control for One-Machine Model Power System", *T. IEE Japan*, Vol.116-B, No.5, pp.556-562 (1996-5) (in Japanese)
川本俊治・桑田晶彦・山田智博:「1機無限大母線モデルシステムの平衡点制御」, 電学論 B, **116**, 5, pp.556-562 (1996-5)
- (2) 内田直之, 他:「電力システムの標準モデル」, 電気学会技術報告, No.754 (1999)
- (3) S. Kawamoto, J. Zhang, H. Yamamoto, and K. Fujimoto: "Generator Control Based on Equilibrium Point Analysis of Standard One-Machine Infinite-Bus System model—Comparison with PSS—", *IEEE Trans. PE*, Vol.125, No.7, pp.655-662 (2005-7) (in Japanese)
川本俊治・張建・山本浩義・藤本幸治:「標準1機無限大システムモデルの平衡点解析に基づく発電機制御—PSS との比較—」, 電学論 B, **125**, 7, pp.655-662 (2005-7)