

다기계통 안정화를 위한 강인한 적응 퍼지 제어기 설계

박장현\*, 박영환\*\*, 허성희\*, 최진호\*, 박귀태\*

\*고려대학교 전기·전자·전파공학부

\*\*충주산업대 제어계측공학과

Design of Robust Adaptive Fuzzy Controller for Multi-Machine Power System

Jang-Hyun Park\*, Young-Hwan Park\*\*, Sung-Hoi Huh\*, Jin-Ho Choi, Gwi-Tae Park\*

\*School of Electrical Engineering, Korea Univ.

\*\*Control and Instrumentation Engineering, Chungju National Univ.

**Abstract** - In this paper, we present a decentralized robust adaptive fuzzy controller for the transient stability and voltage regulation of a multimachine power system under a sudden fault. Power systems have uncertain dynamics due to various effects such as lightning, severe storms and equipment failure in addition to interconnections between generators. Hence a robust controller to deal with these uncertainties is needed. Simulation results show that satisfactory performance is achieved by the proposed controller.

1. 서론

전력계통은 번개나 폭우 등의 여러 가지 요인으로 인해 변화하는 동특성을 갖는다. 전송선로의 리액턴스와 같은 파라미터가 사고 발생으로 인해 변하게 되는 것이 그 대표적 예일 것이다. 그 동안 전력계통의 미소안정을 보장하기 위한 제어방식으로 여러 가지 방법들이 연구되어 왔다. 전력계통에 사고가 발생하였을 경우 이를 해석하는 고전적인 방법으로는 AVR과 PSS를 사용한 안정화 방법을 대표적으로 들 수 있을 것이다[1,13]. 그러나 이러한 방법은 동작점 부근에서 선형화 하여 안정도를 해석하는 방식이므로 지락사고와 같은 대규모의 왜란에는 문제가 생길 수 있을 것이다. 따라서 이러한 대규모의 왜란에도 전력계통이 안정할 수 있는 제어방식을 제시하고자 한다. 전력계통의 비선형성에 효과적으로 대처하기 위해서는 비선형 제어기법이 필요하게 되는데, 여기에서는 입출력 제한 선형화를 사용한 제어방식을 채택하였다[1,3]. 입출력 제한 선형화를 사용한 제어기는 전력계통의 비선형특성을 선형화하여 제어대상인 단자전압을 원하는 전압, 즉 사고 발생전의 단자전압으로 유도해 줄 수 있는 제어입력을 구할 수 있게 된다. 이 과정에서 계통의 내부동특성을 개선하기 위하여 출력을 단자전압과 상태변수들로 이루어진 함수로 재구성할 수 있다. 이러한 제한선형화는 계통에 불확실성이 없다는 가정 하에 정확한 제어입력을 만들어 낼 수 있으나, 사고발생으로 계통의 불확실성이 야기되면 그 성능은 제약될 수 밖에 없다. 따라서 이러한 불확실성을 다룰 수 있는 제어 알고리즘이 필요하게 된다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 본 논문에서는 적응 퍼지(fuzzy) 제어를 도입하여 PSS-AVR의 성능을 향상시키고자 하며, 계통의 파라미터적인 불확실성은 물론 비구조화된 불확실성에 대해서도 견실한 제어성능을 발휘하는 제어기를 설계함을 그 목적으로 한다.

2 다기계통의 수학적 모델

이 절에서는  $n$ 개의 동기발전기로 이루어진 전력계통에 대하여 기술한다. 이러한 일반적인 다기계통의 구조는 다음과 같은 방정식으로 표현된다.  $i$ 번째 발전기의 동요방정식(swing equation)은 다음과 같다.

$$\dot{\delta}_i = w_i(t) \tag{1}$$

$$\dot{w}_i = -\frac{D_i}{2H_i} w_i(t) + \frac{w_0}{2H_i} (P_{m0} - P_{ei}) \tag{2}$$

여기서

$$P_{ei} = E_{qi} I_{di} \tag{3}$$

$$I_{di}(t) = \sum_{j=1}^n E_{qj} B_{ij} \sin \delta_{ij}(t) \tag{4}$$

이고  $\delta_i$ 와  $w_i$ 는  $i$ 번째 발전기의 전력각과 상대각속도를 나타낸다. 그리고  $I_{di}$ 는  $i$ 번째 발전기에 흐르는 전류의  $d$ 축 성분을 나타내고  $P_{m0}$ 는 기계적인 입력으로서 상수로 가정한다.  $P_{ei}$ 는 전기적인 출력으로서  $i$ 번째 발전기의 유효전력을 나타낸다. 그리고  $w_0$ 는 동기속도,  $D_i$ 는 제동계수,  $H_i$ 는 관성계수이다.

$i$ 번째 발전기의 횡축의 과도 기전력  $E'_{qi}$ 는 다음과 같고

$$E'_{qi} = \frac{1}{T_{doi}} (E_{fi}(t) - E_{qi}(t)) \tag{5}$$

$$E_{fi}(t) = k_{ci} u_{fi}(t) \tag{6}$$

여기서  $T_{doi}$ 는 직축의 과도 단락회로 시정수,  $k_{ci}$ 는 여자 증폭기의 이득,  $x_{di}$ 는 발전기의 직축 리액턴스,  $x'_{di}$ 는 발전기의 직축 과도 리액턴스이다.  $i$ 번째 발전기의 입력은 (5)에 나타난  $u_{fi}$ 이다. 횡축의 기전력  $E_{qi}$ 와 과도 기전력  $E'_{qi}$  사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$E_{qi}(t) = E'_{qi}(t) - (x_{di} - x'_{di}) I_{di} \tag{7}$$

여기서

$$I_{di}(t) = \sum_{j=1}^n E_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij}(t) = \sum_{j=1}^n E'_{qj} B'_{ij} \cos \delta_{ij}(t) \tag{8}$$

$$\delta_{ij} := \delta_i - \delta_j$$

이며  $i$ 번째 발전기에 흐르는 전류의  $d$ 축 성분을 나타낸다.  $i$ 번째 발전기의 출력은 발전기의 단자전압으로서 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ti} = B_{13} \{ (x_{di} I_{di})^2 + (E_{qi} + x_{di} I_{di})^2 \}^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

(4), (8)을 (9)에 대입하여 전개하면 다음이 얻어진다.

$$V_{ti}(k) = B_{13} \{ (x_{di} V_s \sin \delta_i + \Delta_{13})^2 + (x_{si} E_{qi} + x_{di} V_s \cos \delta_i + \Delta_{14})^2 \}^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

여기서

$$\Delta_{13} = x_{di} B_{ij} E_{qj} \sin \delta_{ij}, \quad \Delta_{14} = \frac{x_{di} B_{ij}}{B_{13}} E_{qj} \cos \delta_{ij},$$

$$x_{si} = \frac{1 + x_{di} B_{ij}}{B_{13}}$$

이다.  $\Delta_{ij}$ , ( $i=1,2, j=3,4$ )는 다른 발전기 때문에 야

기되는 간섭항을 나타내며 만약  $\Delta_{ij} = 0$ 이면 [10]에서의

1기 무한대 모선의 출력식과 동일한 식이 됨을 확인할 수 있다.

(5)에서  $E_{qi}$ '값은 물리적으로 측정 불가능하므로 (5)의 양변을 미분하여  $E_{qi}$ '항을 없애고 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{qi}(t) = & -\frac{1}{T_{doi}} E_{qi}(t) - (x_{di} - x'_{di}) B_{\beta} V_s \sin \delta_i(t) \omega_i(t) \\ & + \frac{k_{ci}}{T_{doi}} u_{fi}(t) + \Delta_2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\Delta_2 = -(x_{di} - x'_{di}) (\dot{E}_{qi}' B_{ij}' \cos \delta_{ij} - E_{qi}' B_{ij}' \sin \delta_{ij} \omega_{ij})$$

$$T_{doi}' = -\frac{T_{doi}}{1 - (x_{di} - x'_{di}) B_{ii}'}$$

이다.

본 논문에서는 두 대의 발전기가 전송선로를 통해서 무한대 모선에 연결된 2기 무한대 모선 계통을 고려한다. 플랜트 모델은 그림 1에 나타나 있다.

여기서 ③번 모선을 무한대 모선으로 정하고 전압을  $V_s$  ( $=1.0$  pu)로 표기한다. 또한 이 모선의 전력각을 기준으로 하여 ①번과 ②번 발전기의 전력각을 표시한다. 본 논문에서 고려하는 사고는 ④번과 ⑤번 모선을 연결하는 두 선로중 하나에 발생하는 3상 지락사고이다.  $\lambda$ 는 고장발생점에서 ④번 모선까지 부분의 ④-⑤번 전체선로에 대한 비율을 나타낸다. 만약  $\lambda=0$ 이라면 사고는 ④번 모선에서 발생한 것이고  $\lambda=0.5$ 라면 ④-⑤번 전송선 정중앙에서 사고가 발생한 것이다. 이러한 계통의 제어 목적은 선로사고 발생시 계통의 파라미터들이 변함에도 불구하고 동기상태와 일정전압을 유지하도록 발전기 SCR증폭기 제어입력  $u_{fi}$ 를 결정하는 것이다.

### 3. 분산 적응 퍼지 제어기

3.1 입력-의사출력 선형화에 근거한 적응퍼지제어  
이 절에서는 제한 선형화를 기반으로 한 적응퍼지제어기를 제시한다. [10]에서와 같이 내부 동특성의 향상을 위해 다음과 같은 수정된 출력을 고려한다.

$$y_i = V_{Fi} + \alpha_i w_{Fi} \quad (12)$$

여기서

$$w_{Fi} = -b_i w_{Fi} + b_i w_i$$

입출력 제한 선형화를 적용하기 위해 위의 출력식을 미분하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{y} = & L_f h_i + L_g h_i u_{fi} \\ = & \frac{w_i}{f_{\beta}^{\frac{1}{2}}} [f_{\beta} x_{di} (I_{di} - E_{qi} B_{ii}) - f_{\beta} x_{di} I_{qi}] \\ & - \frac{\alpha_i b_i}{2H_i} [D_i w_i - w_0 (P_{m0} - P_{ei})] \\ & + \frac{1 + x_{di} B_{ii}}{f_{\beta}^{\frac{1}{2}}} \left[ \frac{E_{qi}}{T_{doi}} + (x_{di} - x'_{di}) I_{di} \right] \\ & + \alpha_i b_i (b_i w_{Fi} - b_i w_i) \\ & + \frac{1 + x_{di} B_{ii}}{f_{\beta}^{\frac{1}{2}}} \frac{k_{ci}}{T_{doi}} u_{fi} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $L_f h_i$ 와  $L_g h_i$ 는 각각  $f_i$ 와  $g_i$ 에 대한  $h_i$ 의 Lie 미분이며 함수  $f_{\beta}$ ,  $f_2$ ,  $f_{\beta}$ 와  $f_{\beta}$ 는 각각 다음과 같이 정리된다.

$$f_{\beta} = x_{di} I_{qi}, \quad f_2 = E_{qi} + x_{di} I_{di}, \quad f_{\beta} = f_{\beta}^2 + f_2^2$$

입출력 제한 선형화를 사용하기 위해 기준전압을  $y_{IR}$ . 오

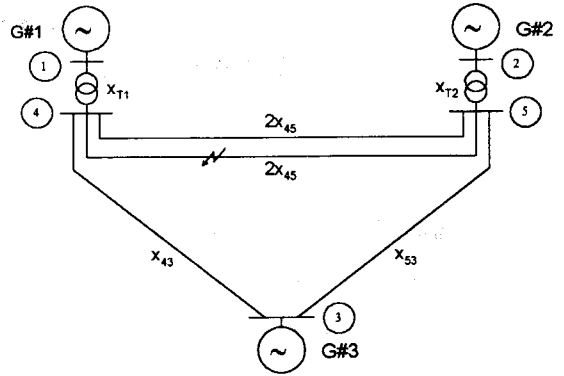


그림 1 2기 무한 모선 계통도

Fig. 1 two-machine infinite bus system

차  $e_i$ 를  $e_i = y_i - y_{IR}$ 이라고 정의하고,

$$\dot{e}_i + c_0 e_i = 0, \quad (c_0 > 0) \quad (14)$$

가 만족되는 제한 선형화 제어입력을 결정하면 다음과 같다[7].

$$u_{fi} = \frac{1}{L_g h_i} \{ -L_f h_i + \dot{y}_{IR} - c_0 e_i \} \quad (15)$$

그러나 선로에 사고가 발생하는 경우 앞에서 논한 바와 같이 선로의 susceptance값이 변화하게 되고, 이로 인해  $L_f h_i$ 와  $L_g h_i$ 가 변화하게 된다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 근사화 기법을 이용하여 이 함수들을 추정한다. 먼저  $L_f h_i$ 를 다음과 같이 분리한다.

$$L_f h_i = L_f h_i' + f_{\beta} \quad (16)$$

여기서

$$f_{\beta} = \alpha_i b_i (b_i w_{Fi} - b_i w_i)$$

이다.

### 3.2 확정성 등가 제어 법칙

[8]에 의하면, 싱글톤 퍼지화기 (singleton fuzzifier), sup-star합성 (sup-star composition)을 이용하는 추론 엔진 (inference engine), 중심평균 비퍼지화기 (center average defuzzifier)를 사용할 경우  $L_f h_i'$ ,  $L_g h_i' (x)$ 는 다음과 같이 퍼지 시스템으로 추정 (estimation)될 수 있다.

$$\widehat{L_f h_i'}(x) = \widehat{\theta}_f^T \xi_f(x) \quad (17)$$

$$\widehat{L_g h_i'}(x) = \widehat{\theta}_g^T \xi_g(x) \quad (18)$$

여기서

$$\widehat{\theta}_f = [ \widehat{\theta}_1^{(1,1,1)}, \dots, \widehat{\theta}_1^{(m_1, m_2, m_3)} ]^T$$

$$\widehat{\theta}_g = [ \widehat{\theta}_2^{(1,1)}, \dots, \widehat{\theta}_2^{(m_1, m_3)} ]^T$$

이고  $\xi_f$ ,  $\xi_g$ 는 다음과 같이 정의되는 퍼지기저함수 (fuzzy basis function)이다.

$$\xi_f^{(i_1, i_2, i_3)} \triangleq \left[ \frac{\prod_{j=1}^3 \mu_{F_j^i}(x_{ij})}{\sum_{i_1=1}^{m_1} \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=1}^{m_3} \left( \prod_{j=1}^3 \mu_{F_j^i}(x_{ij}) \right)} \right] \quad (19)$$

$$\xi_g^{(i_1, i_3)} \triangleq \left[ \frac{\mu_{F_1^i}(x_1) \cdot \mu_{F_3^i}(x_3)}{\sum_{i_1=1}^{m_1} \sum_{i_3=1}^{m_3} (\mu_{F_1^i}(x_1) \cdot \mu_{F_3^i}(x_3))} \right] \quad (20)$$

$\widehat{L_f h_i'}(x) = \widehat{L_f h_i'} + f_{\beta}$ 라고 정의하면 추정된  $\widehat{L_f h_i'}$ ,

$\widehat{L}_g h_i$ 을 (15)에 대입하여 얻어지는 제어규칙은 다음과

같다.

$$u_i = u_{0i} + u_{si} \\ = \frac{1}{\widehat{L}_g h_i} \{ -\widehat{L}_f h_i(x) + y_{iR} - c_{0i} e_i \} + u_{si} \quad (21)$$

이 때  $u_{0i}$ 는 확정성 증가제어입력이고,  $u_{si}$ 는 계통안정도를 위해 추가적으로 인가하는 감속제어입력으로서 다음과 같이 결정된다.

$$u_{s_i} = -\Gamma_i \operatorname{sgn}(e_i) \frac{1}{\widehat{L}_g h_i^L(x)} \\ \times \{ |\widehat{L}_f h_i(x)| + L_f h_i^U(x) + |\widehat{L}_g h_i(x) u_{0i}| \\ + |L_g h_i^U(x) u_{0i}| \} \quad (22)$$

$$\Gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{if } V_{ei} \geq \overline{V}_i \\ 0, & \text{if } V_{ei} < \overline{V}_i \end{cases}$$

여기서

$$L_f h_i^U = \left| \frac{w_i x_{di}}{f_{\beta}^2} [f_{\beta 1} I_{di} - f_{\beta 2} I_{qi}] \right| + \left| \frac{w_i x_{di}}{f_{\beta}^2} f_{\beta 1} \right| B_{ii} |_{\max} |E_{qi}| \\ - \frac{a_i b_i}{2H_i} |D_i w_i - w_0 (P_{mi}) - P_{ei}| \\ + \frac{1 + x_{di} |B_{ii}|_{\max}}{f_{\beta}^2} \frac{|E_{qi}|}{T_{doi}} - a_i b_i |b_i w_{Fi} - b_i w_i| \quad (23)$$

$$L_g h_i^L = \frac{1 + x_{di} |B_{ii}|_{\min}}{f_{\beta}^2} \frac{k_{ci}}{T_{doi}} \quad (24)$$

$$L_g h_i^U = \frac{1 + x_{di} |B_{ii}|_{\max}}{f_{\beta}^2} \frac{k_{ci}}{T_{doi}} \quad (25)$$

이다. 그리고 (17)과 (18)에 포함된 파라미터 벡터  $\theta_f, \theta_g$ 를 추정하는 적응알고리즘은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\theta}}_f = \gamma_1 e_i \xi_f(x), \quad \dot{\hat{\theta}}_g = \gamma_2 e_i \xi_g(x) u_{0i} \quad (28)$$

본 논문에서는 파라미터의 발산을 막기 위해 [8]에서와 같이 projection 알고리즘을 사용하였다.

#### 4. 시뮬레이션

여기서는 제안된 분산 신경망 제어기의 성능평가를 위한 시뮬레이션 결과를 소개한다. 제어 목적은 사고 발생 후에도 발전기의 전력과  $\delta_i, i=1,2$ 를  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 의 범위로 유지하면서 단자전압  $V_{ti}, i=1,2$ 가 1.0 [p.u.]이 되도록 하는 것이다. 제어기 관련 파라미터들은 표 1에 주어져 있다.

표 1 모의실험에 사용된 파라미터들

Table 1 simulation parameters

$\gamma_1, \gamma_2$	0.01, 0.009
$c_0$	10
$M_f, M_g$	42.675 0.5434
$\epsilon$	0.0453
$\alpha, b$	-5, 0.04

계통이 정상상태를 유지하다가 1초에  $\lambda=0.5$ 인 사고가 발생한 경우의 시뮬레이션 결과가 그림 2에 도시되어 있다. 의사출력을 사용하지 않은 경우는 두 발전기의 전력이 각이 진동하면서 발산하는 양상을 보이지만 의사출력을 사용한 경우는 그렇지 않음을 확인할 수 있다. 사고 발생 후  $V_{ti}$ 는 제어기에 의해서 1.0 pu로 수렴되고 있지만 발전기 전력각은 새로운 동작점으로 점차 수렴해 가고 있

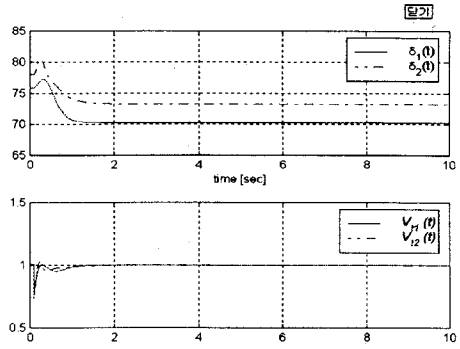


그림 2 사고 지속시 발전기 전력각과 단자전압 (의사출력 사용시)

Fig. 2 The power angle and terminal voltage of the generator

다. 이 결과에서 의사출력의 도입이 1기 무한대 모선계통 뿐만 아니라 다기계통에서도 내부동특성을 현저히 개선시킴을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문은 [10]에서의 1기 무한대 모선에 대한 연구의 확장으로 다기계통에 대한 적응퍼지 제어를 제시하였다. 제시한 적응 퍼지 제어기는  $i$ 번째 발전기 ( $i=1,2$ )에서 얻을 수 있는 정보만 이용하여 해석적으로 안정도가 보장된다는 점이 특징이라고 할 수 있다. 또한 의사출력의 도입이 1기 무한대 모선의 경우뿐만이 아니고 다기계통의 경우에도 각각의 발전기의 내부동특성을 현저히 개선시킴을 시뮬레이션 결과로 알 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] A. Isidori, Nonlinear Control System. New York: Springer Verlag, 1989.
- [2] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, L. Gao, "Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation of Power Systems," IEEE Trans. Power Sys., Vol. 8, No 2, pp. 620-626, May 1993.
- [3] T.-W. Yoon and D.-K. Lee, "Adaptive Feedback Linearization for Power System Stabilization", Proc. of ICARCV, pp.2394-2398, 1996.
- [4] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, L. Gao, "Transient Stabilization of Power System with an Adaptive Control Law," Automatica, Vol. 30, No. 9, pp.1409-1413, 1994.
- [5] P.M. Anderson and A.A. Fouad, Power System Control and Stability, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [6] Jean-Jacques E. Slotine, W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall
- [7] Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control of Linearizable systems," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 34, pp. 1123-1131, 1989.
- [8] Li-Xin Wang, "Stable Adaptive Fuzzy Controllers with Application to Inverted Tracking," IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics-Part B, vol. 26, No. 5, pp. 677-691, October 1996.
- [9] Y. Wang, G. Guo and D. Hill, "Robust Decentralized Nonlinear Controller Design for Multimachine Power Systems", Automatica, Vol. 33, No. 9, pp. 1725-1733, 1997
- [10] 박장현, 박영환, 윤태웅, 박귀태, "신경망 제어기를 이용한 전력계통의 안정화," 대한전기학회 논문집, Vol. 47, No. 11, pp. 1946-1951, Nov., 1998.