

다기계통 안정화를 위한 강인한 적응 퍼지 제어기 설계

Design of Robust Adaptive Fuzzy Controller for Multimachine Power System

박 장 현, 박 영 환, 박 귀 태
(Jang-Hyun Park, Young-Hwan Park, and Gwi-Tae Park)

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. The fuzzy systems are adapted using a Lyapunov-based design and the stability of each closed-loop system is guaranteed. Simulation results show that satisfactory performance is achieved by the proposed controller.

Keywords : multimachine system, fuzzy system, robust adaptive control

I. 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]. 그러나 이러한 방법은 동작점 부근에서 선형화 하여 안정도를 해석하는 방식이므로 지락사고와 같은 대규모의 외란에는 문제가 생길 수 있을 것이다. 따라서 이러한 대규모의 외란에도 전력계통이 안정할 수 있는 제어방식을 제시하고자 한다.

다기계통은 일반적으로 대규모 계통으로서 비선형성이 강하고 발전기 상호간의 간섭(interaction)이 존재하게 된다[1][2]. 계통의 비선형성에 효과적으로 대처하기 위해서는 비선형 제어기법이 필요하게 되는데, 여기에서는 입출력 궤환 선형화를 사용한 제어방식을 채택하였다[3][4]. 입출력 궤환 선형화를 사용한 제어기는 전력계통의 비선형특성을 상태변수 궤환(state feedback)으로 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[5][7]. 이러한 궤환선형화는 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. 또한 다른 발전기에 의해서 야기되는 간섭항을 효과적으로 다루기 위해서 분산제어 및 강인제어의 필요성도 대두된다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 본 논문에서는 강인한 적응 퍼지(adaptive fuzzy) 제어 기법[8]-[10]을 도입하여 PSS-AVR의 성능을 향상시키고자 하며, 계통의 파라미터적인 불확실성은 물론 발전기 상호간의 간섭항에 대해서도 견실한 제어성능을 발휘하는 제어기를 설계함을 그 목적으로 한다.

본 논문에서 제시하는 방법은 적응비선형 제어기[5][11]에서 요구되는 계통의 비선형항에 대한 선형 파라미터화 조건이 불필요하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다기계통의 수학적 모델을 설명하고 1기 무한대모선 계통과의 차이점을 보인다. 3장에서는 일반적인 n 기 계통에 대해서 적응 퍼지 제어알고리즘을 소개하고 안정도에 대해서 논한다. 4장에서는 2기 무한대모선에 대한 모의실험 결과를 소개하고 마지막으로 5장에서 결론을 내린다.

II. 다기계통의 수학적 모델

이 절에서는 n 개의 동기발전기로 이루어진 전력계통의 동특성식에 대하여 기술한다. 일반적인 다기계통의 구조는 그림 1과 같고 다음과 같은 방정식으로 표현된다.

1. 발전기의 동역학식

i 번째 발전기의 동요방정식(swing equation)은 다음과 같다.

$$\delta_i = w_i(t) \quad (1)$$

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

여기서

$$P_{ei} = E_{qi} I_{qi} \quad (3)$$

$$I_{qi}(t) = \sum_{j=1}^n E_{qj} B_{ij} \sin \delta_j(t) \quad (4)$$

이고 δ_i 와 w_i 는 i 번째 발전기의 전력각과 상대각속도

접수일자 : 2000. 7. 25., 수정완료 : 2001. 2. 5.

박장현, 박귀태 : 고려대학교 전기공학부(hyun@elec.korea.ac.kr/
gtpark@mail.korea.ac.kr)

박영환 : 충주산업대 제어계측공학과(pyh@mail.chung.ac.kr)

※ 본 논문은 기초전력공학공동연구소에서 지원하여 연구하였습니다.(과제번호 제 99-006호)

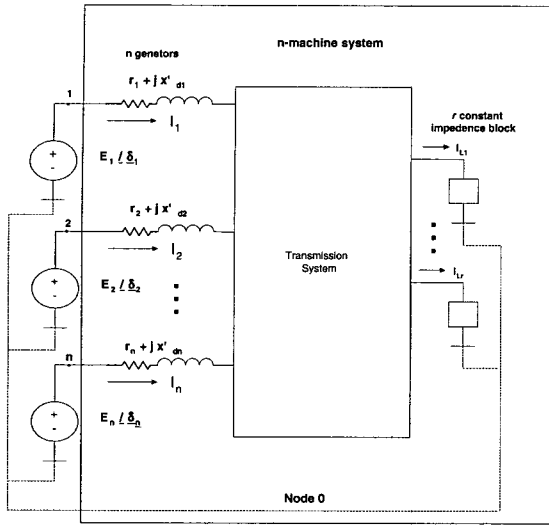


그림 1. 다기계통 계통도.
Fig. 1. Representation of a multimachine system (classical model).

를 나타낸다. 그리고 P_{m0} 는 기계적인 입력으로서 본 논문에서는 상수로 가정한다. P_{ei} 는 전기적인 출력으로서 i 번째 발전기의 유효전력을 나타내고 E_{qi} 는 i 번째 발전기의 횡축(q-axis) 기전력이고 I_{qi} 는 전류의 횡축 성분을 나타내고. w_0 는 동기속도, D_i 는 제동계수, H_i 는 관성계수이고 B_{ij} 는 susceptance행렬의 i 행 j 열의 요소이다.

i 번째 발전기의 횡축의 과도 기전력 E'_{qi} 는 다음과 같고

$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T_{d0i}} (E_{fi}(t) - E_{qi}(t)) \quad (5)$$

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

여기서 T_{d0i} 는 직축(d-axis)의 과도 단락회로 시정수, E_{fi} 는 여자기 코일의 등가 EMF, k_{ci} 는 여자 증폭기의 이득, x_{di} 는 발전기의 직축 리액턴스이다. i 번째 발전기의 입력은 (6)에 나타난 u_{fi} 로서 SCR증폭기의 제어 입력이다. 횡축의 기전력 E_{qi} 와 과도 기전력 E'_{qi} 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

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

여기서 x'_{di} 는 발전기의 직축 과도 리액턴스이며 I_{di} 는 전류의 직축 성분으로서 다음과 같이 계산된다.

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

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

i 번째 발전기의 출력은 발전기의 단자전압으로서 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ti} = \{ (x_{di} I_{qi})^2 + (E_{qi} + x_{di} I_{di})^2 \}^{1/2} \quad (9)$$

위에서 기술한 바와 같이 다기계통은 비선형성이 매

우 크고, 물리적으로 멀리 떨어진 발전기 계통들이 전송 선로를 통하여 상호 연결되어 있어 i 번째 발전기의 동특성식에는 다른 발전기에 기인하는 간섭항이 존재하게 된다.

2. 의사출력식과 상태방정식

(9)를 출력식으로 하여 궤환 선형화를 수행하면 제어입력 u_{fi} 와 제어대상인 V_{ti} 의 관계가 1차 미분항에서 나타나므로 이 시스템은 상대차수가 1이 된다. 상대차수가 1이고 전체 시스템의 차수는 3이므로 이 계통은 내부 동특성(internal dynamics)이 2차가 된다. 전체 시스템의 안정도는 이 내부 동특성이 안정하여야 하고 (9)를 출력으로 하여 궤환 선형화를 수행하면 이 내부 동특성식에 진동(oscillation)하는 특성이 나타나서 δ_i 가 진동하는 문제가 발생함이 1기 무한대 모션의 경우에 [5]에서 보여졌고 이는 다기 계통에서도 마찬가지로 모의실험으로 확인되었다. 일반적으로 전력계통에서의 동기각의 진동은 계통에 악영향을 미치므로 피해야 하며, 본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 [3]에서의 방법을 다기 계통에 적용하여 다음과 같은 수정된 출력을 고려한다.

$$h_i = V_{ti} + \alpha_i (-b_i w_{Fi} + b_i w_i) \quad (10a)$$

$$\dot{w}_{Fi} = -b_i w_{Fi} + b_i w_i \quad (10b)$$

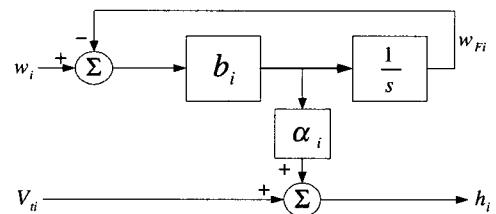


그림 2. 의사출력 생성을 위한 블록 다이어그램.
Fig. 2. Generation of modified output h_i .

여기서 수정된 출력 h_i 는 정상상태에서 V_{ti} 와 동일하며 w_{Fi} 는 w_i 를 저주파 필터링하여 얻어진다($b_i > 0$). 이러한 의사출력 h_i 를 사용하면 δ_i 의 진동이 현저히 개선되고 전체 페루프 계통의 안정도는 만약 차단주파수(break frequency) b_i 를 고정시킨다면 α_i 에 의해서 결정되어진다.

상태변수벡터를 $x_i = [\delta_i \ w_i \ E'_{qi} \ w_{Fi}]^T$ 라고 정의하면 (1),(2),(5),(10)에서 다음과 같은 상태방정식이 얻어진다.

$$\dot{x}_i = f_i(x_i) + g_i(x_i)u_i \quad (11)$$

$$y_i = h_i(x_i) \quad (12)$$

여기서

$$f_i(x_i) = \begin{bmatrix} w_i(t) \\ -\frac{D_i}{2H_i} w_i(t) + \frac{w_0}{2H_i} (P_{m0} - P_{ei}) \\ -\frac{1}{T_{d0i}} E_{qi}(t) \\ -b_i w_{Fi} + b_i w_i \end{bmatrix}$$

$$g_i(x_i) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_{ci}}{T_{di}} \\ 0 \end{bmatrix}, u_i = u_{fi}$$

이다. 계통의 제어 목적은 선로사고 발생 시 계통의 파라미터가 변함에도 불구하고 동기상태를 유지하고 단자 전압이 동작점으로 복구하도록 하는 제어입력 u_i 를 결정하는 것이다.

III. 분산 적응 퍼지 제어기

1. 입력-의사출력 선형화에 근거한 적응퍼지제어

이 절에서는 입출력 궤환 선형화(input-output feedback linearization)를 기반으로 한 적응 퍼지 제어기법을 제시한다. 입력-의사출력(pseudo-output) 궤환 선형화를 적용하기 위해 출력식 (10a)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{h}_i &= L_{f_i} h_i(x_i) + L_{g_i} h_i(x_i) u_{fi} \\ &= \frac{w_i x_{di}}{V_{ii}} [f_{1i}(I_{di} - E_{qi} B_{ii}) - f_{2i} I_{qi}] \\ &\quad - \frac{\alpha_i b_i}{2H_i} [D_i w_i - w_0(P_{m0} - P_{ei})] \\ &\quad - \frac{f_{2i}}{V_{ii}} \frac{E_{qi}}{T_{di}} + \alpha_i b_i (b_i w_{Fi} - b_i w_i) \\ &\quad + \frac{f_{2i}}{V_{ii}} \frac{k_{ci}}{T_{di}} u_i \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $L_{f_i} h_i$ 와 $L_{g_i} h_i$ 는 각각 f_i 와 g_i 에 대한 h_i 의 Lie도함수이고 함수 f_{1i} , f_{2i} 와 상수 T_{di}' 은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} f_{1i} &= x_{di} I_{qi}, \quad f_{2i} = E_{qi} + x_{di} I_{di} \\ T_{di}' &= \frac{T_{di}}{1 - (x_d - x_{d}') B_{ii}'} \end{aligned}$$

(13)은 다음과 같은 등식을 이용하면 쉽게 유도된다.

$$\begin{aligned} E_{qi} &= E_{qi}' - (x_{di} - x_{di}') \sum_{j=1}^n E_{qj}' B_{ij}' \cos \delta_{ij} \\ &= (1 - (x_{di} - x_{di}') B_{ii}') E_{qi}' \\ &\quad - (x_{di} - x_{di}') \sum_{j=1, j \neq i}^n E_{qj}' B_{ij}' \cos \delta_{ij} \\ \sum_{j=1, j \neq i}^n E_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij} &= I_{di} - E_{qi} B_{ii} \end{aligned}$$

발전기 계통에서 유효전력 P_{ei} , 무효전력 Q_{ei} 그리고 횡축 기전력 E_{qi} 는 측정 가능한 변수들이다. 따라서 다음과 같은 관계식들을 이용하여

$$P_{ei} = E_{qi} I_{qi}, \quad Q_{ei} = -E_{qi} I_{di}, \quad E_{qi} = x_{adi} I_{fi}$$

I_{di} , I_{qi} , 그리고 E_{qi} 는 측정 가능한 변수들로부터 계산 가능하므로 f_{1i} , f_{2i} 도 계산 가능함을 알 수 있다. 여기서 I_{fi} 는 여자기 전류, x_{adi} 는 상호 리액턴스를 나타낸다.

이제 입출력 궤환 선형화를 사용하기 위해 기준전압

을 y_{Ri} , 오차 e_i 를 $e_i = h_i - y_{Ri}$ 라고 정의하고,

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

를 만족시키는 궤환 선형화 제어입력을 결정하면 (15)와 같다[9].

$$u_i^* = \frac{1}{L_{g_i} h_i} \{ -L_{f_i} h_i + \dot{y}_{Ri} - c_{0i} e_i \} \quad (15)$$

(15)는 발전기의 모든 파라미터 변화를 알고 있을 경우 즉 이상적인 상황을 고려했을 때의 최적의 제어입력이고 실제로 외란 발생시 함수 $L_{f_i} h_i$, $L_{g_i} h_i$ 를 정확히 알 수는 없다. 즉 선로에 사고가 발생하는 경우 앞에서 논한 바와 같이 선로의 susceptance값이 변화하게 되고, 이로 인해 B_{ii} , T_{di}' 등과 같은 상수가 변하게 되어 결국 $L_{f_i} h_i$ 와 $L_{g_i} h_i$ 가 변화하게 된다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 근사화 기법을 이용하여 이 함수들을 적응적으로 추정한다. 먼저 $L_{f_i} h_i$ 를 다음과 같이 분리한다.

$$L_{f_i} h_i = L_{f_i} V_{fi} + f_{3i} \quad (16)$$

여기서

$$\begin{aligned} L_{f_i} V_{fi} &= \frac{w_i x_{di}}{V_{ii}} [f_{1i}(I_{di} - E_{qi} B_{ii}) - f_{2i} I_{qi}] \\ &\quad + \frac{f_{2i}}{V_{ii}} \frac{E_{qi}}{T_{di}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} f_{3i} &= \alpha_i b_i (b_i w_{Fi} - b_i w_i) \\ &\quad - \frac{\alpha_i b_i}{2H_i} [D_i w_i - w_0(P_{m0} - P_{ei})] \end{aligned} \quad (18)$$

이며 f_{3i} 는 의사출력의 도입으로 $L_{f_i} h_i$ 에 새로이 첨가된 항으로서 불확실성이 존재하지 않는 항이다. 다음절에서 제시하듯이 퍼지시스템은 사고 발생으로 인하여 불확실하게 되는 부분 즉, $L_{f_i} V_{fi}$ 와 $L_{g_i} h_i$ 만을 퍼지 시스템으로 추정하게 된다.

2. 확정성 등가 제어 법칙

[12]에 의하면, 싱글톤 퍼지화기(singleton fuzzifier), sup-star 합성(sup-star composition)을 이용하는 추론엔진(inference engine), 중심평균 비퍼지화기(center average defuzzifier)를 사용하는 퍼지시스템의 출력을 $y(x, \theta)$ 라고 하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y(x, \theta) = \frac{\sum_{i=1}^M \theta^i \left(\prod_{j=1}^n \mu_{F_j}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^M \left(\prod_{j=1}^n \mu_{F_j}(x_j) \right)} \quad (19)$$

여기서 $\mu_{F_i}^l$ 은 i 번째 상태변수에 대한 l 번째 퍼지 소속 함수를 나타내고 θ^l 는 퍼지 후건부 파라미터들로서 (1)에 대한 전문가의 지식으로부터 정해지며, (11)에 포함된 파라미터의 불확실성 때문에 적절한 추정알고리즘에 의해 추정되어야 할 값들이다. 뒤에 논의될 적응 알고리즘에 의해 추정되는 값들을 $\hat{\theta}_f^l$, $\hat{\theta}_g^l$ 이라 하면 $L_{f_i} V_{fi}$

과 $L_g h_i$ 의 추정치는 다음과 같다.

$$\widehat{L}_f V_{hi}(x_i, \hat{\theta}_f) = \frac{\sum_{j=1}^M \hat{\theta}_f^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_j}(x_i) \right)} \triangleq \hat{\theta}_f^T \xi \quad (20)$$

$$\widehat{L}_g h_i(x_i, \hat{\theta}_g) = \frac{\sum_{j=1}^M \hat{\theta}_g^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_j}(x_i) \right)} \triangleq \hat{\theta}_g^T \xi \quad (21)$$

여기서 $\hat{\theta}_f, \hat{\theta}_g$ 는

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_f &= [\hat{\theta}_f^1, \dots, \hat{\theta}_f^M]^T \\ \hat{\theta}_g &= [\hat{\theta}_g^1, \dots, \hat{\theta}_g^M]^T \end{aligned} \quad (22)$$

로 정의되는 파라미터 벡터이고 $\xi(x_i) = [\xi^1(x_i), \dots, \xi^M(x_i)]^T$ 는 다음과 같이 정의되는 퍼지 기저 함수(fuzzy basis function)를 요소로 하는 벡터이다.

$$\xi^l(x_i) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_l}(x_i)}{\sum_{j=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_j}(x_i) \right)} \quad (23)$$

위의 퍼지 시스템을 이용하면 $L_f h_i, L_g h_i$ 는 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$L_f h_i(x_i) = \widehat{L}_f V_{hi}(x_i, \theta_f^*) + f_{3i} + \delta_f(x_i) \quad (24)$$

$$L_g h_i(x_i) = \widehat{L}_g h_i(x_i, \theta_g^*) + \delta_g(x_i) \quad (25)$$

여기서 θ_f^*, θ_g^* 는 다음과 같이 정의되는 미지의 최적의 퍼지후건부 파라미터 벡터이고

$$\theta_f^* = \arg \min_{\theta_f \in \Omega_f} \left[\sup_{x \in U_c} [\widehat{L}_f V_{hi}(x_i, \theta_f) - L_f V_{hi}(x_i)] \right]$$

$$\theta_g^* = \arg \min_{\theta_g \in \Omega_g} \left[\sup_{x \in U_c} [\widehat{L}_g h_i(x_i, \theta_g) - L_g h_i(x_i)] \right]$$

$\delta_f(x_i), \delta_g(x_i)$ 는 유계인 근사화 오차(reconstruction error)이다. $\widehat{L}_f h_i(x_i) = \widehat{L}_f V_{hi} + f_{3i}$ 라고 정의하고, (13)의 $L_f h_i, L_g h_i$ 를 추정된 $\widehat{L}_f h_i, \widehat{L}_g h_i$ 으로 대체하여 얻어지는 제어규칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_i &= u_{0i} + u_{si} \\ &= \frac{1}{\widehat{L}_g h_i} \{ -\widehat{L}_f h_i(x) + y_{Ri} - c_{0i} e_i \} + u_{si} \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 u_{0i} 는 확정성 등가(certainty equivalence) 제어 입력이고, u_{si} 는 계통안정도를 위해 추가적으로 인가하는 감속제어입력[9]으로서 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} u_{si} &= -\Gamma_i \operatorname{sgn}(e_i) \frac{1}{L_g h_i^L(x)} \\ &\times \{ |\widehat{L}_f h_i(x)| + L_f h_i^U(x) + |\widehat{L}_g h_i(x)| u_{0i} \\ &+ |L_g h_i^U(x)| u_{0i} \} \end{aligned} \quad (27)$$

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

여기서

$$L_f h_i^U = \frac{w_i x_{di}}{V_{hi}} (f_{1i} I_{di} - f_{2i} I_{qi}) + \frac{|w_i x_{di} f_{1i} E_{qi}|}{V_{hi}} |B_{hi}|_{\max} \quad (28)$$

$$+ \frac{|f_{2i} E_{qi}|}{V_{hi} |T_{doi}|_{\min}} + f_{3i}$$

$$L_g h_i^L = \frac{k_{ci} |f_{2i}|}{V_{hi} |T_{doi}|_{\max}} \quad (29)$$

$$L_g h_i^U = \frac{k_{ci} |f_{2i}|}{V_{hi} |T_{doi}|_{\min}} \quad (30)$$

이고 V_{ei} 는 리아프노브 후보함수이고 \overline{V}_i 는 설계자가 정하는 상수이다. 만약 [9]에서와 같이 V_{ei} 를 $V_{ei} = \frac{1}{2} e_i^2$ 으로 정의하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ei} &= -c_{0i} e_i^2 + e_i \{ (L_f h_i - \widehat{L}_f h_i) \\ &+ (L_g h_i - \widehat{L}_g h_i) u_{fi} + L_g h_i u_{si} \} \\ &\leq -c_{0i} e_i^2 + e_i \{ |L_f h_i| + |\widehat{L}_f h_i| + |\widehat{L}_g h_i| u_{0i} \\ &+ |L_g h_i u_{0i}| \} + e_i L_g h_i u_{si} \end{aligned} \quad (31)$$

이 되어 $V_{ei} \geq \overline{V}_i$ 인 경우 $\dot{V}_{ei} \leq -c_{0i} e_i^2$ 가 성립하고 따라서 V_{ei} 가 유한하게 된다. 즉 오차의 절대값 $|e_i|$ 는 $\sqrt{2\overline{V}_i}$ 를 넘지 않게 된다.

여기서 주목할 사실은 제어입력 (26)을 구성하는 데 있어서 다른 발전기의 상태변수를 사용하지 않는다는 것이다. 즉 제시한 제어기는 i 번째 발전기에서 측정가능하거나 계산가능한 값들만으로 구성되지만 다른 발전기의 간섭항이나 사고발생시 파라미터의 변화에 관계없이 계통의 안정성을 유지할 수 있다. 이는 i 번째 발전기에서 계산가능한 값인 I_{di}, I_{qi} 가 다른 발전기의 간섭항에 대한 정보와 사고 발생시의 파라미터 변화에 대한 정보를 내포하고 있고 이 값들을 이용하여 감속제어항 u_{si} 를 구성하기 때문이다.

이제 (17)과 (18)에 포함된 파라미터 벡터 θ_f, θ_g 를 추정하는 적응알고리즘을 유도하기로 한다. 오차방정식 (12)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= -c_{0i} e_i + (L_f h_i - \widehat{L}_f h_i) + (L_g h_i - \widehat{L}_g h_i) u_{0i} \\ &+ L_g h_i u_{si} \\ &= -c_{0i} e_i + L_g h_i u_{si} \\ &+ \{ L_f h_i - \widehat{L}_f h_i + \widehat{L}_f h_i - L_f h_i \} \\ &+ \{ L_g h_i - \widehat{L}_g h_i + \widehat{L}_g h_i - L_g h_i \} u_{0i} \\ &= -c_{0i} e_i + L_g h_i u_{si} + v + \phi_f^T \xi + \phi_g^T \xi u_{0i} \end{aligned} \quad (32)$$

여기서

$$\begin{aligned} \phi_f &= \theta_f^* - \hat{\theta}_f, \quad \phi_g = \theta_g^* - \hat{\theta}_g \\ v &= (L_f h_i - \widehat{L}_f h_i(x_i | \theta_f^*)) \\ &+ (L_g h_i - \widehat{L}_g h_i(x_i | \theta_g^*)) u_{0i} \\ &= \delta_f(x_i) + \delta_g(x_i) u_{0i} \end{aligned} \quad (33)$$

이다. 이 때 양의 함수

$$V_i = \frac{1}{2} e_i^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \phi_f^T \phi_f + \frac{1}{2\gamma_2} \phi_g^T \phi_g$$

를 고려하면 V_i 의 시간 미분은

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= e_i \dot{e}_i + \frac{1}{\gamma_1} \phi_f^T \dot{\phi}_f + \frac{1}{\gamma_2} \phi_g^T \dot{\phi}_g \\ &= e_i(-c_0 e_i + L_g h_i u_{si} + v + \phi_f^T \xi + \phi_g^T \xi u_{0i}) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_1} \phi_f^T \dot{\phi}_f + \frac{1}{\gamma_2} \phi_g^T \dot{\phi}_g \quad (34) \\ &= -c_0 e_i^2 + e_i L_g h_i u_{si} + e_i v + \frac{1}{\gamma_1} \phi_f^T (\dot{\phi}_f + \gamma_1 e_i \xi) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_2} \phi_g^T (\dot{\phi}_g + \gamma_2 e_i \xi u_{0i}) \end{aligned}$$

가 되어 적응법칙

$$\begin{aligned} -\dot{\phi}_f &= \hat{\theta}_f = \gamma_1 e_i \xi \\ -\dot{\phi}_g &= \hat{\theta}_g = \gamma_2 e_i \xi u_{0i} \end{aligned} \quad (35)$$

과 부등식 $e_i L_g h_i u_{si} \leq 0$ 을 사용하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= -c_0 e_i^2 + e_i L_g h_i u_{si} + e_i v \\ &\leq -c_0 e_i^2 + e_i v \end{aligned} \quad (36)$$

가 된다. 여기서 v 는 근사화 오차(reconstruction error)로서 퍼지 시스템은 임의의 함수를 원하는 정밀도로 근사화시킬 수 있는 범용 근사화기(universal approximator)[12]이므로 소속함수의 개수, 분포 그리고 퍼지 규칙의 개수 등을 조절하여 충분히 작게 만들 수 있는 값이다. 따라서 (36)의 $e_i v$ 항은 무시할 수 있을 정도로 작게 만들 수 있다. 그러나 비록 이 항을 충분히 작게 만들 수 있다 할 지라도 해석적인 관점에서는 [9]의 정리 1에 의해 v 가 square integrable이어야 오차가 0으로 수렴함을 보일 수 있다. 즉 $v(t)$ 에 대해 $\int_0^\infty |v(t)|^2 \leq \infty$ 이 만족되어야 하지만 일반적으로 이 조건을 만족됨을 보이기 어렵다. 그러한 바, u_{si} 라는 추가적인 항을 도입하여 전체 계통의 안정도를 보장하는 것이다. 이 추가적인 제어항에 의해서 계통의 추종오차는 근사화 오차가 존재함에도 불구하고 \bar{V} 라는 설계자가 정하는 상수에 의해서 유계됨을 보장할 수 있다.

(35)만으로는 퍼지 후건부 파라미터 $\hat{\theta}_f, \hat{\theta}_g$ 의 유계를 보장할 수 없으므로 [3]에서는 투영(projection)알고리즘을 사용하였고 본 논문에서도 이 알고리즘을 사용하였다. 이 경우 (35)는 다음과 같이 변경한다.

$$\hat{\theta}_f = \begin{cases} \gamma_1 e_i \xi_f & \text{if } (|\hat{\theta}_f| < M_f) \text{ or } (|\hat{\theta}_f| = M_f \text{ and } e_i \hat{\theta}_f^T \xi \leq 0) \\ \gamma_1 e_i \xi - \gamma_1 e_i \frac{\hat{\theta}_f \hat{\theta}_f^T \xi}{|\hat{\theta}_f|^2} & \text{if } (|\hat{\theta}_f| = M_f \text{ and } e_i \hat{\theta}_f^T \xi > 0) \end{cases} \quad (37)$$

$$\hat{\theta}_g = \begin{cases} \gamma_2 e_i \xi u_{0i} & \text{if } (|\hat{\theta}_g| < M_g) \text{ or } (|\hat{\theta}_g| = M_g \text{ and } e_i \hat{\theta}_g^T \xi u_{0i} \leq 0) \\ \gamma_2 e_i \xi u_0 - \gamma_2 e_i \frac{\hat{\theta}_g \hat{\theta}_g^T \xi u_{0i}}{|\hat{\theta}_g|^2} & \text{if } (|\hat{\theta}_g| = M_g \text{ and } e_i \hat{\theta}_g^T \xi u_{0i} > 0) \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \text{if } \theta_{gk} &= \varepsilon, \\ \hat{\theta}_{gk} &= \begin{cases} \gamma_2 e_i \xi_k u_{0i} & \text{if } e_i \xi_k u_{0i} > 0 \\ 0 & \text{if } e_i \xi_k u_{0i} \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (39)$$

여기서 θ_{gk}, ξ_k 는 각 벡터의 k 번째 원소를 나타내며 ε 은 양수로서 $\widehat{L}_g \widehat{h}_i$ 가 양수가 되도록 하기 위해 사용된다. 위의 projection 알고리즘은 $|\hat{\theta}_f| < M_f, |\hat{\theta}_g| < M_g$ 를 보장하며 여기서 M_f, M_g 는 설계자가 정하는 값이다. 또한 다음의 부등식으로부터 만약 투영 알고리즘이 수행된다 하더라도 (36)은 여전히 성립함을 증명할 수 있다.

$$\phi_f^T e_i \frac{\hat{\theta}_f \hat{\theta}_f^T \xi}{|\hat{\theta}_f|^2} < 0 \quad \text{if } e_i \hat{\theta}_f^T \xi > 0 \quad (40)$$

$$\phi_g^T e_i \frac{\hat{\theta}_g \hat{\theta}_g^T \xi u_{0i}}{|\hat{\theta}_g|^2} < 0 \quad \text{if } e_i \hat{\theta}_g^T \xi u_{0i} > 0 \quad (41)$$

전체 적응 퍼지 제어 계통의 블록도는 그림 3과 같다.

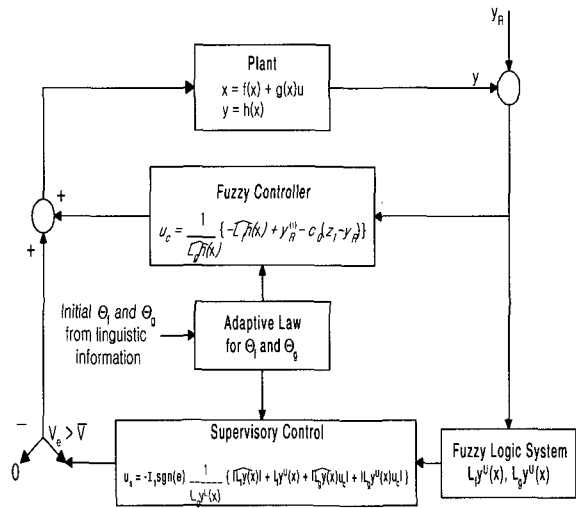


그림 3. 적응 퍼지 제어기의 구조도.

Fig. 3. The overall scheme of adaptive fuzzy control systems.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서는 두 대의 발전기가 전송선로를 통해서 무한대 모선에 연결된 2기 무한대 모선 계통을 고려한다. 플랜트 모델은 그림 4에 나타나 있다.

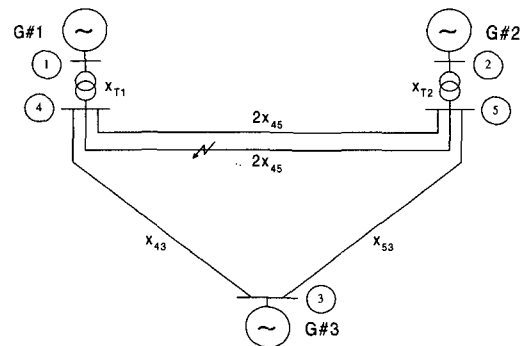
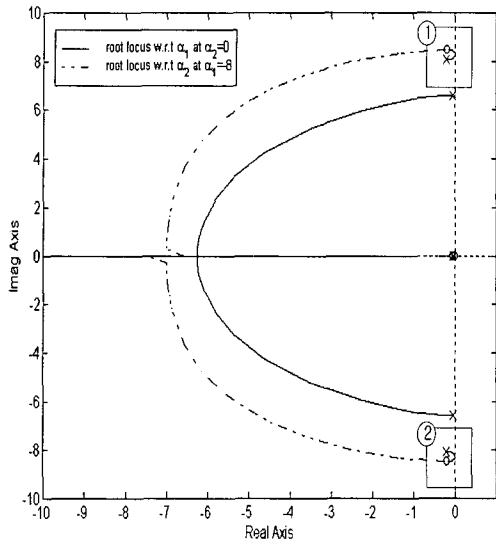
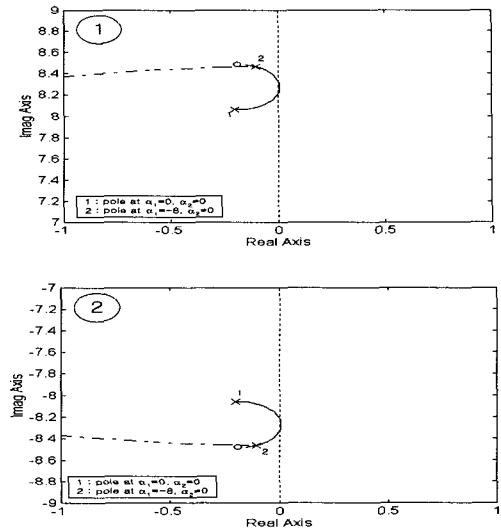


그림 4. 2기 무한 모선 계통도.

Fig. 4. Two-machine infinite bus system.



(a)



(b)

그림 5a. 2기 무한대 모선 예제 계통의 zero dynamics의 α_i 에 대한 근궤적.

Fig. 5a. Pole loci of the zero dynamics of the two-machine infinite bus model.

그림 4에서 ③번 모선을 무한대 모선으로 정하고 전압을 $V_s (= 1.0 \text{ pu})$ 로 표기한다. 또한 이 모선의 전력각을 기준으로 하여 ①번과 ②번 발전기의 전력각을 표시한다.

(4),(8)을 (9)에 대입하여 전개하면 다음이 얻어진다.

$$V_{ii}(k) = B_{ii} \{ (x_{di} V_s \sin \delta_i + \Delta_{ii})^2 + (x_{si} E_{qi} + x_{di} V_s \cos \delta_i + \Delta_{ii}')^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

여기서

$$\Delta_{ii} = x_{di} B_{ij} E_{qj} \sin \delta_{ij} \quad (i, j = 1, 2, i \neq j) \quad (43)$$

$$\Delta_{ii}' = \frac{x_{di} B_{ij}}{B_{ii}} E_{qj} \cos \delta_{ij} \quad (44) \quad x_{si} = \frac{1 + x_{di} B_{ii}}{B_{ii}} \quad (45)$$

이다. Δ_{ik} , ($i=1, 2, k=3, 4$)는 다른 발전기 때문에 야기되는 간섭항을 나타내며 만약 $\Delta_{ik} = 0$ 이면 [6][7]에서의 1기 무한대 모선의 출력식과 동일한 식이 됨을 확인할 수 있다.

2.2절에서 언급한 바대로 만약 차단주파수인 b_i ($i=1, 2$)를 고정시킨다면 내부 동특성식의 안정도는 α_i 에 의존하게 된다. $b_1 = b_2 = 0.04$ 로 선택한 후 동작점 부근에서 선형화된 zero-dynamics의 α_i ($i=1, 2$)에 대한 근궤적이 그림 5에 도시되어 있다. $|\alpha_1|, |\alpha_2|$ 가 증가함에 따라서 특성방정식의 해의 damping이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 비록 국부적인 안정도이지만 α_i 를 적절히 선택하면 전력각의 진동을 방지할 수 있음을 증명할 수 있다. 모의실험에서는 $\alpha_1 = \alpha_2 = -8.0$ 으로 설정하였다.

그림 5b. 하수축 부분의 근궤적(그림 5a) 확대.

Fig. 5b. Zpoming in the pole loci(fig. 5a) around the imaginary-axis.

몇번의 모의실험을 거쳐서 δ_i, w_i, E_{qi}' 의 전체집합의 범위를 각각 $[0, 2\pi], [-8, +8], [0, 53.14]$ 로 결정하고 소속함수의 개수는 각각 4,3,3이다. 따라서 퍼지 규칙의 개수는 36개($4 \times 3 \times 3$)이고 퍼지 기저 함수벡터 ξ 역시 각각 36차원의 벡터이다. 소속함수가 그림 6에 도시되어 있다.

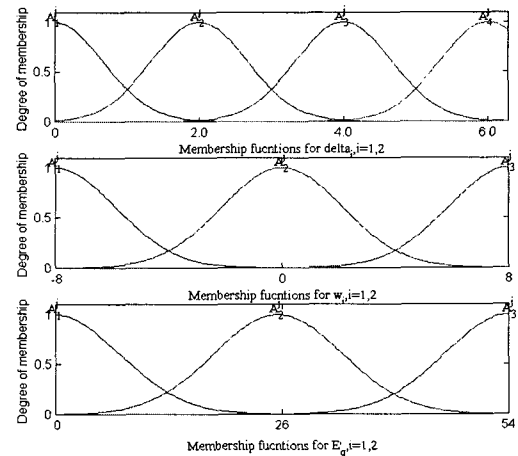


그림 6. δ_i, w_i, E_{qi}' 의 소속함수.

Fig. 6. Membership functions of δ_i, w_i, E_{qi}' .

본 논문에서 고려하는 사고는 그림 4의 ④번과 ⑤번 모선을 연결하는 두 선로중 하나에 발생하는 3상 지락사고이다. λ 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 정 중앙에서 사고가 발생한 것이다.

제어 목적은 사고 발생 후에도 발전기의 전력각 δ_i , $i=1,2$ 를 0° 와 90° 의 범위로 유지하면서 단자전압 $V_{i,i}$, $i=1,2$ 가 1.0 [p.u]이 되도록 하는 것이다. 제어기 관련 파라미터들은 표 1과 표 2에 주어져 있고 발전기 관련 파라미터들은 부록에 실었다.

표 1. 모의실험에 사용된 파라미터들.

Table 1. Simulation parameters.

γ_1, γ_2	0.01, 0.009
c_D	10
M_f, M_a	42.675 0.5434
ϵ	0.0453
$a_i, b_i, i=1,2$	-8, 0.04

계통이 정상상태를 유지하다가 0.25초에 $\lambda=0.5$ 인 사고가 발생한 경우의 시뮬레이션 결과가 그림 7, 8에 도시되어 있다. 그림 7은 의사출력을 사용하지 않은 경우 ($a_i=0, i=1,2$)이고 그림 8은 사용한 결과이다. 의사출력을 사용하지 않은 경우는 감동제어 입력에 의해서 단자전압은 유계되지만 전력각은 진동하면서 심지어 발산하는 양상을 보이고 있다. 하지만 의사출력을 사용한 경우는 전력각의 진동없이 단자전압이 빠르게 수렴함을 알 수 있다. 즉 사고 발생 후 $V_{i,i}(i=1,2)$ 는 제어기에 의해서 1.0 pu로 수렴되고 발전기 전력각은 새로운 동작점으로 점차 수렴해 가고 있다.

이 결과에서 의사출력의 도입이 1기 무한대 모선계통 뿐만 아니라[5]-[7] 다기계통에서도 내부동특성을 현저히 개선시킴을 확인할 수 있다. 또한 제시한 제어기가 전력각을 사고발생 후 동작점 부근으로 빠르게 수렴시킴을 알 수 있다.

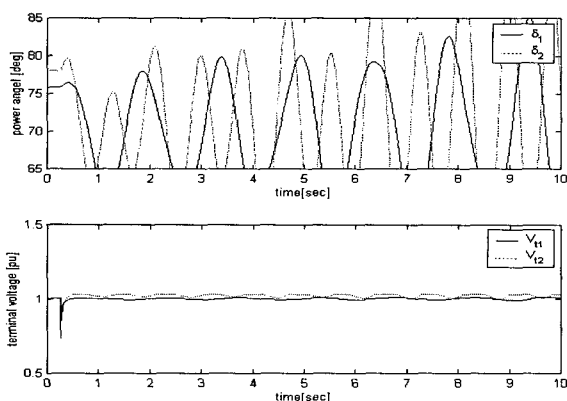


그림 7. $t=0.25$ sec에서 사고 발생시 발전기 전력각과 단자전압 (의사출력 비사용시).

Fig. 7. The power angle and terminal voltage of the generator when a fault occurs at $t=0.25$ sec.

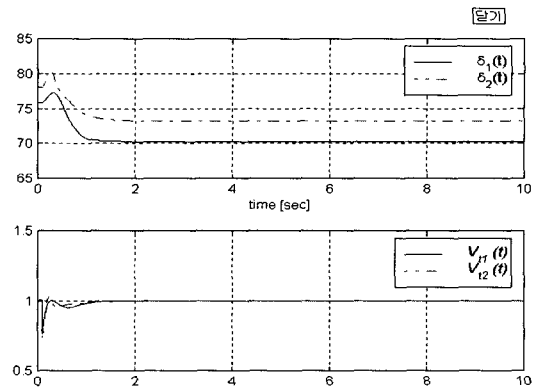


그림 8. $t=0.25$ sec에서 사고 지속시 발전기 전력각과 단자전압 (의사출력 사용시).

Fig. 8. The power angle and terminal voltage of the generator when a fault occurs at $t=0.25$ sec.

V. 결론

본 논문은 [6][7]의 1기 무한대 모선에 대한 연구의 확장으로 다기계통에 대한 적용 퍼지 제어기를 제시하였다. 따라서 [6][7]은 본 논문에서 제시한 결과의 특수한 경우로 간주할 수 있다. 제시한 적용 퍼지 제어기는 i 번째 발전기에서 얻을 수 있는 국부 정보만 이용하여 해석적으로 안정도가 보장되므로 분산 제어기라 칭할 수 있으며 이는 공간적으로 멀리 떨어진 발전기의 상태변수 값을 실시간으로 취득하기가 쉽지 않으므로 실용적인 관점에서 중요한 의미를 지닌다. 또한 의사출력의 도입이 1기 무한대 모선의 경우뿐만이 아니고 다기계통의 경우에도 각각의 발전기의 내부 동특성을 현저히 개선시킴 (즉 전력각의 진동을 제거함)을 근궤적을 이용하여 증명하였고 2기 무한대 모선 예제 계통에 대한 시뮬레이션 결과로 확인하였다.

본 논문에서는 간단한 1축모델(one-axis model)을 고려하였으나 SSR등 보다 정밀한 발전기-터빈 모델 사용시에도, 즉 보다 복잡한 다입력계통으로 모델을 확장한다 하더라도 본 논문의 제어 기법을 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [2] 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.
- [3] A. Isidori, *Nonlinear Control System*. New York: Springer Verlag, 1989.
- [4] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, and L. Gao, "Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems," *IEEE Trans. Power*

Sys., vol. 8, no 2, pp. 620-626, May, 1993.

[5] T.-W. Yoon and D.-K. Lee, "Adaptive feedback linearization for power system stabilization", *Proc. of ICARCV*, pp. 2394-2398, 1996.

[6] 박장현, 박영환, 윤태웅, 박귀태, "신경망 제어를 이용한 전력계통의 안정화," 대한전기학회 논문집, vol. 47, no. 11, pp. 1946-1951, Nov., 1998.

[7] 박영환, 박장현, 윤태웅, 박귀태, "의사출력을 사용한 전력계통 안정화를 위한 적응퍼지제어기 설계," 전기학회 논문지, 제47권, 제5호, pp. 644-651, 5, 1998.

[8] Li-Xin Wang, "Adaptive fuzzy systems and control of linearizable systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 34, pp. 1123-1131, 1989.

[9] 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.

[10] J. T. Spooner and K. M. Passino, "Stable adaptive control using fuzzy systems and neural networks," *IEEE Trans. Fuzzy Sys.*, vol. 3, no. 3, pp. 339-359, 1996.

[11] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, and L. Gao, "Transient stabilization of power system with an adaptive control law," *Automatica*, vol. 30, no. 9, pp. 1409-1413, 1994.

[12] L.-X. Wang and J. M. Mendel, "Fuzzy basis

functions universal approximation, and orthogonal least-squares learning", *IEEE Trans. Neural Network*, vol. 3, no. 5, pp. 807-814, 1992.

부록

발전기 파라미터 값들

$$P_{m01} = 0.95, \quad P_{m02} = 1.0, \quad x_{d1} = 1, \quad x_{d1}' = 0.26, \\ x_{d2} = 0.99, \quad x_{d2}' = 0.318, \quad T_{d01} = 7.1, \quad T_{d02} = 5.3, \\ H_1 = 7.2571, \quad H_2 = 2.6975, \quad D_1 = D_2 = 2.0 \quad k_{c1} = k_{c2} = 1.0, \\ \omega_0 = 314.159, \quad x_{T1} = 0.129, \quad x_{T2} = 0.11, \quad x_{45} = 0.55, \\ x_{43} = 0.53, \quad x_{53} = 0.6$$

사고발생전의 susceptance 행렬 :

$$B = \begin{bmatrix} -0.6813 & 0.0868 & 0.5945 \\ 0.0868 & -0.6841 & 0.5973 \\ 0.5945 & 0.5973 & -1.1919 \end{bmatrix}, \\ B' = \begin{bmatrix} -1.4129 & 0.3287 & 1.0842 \\ 0.3287 & -1.3054 & 0.9767 \\ 1.0842 & 0.9767 & -2.0609 \end{bmatrix}$$

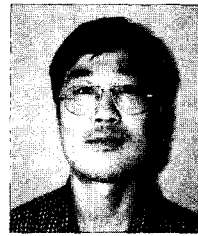
사고발생후($\lambda=0.5$) susceptance 행렬 :

$$B = \begin{bmatrix} -0.7389 & 0.0258 & 0.3601 \\ 0.0258 & -0.7487 & 0.3491 \\ 0.3601 & 0.3491 & -2.1464 \end{bmatrix}, \\ B' = \begin{bmatrix} -1.6349 & 0.1149 & 0.7688 \\ 0.1149 & -1.5112 & 0.6730 \\ 0.7688 & 0.6730 & -2.5092 \end{bmatrix}$$



박 장 현

1972년 1월 24일생. 1995년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 동 대학원 석사(1997). 현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 적응제어, 비선형 제어, 지능제어 및 응용.



박 영 환

1961년 1월 28일생. 1986년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 동대학 석사(1990). 동대학 박사(1998). 현재 충주 산업대 제어계측공학과 조교수.



박 귀 태

1947년 10월 25일생. 1975년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 동대학 석사(1977). 동대학 박사(1981). 현재 고려대 공대 전기공학과 교수.