

다기 전력 시스템의 안정화를 위한 탐색화된 정책 반복법 기반 적응형 강인 제어기 설계

Design of an Adaptive Robust Controller Based on Explorized Policy Iteration for the Stabilization of Multimachine Power Systems

전 태 윤, 박 진 배*
(Tae Yoon Chun¹ and Jin Bae Park^{1,*})

¹Department of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract: This paper proposes a novel controller design scheme for multimachine power systems based on the explorized policy iteration. Power systems have several uncertainties on system dynamics due to the various effects of interconnections between generators. To solve this problem, the proposed method solves the LQR (Linear Quadratic Regulation) problem of isolated subsystems without the knowledge of a system matrix and the interconnection parameters of multimachine power systems. By selecting the proper performance indices, it guarantees the stability and convergence of the LQ optimal control. To implement the proposed scheme, the least squares based online method is also investigated in terms of PE (Persistency of Excitation), interconnection parameters and exploration signals. Finally, the performance and effectiveness of the proposed algorithm are demonstrated by numerical simulations of three-machine power systems with governor controllers.

Keywords: multimachine system, adaptive dynamic programming, explorized policy iteration, optimal control

1. 서론

전력 계통은 다양한 전력설비들의 결합과 부하의 변동으로 인해 복잡성이 증대되고 있으며, 이를 안정화하기 위한 효율적인 제어의 필요성이 요구되고 있다. 이러한 배경하에 그 동안 단일 동기 발전기(synchronous generator)나 다기 전력 시스템의 제어를 위한 다수의 연구가 수행되었으며[1-7], 대표적인 선형 제어 방법으로는 계통의 동작점 부근에서 선형화하여 최적 제어를 설계하는 방법[2], 선형 행렬 부등식(linear matrix inequality) 혹은 강인 제어(robust control) 기법을 이용한 강인한 분산 제어기(robust decentralized control) 등이 있다[3,4]. 또한, 큰 규모의 외란에서도 만족할만한 성능을 도출하기 위해 다수의 비선형 제어 기법들이 제안되었으며[5-7], 직접 궤환 선형화(direct feedback linearization) 기법을 이용한 강인 제어기 설계[5]나 적응 분산 제어기(adaptive decentralized control)[6], 퍼지 제어기[7] 등의 비선형 제어 기법들이 다기 계통의 안정화를 위해 적용되었다.

그러나 대부분의 기존 연구들은 계통의 연결 상태를 미리 알고 있어야 하거나 시스템 모델 정보 혹은 외란의 범위를 사전에 알고 있어야 하는 문제점을 가진다. 따라서 발전기 사이에 상호 결합성 및 모델의 불확실성이 존재하는 다기 전력 시스템에서 발전기 사이의 상태와 계통 정보를 실시간으로 학습하여 전체 다기 전력 계통을 안정화하는 제어 기법의

연구가 반드시 필요하다.

한편, 정책 반복법(policy iteration)은 반복된 계산법을 통해 최적의 의사결정 및 최적 제어의 해를 구하는 기법으로 정책 평가 루틴(policy evaluation routine)과 정책 향상 루틴(policy improvement routine)으로 구성된다[8]. 이러한 정책 반복법에 대한 연구는 마르코프 의사결정 프로세스(MDP: Markov Decision Process)을 다루는 연구를 시작으로 동적 시스템에 대한 연구로 확장되었으며, 안정성과 수렴성이 보장된 연속 시간 동적시스템의 정책 반복법이 제안되었다[9]. 이를 발전시켜 시스템의 내부 모델과 상태변수 미분치를 모르는 상황에도 제어가 가능한 적분구간 강화학습 방법[10]이 제안되었으며, 최근에는 적분 Q-학습법(integral Q-learning) 및 강인 동적 계획법(robust adaptive dynamic programming) 기법들이 연구되었다[11,12]. 이들 기법들은 시스템 정보를 완전히 알지 못하는 상황에서도 적용 가능한 기법으로 시스템의 정보를 모르는 경우에도 최적의 제어입력을 설계할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 다기 전력 계통의 안정화를 위한 탐색화된 정책 반복법 기반의 제어 기법[11]을 통해 상호 결합 성분과 시스템 행렬을 모르는 경우에도 다기 전력 시스템을 안정화하도록 하는 적응형 강인 제어기법을 제안한다. 제안한 제어 기법은 기존의 정책 반복법[10,11]을 확장한 것으로, 발전기 모델의 시스템 행렬과 상호 결합 성분의 상한을 모르는 경우에도 반복학습을 통해 상호 결합의 상한을 추정하고, 이를 바탕으로 전체 시스템을 안정화하는 제어 입력을 설계한다. 또한, 탐색화된 정책 반복법을 통해 도입된 탐색 신호(exploration signal)를 고려하여 알고리즘의 수렴성과 안정도가 보장되도록 한다. 마지막으로, 3기의 다기 전력 시스템에 대한 모의실험을 통해 제안한 알고리즘의 유용성과 효율성을 검증하고자 한다.

* Corresponding Author

Manuscript received February 12, 2014 / revised May 2, 2014 / accepted June 13, 2014

전태윤, 박진배: 연세대학교 전기전자공학과
(yueyoon@yonsei.ac.kr/jbpark@yonsei.ac.kr)

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초 연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2013R1A1A2012 609).

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 다기 전력 계통의 수학적 모델을 설명하고 격리된 부시스템의 LQ (Linear Quadratic) 최적 제어 문제를 기술한다. III 장에서는 II 장의 결과를 바탕으로 탐색화된 정책반복법 기반의 제어 기법을 설계한다. 실시간 구현 및 제어 입력 설계를 위해 IV 장에서는 최소 자승법(least squares) 기반의 실시간 알고리즘 구현 방법을 기술하고, 이를 검증하기 위해 V 장에서 모의실험을 수행하여 제안된 알고리즘의 유용성과 적합성을 검증한다. 마지막으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. 다기 전력 시스템의 모델 및 격리된 부시스템의

LQ 최적 제어 문제

본 장에서는 다수의 동기 발전기로 구성된 다기 전력 시스템의 모델과 상태 방정식을 기술하고, 격리된 부시스템(isolated subsystem)의 LQ 최적 제어 문제에 대한 수학적 배경을 기술한다.

1. 다기 전력 시스템의 모델

본 논문에서는 N 개의 동기 발전기로 이루어진 대규모 상호 결합 전력 시스템(large-scale interconnected power system)을 고려하며, i 번째 발전기의 동역학과 제어 입력의 상태 방정식을 표현하면 다음과 같다[12].

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

$$\dot{\omega}_i(t) = -\frac{D_i}{2H_i}\omega_i(t) + \frac{\omega_0}{2H_i}[P_{mi}(t) - P_{ei}(t)] \tag{2}$$

$$\dot{P}_{mi}(t) = \frac{1}{T_i}[-P_{mi}(t) + u_{gi}(t)] \tag{3}$$

여기서

$$P_{ei}(t) = E'_{qi}I_{qi} = E'_{qi} \sum_{j=1}^N E'_{qj}B_{ij} \sin \delta_{ij}(t)$$

이며, $\delta_i(t)$ 와 ω_i 는 각각 i 번째 발전기의 전력각(angle)과 상대각속도(relative rotor speed)를 나타낸다. 또한, P_{mi} 와 P_{ei} 는 기계력(mechanical power)과 전기력(electrical power)을 의미하며 나머지 변수들은 표 1과 같다.

이제, 식 (1)-(3)을 이용하여 동작점까지의 차이를 다음과 같은 상태변수로 정의하면

표 1. 동기 발전기의 변수값.

Table 1. The parameters of synchronous generator.

변수	설명
δ_{ij}	i, j 번째 발전기의 전력각 차이 ($\delta_{ij} := \delta_i - \delta_j$)
E'_{qi}	i 번째 발전기의 횡축(quadrature axis) 기전력
I_{qi}	전류의 횡축 성분
ω_0	동기 속도
H_i	관성계수(inertia constant)
D_i	제동계수(damping constant)
B_{ij}	서셉턴스(susceptance) 행렬의 i 행 j 열 요소
T_i	시정수(time constant)

$$\Delta\delta_i(t) := \delta_i(t) - \delta_{i0}, \quad \Delta\omega_i(t) := \omega_i(t) - \omega_{i0},$$

$$\Delta P_{mi}(t) := P_{mi}(t) - P_{ei}, \quad u_i(t) = u_{gi}(t) - P_{ei}.$$

다기 전력 시스템의 모델은 비선형 상호 결합이 존재하는 식 (4)의 형태로 표현할 수 있다[12,13].

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i [u_i(t) + h_i(x)] \quad i = 1, \dots, N \tag{4}$$

여기서 $x_i(t) \in R^{n_i}$ 와 $u_i(t) \in R^{m_i}$ 는 각각 상태 변수와 제어 입력으로, 상태 벡터는 $x_i(t) = [\Delta\delta_i(t) \ \Delta\omega_i(t) \ \Delta P_{mi}(t)]^T$ 로 정의되며 각 시스템 행렬 A_i 와 B_i 는 다음과 같다.

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -D_i/2H_i & \omega_0/2H_i \\ 0 & 0 & -1/T_i \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1/T_i \end{bmatrix}^T.$$

또한, 다기 전력 시스템의 상호 결합 $h_i(x)$ 는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$h_i(x) = T_i E'_{qi} \sum_{j=1, j \neq i}^N E'_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij}(t) \times [\Delta\omega_j(t) - \Delta\omega_i(t)] \tag{5}$$

$\max_{1 \leq j \leq N} T_i E'_{qi} E'_{qj} |B_{ij}| = \alpha_i$ 라고 정의할 때 $h_i(x)$ 의 상한은 식 (6)의 부등식을 만족하여,

$$|h_i(x)| \leq \alpha_i (N-1) \sum_{j=1, j \neq i}^N |\Delta\omega_j - \Delta\omega_i| \leq \alpha_i (N-1)^2 \sum_{j=1}^N |\Delta\omega_j|$$

$$\leq \alpha_i (N-1)^2 \sqrt{3} \|x\| = d_i \|x\| \tag{6}$$

최종적으로 $|h_i(x)| \leq d_i \|x\|$ 의 조건을 만족한다.

2. 격리된 부시스템의 LQ 최적 제어 문제

한편, 상호 결합이 존재하지 않는 i 번째 발전기의 격리된 부시스템은 식 (7)과 같은 시불변 선형 시스템 모델로 고려할 수 있으며, 이 때 이차 비용함수는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{시스템 모델: } \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t), \quad x_i(0) = x_{i0} \tag{7}$$

$$\text{이차 비용함수: } V_i(x_i(t), t) = \int_t^{\infty} r_i(x_i, u_i) dt \tag{8}$$

여기서 $r_i(x_i, u_i)$ 는 $r_i(x_i, u_i) = x_i^T Q_i x_i + u_i^T R_i u_i$ 로 준양한정(positive semi-definite)인 행렬 $Q_i \geq 0$ 와 양한정(positive definite)인 행렬 $R_i > 0$ 로 정의되는 이차 함수이다. (A_i, B_i) 가 가안정(stabilizable)하고, $(A_i, Q_i^{1/2})$ 이 가검출(detectable) 하면 다음의 최적의 비용함수 $V_i^*(x_i)$ 와 최적 제어 입력 u_i^* 에 대한 최적해 $P_i^* \geq 0$ 이 유일하게 존재한다.

$$\text{최적의 비용함수: } V_i^*(x_i) = x_i^T P_i^* x_i, \tag{9}$$

$$\text{최적 제어 입력: } u_i^* = -K_i^* x_i = -R_i^{-1} B_i^T P_i^* x_i. \tag{10}$$

여기서 최적 입력 이득 K_i^* 는 $R_i^{-1} B_i^T P_i^*$ 로 정의되는 행렬이며, 최적해 P_i^* 는 식 (11)과 같은 대수 리카티 방정식(Algebraic Riccati Equation)을 만족시킨다.

$$A_i^T P_i^* + P_i^* A_i - (K_i^*)^T R_i (K_i^*) + Q_i = 0. \quad (11)$$

3. LQ 최적 기법의 안정도 증명

본 절에서는 2절에서 유도한 격리된 부시스템의 최적 제어 입력 (10)을 상호 결합이 존재하는 다기 전력 계통 시스템 (4)에 입력으로 적용하였을 때의 전체 다기 전력 계통 시스템의 안정도를 판별한다.

정리 1: 임의의 양수 $\gamma > 0$ 와 모든 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 에 대해 Q_i 와 R_i 가 다음의 조건을 만족할 때, 상호 결합 시스템 (4) 는 점근적 안정(asymptotic stable)하다.

$$Q_i > \gamma N \cdot I_{n_i}, \quad R_i \leq \gamma d_i^{-2} I_{m_i} \quad (12)$$

증명: 우선 i 번째 시스템 (4)에 대한 리아프노프 함수(Lyapunov function)로 $V_i(x_i) = x_i^T P_i x_i$ 를 고려하자. 식 (10)과 (11)을 대입하여 $V_i(x_i)$ 를 시간에 대해 미분을 하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(x_i) &= \frac{d}{dt}(x_i^T P_i x_i) \\ &= x_i^T P_i [A_i x_i + B_i u_i + B_i h_i(x)] + [A_i x_i + B_i u_i + B_i h_i(x)]^T P_i x_i \\ &= x_i^T P_i (A_i - B_i K_i) x_i + x_i^T (A_i - B_i K_i) P_i x_i + 2x_i^T P_i B_i h_i(x) \\ &= x_i^T [-Q_i - K_i^T R_i K_i] x_i + 2x_i^T P_i B_i h_i(x) \\ &= -x_i^T Q_i x_i - (K_i x_i - h_i(x))^T R_i (K_i x_i - h_i(x)) + h_i^T(x) R_i h_i(x) \\ &\leq -x_i^T Q_i x_i + h_i^T(x) R_i h_i(x) \\ &\leq -x_i^T Q_i x_i + \gamma \|x_i\|^2 \end{aligned}$$

상기 식의 결과를 확장하여 전체 시스템에 대한 리아프노프 함수를 $V_r(x) = \sum_{i=1}^N x_i^T P_i x_i$ 로 정의하고 식 (12)를 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{V}_r(x) = -\sum_{i=1}^N x_i^T Q_i x_i + \gamma N \|x\|^2 < 0$$

따라서 리아프노프 정리[14]에 의해 전체 상호 결합 시스템 (4)는 점근적 안정하다. ■

정리 1의 결과는 격리된 부시스템에서 유도된 LQ 최적 해가 전체 상호 결합 시스템 (4)를 안정하게 하는 조건을 제시한 것으로, 다음 장에서 제안하는 탐색화된 정책 반복법 기반의 적응형 강인 제어기 설계 시 식 (12)를 이용하여 제어기를 설계하면 전체 다기 전력 계통 시스템을 안정화할 수 있다.

III. 탐색화된 정책 반복법 기반 제어기 설계

본 장에서는 II 장에서 유도한 다기 전력 시스템 모델과 LQ 최적 제어, 안정도 증명 결과를 이용하여 상호 결합이 존재하는 시스템 (4)를 안정화시키는 탐색화된 정책 반복법 기반 적응형 강인 제어기법을 제안한다. 이를 위해 우선, 탐색 신호 $e_i(t)$ 를 추가하여 식 (4)의 시스템을 표현하면 식 (13)과 같이 된다.

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i (u_i + e_i + h_i(x)) \quad (13)$$

여기서 탐색 신호 $e_i(t)$ 는 $\sup_{t \geq 0} \|e_i(t)\| \leq e_{i,M}$ 인 유계의 신호로서 i 번째 상태변수 $x_i(t)$ 를 여기(excitation)시켜 영속 여기 조건(persistent excitation condition)이 만족되도록 하고, 계산 안정도를 향상시키는 역할을 한다[11].

또한, 탐색화된 정책 반복법을 통한 상호 결합 $h_i(x)$ 성분의 변수를 학습하기 위해서 식 (5)의 $h_i(x)$ 를 재정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_i(x) = \sum_{j=1, j \neq i}^N T_i E'_{qi} E'_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij}(t) \times [\Delta \omega_j(t) - \Delta \omega_i(t)]$$

이 때, $T_i E'_{qi} E'_{qj} B_{ij} = Y_{ij}$ 로 정의하고, 전력각 차이의 코사인 값을 아래와 같이 표현하면

$$\cos \delta_{ij}(t) [\Delta \omega_j(t) - \Delta \omega_i(t)] = \phi_{ij}(x_i, x_j)$$

$h_i(x)$ 는 다음 변수들로 이루어진 $h_i(x) = H_i^T \phi_i(x_i, x_j)$ 의 형태로 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_i &= [Y_{i1} \quad Y_{i2} \quad \dots \quad Y_{iN-1} \quad Y_{iN}]^T \\ \phi_i(x_i, x_j) &= [\phi_{i1} \quad \phi_{i2} \quad \dots \quad \phi_{iN-1} \quad \phi_{iN}]^T \end{aligned}$$

임의의 i 번째 제어 입력 u_i 를 $u_i = -K_i x_i$ 로 대입하고, $A_{i,K}$ 를 $A_{i,K} := A_i - B_i K_{i,K}$ 로 정의하면 식 (13)은 다음과 같은 페루프 시스템 형태로 다시 표현할 수 있다.

$$\dot{x}_i = A_{i,K} x_i + B_i e_i + B_i H_i^T \phi_i \quad (14)$$

참고로 저자의 기존 논문[11]에서 언급한 바와 같이 $h_i(x) = 0$ 인 격리된 부시스템의 경우, 안정한 입력 제어 입력 $u_i = -K_i x_i$ 에 대한 적분식 기반의 벨만(Bellman) 방정식은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i^T(t) P_i x_i(t) + 2 \int_t^{t+T} x_i^T P_i B_i e_i d\tau \\ = \int_t^{t+T} r_i(x_i, u) d\tau + x_i^T(t+T) P_i x_i(t+T) \end{aligned}$$

여기서 적분식 기반의 벨만 방정식을 통해 계산되는 $P_i > 0$ 은 식 (15)와 같이 리아프노프 방정식을 만족하는 $P_i > 0$ 와 일치한다[11].

$$A_{i,K}^T P_i + P_i A_{i,K} = -Q_i - K_i^T R_i K_i \quad (15)$$

이러한 결과를 바탕으로, 상호 결합 시스템 식 (14)를 만족하는 벨만 방정식을 유도하면 다음과 같은 보조 정리를 유도할 수 있다.

보조 정리 1: 임의의 탐색 신호 e_i 가 포함된 안정한 i 번째 시스템의 제어 입력 $u_i = -K_i x_i$ 에 의한 시스템 식 (14)는 다음과 같은 방정식을 만족한다.

$$\begin{aligned} x_i^T(t) P_i x_i(t) + 2 \int_t^{t+T} x_i^T P_i B_i e_i d\tau + 2 \int_t^{t+T} x_i^T P_i B_i H_i^T \phi_i d\tau \\ = \int_t^{t+T} r_i(x_i, u_i) d\tau + x_i^T(t+T) P_i x_i(t+T) \end{aligned} \quad (16)$$

증명: i 번째 시스템에 대한 리아프노프 함수로 $V_i(x) = x_i^T P_i x_i$ 를 고려하여 식 (14)에 적용하면, $V_i(x)$ 의 미분은 다음과 같다.

$$\dot{V}_i = x_i^T [A_{i,K}^T P_i + P_i A_{i,K}] x_i + 2x_i^T P_i B_i e_i + 2x_i^T P_i B_i H_i^T \phi_i$$

식 (15)의 리아프노프 방정식을 상기 식에 대입하고, 양변을 각각 $[t, t+T]$ 구간에 대해 적분을 취하면 식 (16)의 결과를 얻을 수 있다. ■

식 (16)을 이용하여 다기 전력 계통 안정화를 위한 탐색화된 정책 반복법 기반의 제어기 알고리즘을 설명하면 알고리즘 1과 같으며, 정책 평가 루틴과 정책 향상 루틴을 통해 계산되는 최적의 해 u_i^* 와 비용함수 $V_i^*(x_i)$ 는 정리 2와 같은 수렴성을 만족한다.

알고리즘 1: 다기 전력 계통 시스템을 위한 탐색화된 정책 반복법 기반 적응형 강인 제어기

- 1: i 번째 발전기의 초기값 설정 ($P_i^0 = 0$ 으로 설정하고, 임의의 $u_i^{(1)} = -K_i^{(1)} x_i$ 를 제어 입력으로 설정)
- 2: $k \leftarrow 0$, 임의의 $Q_i \geq 0, R_i > 0$ 을 선정
- 3: **do** {
- 4: $k \leftarrow k+1$
- 5: 0이 아닌 탐색 신호 $e_i(t)$ 를 설정
- 6: $u_i^{(k)} = -K_i^{(k)} x_i + e_i(t)$ 를 다기 전력 모델 식 (4)에 대입
- 7: **정책 평가 (Policy Evaluation) 루틴:**
7-1) 식 (16)을 만족시키는 $P_i^{(k)}, H_i$ 를 계산.

$$\begin{aligned} V_i^{(k)}(x_i(t)) + 2 \int_t^{t+T} x_i^T P_i^{(k)} B_i e_i d\tau \\ + 2 \int_t^{t+T} x_i^T P_i^{(k)} B_i H_i^T \phi_i d\tau \\ = \int_t^{t+T} r_i(x_i, u_i^{(k)}) d\tau + V_i^{(k)}(x_i(t+T)) \end{aligned} \quad (17)$$

- 7-2) H_i 를 통해 d_i 를 유도. Q_i 와 R_i 가 정리 1의 식 (12) 조건을 만족하는지 확인. 만족 시 8단계 이동. 이를 만족하지 않을 시 2단계 돌아가서 Q_i 와 R_i 를 식 (12)가 만족하도록 재설정.

- 8: **정책 향상 (Policy Improvement) 루틴:**

$$u_i^{(k+1)} = -K_i^{(k+1)} x_i = -R_i^{-1} B_i^T P_i^{(k)} x_i \quad (18)$$

- 9: } **until** $\|P_i^{(k)} - P_i^{(k-1)}\| < \varepsilon$
- 10: $e_i(t) = 0$ 을 대입하여 $u_i^{(k+1)} = -K_i^{(k+1)} x_i$ 를 적용

정리 2: Q_i 가 양한정 행렬이고, 초기 제어 입력 $u_i^{(1)}$ 이 안정하면, 알고리즘 1에 의해 계산된 k 번째 비용함수 $V_i^{(k)}(x_i) = x_i^T P_i^{(k)} x_i$ 는 $V_i^*(x_i) \leq V_i^{(k)}(x_i) \leq V_i^{(k-1)}(x_i)$ 를 만족하며, $k \rightarrow \infty$ 로 감에 따라 격리된 부시스템의 최적 비용함수와 최적 제어 입력 (9), (10)으로 수렴한다.

증명: 보조 정리 1에 의해 $A_i^{(k)}$ 는 항상 안정하며, 정책 평가 루틴의 식 (17)을 통해 유도된 P_i 는 항상 리아프노프 방정식 식 (15)를 만족한다. 이는 클라인만(Kleinman) 뉴턴 방법과 등가이므로, [10]과 [15]의 방법에 의해 비용함수 $V_i^*(x_i)$ 와 최적 제어 입력 u_i^* 의 수렴성이 증명된다. ■

알고리즘 1의 정책 평가 루틴과 정책 향상 루틴을 반복적으로 수행하면 정리 2에 의해 격리된 발전기 시스템의 최적 비용함수 V_i^* 와 최적 제어 입력 u_i^* 로 수렴함을 확인할 수 있다. 또한 정책 평가 루틴의 경우 식 (17)에서 확인할 수 있듯이 시스템 모델 정보 A_i 는 사용하지 않기 때문에 모델에 정보 없이도 최적 제어 입력의 유도가 가능하다. 반면 본 논문에서 제안한 제어 알고리즘은 제어 입력 $R_i^{-1} B_i^T P_i^{(k)}$ 를 설계하기 위해 제어기의 시정수인 행렬 B_i 의 정보를 필요로 하며, 행렬 B_i 를 통해 상호 결합 H_i 의 유도가 가능하다.

참고 1: 식 (17)과 (18)을 통해 계산된 벡터 H_i 는 i 번째 시스템의 상호 결합 $T_i E_{qi}^T E_{qi}^T B_{ij}$ 로 구성된 행렬이며, H_i 행렬 중 절대값이 가장 큰 값이 식 (6)에서 유도한 α_i 값이 되어 상한인 d_i 를 유도할 수 있다. 알고리즘 1의 7-2단계에서는 계산된 상한 d_i 를 통해 정리 1의 안정도 조건을 확인하며, 이를 만족하지 않을 시 알고리즘 1의 2단계로 돌아가 식 (12)를 만족하도록 Q_i 와 R_i 를 재설정하게 된다. 이를 통해 최종적으로 전체 다기 전력 시스템을 안정화하는 제어 입력을 구할 수 있다.

참고 2: 다기 전력 계통 시스템은 대표적인 대규모 상호 결합 시스템으로 식 (4)와 같이 상호 결합 성분이 존재하여, 이를 고려한 제어기 설계가 필요하다. 이를 위하여 본 알고리즘에서는 저자의 기존 논문[11]에서와 달리 정리 1의 안정도 조건이 추가로 필요로 하며, 정책 평가 루틴에서도 상호 결합에 의한 $\int_t^{t+T} x_i^T P_i^{(k)} B_i H_i^T \phi_i d\tau$ 항이 추가되어 정책 평가 및 정책 향상 루틴을 수행한다. 또한, 정책 평가 단계에서 $P_i^{(k)}$ 만 계산하는 기존 방법과 달리 동시에 H_i 를 계산하여 상호 결합의 상한을 추정한다.

IV. 실시간 알고리즘 구현 방법

본 장에서는 III 장에서 제안한 탐색화된 정책 반복법을 실시간으로 구현하기 위하여 최소자승법 기반에 알고리즘 구현 방법을 서술한다. 이를 위해 우선 크로네퍼 곱(Kronecker product)과 벡터화 연산법에 대한 정의와 기본적인 설명을 서술하면 다음과 같다.

행렬 A 와 B 의 크로네퍼 곱은 $A \otimes B$ 로 정의하고, $m \times n$ 인 행렬 X 에 대하여 X 의 열벡터(column vector)를 일렬로 변환하여 $mn \times 1$ 열벡터로 돌려주는 연산자를 $\text{vec}(X)$ 로 정의하자. 또한, $\text{vec}^+(X)$ 는 $n \times n$ 인 대칭 행렬 X 를 $n(n+1)/2 \times 1$ 차의 열벡터로 변환하는 연산자로 다음과 같이 표현하면,

$$\text{vec}^+(X) = [x_{11}^2, 2x_{11}x_{12}, \dots, 2x_{11}x_{1n}, x_{22}^2, 2x_{22}x_{23}, \dots, 2x_{22}x_{n-1,n}, x_{n,n}^2]^T$$

각 연산자들은 다음과 같은 성질을 만족한다[11].

- 1) $(A \otimes B)^T = A^T \otimes B^T$,
- 2) $x^T A y = (y^T \otimes x^T) \text{vec}(A)$
- 3) $\text{vec}(AXB) = (B^T \otimes A) \text{vec}(X)$
- 4) 임의의 n 차 대칭행렬 $X = X^T \in R^{n \times n}$ 에 대해

$$\text{vec}(X) = S \text{vec}^+(X) \text{ 를 만족하는 행렬 } S \text{ 가 존재}$$

이러한 크로벡터 곱과 그 성질을 이용하여 알고리즘 1의 식 (17)의 각 항목들을 기술하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_i^{i+T} x_i^T Q_{i,K} x_i d\tau &= \left[\int_i^{i+T} (x_i \otimes x_i)^T d\tau \right] \text{vec}(Q_{i,K}) \\ \int_i^{i+T} x_i^T P_i^{(k)} B_i e_i d\tau &= \left[\int_i^{i+T} (B_i e_i \otimes x_i)^T S d\tau \right] \text{vec}^+(P_i) \\ \int_i^{i+T} x_i^T P_i^{(k)} B_i H_i^T \phi_i d\tau &= \left[\int_i^{i+T} (\phi_i \otimes x_i)^T d\tau \right] \text{vec}(P_i B_i H_i^T) \end{aligned}$$

상기 식들을 이용하여 알고리즘 1의 정책 평가 루틴 (17)을 재서술하면 식 (19)와 같은 스칼라 방정식으로 표현할 수 있으며,

$$X_i^T \begin{bmatrix} \text{vec}^+(P_i) \\ \text{vec}(L_i) \end{bmatrix} = Y_i \quad (19)$$

이 때, X_i 와 Y_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} X_i &:= \begin{bmatrix} \bar{x}_{i,i} - \bar{x}_{i,i+T} + 2 \int_i^{i+T} (B_i e_i \otimes x_i)^T S_i d\tau \\ 2 \int_i^{i+T} (\phi_i \otimes x_i)^T d\tau \end{bmatrix} \\ Y_i &= \int_i^{i+T} x_i^T Q_i x_i + (u_i^{(k)})^T R_i u_i^{(k)} d\tau \end{aligned}$$

1차원의 스칼라 방정식인 식 (19)를 이용하여 P_i 와 L_i 를 유도하기 위해서는 T 를 한 주기로 하는 X_i 와 Y_i 를 $M \geq \frac{n_i(n_i+1)}{2} + 2n_i$ 개가 만족하도록 x_i 를 측정하여야 한다.

M 개로 구성된 행렬을 표기하면 다음과 같으며,

$$\begin{aligned} \Sigma_X &= [X_i^{(1)}, X_i^{(2)}, \dots, X_i^{(M)}]^T \\ \Sigma_Y &= [Y_i^{(1)}, Y_i^{(2)}, \dots, Y_i^{(M)}]^T \end{aligned}$$

식 (20)과 같이 임의의 양수 $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0$ 에 대한 영속 여기 조건이 만족하게 되면

$$\alpha_1 I \leq \sum_{k=1}^M X_i^{(k)} X_i^{T(k)} \leq \alpha_2 I \quad (20)$$

유일한 $P_i^{(k)}$ 와 $L_i^{(k)}$ 를 식 (21)을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \text{vec}^+(P_i^{(k)}) \\ \text{vec}(L_i^{(k)}) \end{bmatrix} = (\Sigma_X \Sigma_X^T)^{-1} \Sigma_X \Sigma_Y \quad (21)$$

여기서 계산된 $P_i^{(k)}$ 는 정책향상 루틴의 식 (18)을 통해 제어

입력을 갱신하는데 사용된다. 또한, 이와 함께 계산되는 $L_i^{(k)}$ 는 $L_i^{(k)} = P_i^{(k)} B_i H_i^T$ 로 식 (19)를 통해 계산된 $P_i^{(k)}$ 와 행렬 B_i 를 이용하여 대기 전력 시스템의 상호 결합 성분인 H_i 를 계산하는데 이용된다. 이를 통해 최종적으로 정리 1을 만족하도록 가중치 행렬 Q_i 와 R_i 를 설정하여 전체 대기 전력 시스템의 안정성을 보장할 수 있으며, 다른 부시스템의 상태 A_i 와 계통 정보 없이도 최적의 제어 입력을 유도할 수 있다.

V. 모의실험

본 장에서는 탐색화된 정책반복법 기반 적응형 강인 제어기의 성능을 검증하기 위해 3기의 발전기가 전송선로를 통해 연결되어 있는 전력 시스템의 모의실험을 수행하였다. 3기의 발전기 변수와 전송선로의 서셉턴스 정보는 각각 표 2-3과 같으며, 발전기 1을 기준 발전기(reference generator)로 선정하였다[12]. 이 때, 각 발전기의 초기 제어 입력 $K_i^{(0)}$ 와 가중치 행렬 Q_i, R_i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_2^{(1)} = K_3^{(1)} &= [10 \quad 50 \quad 5], \\ Q_2 = Q_3 &= \text{diag}\{400, 400, 400\}, \quad R_2 = R_3 = 0.1^* \end{aligned}$$

여기서 정한 가중치 행렬은 정리 1의 식 (12)를 만족하는 값들로 알고리즘 1의 정책 평가 루틴에 의해 계산된 상호 결합의 상한 d_i 를 이용하여 안정도 조건이 만족되도록 재설정된 값이다. 또한, 안정도와 수렴성을 위해 인가한 탐색 신호는 식 (20)의 영속 여기 조건을 만족하도록 상한 $e_{2,M}$ 과 $e_{3,M}$ 이 0.01의 크기를 갖는 난수 함수로 설계하였다.

상기 조건을 이용하여 동기 발전기의 유효전력(active power)에 외란(disturbance)이 발생하였을 경우의 모의실험을 수행하면, 그림 1, 2의 결과를 얻을 수 있다. 인가된 외란과 알고리즘 적용 시간에 대해 자세히 설명하면 발전기 2의 경우 0초에서 0.5초까지는 정상 상태를 유지하다가 0.5초에 외란이 발생하여 2초부터 제안한 알고리즘을 통해 제어를 수행하는 경우이며, 발전기 3의 경우는 0.5초에 발생한 외란과 1.5초에 추가로 발생한 외란을 보상하기 위해 3초부터 제어 학습을 통해 제어 입력을 유도한 것이다.

그림 1, 2는 각각 발전기 2와 3의 전력각과 상대 속도의 궤적을 나타낸 것으로 제안한 제어 알고리즘에 의해 발전기의 모든 상태변수들이 동작점 부근으로 안정화됨을 확인할 수 있으며 학습이 이루어지지 않은 초기 입력과 비교해서 향상된 성능을 보임을 확인할 수 있다. 또한, 알고리즘 1을 통해 구해진 발전기 2와 발전기 3의 제어 입력은 아래 값으로 수렴함을 확인할 수 있으며,

$$\begin{aligned} u_2 &= -63.2456\Delta\delta_2 - 68.8245\Delta\omega_2 - 154.7783\Delta P_{m_2} \\ u_3 &= -63.2455\Delta\delta_3 - 66.2676\Delta\omega_3 - 217.4649\Delta P_{m_3} \end{aligned}$$

이 결과는 대수 리카티 방정식을 통해 계산된 상호 결합이 없는 격리된 부시스템의 LQ 최적의 해 K_2^*, K_3^* 와 각각 일치함을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_2^* &= [63.2456 \quad 68.8247 \quad 154.7784] \\ K_3^* &= [63.2456 \quad 66.2748 \quad 217.4760] \end{aligned}$$

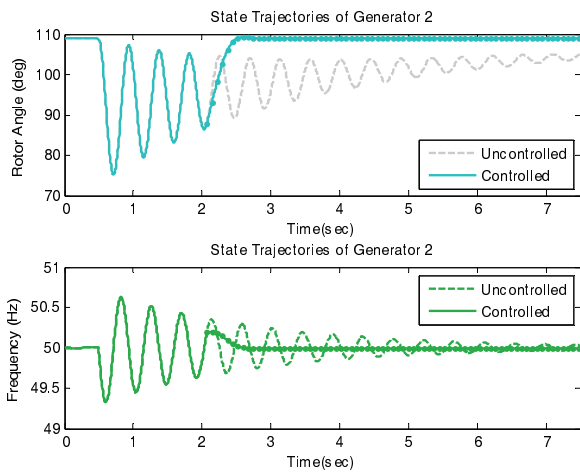


그림 1. 발전기 2의 상태 변수 궤적.

Fig. 1. The state trajectories of generators 2.

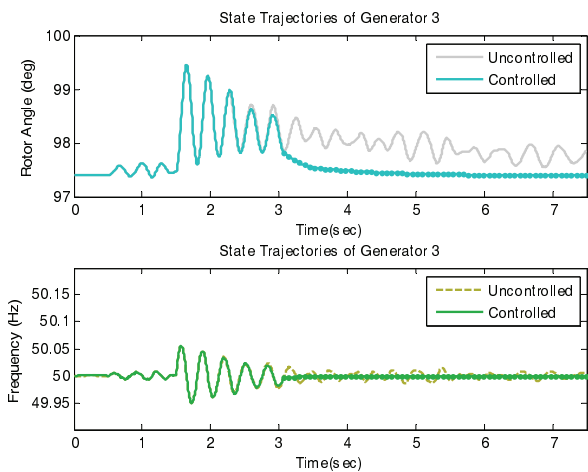


그림 2. 발전기 3의 상태변수 궤적.

Fig. 2. The state trajectories of generators 3.

표 2. 발전기의 변수들.

Table 2. Generators parameters.

	G1	G2	G3
$H_i(p.u.)$	∞	6.4	3
$D_i(p.u.)$	-	1	1.5
$T_i(s)$	-	6	6.3
$E'_{qi}(p.u.)$	1	1.2	1.5
$\delta_{i0}(deg)$	0	108.86	97.4

표 3. 서셉턴스 행렬.

Table 3. Susceptance matrix.

B_{ij}	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$j = 1$	0.2537	0.5563	0.5372
$j = 2$	0.5563	0.3927	0.4230
$j = 3$	0.5372	0.4230	0.0545

또한 정책 평가 루틴을 통해 계산된 결과 각 k 단계의 계산된 $L_i^{[k]} = P_i^{[k]} B_i^T H_i^T$ 로부터 H_i^T 를 유도하면 다음과 같다.

$$H_2 = [-4.0054 \quad -4.5684]^T, \quad H_3 = [-5.0766 \quad -4.7969]^T$$

이 값들의 절대값을 취하면 앞에서 정의한 $T_i E'_{qi} E'_{qj} B_{ij} = Y_{ij}$ 의 실제 다기 전력 시스템의 변수를 대입하여 계산한 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 상호 결합 성분을 모르는 경우에도, 알고리즘 1을 통해 H_i 의 유도가 가능하며, 식 (6)을 이용하여 상호 결합의 상한 d_i 를 선정할 수 있다. 본 모의실험에 경우, $\alpha_2 = 4.5684$, $\alpha_3 = 5.0766$ 로 상호 결합의 상한 d_2 와 d_3 는 약 31.65와 35.17의 값을 가지며, 이는 정리 1의 가중치 행렬 조건 역시 만족함을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 탐색화된 정책 반복법을 이용하여 상호 결합이 존재하는 다기 전력 계통을 안정화하는 적응형 강인 제어 기법을 제안하였다. 제안한 제어 기법은 기존의 정책 반복법을 확장한 것으로, 발전기 모델의 시스템 행렬과 상호 결합 성분의 상한을 모르는 경우에도 반복 학습을 통해 제어 입력을 유도하여 전체 시스템을 안정화한다. 이를 위해 제안한 알고리즘의 안정성과 격리된 부시스템의 LQ-최적 제어 문제의 최적해로의 수렴성을 증명하였으며, 3개의 발전기로 이루어진 모델을 기반으로 모의실험을 수행하여 제안한 제어기의 성능을 검증하였다.

REFERENCES

- [1] N. Yadaiah and R. N. Venkata, "Linearisation of multi-machine system: modeling and control – a survey," *Int. J. Electrical Power and Energy Syst.*, vol. 29, no. 4, pp. 297-311, May 2007.
- [2] Y. N. Yu and H. A. M. Moussa, "Optimal stabilization of multimachine systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-91, no. 3, pp. 1174-1182, May 1972.
- [3] D. D. Siljak, D. M. Stipanovic, and A. I. Zecevic, "Robust decentralized turbine/governor control using linear matrix inequalities," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 715-722, Aug. 2002.
- [4] Y. Wang, D. J. Hill, and G. Guo, "Robust decentralized control for multimachine power system," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 45, no. 3, pp. 271-279, Mar. 1998.
- [5] Y. Wang, G. Guo, and D. J. Hill, "Robust decentralized nonlinear controller design for multimachine power systems," *Automatica*, vol. 33, no. 9, pp. 1725-1733, Sep. 1997.
- [6] R. Yan, Z. Dong, T. K. Saha, and R. Majumder, "A power system nonlinear adaptive decentralized controller design," *Automatica*, vol. 46, no. 2, pp. 330-336, Feb. 2010.
- [7] S. K. Yee and V. Milanovic, "Fuzzy logic controller for decentralized stabilization of multimachine power systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 971-981, Aug. 2008.
- [8] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: an introduction*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1988.
- [9] J. J. Murray, C. J. Cox, G. G. Lendaris, and R. Saeks, "Adaptive dynamic programming," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 32, no. 2, pp. 140-153, May 2002.

- [10] D. Vrabie, O. Pastravanu, M. Abu-Khalaf, and F. L. Lewis, "Adaptive optimal control for continuous-time linear systems based on policy iteration," *Automatica*, vol. 45, no. 2, pp. 477-484, Feb. 2009.
- [11] J. Y. Lee, J. B. Park, and Y. H. Choi, "Integral Q-learning and explorized policy iteration for adaptive optimal control of continuous-time linear systems," *Automatica*, vol. 48, no. 11, pp. 2850-2859, Nov. 2012.
- [12] Y. Jiang and Z. P. Jiang, "Robust adaptive dynamic programming for large-scale systems with an application to multimachine power systems," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 59, no. 10, pp. 693-697, Oct. 2012.
- [13] H. Jiang, H. Cai, J. F. Dorsey, and Z. Qu, "Toward a globally robust decentralized control for large-scale power systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 309-319, May 1997.
- [14] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 2002.
- [15] D. Kleinman, "On an iterative technique for Riccati equation computations," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. AC-13, no. 1, pp. 114-115, Feb. 1968.



전 태 윤

2010년 연세대학교 전기전자공학과(공학사). 2012년 연세대학교 전기전자공학과(공학석사). 현재 동대학원 박사과정 재학 중. 관심분야는 강화학습, 근사 동적 프로그래밍, 비선형 제어, 파워 시스템.



박 진 배

1977년 연세대학교 전기공학과(공학사). 1985년 Kansas 주립대학교 전기공학과(공학석사). 1990년 Kansas 주립대학교 전기공학과(공학박사). 1992년~현재 연세대학교 전기공학과 교수. 관심분야는 강인 제어, 필터, 비선형 제어, 로봇틱스, 퍼지이론, 신경망 회로 이론. 2006년~2010년 국제저널 *International Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS)*의 Editor-in-Chief 역임. 2013년 제어·로봇·시스템 학회 회장 역임.