

Analysis of Small Signal Stability Using Resonance Conditions

趙 成 眞* · 張 吉 洙** · 尹 泰 雄***
(Sungjin Cho · Gilsoo Jang · Tae-Woong Yoon)

Abstract - Modern power grids are becoming more and more stressed with the load demands increasing continually. Therefore large stressed power systems exhibit complicated dynamic behavior when subjected to small disturbance. Especially, it is needed to analyze special conditions which make small signal stability structure varied according to operating conditions. This paper shows that the relation between small signal stability and operating conditions can be identified well using node-focus point and 1:1 resonance point. Also, the weak point which limits operating range is found by the analysis of resonance condition, and it is shown that reactive power compensation may solve the problem in the weak points. The proposed method is applied to test systems, and the results illustrate its capabilities.

Key Words : Small Signal Stability, Bifurcation Theory, Weak Point, Reactive Power Compensation

1. 서 론

현대 전력계통은 지속적인 부하의 증가로 많은 전력 설비가 가용 한계점에서 운용되는 이른바 압박된 상태에서 운전되고 있다. 한 예로 전력회사간의 대규모 전력 거래가 가지는 경제적인 이점은 미국에서 1971년 이후 전력회사간의 전력 거래량을 두 배가 넘도록 하였으며 이러한 경향은 전력산업의 경쟁체제 도입으로 더욱 심화되었다. 그리고 각 회사가 막대한 투자비가 소요되는 송전 설비의 확충을 꺼리는 상황에서 전력 설비 특히 송전 설비들을 최대한 그 한계용량에 가깝게 운전하고 있다[1]. 부하의 증가가 설비의 증가를 앞지르는 현 상황에서 이러한 경향은 계속될 것이며, 이러한 전력계통에서는 작은 외란에 의해서도 연쇄적인 사고의 파급을 통해 대규모 정전사태가 발생할 수 있다. 따라서 일상적인 계통 운전에서 발생하는 작은 변화에 대한 계통의 응답에도 주목하지 않을 수 없다. 특히 운전 조건 변동에 따라 시스템의 미소신호 안정도 구조(structure)가 달라지는 특수한 조건에 대한 해석이 요구된다.

어떤 선형시스템에 사인과 입력이 인가되면 모든 시스템 상태들은 입력 주파수와 동일한 주파수를 갖는다는 사실은 잘 알려져 있다. 그러나 이는 비선형 시스템에 대해서는 성립하지 않는다. 예를 들면 어떤 정적 2차 시스템(static quadratic system)에 ω_1 , ω_2 의 주파수를 갖는 두 개의 사

인과 입력의 합이 인가되면, 출력에 한 개의 DC 성분과 ω_1 , ω_2 , $2\omega_1$, $2\omega_2$, $\omega_1 \pm \omega_2$ 의 주파수들을 갖는 AC 성분들이 나타난다. 반면에 선형시스템에서는 ω_1 , ω_2 주파수를 갖는 출력이 나타난다. 그러므로 비선형 동적 시스템에서는 훨씬 더 복잡한 성질(behavior)이 나타난다. 가령 비선형 동적 시스템에 λ_1 , λ_2 , ..., λ_N 고유치들이 있다고 가정하자.

시스템 다이내믹스(dynamics)의 비선형성 때문에 이 선형 모드들은 서로 상호 작용을 하고, $m_1\lambda_1 + m_2\lambda_2 + \dots + m_N\lambda_N$ 과 같은 많은 상호 작용 모드들을 만들어 낸다. 여기서 m_i 는 정수이고, i 는 1부터 N 까지를 의미한다. 입력이 인가되지 않을 때 이 모드들의 자극(excitation) 정도는 비선형성이나 초기 조건에 의해 결정된다.

따라서 본 저자들은 이런 특수한 상황을 고려할 때, 접속점(node-focus point)과 1:1 공진점(1:1 resonance point)라는 공진 현상이 시스템에 미치는 영향에 대해 논하고, 이를 1기 무한모선 시스템과 3기 9모선 시스템에 적용하여 주어진 조건들과 미소신호 안정도 사이의 연관성 제시하고자 한다. 또한 공진 조건의 유용성을 입증하기 위해서 취약지수를 수학적으로 정의하고, 이를 이용하여 취약지구를 선정하고자 한다. 여기서 취약지수는 허용 가능한 부하의 증가량을 지수(index)로 나타낸 것을 의미하며, 취약지구는 미소신호 안정도에 부정적인 영향을 끼치는 지역을 의미한다.

마지막으로 무효전력 보상방안을 이용하여 미소신호 안정도의 마진(margin)을 늘림으로써 취약지구에 의한 운전제약을 극복할 수 있음을 보였고, 이에 대한 결과는 시뮬레이션 결과에 나타나있다.

* 準 會 員 : 國 防 科 學 研 究 所 研 究 員

** 正 會 員 : 高 麗 大 電 氣 · 電 子 · 電 波 工 學 部 助 教 授 · 工 博

*** 正 會 員 : 高 麗 大 電 氣 · 電 子 · 電 波 工 學 部 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2001年 9月 14日

最 終 完 了 : 2002年 9月 2日

2. 본 론

2.1 발전기 모델링

시스템의 안정도를 연구하기 위해서는 발전기와 부하에 대한 적절한 모델이 필요하다. 예를 들면, 다음과 같은 모델을 사용할 수 있다[2].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= F(x_1, x_2, y) \\ 0 &= G(x_1, x_2, y) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x_1 은 상태변수 벡터, x_2 는 대수변수 벡터, y 는 시스템 파라미터이다. 함수 F 는 발전기와 여자기 및 부하를 나타내고, 함수 G 는 고정자와 내·외부 네트워크 모델을 나타낸다. 상태변수 벡터 x_1 과 대수변수 벡터 x_2 를 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} x_1 &= (\delta, \omega, E'_d, E'_q, V \text{ and } \theta \text{ at load buses}) \\ x_2 &= (I_d, I_q, V \text{ and } \theta \text{ at all buses except for load buses}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 δ 는 발전기의 회전각 벡터, ω 는 동기속도 벡터, E'_d, E'_q 는 회전자 과도 자속성분들과 일치하는 직축과 횡축의 고정자 EMF, I_d, I_q 는 d축과 q축의 고정자 전류, V, θ 는 각각 전압과 전압각을 의미한다.

계통 응답특성 관련 요소와 전력동요의 주요 모드를 규명하기 위해서는 비선형 시스템인 식 (1)을 초기 운전점(평형점)에서 선형화 하여 시스템 행렬을 구해야 한다. 이를 표현하면 다음 식 (3)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 J_{11} 은 $\partial F/\partial x_1$, J_{12} 는 $\partial F/\partial x_2$, J_{21} 은 $\partial G/\partial x_1$, J_{22} 는 $\partial G/\partial x_2$ 이다. 식 (3)에서 선형화 시스템 행렬의 고유치들은 시스템 파라미터 변동에 따라 변화한다. 따라서 분기이론(bifurcation)과 접속점(node-focus point), 1:1 공진점(1:1 resonance point)을 도입하여 이러한 고유치들의 움직임을 고찰해야 된다.

2.2 분기이론(bifurcation)과 접속점(node-focus point), 1:1 공진점(1:1 resonance point)

2.2.1 분기이론

물리적인 파라미터의 변화에 의해 야기된 질적 변화를 분기라고 일컫는다. 다음의 그림을 예로 들어보자.

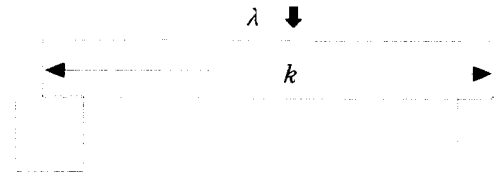


그림 1 구부러진 나무판자
Fig. 1 Bended Board

k 라는 길이의 나무판자를 λ 라는 힘으로 누를 때를 고려하자. λ 라는 힘이 가해질 때 나무판자는 휘어질 것이며, 어느 순간 나무판자는 부러질 것이다. 즉 파라미터 λ, k 에 따라 시스템은 질적 변화를 겪게 되는 것이다. 나무판자가 부러졌을 때 질적 변화가 발생했다고 하며, 그 이전까지는 양적 변화가 일어났다고 말한다. 안정도 관점에서 질적 변화의 의미는 시스템이 안정한 상태에서 불안정한 상태로 바뀌는 것을 의미한다. 이는 고유치의 위치에 따라 질적 변화가 발생한다는 점에서 분기이론이 시스템 공학자나 설계자들에게 중요함을 의미한다.

질적 변화를 일으키는 점을 결정하는 방법으로 크게 세 가지가 있다. 첫 번째는 선형화 행렬이 0인 고유치를 가지고 있는 saddle node bifurcation 이며, 두 번째는 선형화 행렬이 한 쌍의 허수 고유치를 가지고 있을 때인 Hopf bifurcation, 마지막으로 선형화 행렬이 singular할 때인 singularity induced bifurcation이다[3]. 이와 더불어 다음절에서 설명할 node-focus와 1:1 resonance도 질적 변화를 일으키는 점을 결정하는 방법이 된다.

2.2.2 접속점(node-focus point)과 1:1 공진점(1:1 resonance point)

접속점은 한 쌍의 복소 고유치들이 두개의 실수 고유치들로 되는 점을 뜻하고 1:1 공진점은 두 쌍의 복소 고유치들에서 각 쌍의 복소 고유치들이 각각 서로 같은 두개의 복소 고유치들로 되는 점을 의미한다. 이를 그림으로 나타내면 다음과 같다.

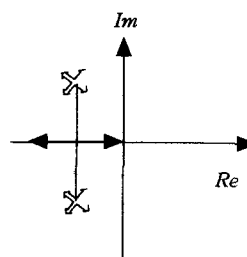


그림 2 접속점
Fig. 2 Node-Focus Point

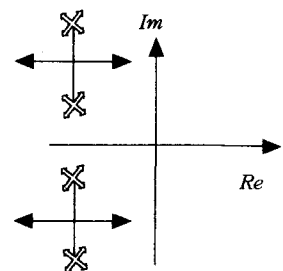


그림 3 1:1공진점
Fig. 3 1:1 Resonance Point

본 논문에서는 접속점과 1:1 공진점이 평형점의 안정도에 직접적으로 영향을 주진 않지만, 다음과 같은 이유에서 중요하다.

- 접속점 주위에서는 시스템이 과제동(over damping)이 되거나 과소제동(under damping)이 된다. 또한 1:1 공진점 부근에서는 시스템이 비선형으로 진동한다[4].
- 이 점들에서는 고유벡터가 유일하지 않고, 그들 자신의 물리적 의미를 잃어버리기 때문에 참여인수(participation factor)와 고유벡터 그리고 잔류항(residues)들에 오류가 생길 수 있다[4, 5].
- 시스템 파라미터 변화에 따라 고유치가 상당히 민감하다 [4, 6].

첫 번째와 두 번째 항목은 선형시스템 이론[7]과 모델 해석(modal analysis)[8, 9]에 근거하고, 세 번째 항목은 논문 [4, 6]에 증명되어 있기 때문에 따로 언급하지 않겠다.

따라서 고유벡터와 관련된 시스템 해석적인 측면과 고유치의 민감도와 관련된 시스템 특성을 고려해볼 때, 접속점과 1:1 공진점은 미소신호 안정도를 예측할 수 있는 기준이 됨을 알 수 있다.

2.3 취약지구

2.3.1 취약지구 선정방법

취약지구(weak point)란 부하의 변동에 따라 시스템 안정도에 영향을 미치는 지역으로 정의하였으며, 언급된 안정도는 미소신호 안정도를 의미한다. 취약지구를 나타내는 취약지수(weak index)를 각각 발전단의 취약지수와 부하단의 취약지수로 정의한다. 두 개의 취약지수로 구분한 이유는 발전단과 부하단 사이의 송전선로로 인해 전력 손실이 존재하기 때문이며, 이를 수학적으로 정의하면 다음과 같다.

$$P_{Gf} = \frac{P_{Gf}}{P_G}, \quad P_{Lf} = \frac{P_{Lf}}{P_L} \quad (4)$$

여기서 P_{Gf} 발전기의 취약지수, P_{Lf} 는 부하의 취약지수, P_G 는 공진이 일어나기 직전 전체 발전기의 유효전력 값, P_L 은 공진이 일어나기 직전 전체 부하의 유효전력 값, P_G 는 초기 전체 발전기의 유효전력 값, P_L 은 초기 전체 부하의 유효전력 값이다.

취약지수는 초기 부하(혹은 발전기)의 유효전력 값에 대한 공진이 발생하기 직전 부하(혹은 발전기)의 유효전력 값의 비를 의미한다. 이는 허용 가능한 부하의 증가량을 지수(index)로 나타낸 것으로 이 지수 값이 크면 클수록 초기 부하 보다 큰 부하에서 공진 현상이 발생하며, 작으면 작을수록 초기 부하에 가깝게 공진 현상이 발생한다. 이에 대한 시뮬레이션 결과는 3절 사례연구에서 다루진다.

2.3.2 취약지구 해소방안

앞 절에서 제시된 지수에 의해 선정된 취약지구에 대하여 그 제한을 해소하기 위한 방안으로 본 논문에서는 무효전력 보상이 사용되었다. 여기서 무효전력 보상방안은 부하부분에 콘덴서를 투입함으로써 결과적으로 무효전력 수요와 임

피턴스를 감소시키는 것이다. 이를 이용해 미소신호 안정도에 부정적인 영향을 끼치는 취약부분에 대한 보강이 가능하며, 적용 결과는 3절 사례연구에서 자세히 다루어져 있다.

2.4 공진점 탐색 알고리즘

부하 변동에 따라 접속점(node focus point)과 1:1 공진점(1:1 resonance point)을 효율적으로 찾는 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서 제시한 방법은 간편하고, 다계통에도 적용할 수 있다. 이 방법의 기본 아이디어는 고유치가 변수인 다항식에서 극값의 함수값이 0에 가까이 가면, 그 점이 접속점 혹은 1:1 공진점이라는 사실을 이용하였다. 만약 알고리즘을 이용하여 얻은 결과 값이 실수이면 접속점, 복소수이면 1:1 공진점이다. 이에 관한 절차는 다음 2.4.1에 나타나 있고, 이를 순서도로 나타내면 다음 그림 4와 같다.

2.4.1 접속점(node-focus point)과 1:1 공진점(1:1 resonance point) 찾는 절차

1. 운전조건에 대한 선형화 시스템 행렬 A를 구한다.
2. $f(\lambda) = \det(A - \lambda I)$ 으로 정의하고, $f(\lambda) = 0$ 을 $a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_0 = 0$ 으로 정리한다.
3. $\frac{d}{d\lambda} f(\lambda) \cong 0$ 을 만족시키는 λ^* 을 찾는다.
4. 3번에서 구한 λ^* 들 중에 $f(\lambda) \cong 0$ 을 만족하는 λ^* 을 선택한다. 여기서 선택된 값이 실수이면 접속점, 복소수이면 1:1 공진점이 된다
5. 4번에서 접속점이나 1:1 공진점을 찾지 못하면 초기 운전조건에 ΔP 만큼 증가시켜 1번을 수행한다.

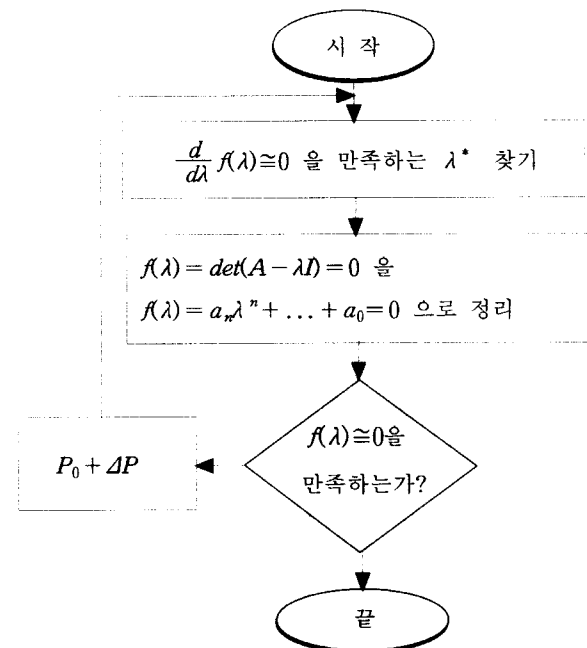


그림 4 공진점 탐색 알고리즘 순서도
Fig. 4 Flow Chart for Searching Resonance Points

3. 사례 연구

본 논문의 목적은 접속점과 1:1 공진점을 이용해 부하 변동에 의해 비소신호 안정도의 기본 구조가 변화되는 것을 예측하고, 공진 조건을 이용한 취약지구의 선정이다. 이를 위하여 본 논문에서의 제시된 방법을 1기 무한모선 시스템과 3기 9모선 시스템에 적용하여 그 유용성을 검증하고자 한다. 시뮬레이션 툴(tool)은 1기 무한모선 시스템인 경우는 MATLAB을 이용하였고, 3기 9모선 시스템인 경우는 PSS/E를 이용하였다.

3.1 1기 무한모선 시스템

1기 무한 모선 전력계통 시스템의 선형화 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (5)$$

여기서 K_S 는 동기화 토크 상수, K_D 는 제동 토크 상수, H 는 관성상수, $\Delta\omega_r$ 는 속도변화, ω_0 는 377 rad/s의 크기를 갖는 회전자는 상수이다. 이 시스템에 대한 예제 시스템을 이용해서 부하 패턴을 고찰할 것이다. 예제 시스템은 다음 그림 5와 같다.

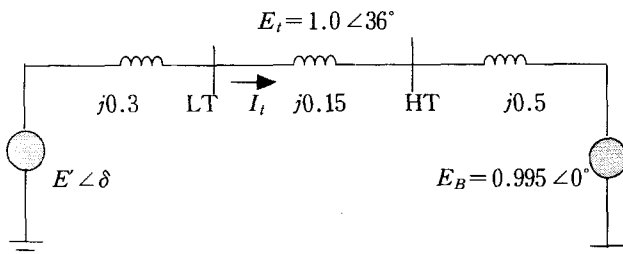


그림 5 1기 무한 모선 전력시스템의 예제[10]
Fig. 5 Single Machine Infinite Bus Power System Model[10]

이 시스템에 대한 방정식들은 다음과 같다.

$$X'_d=0.3, X_T=0.95, E_t = \hat{E}_t \angle 36^\circ, \tilde{I}_t = \frac{(P+jQ)^*}{\hat{E}_t^*},$$

$$\tilde{E} = \hat{E}_t + jX'_d \tilde{I}_t, \tilde{E} = E \angle \delta, \delta_0 = \delta + 36^\circ,$$

$$K_S = E \frac{E_B}{X_T} \cos \delta_0, H = 1.5 \quad (6)$$

결국 K_S 는 P, Q 값에 따라 결정되는 것을 알 수 있다. K_D 는 임의의 제동상수이다. 여기서 K_D 는 일반적으로 0이 아니다. 그 이유는 실제의 다기계통에서 보통 D라고 표시되는 인위적인 댐핑(damping)은 0이지만, 일기 무한모선 등가 표현에서 유도된 K_D 가 일반적으로 0이치는 않기 때문이다. 주어진 K_D 값에 따라 K_S 의 변화를 나타내면 다

음 표와 같다. 여기서 P 값의 범위와 Q 값의 범위는 다음과 같다.

$$0.5 \leq P \leq 1.2, -0.1 \leq Q \leq 0.6, \quad (7)$$

표 1 제동 상수 변화에 따른 공진 발생 범위
Table 1 Resonance Occurrence Range according to Damping Constants Change

K_D	K_S
53	0.6188 ~ 0.6372
54	0.6372 ~ 0.6627
55	0.6511 ~ 0.6811
56	0.6766 ~ 0.7111
57	0.7020 ~ 0.7365
58	0.7274 ~ 0.7619
59	0.7528 ~ 0.7874
60	0.7782 ~ 0.8128

표 1에서는 주어진 임의의 제동 상수에 대해 공진이 일어날 때의 동기화 토크 상수 값의 범위를 제시하고 있다. 제동 상수가 커짐에 따라 동기화 토크 상수 값의 하한이 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 공진이 일어날 때 이 토크 상수 값 범위의 크기는 거의 일정한 값을 가지고 있다(평균 0.032). 동기화 토크 상수 값은 동작 조건(P, Q)에 의해 결정되기 때문에 공진이 일어날 때의 범위를 피하도록 동작 조건을 설정해야 된다.

또한 주어진 K_S 값에 따라 공진이 일어날 때 K_D 값들의 범위를 표로 나타내면 다음과 같다.

표 2 운전 조건 변화에 따른 공진 발생 범위
Table 2 Resonance Occurrence Range according to Operating Conditions Change

운전 조건	K_S	K_D
P=0.5 Q=0.3	0.8313	61~62
P=0.6 Q=0.3	0.8128	60~61
P=0.7 Q=0.3	0.7943	59~60
P=0.8 Q=0.3	0.7758	59~60
P=0.9 Q=0.3	0.7574	58~59
P=1.0 Q=0.3	0.7389	57~58
P=1.1 Q=0.3	0.7204	57~58
P=1.2 Q=0.3	0.7020	56~57

표 2에서는 임의의 동작 조건에서 P 값이 커짐에 따라 사용자가 선택할 수 있는 제동 상수 값이 작아져야 함을 알 수 있다. 본 논문에서의 제동상수 K_D 는 시스템에 인위적인 댐핑(damping)을 주어 변화시킬 수 있지만, 주어진 시스템에서의 변경(발전기, 여자기 등의 파라미터, 시스템 운전점 변경 등)을 통해 변화되는 값이다. 본 논문에서는 인위적인 댐핑의 추가는 고려하지 않고 시스템에 의해 결정되는 K_D 만을 고려하였다. 따라서 주어진 시스템에 의해 결정되는 제동상수 값의 변화는 시스템의 변경을 필요로 하며, 이는 운전 조건이 어느 한도 이상 변화할 경우 기존 시스템의

파라미터 변경만으로는 안정한 운전점을 찾을 수 없다는 것을 의미한다.

3.2 3기 9모선 시스템

3기 9 모선 시스템을 다이어그램으로 나타내면 다음과 같다.

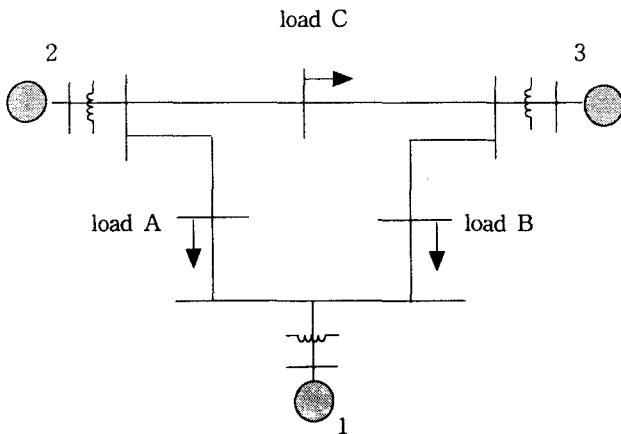


그림 6 3기 9모선 시스템 다이어그램
Fig. 6 Three-Machine Nine-Bus Power System Diagram

그리고 3기 9모선 시스템 각각의 유효전력과 무효전력을 다음과 같은 기호로 정의한다.

표 3 기호의 정의

Table 3 Definitions of Symbols

기호	정의
P_{G_1}	1번 발전기의 유효전력 P
P_{G_2}	2번 발전기의 유효전력 P
P_{G_3}	3번 발전기의 유효전력 P
P_{L_A}	부하 A의 유효전력 P
P_{L_C}	부하 B의 유효전력 P
P_{L_B}	부하 C의 유효전력 P
Q_{L_A}	부하 A의 무효전력 Q
Q_{L_B}	부하 B의 무효전력 Q
Q_{L_C}	부하 C의 무효전력 Q

각 발전기와 부하의 P-Q데이터 및 시스템 데이터는 다음 표 4, 5와 같다[11].

표 4 3기 9모선 P-Q 데이터

Table 4 Three-Machine Nine-Bus Power System P-Q Data

	1번 발전기	2번 발전기	3번 발전기	부하 A	부하 B	부하 C
P	71.6	163	85	125	90	100
Q	27	6.7	-10.9	50	30	35

표 5 시스템 데이터

Table 5 System Data

발전기	1번 (고전모델)	2번 (이축모델)	3번 (이축모델)
Rated MVA	247.5	192.0	128.0
Type	hydro	steam	steam
x_d	0.1460	0.8958	1.3125
x'_d	0.0608	0.1198	0.1813
x_e	0.0969	0.8645	1.2578
x'_e	0.0969	0.1969	0.25
Stored energy at rated speed	2364 MW · s	640 MW · s	301 MW · s

표 4, 5의 데이터들을 PSS/E에 알맞은 조류계산 데이터와 동적 데이터로 구성하여 시뮬레이션을 수행한다. 운전조건 변동에 따른 임계 고유치 움직임을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

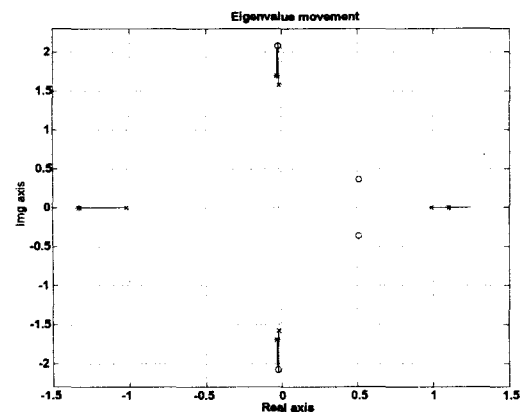


그림 7 운전조건 변동에 따른 임계 고유치 움직임

Fig. 7 Critical eigenvalue movement according to operating conditions change

표 6 운전조건 변동에 따른 임계 고유치 움직임

Table 6 Critical eigenvalue movement according to operating conditions change

P, Q (%)	Eigenvalue	
	Real	Imaginary
0	-0.18097E-01	1.5758
	-0.18097E-01	-1.5758
10	-0.19830E-01	1.7728
	-0.19830E-01	-1.7728
20	-0.21904E-01	1.9208
	-0.21904E-01	-1.9208
30	-0.23789E-01	2.1227
	-0.23789E-01	-2.1227
40	-1.0170, 0.99029	0
50	-1.1305, 1.0279	0
60	0.97753, -1.1462	0
70	1.2498, -1.3542	0
80	-0.30934E-01	1.6959
	-0.30934E-01	-1.6959
90	-0.31829E-01	2.0253
	-0.31829E-01	-2.0253
100	1.1093, -1.3227	0
110	-0.22655E-01	2.0788
	-0.22655E-01	-2.0788
120	0.51102	0.36136
	0.51102	-0.36136

그림 7에서 나타난 고유치의 변화를 표로 나타내면 위의 표 6과 같다.

표 6을 통해 전체 부하의 변동에 따른 공진 조건을 분석하면 P, Q 값의 증가량이 30%에서 40%사이 에 있을 때 공진이 발생함을 알 수 있다.

이번에는 공진이 발생했을 때 취약지구(weak point)로 꼽히는 부하단을 관찰하려고 한다. 취약지구를 선정하는 방식은 2.3.1 절에서 정의한 취약지수를 이용해서 선정한다.

표 7 전체 부하와 국소 부하의 취약지수 비교
Table 7 Comparison of Total Loads Weak Index to Local Loads

시나리오	P_{Gf}	P_{Lf}
$P_{G_2}, P_{L_A}, Q_{L_A}$ 각각 10%씩 증가	1.27378	1.27778
$P_{G_2}, P_{L_B}, Q_{L_B}$ 각각 10%씩 증가	1.30976	1.31429
$P_{G_2}, P_{L_C}, Q_{L_C}$ 각각 10%씩 증가	없음	없음
$P_{G_3}, P_{L_A}, Q_{L_A}$ 각각 10%씩 증가	1.27378	1.2778
$P_{G_3}, P_{L_B}, Q_{L_B}$ 각각 10%씩 증가	1.30976	1.31429
$P_{G_3}, P_{L_C}, Q_{L_C}$ 각각 10%씩 증가	없음	없음
$P_{G_1}, P_{G_2}, P_{G_3}, P_{L_A}, P_{L_B}, P_{L_C}, Q_{L_A}, Q_{L_B}, Q_{L_C}$ 각각 10%씩 증가	1.3	1.3

표 7은 PSS/E를 이용한 시뮬레이션 결과를 취약지수 값으로 표현한 것이다. 우선 국소 부하의 경우, P_{G_2} 와 P_{L_A} 을 10%씩 증가시켰을 때 발전기와 부하의 취약지수를 구하면 약 1.27로 동일하게 나온다. 그리고 P_{G_2} 와 P_{L_C} 을 10%씩 증가시켰을 때 공진이 일어나지 않음을 알 수 있다. 2번 발전기 대신 3번 발전기를 이용해 결과를 분석하면 2번 발전기와 동일한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 전체 부하의 증가에 따른 공진 현상과 더불어 국소 부하가 증가하였을 때 역시 공진이 일어남을 알 수 있으며, 이를 취약지수를 통해 확인하였다. 그러므로 전체 부하증가에 따른 공진 현상보다도 취약지구의 부하의 증가로 인해 전체 부하량보다도 적은 값에서 공진이 일어날 수 있음을 알 수 있고, 이는 공진 현상에 대한 제한 요소로 작용함을 알 수 있다.

표 7에서의 결과를 개선하기 위해 다음 표 8, 9에서는 무효전력(Q) 보상방안을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 무효전력 보상방안은 부하부분에 콘덴서를 투입함으로써 결과적으로 무효전력 수요와 임피던스를 감소시키는 것이다. 이를 이용해 미소신호 안정도에 부정적인 영향을 끼치는 취약부분을 해소한다.

표 8은 무효전력이 표 7에서보다 절반 보상되었다는 가정 하에 얻은 결과이다. P_{G_2} 와 P_{L_A} 을 각각 10%씩 증가시키고, Q_{L_A} 을 5%씩 증가시켰을 때, 발전기와 부하의 취약지수 값을 구하면 앞의 표 7에서 구한 취약지수 값과 동일하게 나온다. 또한 2번 발전기에 대해서 부하 B, C는 모두 공진이 일어나지 않는다. 2번 발전기 대신 3번 발전기를 이용해 결과를 분석하면 부하 A인 경우에는 취약지수가 약 1.31로 표 7보다 향상된 결과를 얻는다. 또한 부하 B, C는 2번

표 8 보상된 국소 부하의 취약지수 비교 I(Q의 증가량: 5%)

Table 8 Weak Index Comparison I in Compensated Local Loads

시나리오	P_{Gf}	P_{Lf}
P_{G_2}, P_{L_A} 각각 10%씩 증가, Q_{L_A} 5%씩 증가	1.27378	1.27778
P_{G_2}, P_{L_B} 각각 10%씩 증가, Q_{L_B} 5%씩 증가	없음	없음
P_{G_2}, P_{L_C} 각각 10%씩 증가, Q_{L_C} 5%씩 증가	없음	없음
P_{G_3}, P_{L_A} 각각 10%씩 증가, Q_{L_A} 5%씩 증가	1.31289	1.31746
P_{G_3}, P_{L_B} 각각 10%씩 증가, Q_{L_B} 5%씩 증가	없음	없음
P_{G_3}, P_{L_C} 각각 10%씩 증가, Q_{L_C} 5%씩 증가	없음	없음

발전기가 발전량을 담당할 때와 마찬가지로 모두 공진이 일어나지 않는다.

따라서 무효전력(Q)을 절반 보상하여 시뮬레이션을 수행하면 부하 B는 공통적으로 공진이 일어나지 않으므로 이전보다 현저히 향상된 결과를 얻는다. 그러나 부하 A에 대해서 2번 발전기가 발전량을 담당할 때는 이전과 동일한 결과를 얻었고, 3번 발전기의 경우는 개선된 결과를 얻는다.

표 9 보상된 국소 부하의 취약지수 비교 II(Q의 증가량: 2.5%)

Table 9 Weak Index Comparison II in Compensated Local Loads

시나리오	P_{Gf}	P_{Lf}
P_{G_2}, P_{L_A} 각각 10%씩 증가, Q_{L_A} 2.5%씩 증가	1.31289	1.31746
P_{G_2}, P_{L_B} 각각 10%씩 증가, Q_{L_B} 2.5%씩 증가	없음	없음
P_{G_2}, P_{L_C} 각각 10%씩 증가, Q_{L_C} 2.5%씩 증가	없음	없음
P_{G_3}, P_{L_A} 각각 10%씩 증가, Q_{L_A} 2.5%씩 증가	1.31289	1.31746
P_{G_3}, P_{L_B} 각각 10%씩 증가, Q_{L_B} 2.5%씩 증가	없음	없음
P_{G_3}, P_{L_C} 각각 10%씩 증가, Q_{L_C} 2.5%씩 증가	없음	없음

표 9는 표 7보다 1/4만큼 무효전력이 보상되었다고 가정하고 시뮬레이션을 수행한 결과이다. P_{G_2} 와 P_{L_A} 을 각각 10%씩 증가시키고, Q_{L_A} 을 2.5%씩 증가시켰을 때, 발전기와 부하의 취약지수를 구하면 앞의 표 8에서 구한 취약지수 값보다 높게 나온다. 또한 2번 발전기에 대해서 부하 B, C는 모두 공진이 일어나지 않는다. 2번 발전기 대신 3번 발전기를 이용해 결과를 분석하면 부하 A인 경우에는 취약지수가 약 1.31로 표 8과 마찬가지로 결과를 얻는다. 또한 부하 B, C는 2번 발전기가 발전량을 담당할 때와 마찬가지로 모두 공진이 일어나지 않는다.

따라서 무효전력 Q를 1/4 보상하여 시뮬레이션을 수행하면 부하 B는 공통적으로 공진이 일어나지 않으므로 표 8에서의 결과와 동일한 결과를 얻는다. 그러나 부하 A에 대해서 2번 발전기가 발전량을 담당할 때는 표 8의 결과보다 향상된 결과를 얻었고, 3번 발전기의 경우는 표 8의 결과와 동일한 결과를 얻는다.

결국 표 7, 8, 9을 통해서 국소 부하의 취약지수 값을 최소한 전체부하의 취약지수 값까지 끌어올릴 수 있다는 점을 확인하였다.

본 논문에서는 부하 A가 공진 현상에 매우 취약하다는 결론을 얻었다. 이를 고찰하기 위해 부하 A에 관한 Q보상 전·후 고유치 해석의 결과에 대해서 살펴보기로 한다. 다음의 두 가지 경우에 대해서 살펴보자.

표 10 발전기와 국소 부하의 조합

Table 10 Definition of Case I, II

경우 1	P_{G_2}, P_{L_A} 각각 10%씩 증가
경우 2	P_{G_2}, P_{L_A} 각각 10%씩 증가

표 10는 두 가지 경우에 대해서 정의하고 있다. 즉 부하 A에 대해 발전량을 담당하고 있는 발전기 종류를 나타내고 있다. 경우 1에 대한 고유치 해석 결과는 다음 표 11과 같다.

표 11은 2번 발전기가 부하 A에 대한 발전량을 담당하는 경우, Q보상 전·후의 고유치 결과를 나타낸다. Q보상 전 고유치 결과들을 살펴보면, P_{G_2}, P_{L_A} 의 증가량이 70%와 80% 사이에서 공진이 발생함을 알 수 있다. 이는 부하 A의 부하량이 과도하게 증가할 경우 공진이 발생함을 의미한다. 이를 보상한 결과를 살펴보면, Q_{L_A} 의 증가량이 5%일 경우에는 보상전의 결과와 동일하지만 2.5%일 경우에는 P_{G_2}, P_{L_A} 의 증가량이 80%와 90% 사이에서 공진이 발생함을 알 수 있다. 따라서 Q보상을 통해 보상 전 부하량보다 더 큰 부하량에서도 공진이 발생하지 않음을 알 수 있다. 다음 표 12는 경우 2에 대한 고유치 해석 결과이다.

표 12는 3번 발전기가 부하 A에 대한 발전량을 담당하는 경우, Q보상 전·후의 고유치 결과를 나타낸다. Q보상 전의 고유치 결과들을 살펴보면, 표 11의 결과와 동일함을 알 수 있다. 그런데 Q_{L_A} 의 증가량이 5%일 경우에는 표 11의 결과와 달리 P_{G_2}, P_{L_A} 의 증가량이 80%와 90% 사이에

표 11 경우 1에 대한 고유치 해석

Table 11 Eigenvalue Analysis in Case I

P (%)	보상전 (Q_{L_A} 의 증가량 10%)		보상후			
			Q_{L_A} 의 증가량 5%		Q_{L_A} 의 증가량 2.5%	
	Eigenvalue		Eigenvalue		Eigenvalue	
	Re	Im	Re	Im	Re	Im
10	-0.18955E-01 -0.18955E-01	1.6743 -1.6743	-0.18961E-01 -0.18961E-01	1.6622 -1.6622	-0.18954E-01 -0.18954E-01	1.6587 -1.6587
20	-0.19783E-01 -0.19783E-01	1.7784 -1.7784	-0.19795E-01 -0.19795E-01	1.7558 -1.7558	-0.19799E-01 -0.19799E-01	1.7484 -1.7484
30	-0.20951E-01 -0.20951E-01	1.8317 -1.8317	-0.20932E-01 -0.20932E-01	1.8036 -1.8036	-0.20910E-01 -0.20910E-01	1.7890 -1.7890
40	-0.21869E-01 -0.21869E-01	1.9444 -1.9444	-0.21835E-01 -0.21835E-01	1.8971 -1.8971	-0.21823E-01 -0.21823E-01	1.8780 -1.8780
50	-0.22820E-01 -0.22820E-01	2.0592 -2.0592	-0.22759E-01 -0.22759E-01	1.9998 -1.9998	-0.22737E-01 -0.22737E-01	1.9721 -1.9721
60	-0.24215E-01 -0.24215E-01	2.1154 -2.1154	-0.23729E-01 -0.23729E-01	2.1025 -2.1025	-0.23673E-01 -0.23673E-01	2.0690 -2.0690
70	-0.24530E-01 -0.24530E-01	2.2765 -2.2765	-0.25147E-01 -0.25147E-01	2.1474 -2.1474	-0.25043E-01 -0.25043E-01	2.1102 -2.1102
80	-0.92172 0.91588	0	-0.82350 0.79476	0	-0.25677E-01 -0.25677E-01	2.2440 -2.2440
90	-0.95578 1.00470	0	-0.87506 0.86229	0	-0.81894 0.79444	0
100	-0.99455 1.20610	0	-0.90640 0.92189	0	0.85028 0.84122	0
110	-0.96421 1.19560	0	-0.96544 1.11250	0	0.87339 0.90284	0
120	-0.89791 1.13730	0	-0.90866 1.02140	0	-0.93248 1.05460	0

표 12 경우 2에 대한 고유치 해석

Table 12 Eigenvalue Analysis in Case II

P (%)	보상전 (Q_{L_A} 의 증가량 10%)		보상후			
			Q_{L_A} 의 증가량 5%		Q_{L_A} 의 증가량 2.5%	
	Eigenvalue		Eigenvalue		Eigenvalue	
	Re	Im	Re	Im	Real	Im
10	-0.18937E-01 -0.18937E-01	1.6714 -1.6714	-0.18935E-01 -0.18935E-01	1.6630 -1.6630	-0.18948E-01 -0.18948E-01	1.6557 -1.6557
20	-0.19750E-01 -0.19750E-01	1.7733 -1.7733	-0.19755E-01 -0.19755E-01	1.7539 -1.7539	-0.19754E-01 -0.19754E-01	1.7395 -1.7395
30	-0.20560E-01 -0.20560E-01	1.8366 -1.8366	-0.20542E-01 -0.20542E-01	1.8492 -1.8492	-0.20547E-01 -0.20547E-01	1.8358 -1.8358
40	-0.21741E-01 -0.21741E-01	1.9319 -1.9319	-0.21715E-01 -0.21715E-01	1.8905 -1.8905	-0.21708E-01 -0.21708E-01	1.8709 -1.8709
50	-0.22969E-01 -0.22969E-01	1.9989 -1.9989	-0.22905E-01 -0.22905E-01	1.9405 -1.9405	-0.22874E-01 -0.22874E-01	1.9197 -1.9197
60	-0.23977E-01 -0.23977E-01	2.1042 -2.1042	-0.23863E-01 -0.23863E-01	2.0339 -2.0339	-0.23819E-01 -0.23819E-01	2.0031 -2.0031
70	-0.25061E-01 -0.25061E-01	2.2136 -2.2136	-0.24875E-01 -0.24875E-01	2.1303 -2.1303	-0.24810E-01 -0.24810E-01	2.0927 -2.0927
80	-1.0021 1.0498	0	-0.25921E-01 -0.25921E-01	2.2301 -2.2301	-0.25795E-01 -0.25795E-01	2.1908 -2.1908
90	-0.90316 0.89315	0	-1.07340 1.00000	0	-0.93859 0.91902	0
100	-0.91043 0.94970	0	-0.83022 0.80883	0	-0.77328 0.74280	0
110	-0.90323 0.98350	0	-0.83912 0.84842	0	-0.79272 0.77059	0
120	-1.4121 1.3106	0	-0.83004 0.86440	0	-0.79048 0.79773	0

서 공진이 발생함을 알 수 있다. Q_{L_A} 의 증가량이 2.5%일 경우에는 5%일 경우와 동일한 결과를 얻는다. 이는 3번 발전기가 부하 A에 대해 발전량을 담당할 경우, Q를 절반 보상해도 공진이 발생하는 부하 변동 범위를 늘릴 수 있음을 의미한다. 또한 표 11, 12에서 고유치들의 실수값을 비교해

보면, Q보상 전·후 모드들의 댐핑(damping)이 변하지 않음을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 제안된 Q보상 방법은 보상 전 모드들의 댐핑(damping)을 변화시키지 않으면서 공진 현상이 발생하는 부하의 한계영역(boundary)을 늘릴 수 있고, 이는 미소신호 안정도를 효과적으로 개선할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 크게 세 가지의 결과를 보여주고 있다. 첫 번째로는 주어진 임의의 제동 상수에 대해 공진이 일어날 때의 동기화 토크 상수 값의 범위를 제시하고 있다. 제동 상수가 커짐에 따라 동기화 토크 상수 값의 하한이 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 공진이 일어날 때 이 토크 상수 값의 범위의 크기는 거의 일정한 값을 가지고 있다(평균 0.032). 동기화 토크 상수 값은 동작 조건 (P, Q) 에 의해 결정되기 때문에 공진이 일어날 때의 범위를 피하도록 동작 조건을 설정해야 된다. 또한 임의의 동작 조건에서 P 값이 커짐에 따라 사용자가 선택할 수 있는 제동 상수 값이 작아져야 함을 알 수 있다. 즉 주어진 시스템에 의해 결정되는 제동상수 값의 변화는 시스템의 변경을 필요로 하며, 이는 운전 조건이 어느 한도 이상 변화할 경우 기존 시스템의 파라미터 변경만으로는 안정한 운전점을 찾을 수 없다는 것을 의미한다. 두 번째로는 이러한 공진점들을 효율적으로 찾기 위해 제안한 알고리즘이 시뮬레이션을 통해 잘 수행되었다는 점이다.

마지막으로 공진 조건을 이용해 취약지구를 선정하였고, 그에 대한 해결방안을 제시하였다. 이는 3기 9모선 시뮬레이션을 통해서 앞의 2.3.1절에서 수학적으로 정의한 취약지구를 이용해 취약지구를 선정하였다. 그리고 선정된 취약지구 해소방안으로 무효전력 (Q) 을 보상하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 부하 B에 대해서는 공진이 발생하지 않아서 이전과 비교하여 향상된 결과를 얻었고, 부하 A에 대해서는 부하 A의 취약지수 값을 전체 부하의 취약지수 값까지 끌어올린 결과를 얻었다. 그렇지만 부하 A는 여전히 공진 현상에 매우 취약하다고 할 수 있고, 이 부하의 증가량에 대해서 미리 관심을 기울일 필요가 있다.

접속점(node-focus point)과 1:1 공진점(1:1 resonance point)을 이용하여 미소신호 안정도와 운전조건과의 관계를 예측할 수 있음을 사례연구를 통해 확인하였다. 특히 1기 무한모선 시스템의 경우에는 부하의 변동뿐만 아니라 제동 상수의 변화에 따라서 공진이 발생함을 확인하였고, 이는 전력계통 제어기나 여자기의 이득변화에 따라 공진이 발생할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

그리고 전력계통에 여러 개의 부하들이 존재할 수 있다는 점을 감안할 때, 공진 조건이 취약지구(weak point) 선정 방법이 될 수 있다는 점을 3기 9모선 시스템의 시뮬레이션 결과를 통해 입증하였고, 미소신호 안정도에 부정적인 영향을 끼치는 취약지구의 취약성을 무효전력 보상방안을 이용해 해소하였다. 본 논문에서 제시하는 무효전력 보상방안은 취약지구에 대한 근본적인 해결책은 아니지만, 단순히 무효전력 보상만으로도 미소신호 안정도의 상당한 개선을 보일 만

큼 취약지구가 잘 선정되었음을 확인할 수 있다.

따라서 이 결과들을 바탕으로 여자기와 PSS를 포함한 전력계통 공진 해석, 여러 가지 조상설비를 이용한 취약지구 해소방안 및 Normal form을 이용하여 비선형 2차 항까지 고려한 시스템의 동적 성능 및 공진 해석에 관한 연구가 진행 중이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2000-000-00269-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Koeler, J. E., "Bulk power system voltage Phenomena-Voltage Stability & Security," Proc. of Voltage Stability & Security, September, 1988, Keynote.
- [2] Y. V. Makarov, Z. Y. Dong, and D. J. Hill, "A General Method for Small Signal Stability Analysis," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August, 1998
- [3] R. Seydel, Practical Bifurcation and Stability Analysis from equilibrium to chaos, New York: Springer-Verlag, 1994
- [4] B.-J. Lee, V. Ajjarapu, "A piecewise global small-disturbance voltage stability of the structure-preserving power system model," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 4, November, 1995
- [5] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorthy, and P. Kunder, "Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 3, September, 1992
- [6] B.-J. Lee, A unified framework to study the voltage stability of the structure-preserving power system model, Ph D. thesis, Iowa State University, 1994
- [7] C.-T. Chen, Linear system theory, Harcourt Brace College Publishers, 1984
- [8] G. C. Verghese, I. J. Perez-Arriaga, "Selective modal analysis with application to electric power systems, part I: Heuristic introduction," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9, September, 1982
- [9] G. C. Verghese, I. J. Perez-Arriaga, "Selective modal analysis with application to electric power systems, part II: The dynamic stability problem," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9, September, 1982
- [10] P. Kunder, Power System Stability and Control, New york: McGraw-Hill, 1994
- [11] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power System Control and Stability, New york: IEEE PRESS, 1994

저 자 소 개



조 성 진 (趙 成 眞)

1977년 10월 20일생. 2000년 고려대 자연과학대 제어계측공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기·전자·전과공학부 졸업(석사). 2002년 1월~현재 국방과학연구소 유도조종기법 팀 연구원

Tel : 042-821-2096, Fax : 042-821-2224
E-mail : sjcho@add.re.kr



장 길 수 (張 吉 洙)

1967년 10월 26일 생. 1991년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 Iowa주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 2000년 3월~현재 고려대 공대 전기전자전과공학부 조교수

Tel : 02-3290-3246, Fax : 02-921-0544
E-mail : gjang@elec.korea.ac.kr



윤 태 응 (尹 泰 雄)

1984년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1986년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1994년 Oxford대 Dept. of Engineering Science 졸업(박사). 1986년~1995년 한국과학기술연구원 연구원/선임연구원. 1995년~현재 고려대학교

전기공학과 부교수. 관심분야: 적응제어, Model Predictive Control, Hybrid Systems

Tel : 02-3290-3240, Fax : 02-928-8909
E-mail : twy@cello.korea.ac.kr