

Synchrophasor를 이용한 한전계통의 저주파 진동 해석 초기 결과

Initial Results of Low Frequency Oscillation Analysis based on Synchrophasor in KEPCO System

심관식* · 김상태** · 남해곤* · 최준호†
(Kwan-Shik Shim · Sang-Tae Kim · Hae-Kon Nam · Joon-Ho Choi)

Abstract - The parameters of electromechanical modes offer considerable insight into the dynamic stability properties of a power system. This paper describes an initial result for extraction of dynamic parameters from synchrophasor measurements collected on the KEPCO system. Dominant modes of the system are estimated by oscillation detecting program in K-WAMS. The critical wide-area modes of KEPCO system have frequencies in the 0.4 to 0.7Hz range. And the local mode causing the low frequency oscillation of generators located on the west coast area has in the frequency 0.97 and 1.25 Hz, respectively. This results can serve as a reference in the future for reliable system operation in KEPCO system.

Key Words : Low frequency oscillation, Mode, parameter estimation, Residue, Synchrophasor, WAMS

1. 서론

인류의 지속가능한 성장을 위해서는 인구 증가, 에너지의 고갈, 환경오염 등 현실적인 벽을 해결하기 위한 새로운 기술개발이 절실히 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 세계 각국은 스마트그리드에 대한 투자와 기술 개발을 시도하고 있다[1-2]. 좁은 의미로 스마트그리드는 전통적인 전력 기술과 IT기술을 융합한 친환경적이면서 고효율의 지능화된 차세대 전력시스템을 의미하고, 그 중심에는 IT 기술을 이용한 전력시스템의 안정운용 기술이 있다.

최근 전력계통에서 위상동기신호를 측정하는 synchrophasor 기술이 많은 관심을 받고 있다[3-6]. Synchrophasor 기술은 인공위성의 시각정보를 이용하여 측정데이터의 시간을 정밀하게 일치함으로써 위상을 동기 시키는 기술이다. 그러므로 광역계통의 정보들을 보다 정밀하게 취득할 수 있을 뿐만 아니라 상호비교를 통하여 새로운 계통해석 정보를 얻을 수 있다. 현재 세계 각국에서 WAMS(wide area measurement system)를 활발하게 개발하고 있는데, 이것은 광역계통 감시 목적으로 synchrophasor를 적용한 좋은 사례이다. 최근에는 synchrophasor 기술을 계통제어와 보호에 적용하기 위한 시도들이 계속 보고되고 있다 [7-12].

우리나라에서도 광역계통을 감시하기 위해 위성정보와 초고속 네트워크 기술을 전력기술에 접목하여 한국형 광역전

력계통 감시시스템 K-WAMS(Korea Wide Area Monitoring System)를 개발하였다[13-14]. K-WAMS는 상위운영시스템과 동기위상측정 장치인 I-PIU(intelligent power system information unit)로 구성되어 있다. I-PIU는 345 kV 전압 레벨의 동서울변전소, 아산변전소, 청양변전소, 신계천변전소에 설치되어 2회선의 전류 데이터와 모선 전압 데이터를 측정하고 있다. 상위 운영시스템은 한국전력공사 본사에 설치되어 실시간으로 계통 상태를 감시하고 있다.

전력계통에서 발생하는 중요 진동 모드는 주로 2.5Hz 이하의 저주파 영역에서 발생하는데 특히 광역진동 모드는 1.0Hz 이하에서 발생한다. 지역모드 진동은 몇 개의 발전기들이 참여하지만 광역모드 진동은 많은 발전기들이 참여하여 진동 억제를 어렵게 한다. 지금까지 전력계통에서 선형 모델에 기반을 둔 고유치 해석에 의하여 진동 모드해석이 수행되었으나[15-19] 급변하는 계통 환경을 정확히 반영하지 못하고 모델링 오류 가능성 등 한계가 나타나고 있다 [20]. 1990년 이후 전력계통에서는 계통에서 취득한 시계열 데이터에서 진동 모드를 추정하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 문헌 [21]에서 전력계통에서 계측한 신호에서 진동 모드를 처음 추정된 뒤로 지금까지 많은 알고리즘들이 제안되고 있다[21-28].

본 논문은 K-WAMS에서 계측한 synchrophasor 데이터에서 한전 계통에 잠재하고 있는 저주파수 진동모드를 추정하고, 중요모드로부터 한전 계통의 저주파진동을 해석하였다. 본 연구에서는 실측 데이터에서 파라미터를 추정하기 위하여 통계신호처리 기법을 적용하였다[21, 27]. 고장이 발생한 직후 데이터와 정상상태 데이터에 대해서 파라미터를 추정한 결과, 한전계통에 중요 지역모드와 광역모드가 잠재되어 있음을 최초로 확인하였다.

이 논문의 제 2장에서는 한국형 광역전력계통 감시시스템인 K-WAMS를 기술하였고, 제 3장에서는 신호모델과 진동 모드 검출에 대해서 기술하였다. 그리고 제 4장에서는 한전

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Korea

E-mail : joono@chonnam.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Korea

** Institute of Electric Power IT, KEPCO KDN Co. Ltd, Korea

Received : July 25, 2013; Accepted : December 27, 2013

계통에서의 저주파 진동 해석 결과를 기술하고, 마지막으로 제 5장에서 결론을 기술하였다.

2. K-WAMS

한국형 광역전력계통 감시시스템 K-WAMS(Korea Wide Area Monitoring System)는 한전 계통에 설치되어 운용중인 I-PIU와 상위 운영시스템을 통칭한다. 한전계통의 시각 동기 데이터를 취득하기 위하여 I-PIU를 345kV 전압레벨의 동서울변전소, 아산변전소, 청양변전소, 신제천변전소에 설치하여 2회선의 전류 데이터와 모션 전압 데이터를 측정하였다. 그리고 상위 운영시스템을 한국전력공사 본사에 설치하여 실시간으로 계통 상태를 감시할 수 있게 시스템을 구성하였다[13]. 현재 한전계통에는 8기의 I-PIU가 설치되어 운용 중에 있고, 그 설치 위치는 다음과 같다. 본 논문에서는 제주에 설치된 I-PIU의 데이터는 제외하였다.

- 동서울변전소(2기) : 동서울-미금, 동서울-곤지암
- 아산변전소(2기) : 아산-화성
- 신제천변전소(1기) : 신제천-곤지암
- 청양변전소(1기) : 청양-온양
- 북제주 변환소(1기) : HVDC 감시
- 성산변전소(1기) : 성풍, 삼달 풍력

현재 설치된 I-PIU의 주목적은 수도권 북상 조류 율동선로 감시를 위해 주요 변전소에 설치되었기 때문에 발전기 동요나, 광역 진동의 분포를 파악하기에는 한계가 있다. 향후 한전계통의 주요 발/변전소에 synchrophasor가 설치된다면 계통해석에 충분한 데이터를 확보할 수 있을 것으로 기대한다. 그림 1은 한전계통도와 현재 설치된 I-PIU의 위치를 나타내고 있다. 그림 1에서 사각형이 현재 설치된 위치이며, 그림 2는 한전 본사에 설치되어 운용중인 K-WAMS의 client 주 화면을 나타내고 있다.

3. 신호모델과 진동모드 검출

K-WAMS의 주목적 중에 하나는 synchrophasor 데이터를 이용하여 광역정전을 예방하기 위한 정보를 추정하는 것이다. 전력계통의 고유한 문제인 저주파 진동은 광역정전을 일으킬 수 있는 하나의 요인이기 때문에 우선 광역 진동과 관련된 저주파진동 파라미터를 추정해야 한다. 이 논문에서는 먼저 신호모델과 파라미터 추정 방법에 대해서 간단하게 기술한다.

계통의 선형모델에서 상태변수와 상태행렬을 각각 x 와 A 라 하고, 출력행렬을 C 라 하면, 상태방정식과 출력방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [29-30].

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x \tag{1}$$

$$\Delta y = C \Delta x \tag{2}$$

상태변수 미소변화는 상태행렬의 고유치 λ_i 와 residue R_i 로 나타낼 수 있으므로 출력의 미소변화도 고유치와 residue로 나타낼 수 있다[29]. 즉,

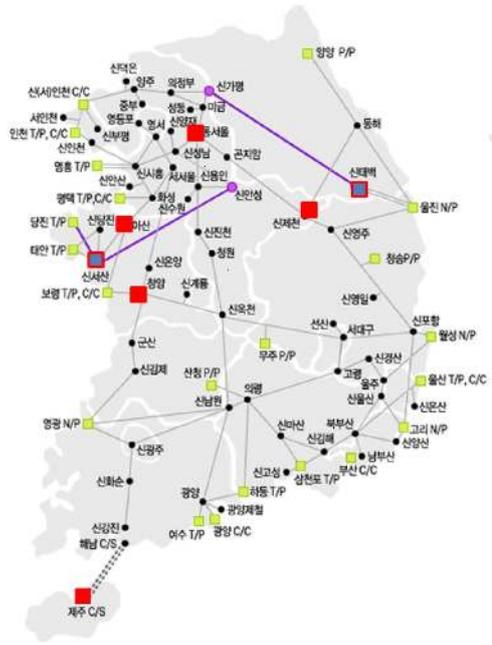


그림 1 한전계통에 I-PIU 위치
Fig. 1 I-PIU location in KEPCO system

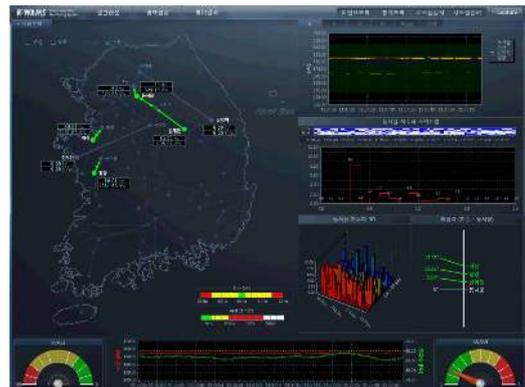


그림 2 K-WAMS의 Client 주 화면
Fig. 2 Client Main Monitoring Screen of K-WAMS

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n R_i e^{\lambda_i t} \tag{3}$$

만일 i 번째 모드가 출력을 지배하는 중요 모드라면, 출력 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) = y(t_0) + \Delta y = y(t_0) + R_i e^{\lambda_i t} \tag{4}$$

이 식에서 계통의 임의의 신호는 그 신호의 정상상태 값과 중요모드, 그리고 그에 대응하는 residue로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 임의의 신호에 포함된 모드는 선형해석에서 고유치에 대응하고, residue는 고유벡터와 참여율에 대응한다. 그러므로 정상상태 값이 시스템의 동작점이라면, 선형모델의 고유치해석과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

식 (4)에 나타난 모드가 복소수이므로 출력신호는 감쇠지수함수와 코사인함수의 곱으로 이루어진 지수감쇠코사인함수로 표현할 수 있다. 만일 임의의 이산신호가 n 개의 지수감쇠코사인함수로 표현될 때, i 번째 함수의 크기와 계동계수를 각각 A_i , α_i 라 하자. 그리고 코사인함수의 주파수와 위상을 ω_i , ϕ_i 라 하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_a(t) = \sum_{i=1}^p A_i e^{\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (5)$$

만일 신호의 모드 중에서 j 번째 모드에 대응하는 크기가 가장 크고, 계동계수가 작아서 j 번째 모드가 신호의 중요 모드라면 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$y_a(t) \cong A_j e^{\alpha_j t} \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (6)$$

식 (4)에서 정상상태 값을 0으로 놓으면 식 (6)을 얻을 수 있다. 그러므로 임의의 신호에서 포함된 파라미터를 추정하면, 중요 저주파진동 모드를 추정할 수 있다.

전력계통에서 다양하게 적용되고 있는 Prony 법은 임의의 신호를 복소모드의 선형결합으로 적합해서 신호의 진동 모드와 관련된 파라미터를 추정하는 방법이다. 측정되거나 계산된 시계열 신호가 감쇠지수함수와 정현파 신호의 합이라 가정하면 신호는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 먼저 모드 λ_i 와 등간격 주기 T 를 이용하여 복소모드 z_i 를 다음과 같이 나타낸다.

$$z_i = e^{\lambda_i T} \quad (7)$$

복소모드와 모드의 residue를 이용하여 등간격주기 T 로 샘플링 한 이산신호는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[31].

$$y(kT) = \sum_{i=1}^m B_i z_i^k \quad (8)$$

파라미터를 추정하기 위해서는 먼저 이산신호의 선형예측오차방정식 $A^T y = 0$ 에서 미지수를 계산한다. 그리고 미지수를 계수로 하는 예측오차다항식(prediction error polynomial)으로부터 이산신호의 극점을 계산한다. 예측오차다항식 $A(z)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(z) = \sum_{i=0}^p a_i z^{-i} = 0, \quad a_0 = 1 \quad (9)$$

이와 같은 예측오차다항식의 근은 복소평면에서 z -평면의 극점이므로 시간영역에서 필요한 s -평면의 복소모드로 변환해야 하고, 복소모드의 정의에 의해서 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\lambda_i = \ln(z_i)/T \quad (10)$$

그러므로 예측오차다항식에서 이산신호의 주파수와 계동계수를 계산할 수 있다. 복소수로 표현된 모드의 residue를

B_i 라하고, 각 요소가 복소모드 z_i 로 구성된 Vandermonde 행렬을 V 라 하면, 모드 방정식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = VB \quad (11)$$

이산신호는 다양한 잡음을 포함하고 있기 때문에 잡음의 영향을 고려하기 위해서 선형예측행렬의 차수를 미지수보다 크게 선택해야 한다. 그러므로 방정식보다 미지수가 많으므로 연산과정에서 최소자승법을 필요로 한다. 이와 같은 과정을 수행하면 신호에 포함된 다양한 파라미터를 추정할 수 있는데, 그 중에서 저주파 진동 특성을 갖는 파라미터를 선택할 수 있다.

4. KEPCO 시스템의 저주파 진동 해석

4.1 계통고장과 계속신호

현재 한전 계통에 설치되어 운용중인 I-PIU 중에서 동서울변전소와 아산변전소에는 시스템 신뢰성 검증을 위해 2기 I-PIU가 설치되어 있고, 청양변전소와 신제천변전소에는 각각 1기씩 설치되어 있다.

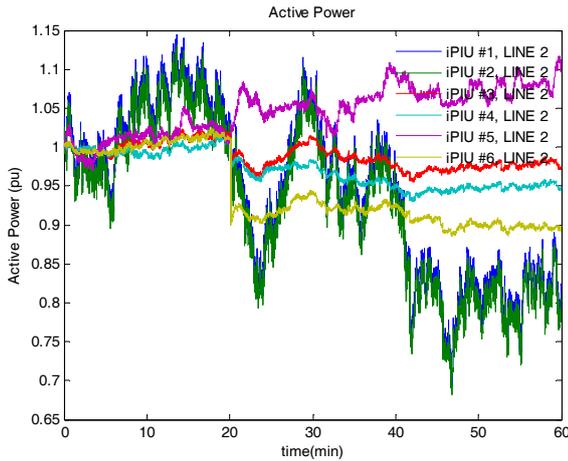
이 논문은 서해안 지역에서 500MW급 발전기가 탈락한 고장이 발생하였을 때, 취득한 데이터에서 한전계통의 저주파진동을 검출한 결과를 기술하고 있다. 그림 3은 변전소에 설치된 I-PIU에서 취득한 60분 데이터에서 유효전력을 나타내고 있다. 발전소와 달리 변전소에서 취득한 유효전력은 연결된 모선의 선로조류에 따라서 급변하고 있다. I-PIU는 2회선 선로의 데이터를 모두 취득하지만 일부 변전소에서 계속한 line 1의 데이터가 부분적으로 시각동기 되지 않아서 본 논문에서는 line 2의 데이터만 이용하였다. 그림에서 I-PIU #1과 I-PIU #2는 동서울변전소를 의미하고, I-PIU#3과 I-PIU#4는 아산변전소를 의미한다. 그리고 I-PIU#5와 I-PIU#6은 각각 신제천변전소와 청양변전소를 의미한다. I-PIU 설치 변전소와 감시 선로를 요약하면 다음과 같다.

- I-PIU #1 : 동서울-미금
- I-PIU #2 : 동서울-곤지암
- I-PIU #3 : 아산-화성
- I-PIU #4 : 아산-화성
- I-PIU #5 : 신제천-곤지암
- I-PIU #6 : 청양-운양

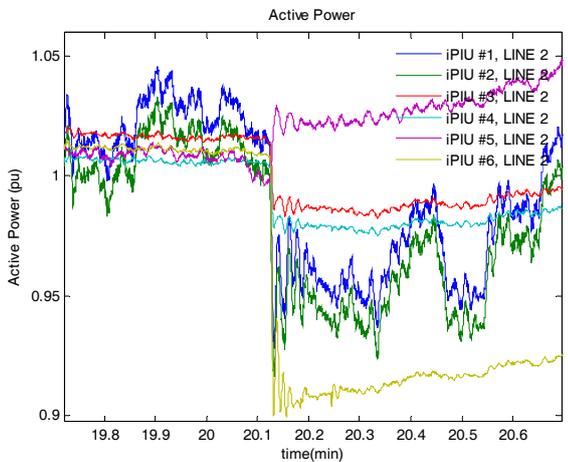
그림 3(b)는 고장 전후 1분간 유효전력을 확대하여 나타낸 것이다. 모든 변전소에서 계속한 유효전력들이 위상 동기 되어 출력되고 있고, 고장 후 작은 동요현상이 발생함을 알 수 있다. 그러나 그림에 나타난 결과는 변전소에서 취득한 데이터이고, 한전계통의 계동특성이 양호하여 심각한 저주파 진동은 발생하지 않음을 알 수 있다.

4.2 고장 직후 신호에서 진동모드 추정

계통에서 발생하는 저주파진동은 계동특성에 따라서 과도



(a) full signal



(b) partial signal

그림 3 각 변전소의 유효전력

Fig. 3 Active Power of each Substation

불안정 후 수초에서 수분간 지속된다. 그러므로 과도 불안정이 발생한 직후에 계측한 신호에 파라미터를 추정하면 계통에 잠재해 있는 저주파진동 모드를 정확하게 검출할 수 있다. 특히 발전소에서 계측한 신호에 파라미터를 추정하면 각 발전기가 가지고 있는 고유한 진동모드를 추정할 수 있다.

표 1 고장 후 추정된 파라미터

Table 1 Estimated Parameter after Fault

I-PIU No.	Modes		Damping (%)	Freq (Hz)	Ai	Ang (deg)	%A	SNR
	real	imag						
#1	-0.412	3.978	10.297	0.633	3.121	-88.40	1.000	20.762
#3	-0.645	6.073	10.553	0.967	9.087	61.38	1.000	28.368
#5	-0.460	3.979	11.481	0.633	9.587	-86.05	1.000	21.066
#6	-1.292	8.284	15.405	1.318	11.388	126.43	1.000	25.554
	-0.321	3.853	8.292	0.613	6.852	-61.81	0.602	

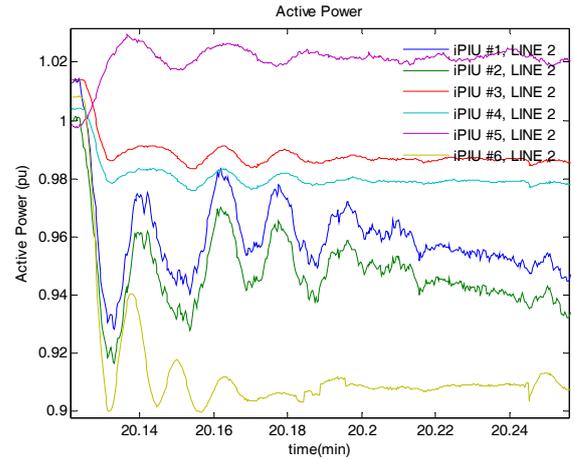


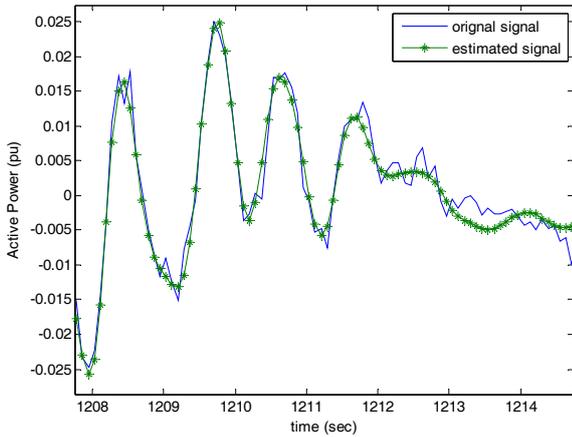
그림 4 고장후 유효전력

Fig. 4 Active power after a fault

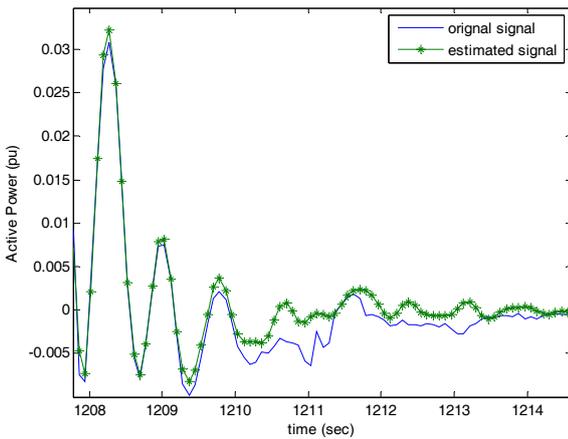
그림 4는 고장 직후 동요를 관찰하기 위해서 확대하여 나타낸 그림이다. 고장 직후 모든 선로조류가 진동하고 있음을 알 수 있다. 각 변전소의 I-PIU에서 취득된 유효전력에서 고장 초기 저주파 진동이 가장 뚜렷한 신호는 청양변전소(I-PIU #6)에서 취득한 신호로 다른 변전소의 신호들과는 달리 고장 초기에 잡음이 거의 포함되어 있지 않음을 알 수 있다. 그리고 동서울변전소(I-PIU #1, I-PIU #2)에서 취득한 신호는 잡음이 포함되어 있으나 진동이 가장 큰 경우이다.

계통에서 고장이 발생한 직후 취득한 신호에 대해서 각 변전소별로 파라미터를 추정한 결과를 표 1에 나타나 있다. 표에서 “Modes”는 추정된 모드의 실수부와 허수부를 나타낸 것이고, “Damping”은 제동비를 의미한다. 그리고 “Freq”는 모드 허수부를 주파수로 변환한 것이고, “Ai”와 “%A”는 각각 모드의 크기와 상대적 크기를 의미한다. 추정된 결과에서 SNR(signal to noise ratio)이 20 이상이므로 비교적 정확하게 신호를 추정하고 있음을 알 수 있다. 청양변전소에서 계측한 신호에서 추정된 0.613Hz 모드가 가장 작은 제동비를 가지고 있고, 다른 모드들은 모두 제동계수가 10%보다 큰 값을 가지고 있어 고장 직후 진동이 빠르게 감쇠하고 있음을 알 수 있다. 비록 제동비가 큰 값을 가지고 있어 계통운용에 문제가 되지 않을 지라도, 표에 나타난 모드들은 한전계통의 잠재적인 저주파진동 모드들이다. 잠재적 진동 모드로 0.63 Hz, 0.97Hz, 1.32Hz 모드들을 추정하였다.

이 결과는 중요 변전소에서 취득한 데이터이므로 발전기의 동적특성(dynamic characteristics)보다는 조류의 변화의 영향을 크게 나타내고 있다. 그러므로 고장 직후에 신호에서 한전계통의 중요한 저주파수 진동 모드를 정확하게 추정하는데 한계가 있다. 그림 5(a)와 그림 5(b)는 원래 신호와 추정한 파라미터에 의한 신호를 비교하기 위하여 나타낸 그림이다.



(a) I-PIU #1



(b) I-PIU #6

그림 5 파라미터 추정 결과

Fig. 5 Result of Parameter Estimation

4.3 고장 전후 신호에서 진동 모드 추정

고장 직후 계측한 신호는 비교적 출력이 크게 변화하고 따라서 추정한 파라미터에서 크기도 크게 추정된다. 반면에 과도불안정이 제거된 정상상태 출력은 그 변화가 매우 작다. 보통 정상상태 출력 신호에 파라미터를 추정하기 위해서는 extended modified Yule-Walker나 subspace state space system identification과 같은 알고리즘을 적용하여 얻을 수 있다[32-33]. 그러나 신호 변동이 크다면 반복적으로 Prony 법과 같은 파라메트릭법을 적용하고 SNR이 큰 경우만 추출해도 유사한 결과를 얻을 수 있다. 이 논문에서 적용한 신호는 변전소에서 계측한 신호이므로 비교적 변화가

크고 따라서 반복적으로 Prony 법[21]을 적용하여 SNR이 큰 경우만 추출하여 저주파진동 파라미터를 추정하였다.

파라미터를 추정하기 위해서 해석시간 구간과 샘플링 비율은 각각 10초와 1/60초로 설정하고, 1초씩 이동하면서 연속적으로 파라미터를 추정하였다. 그리고 추정한 파라미터 중에서 SNR이 20이상이 경우만 선택하여 이를 그림에 나타내었다.

그림 6은 각 변전소에서 취득한 60분 동안의 고장 전후 전체 데이터에서 중요 모드를 추정하여 나타낸 그림이다. 추정한 모드는 복소수이므로 복소수의 실수부를 실수축에 나타내고 허수부를 허수축에 나타내었다. 그러므로 실수축은 제동계수가 되고 허수축은 각주파수로 표현된 주파수가 된다. 그리고 그림에서 표시 “·”은 고장 전 신호에서 추정한 중요 파라미터를 의미하고, “x”는 고장 후 신호에서 추정한 모드들이다. 고장 후 결과들이 고장 전보다 많이 나타난 것은 고장으로 일부 모드들이 여기 되었기 때문이다.

그림에서 가장 밀집되어 있는 0.1Hz 근처의 모드들은 cutoff 주파수를 0.1Hz로 설정하였기 때문에 나타난 모드들이다. 이 모드들을 무시하면 대부분의 중요 모드들은 주파수 0.3Hz~1.3Hz 사이에 존재하고 있다.

먼저 그림 6에 나타난 모드 분포에는 다양한 모드가 존재하므로 주파수 대역을 기준으로 한전계통에 중요 모드를 다음과 같이 구분한다.

- Mode A : 0.43Hz±0.04Hz
- Mode B : 0.65Hz±0.04Hz
- Mode C : 0.97Hz±0.05Hz
- Mode D : 1.25Hz±0.05Hz

그림 6(a)는 동서울변전소(I-PIU #1)에서 취득한 신호에 포함된 모드 분포를 나타내고 있다. 그림에서 Mode A와 Mode B 대역에 중요 모드가 분포되어 있다. 이로부터 서해안 지역 500MW 발전기 탈락 고장으로 동서울변전소의 선로조류의 저주파 진동은 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 동일한 동서울변전소에 설치된 I-PIU #2에서 취득한 신호도 유사한 결과를 나타내서 본 논문에는 나타내지 않았다.

그림 6(b)는 아산변전소(I-PIU #3)에서 취득한 60분 동안의 고장 전후 전체 데이터에서 중요모드를 추정하여 나타낸 그림이다. 파라미터 추정조건은 앞에서 기술한 경우와 동일하게 적용하였다. 가장 아래에 밀집되어 있는 0.1Hz 근처의 모드들을 무시하면, 대부분의 중요모드들은 주파수 0.3Hz~1.3Hz 대역에 존재하고 있다. 그림 6(a)에 나타난 동서울변전소와 그림 6(b)에 나타난 아산변전소의 모드 분포가 확실하게 다른 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 동서울변전소와 달리 아산변전소에서 가장 중요한 모드로 Mode C (0.92Hz~1.02Hz)가 추정되었고, 작지만 Mode A와 Mode B도 동시에 나타나고 있다. 이것은 서해안 지역 다수 발전기가 아산변전소에 연결되어 있으므로 Mode C가 가장 집중적으로 나타났다. 따라서 Mode C는 서해안지역의 지역모드나 지역간모드로 생각할 수 있다. 다만 주어진 데이터가 변전소 데이터이므로 이를 명확하게 구분하기는 어렵다.

그림 6(c)는 신제천변전소(I-PIU #5)에서 취득한 데이터에서 중요 모드를 추정하여 나타낸 것이다. 이 경우에도 파

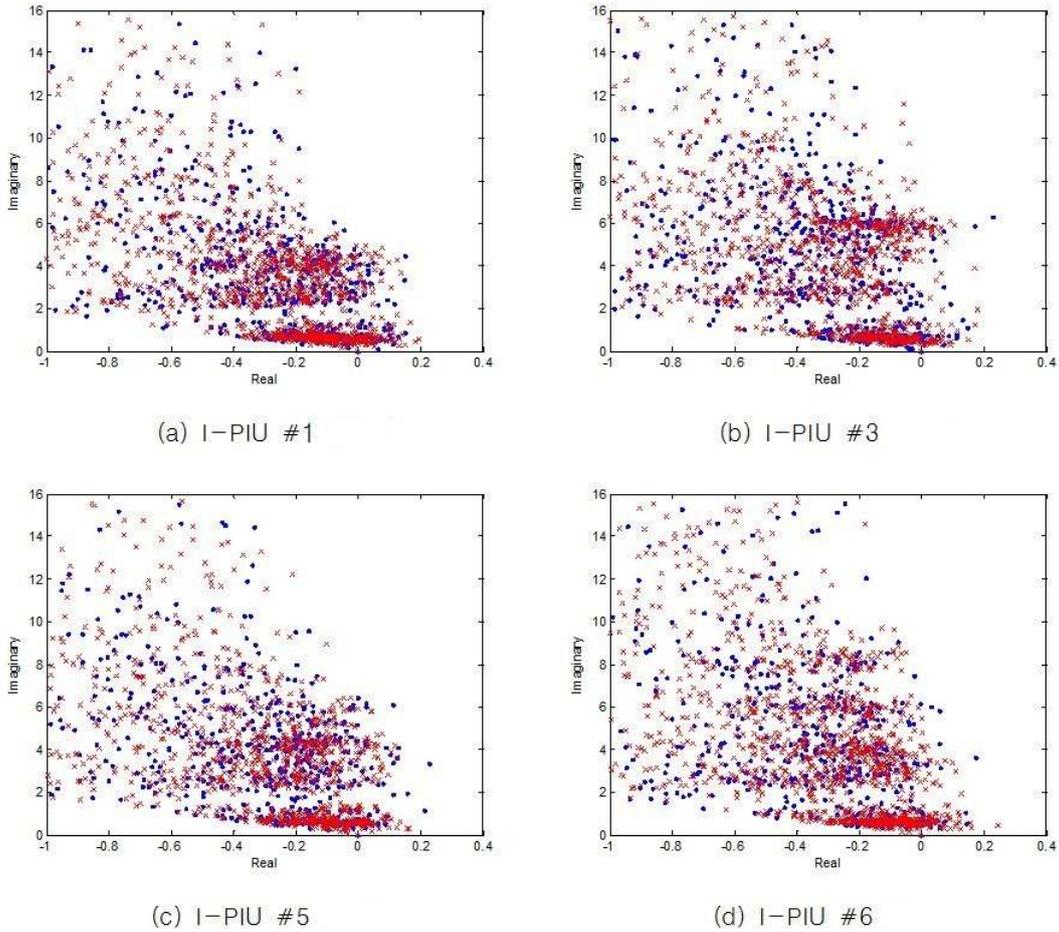


그림 6 진동 모드 분포
Fig. 6 Distribution of oscillation mode

라미터 추정조건은 앞에서 기술한 경우와 동일하게 적용하였다. 가장 중요한 모드로 Mode A와 Mode B를 추정하였는데, 모드분포는 동서울변전소에서 얻은 결과와 유사하다. 앞에서 기술한 아산변전소에서 Mode C가 중요 모드로 추정된 것과 달리 신계천변전소에서 Mode C는 거의 나타나지 않았다. 이것은 신계천변전소가 고장 지점에서 비교적 원거리에 위치해 있어 고장의 영향을 거의 받지 않았기 때문이다.

그림 6(d)는 고장이 발생한 발전소와 근접한 청양변전소(I-PIU #6)에서 취득한 데이터에서 중요 모드를 추정하여 나타낸 그림이다. 이 경우에도 파라미터 추정 조건은 앞에서 기술한 경우와 동일하게 적용하였는데, 다른 변전소보다 더 다양한 모드들이 분포되어 있음을 알 수 있다. 청양변전소는 고장이 발생한 발전소 근처에 있어 Mode C가 많이 나타나고 있고, 다른 변전소에서 집중적으로 분포되지 않은 Mode D도 나타남을 알 수 있다. 이것은 서해안지역 발전기 탈락 고장으로 직접 연결되어 있는 청양변전소에서 취득한 신호가 영향을 크게 받고 있는 것을 의미한다. 전철에서 기술한 고장직후 중요 모드 추정 결과에서 1.3Hz 모드를 추정하였는데 이로써 청양변전소에 인근 발전기들 중 일부 발전기의 중요모드는 Mode D임을 알 수 있다. 또한 Mode A와 Mode B는 전체 변전소에서 고르게 나타나고 있어 이 모드들이 한전계통의 광역모드임을 알 수 있다.

4.4 한전계통 저주파진동 해석 결과

이 논문에서 저주파진동 파라미터를 추정하기 위해서 적용한 신호들은 변전소에서 계측한 신호들이다. 따라서 한전계통의 개별 발전기들의 정확한 진동모드를 추정하기는 어렵다. 그러나 고장이 발생한 발전기와 변전소의 위치에 따라 중요모드가 다르게 추정되므로 근사적으로 지역모드와 광역모드를 유추할 수 있다. 여기에서는 고장 직후 파라미터 추정 결과와 정상상태 신호에서 파라미터 추정 결과를 바탕으로 한전계통의 저주파진동 해석 결과를 기술한다.

4.4.1. 고장직후 해석

한전계통에서 고장이 발생하였을 때, 고장 직후 계측한 신호에서 중요 모드로 0.63Hz, 0.97Hz, 1.3Hz 진동 모드를 추정하였다. 모드 0.63Hz는 고장지점에서 원거리에 위치하고 있어 고장의 영향을 적게 받고 각 변전소에서 고르게 추정되었기 때문에 한전계통의 광역모드로 생각할 수 있다. 그리고 0.97Hz, 1.31Hz 모드는 고장 지점과 근거리에 위치해 있고 특정 변전소에서만 추정되었기 때문에 지역모드로 생각할 수 있다.

4.4.2. 정상상태 해석

정상상태 신호에서 저주파진동 파라미터를 추정한 결과, 다양한 모드들을 추정하였다. 표 2는 모든 I-PIU에서 계측한 신호에 대해서 파라미터를 추정한 후, 중요 모드들의 존재 여부를 요약한 것이다. 각 신호에서 파라미터를 추정한 결과, 가장 많이 분포된 모드는 '○'으로 나타내고, 다음으로 많이 포함된 모드를 '○'으로 나타내었다. 그리고 가장 작거나 거의 나타나지 않는 모드는 '×'로 나타내었다. 표에서 Mode A와 Mode B는 모든 변전소에 나타나고 있고, 특히 Mode B는 동서울변전소와 신제천변전소 및 청양변전소에서 계측한 신호에 가장 많이 분포되어 있다. 그러므로 이 모드는 한전계통의 중요한 광역 진동모드로 생각할 수 있다. 고장 직후 신호에서 모드 A는 검출되지 않았다. 이것은 다른 모드가 상대적으로 크게 추정되었기 때문에 Mode A는 추정되지 않았다.

그리고 Mode C는 고장이 발생한 인근 지역인 아산변전소에서 계측한 신호에 가장 많이 분포되어 있으므로 서해안 지역의 지역모드나 지역간 모드로 생각할 수 있다. 또한 Mode D는 고장이 발생한 인근 지역인 청양변전소에서만 나타나고 다른 지역 변전소에서는 나타나지 않았다. 이 모드는 고장전보다 고장 후 집중적으로 나타났는데, 이것은 서해안 지역 발전기 고장의 영향으로 모드가 활성화되었기 때문이다. 그러므로 Mode D도 서해안지역 특정 발전기의 지역모드임을 알 수 있다. 그러나 전술한 것과 같이 이 논문에서 적용한 신호들이 발전소에서 계측한 신호들이 아니므로 추정한 모드들이 어떤 발전소의 진동모드인지를 판단하기는 어렵다.

결과적으로 고장 직후 데이터에서 추정한 모드와 정상상태 데이터에서 추정한 모드를 비교한 결과, Mode A와 Mode B는 한전계통의 광역모드이고, Mode C와 Mode D는 서해안 지역의 지역모드임을 알 수 있다. 광역 모드는 전체 계통에서 고루 분포되어 나타나기 때문에 각 변전소에서 계

측한 신호에 모두 포함되어 있는 반면, 지역모드는 지역 발전기들의 동요의 영향으로 인근 변전소 출력이 변화되기 때문에 인근 변전소에서 집중적으로 나타난다.

이 논문에서 적용한 synchrophasor 데이터는 모두 변전소에서 취득한 데이터들이다. 따라서 발전기의 고유한 특성인 저주파수 동요를 관찰하기에 적당한 데이터는 아니다. 그러나 광역계통의 진동은 전체 계통에 나타나므로 변전소에서 취득한 데이터에서도 광역모드는 나타날 수 있다.

결과적으로 현재 한전 계통은 제동특성이 매우 양호하여 광역진동은 크게 문제가 되지 않는다. 그러나 전력계통에 잠재되어 있는 저주파 진동은 특정한 상태에서 활성화 될 수 있기 때문에 주요한 감시 대상이 될 수 있다. 이러한 측면에서 본 논문에서 추정한 한전 계통의 주요 광역모드는 한전 계통에 설치된 I-PIU를 이용한 최초의 광역모드 추정으로 매우 의미 있는 결과로 생각된다.

북미계통인 WSCC 계통에 광역정진이 발생한 바 있다 [20]. 이 광역정진으로 계통이 4개로 분리되고, 30,390 MW의 부하가 차단되었으며, 약 750만 수용가가 영향을 받았다. 이 고장은 발전력이 북부지역에 편중된 상태에서 중요 선로들이 연속적으로 개방됨으로써 발전기들이 과여자 보호계통에 의하여 정지함에 따라 지역간 저주파 진동이 시작되었다. 고장 전 정상상태에서 광역모드인 0.27Hz 모드가 잠재해 있었는데, 고장이 발생한 후 이 모드가 감쇄되지 않고, 진동이 점점 커짐으로써 각 발전기의 제어계통에 영향을 주었고 결국 광역정진이 되었다. 즉 잠재되어 있었던 광역진동모드가 특정한 조건에 의해서 활성화 되고, 진동이 점점 커지면서 결국 계통이 붕괴되었다.

WSCC 계통 고장으로부터 광역진동 모드에 대해서 실시간 감시가 필요함을 알 수 있다. 계통에서 저주파 진동모드는 발전기의 고유한 특성에서 기인하므로 그 특성이 급변하지 않는다. 그러므로 한전 계통에 잠재되어 있는 중요 진동모드인 Mode A, Mode B는 지속적으로 발생한다. 따라서 한전 계통에 설치된 I-PIU에서 취득된 데이터에서 이와 같은 광역모드를 주로 감시할 필요성이 있다. 또한 이들 진동모드가 활성화 될 때, 이를 억제하기 위한 적절한 상정사고 해석 및 제어 대책이 필요하다.

이 결과들은 변전소에서 취득한 신호에서 추정한 결과들이지만, 실시간 감시와 계통 운영측면에서 매우 중요한 의미가 있다. 정상상태에서 추정되는 많은 모드들 중에서 감시해야할 광역진동 모드가 몇 개로 한정되기 때문에 보다 정확하고 빠르게 계통의 진동을 감시할 수 있다. 그리고 계통 운영측면에서 특정 진동 모드들에 대한 대책을 수립하면 보다 안정적으로 계통운용을 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 한전계통에 설치된 I-PIU에서 취득한 데이터에서 한전 계통의 중요 진동 파라미터를 추정한 결과를 기술하였다. 한전 계통에 잠재해 있는 중요 진동모드로 주파수 0.43Hz와 0.65Hz, 그리고 0.97Hz, 1.25Hz 근처의 모드를 추정하였다. 고장 직후 신호와 정상상태 신호를 분석한 결과, 0.43Hz와 0.65Hz는 광역진동 모드이고 0.97Hz, 1.25Hz 모드는 서해안 지역 발전기들의 지역모드임을 확인하였다.

표 2 Ambient Data에서 진동모드 추정
Table 2 Oscillation Mode Estimation in Ambient Data

I-PIU No.	Line	Mode			
		A	B	C	D
1	1	○	◎	×	×
	2	×	◎	○	×
2	1	○	◎	×	×
	2	○	○	◎	×
3	1	○	○	◎	△
	2	○	○	◎	△
4	1	○	△	◎	○
	2	○	△	◎	○
5	1	○	◎	△	×
	2	○	◎	△	×
6	1	○	◎	×	×
	2	○	◎	○	○

* dominant ranking : ◎→○→△→×

* Mode A : 0.43Hz±0.04Hz

* Mode B : 0.65Hz±0.04Hz

* Mode C : 0.97Hz±0.05Hz

* Mode D : 1.25Hz±0.05Hz

그러므로 한전 계통의 저주파 진동 대책은 이들 광역모드를 중심으로 수립되어야 하며, 특히 0.65Hz 근처의 모드는 다수 발전기가 참여할 수 있어 광역불안정시 활성화되기 쉬운 모드이다. 광역계통 감시를 위해서 이들 주파수 대역을 중요 주파수로 설정하면, 보다 효율적으로 광역계통의 동요를 감시할 수 있다.

References

- [1] National Energy Technology Laboratory, The modern grid initiative : A systems view of the modern grid, 2007. 12.
- [2] M. Amin, B.F. Wollenberg "Toward a smart grid: power delivery for the 21st century," IEEE Power and Energy Magazine, Vol 3, No 5, Sep/Oct 2005.
- [3] IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Std C37. 118-2005, 2005.
- [4] F. Hauer, "Validation of phasor calculations in the macrodyne PMU for California-Oregon transmission project tests of March 1993," IEEE Trans. Power Delivery, Vol 11, No 3, pp.1224-1231, July 1996.
- [6] I. Kamwa, R. Grondin, "PMU configuration for system dynamic performance measurement in large multiarea power systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp.385-394, 2002.
- [7] J. De La Ree, V. Centeno, J. S. Thorp, A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurement applications in power systems," IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 1, No. 1, pp.250-257, June 2010.
- [8] D. Atanackovic, J. H. Clapauch, G. Dwernychuk, J. Gurney, H. Lee, "First steps to wide area control," IEEE Power Energy, Vol. 6, pp.61-68, 2008.
- [9] A. G. Phadke, R. M. de Moraes, "The wide world of wide-area measurement," IEEE Power Energy, Vol. 6, No. 5, pp.52-65, Oct. 2008.
- [10] Energy Tangle in China, IEEE Spectrum, Oct. 2004.
- [11] J. F. Hauer, W. A. Mittelstadt, K. E. Martin, J. W. Burns, H. Lee, J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, "Use of the WECC WAMS in wide-area probing tests for validation of system performance and modeling WECC disturbance monitoring work group," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp.250-257, Feb. 2009.
- [12] X. Xie, Y. Xin, J. Xiao, J. Wu, Y. Han, "WAMS applications in Chinese power systems," IEEE Power Energy, Vol. 4, No. 1, pp.54-63, Feb. 2006.
- [13] S. T. Kim, "Technology of smart WAMAC infra construction," KIEE 2011 Summer Meeting, July 2011.
- [14] K. S. Shim, "Detection of low frequency oscillation in KEPCO system and WAMAC technology," KIEE 2011 Summer Meeting, July 2011.
- [15] M. Klein, G. J. Rogers, P. Kundur, "A fundamental study of inter-area oscillations in power systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp.914-921, Aug. 1991.
- [16] L. Wang, A. Semlyen, "Application of sparse eigenvalue techniques to the small signal stability analysis of large power systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-5, No. 2, pp.635-642, May 1990.
- [17] EPRI, Phase II: frequency domain analysis of low frequency analysis oscillations in large power system, Vol. 2, Final Report EPRI EL-2348, 1982.
- [18] KW-PSS. Available at: <http://www.kepri.re.kr/kwpss/kor/index.jsp>.
- [19] SSAT. Available at: http://www.dsatools.com/html/prod_ssat.php.
- [20] D. N. Kosterev, C. W. Taylor and W. A. Mittelstadt, "Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 967-979, Aug. 1999.
- [21] J. F. Hauer, C. J. Demeure, and L. L. Scharf, "Initial results in Prony analysis of power system response signals," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 80-89, Feb. 1990.
- [22] D. J. Trudnowski, "Estimating electromechanical mode shape from synchrophasor measurements," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 23, No. 3, Aug. 2008.
- [23] G. Liu, J. Ning, Z. Tashman, V. M. Venkatasubramanian, "Oscillation monitoring system using synchrophasors," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Vol. 1, No. 1, July 2012.
- [24] B. Mohammadi-Ivatloo, M. Shiroei, M. Parniani, "Online small signal stability analysis of multi-machine systems based on synchronized phasor measurements," Electric Power Systems Research, Vol. 81, No. 10, pp.1887 - 1896. Oct 2011.
- [25] N. Kakimoto, M. Sugumi, T. Makino, K. Tomiyama, "Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 21, No 1, pp.260-268, Feb. 2006.
- [26] J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, M. K. Donnelly, "Initial results in electromechanical mode identification from ambient data," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 12, No. 3, pp.1245-1251. Aug. 1997.
- [27] K. S. Shim, H. K. Nam, Y. K. Kim, "A Parameter estimation of time signal and analysis of low frequency oscillation in power systems", Trans. of KIEE, Vol. 54, No. 3, pp. pp.122-132, Mar. 2005.
- [28] D. J. Trudnowski, J. M. Johnson, J. F. Hauer, "Making Prony Analysis More Accurate using Multiple Signals," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, pp.226-231, Feb. 1999.
- [29] P. Kundur, Power system stability and control,

McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

- [30] K. S. Shim, H. K. Nam, Y. C. Lim, "Use of Prony Analysis to Extract Sync Information of Low Frequency Oscillation from Measured Data," European Transactions on Electrical Power, Vol. 21, No. 5, pp.1746 - 1762, July 2011.
- [31] L. L. Scharf, Statistical signal processing : detection, estimation, and time series analysis, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1991.
- [32] L. Ljung, System identification, theory for the user, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1999.
- [33] D. J. Trudnowski, J. W. Pierre, N. Zhou, J. F. Hauer, M. Parashar, "Performance of three mode-meter block-processing algorithms for automated dynamic stability assessment", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 23, No. 2, pp.680 - 690, 2008.



남 해 곤 (南海 鯤)

1975년 서울대학교 전기공학과 졸업.
 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사).
 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(박사).
 1975년-1978년 한국전력 원자력 건설부 근무.
 1986년-1988년 한국전기연구소 근무.
 1988년-현재 전남대 전기공학과 교수.
 Tel : 062-530-1745
 Fax : 062-530-1749
 E-mail : hknam@chonnam.ac.kr



최 준 호 (崔 竣 豪)

1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업.
 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
 현재 전남대학교 전기공학과 부교수.
 Tel : 062-530-1741
 Fax : 062-530-1749
 E-mail : joono@chonnam.ac.kr

저 자 소 개



심 관 식 (沈 冠 埴)

1991년 전남대학교 전기공학과 졸업.
 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
 1997년~2004년 서남대학교 전기공학과 조교수.
 현재 전남대학교 전기공학과 계약교수.
 Tel : 062-530-1740
 Fax : 062-530-1749
 E-mail : simgong@chonnam.ac.kr



김 상 태 (金 尙 泰)

1996년 명지대학교 전기공학과 졸업.
 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사).
 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(박사).
 현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 차장.
 Tel : 031-420-0751
 Fax : 031-420-0759
 E-mail : jesteka@kdn.com