

Synchrophasor를 이용한 한전계통의 저주파 진동 스펙트럴 해석

(Spectral Analysis of LFO Using Synchrophasor in KEPCO Systems)

심관식* · 최준호 · 김상태**

(Kwan-Shik Shim · Jun-Ho Choi · Sang-Tae Kim)

Abstract

The parameters of electromechanical modes offer considerable insight into the dynamic stability properties of a power system. This paper presents a results of a LFO(low-frequency oscillation) based on the time-synchronized signals measured by synchrophasor in the rolling blackout. Spectral analysis was performed, and critical parameters were estimated using the data acquired from synchrophasors installed in the KEPCO system. As significant modes, a 0.68 Hz oscillation mode that occurred prior to the forced load shedding in the rolling blackout was estimated. Such an oscillation mode can cause an uncontrollable blackout. Therefore, the system should be operated so that significant oscillation modes are not activated. This results can serve as a reference in the future for reliable system operation in the event of a similar blackout.

Key Words : Power Spectrum Density, Rolling Blackout, Spectral Analysis, Synchrophasor, WAMS

1. 서 론

최근 전력기술에서 GPS 기반으로 위상동기신호를 측정하고 계통해석과 운용에 적용하는 synchrophasor 기술이 많은 관심을 받고 있다[1-4]. 이 기술은 인공위

성 GPS의 시간정보를 이용하여 측정데이터의 시간을 정밀하게 동기화시킴으로써 신호들의 위상을 측정하는 기술이다. 그러므로 광역계통의 정보를 보다 정밀하게 취득할 수 있을 뿐만 아니라 상호비교를 통하여 새로운 계통해석 정보를 얻을 수 있다. 현재 각국에서는 광역계통 감시 목적으로 synchrophasor를 적용한 WAMS(Wide Area Monitoring System)를 활발하게 개발하고 있다. 그리고 이를 확장하여 계통제어와 보호(control and protection)에 적용하기 위한 시도들이 계속 보고되고 있다[5-7].

최근 우리나라에서도 광역계통을 감시하기 위해서 전력기술과 ICT를 접목한 K-WAMS(Korea wide area monitoring system)를 개발하였다. K-WAMS는 동기위상측정장치인 synchrophasor를 한전계통의 중

* 주저자 : 전남대학교 전기공학과 연구교수
** 교신저자 : 한전KDN 전력IT연구원 선임연구원
* Main author : Chonnam National University,
Department of Electrical Engineering,
Research Professor
** Corresponding author : KEPCO-KDN KDNERI
Senior Research Engineer
Tel : 031-420-0751, Fax : 031-420-0759
E-mail : jesteka@kdn.com
접수일자 : 2013년 7월 4일
1차심사 : 2013년 7월 10일
심사완료 : 2013년 9월 27일

요변전소에 설치하고, 한국전력 본사와 전력거래소에서 실시간으로 계통 상태를 감시할 수 있는 시스템이다[8-10].

전력계통에서 발생하는 중요 저주파진동은 주로 2.5Hz이하의 저주파 영역에서 발생하고, 특히 많은 발전기들이 동시에 진동하는 광역진동 모드는 1.0Hz 이하에서 발생한다[11]. 대규모 부하차단이나 발전기탈락, 선로고장 등과 같은 외란은 광역계통의 불안정을 야기할 수 있는데, 광역진동모드를 이용한 동적해석은 광역불안정을 판별하는데 중요하다.

지금까지 계통에서 발생하는 저주파진동은 주로 계통상태 행렬의 고유치와 고유벡터를 계산하여 해석하였고, 이와 관련되어 많은 상용 소프트웨어들은 개발되었다[12-14].

수학적인 선형모델을 이용한 고유치 해석법과 달리 최근 synchrophasor에서 취득한 위상동기된 신호에서 직접 파라미터를 추정하여 저주파진동을 해석하는 방법들이 개발되고 있다[15-17]. 이들은 주로 통계신호 처리에 기반을 둔 알고리즘들을 포함한 방법들로 크게 파라미터법(parametric method)과 비파라미터법(non-parametric method)으로 분류할 수 있다[18]. 비파라메트릭법은 푸리에변환에 기반을 두고 파라미터를 추정하므로 계산시간이 빠르고 알고리즘이 단순하다[19]. 반면에 파라메트릭 법은 이산데이터를 자동회귀이동평균 모델로 변환하여 복소지수함수를 추정하고 이를 이용하여 파라미터를 추정하므로 비파라메트릭 법보다 비교적 정확한 반면에 계산시간이 많이 소요 된다. 스펙트럴 해석은 계측한 신호에 파라미터법이나 비파라미터법을 적용하여 주파수에 대한 스펙트럼 분포를 구하여 중요 주파수를 추정한다[20-21].

최근 한전계통에 순환정전이 시행된 바 있다. 순환정전(rolling blackout)은 공급전력이 부족할 때, 지역별로 일정시간동안 전력공급을 중지하는 것으로 인위적으로 계통을 제어할 수 있다는 점에서 불가항력적인 대정전과 다르다[22-23]. 또 다른 측면에서 순환정전은 광역전력계통을 안정하게 운용하기 위한 최후의 계통운용 기술이다. 전기의 특징 중에 하나는 저장이 어려워 생산과 소비가 동시에 이루어진다는 것이다. 그러므로 발전소에서 발전된 전력은 생산과 동시에

부하에서 소비된다. 그런데 부하는 항상 변화하므로 전력계통을 운용하기 위해서는 부하수요를 미리 예측해서 발전량을 결정한다. 그러므로 전력계통을 안정하게 운용하기 위해서는 정확한 부하수요 예측이 필수적이다. 이런 측면에서 부정확한 수요예측으로 발생한 순환정전은 다소 불가항력적인 측면이 포함되어 있다. 최근 부하수요에 가장 민감한 인자는 날씨가 되고 있다. 당일 기온에 따라서 전력사용량은 급변하는데, 근래 이상기온의 급증에 따른 전력사용량 예측도 그만큼 어려워지고 있다.

본 논문은 한전계통에 설치된 K-WAMS에서 계측한 synchrophasor 신호에 대해서 저주파수 대역의 스펙트럴 해석 결과를 기술하고 있다. 순환정전 전후에 실측한 synchrophasor 데이터에서 전력스펙트럼밀도와 상호스펙트럼밀도를 계산하여 스펙트럴 해석을 하였다. 스펙트럴 해석 결과, 한전계통의 중요 모드의 주파수를 검출하고, 순환정전 과정에서 중요 주파수와 모드의 변화를 분석하였다. 순환정전 과정에서 스펙트럴 해석을 통하여 긴급부하차단과 재투입이 광역계통의 안정성에 주는 영향을 확인할 수 있어 유사한 고장이 발생하였을 때, 좋은 참고자료가 될 수 있다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 한전계통의 K-WAMS와 synchrophasor에 대해서 기술하고, 제 3장에서는 저주파진동과 스펙트럴 해석에 대해서 기술한다. 그리고 제 4장에서는 저주파진동 스펙트럴 해석 결과에 대해서 기술하며, 제 5장에서는 결론을 기술한다.

2. K-WAMS와 Synchrophasor

한국형 광역전력계통 감시시스템인 K-WAMS는 한전계통에서 설치한 synchrophasor와 운영시스템으로 구성되어 있다. K-WAMS는 한전계통의 변전소에 설치된 synchrophasor에서 실측한 전압, 전류의 정상분 페이지(positive phasor data), 주파수, 유/무효전력 등 기본 정보를 이용해 실시간 계통 상황을 감시하면서 계통 불안정현상을 예측하고, 대규모 정전이 예상될 경우, 이를 조기 경보하는 시스템이다. 현재 2013년 한전계통에 설치된 synchrophasor는 초당 1/60 샘플

링 전송률(transfer rate), 계측오차 $\pm 0.1\%$, 측정시간 오차 $\pm 1\mu s$ 로 기본 데이터를 계측하고 있다. 한전계통에는 6기의 synchrophasor가 설치되어 운용 중에 있는데, 동서울변전소(2기), 아산변전소(2기) 그리고 신계천변전소와 청양변전소에서 설치되어 있다.

현재 한전계통에 설치된 synchrophasor의 주요 목적은 수도권 북상조류 감시목적으로 중요 변전소에 설치되었다. 그러므로 원자력발전소를 비롯한 중요 발전소의 발전기 동요나 광역진동, 수도권 전압 문제를 판별하는데 한계가 있다. 향후 한전계통의 중요 발전소와 변전소에 synchrophasor가 설치되면 계통해석과 운용에 필요한 충분한 정보를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 그림 1은 한전계통도와 synchrophasor의 위치를 나타내고 있는데, 붉은색 사각형이 현재 설치된 위치를 나타내고 있다.

3. 저주파진동과 스펙트럴 해석

이 장에서는 먼저 신호 모델을 정의하고 신호와 저주파진동 그리고 스펙트럴 해석에 대해서 기술한다.

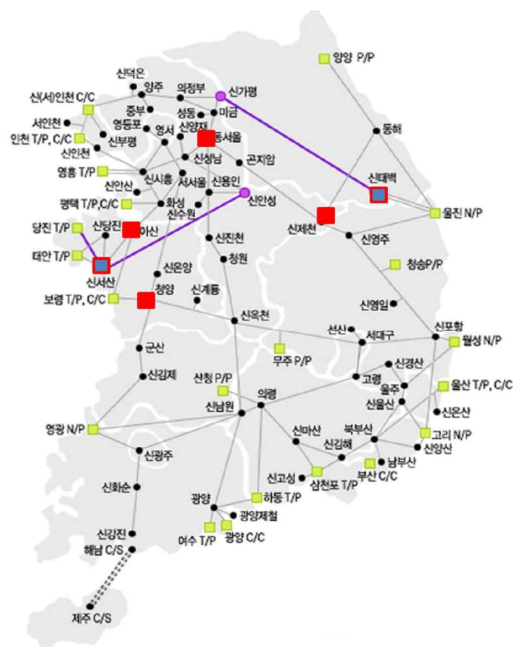


그림 1. 한전계통과 synchrophasor 설치 위치
Fig. 1. KEPCO system and synchrophasor location

3.1 신호와 저주파진동

선형모델에서 상태변수와 상태행렬을 각각 x 와 A 라 하면 선형상태방정식은 다음과 같다.

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

그리고 입력이 직접 출력에 영향을 주지 않는다고 가정할 때, 출력방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

상태변수 미소변화는 모드 λ_i 와 residue R_i 로 나타낼 수 있으므로 출력의 미소변화도 모드와 residue로 나타낼 수 있다[24]. 즉

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

만일 i 번째 모드가 출력을 지배하는 중요 모드라면, 출력신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

이 식에서 임의의 출력신호는 정상상태 값과 중요모드 그리고 그에 대응하는 residue로 나타낼 수 있다. 모드 λ_i 는 선형해석에서 고유치에 대응하고, residue는 좌고유벡터와 우고유벡터 요소들의 곱으로 구성되어 있으므로 참여율에 대응한다. 만일 정상상태 값 $y(t_0)$ 가 신호의 동작점이라면 선형모델의 고유치해석과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

측정한 임의의 신호는 감쇠지수함수와 코사인함수의 곱으로 이루어진 지수감쇠코사인함수들의 합으로 표현될 수 있다. 만일 임의의 이산신호가 n 개의 지수감쇠코사인함수로 표현될 때, i 번째 함수의 크기와 제동계수를 각각 A_i, α_i 라 하자. 그리고 코사인함수의 주파수와 위상을 ω_i, ϕ_i 라 하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

만일 신호의 모드 중에서 k 번째 모드에 대응하는 크기 A_k 가 가장 크고, 계동계수가 α_k 가 작아서 k 번째 모드가 신호의 중요 모드라면 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$y_a(t) \cong A_k e^{\alpha_k t} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (6)$$

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

3.2 스펙트럴 해석

스펙트럴 해석은 계측한 신호에서 주파수에 대한 스펙트럼 분포를 구하여 중요 주파수와 위상을 추정한다[18].

계통에서 측정된 신호 $y_a(t)$ 와 $y_b(t)$ 사이에 전력스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)를 $S_{aa}(\omega)$ 라 하고, 상호스펙트럼 밀도(cross spectral density, CSD)를 $S_{ab}(\omega)$ 라 하자. 푸리에스펙트럼을 이용해서 상호스펙트럼 밀도와 전력스펙트럼 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{aa}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[Y_a^*(\omega) Y_a(\omega)] \quad (7)$$

$$S_{ab}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[Y_a^*(\omega) Y_b(\omega)] \quad (8)$$

여기에서 $Y_a(\omega)$ 는 주파수 ω 에 대한 신호 $y_a(t)$ 의 푸리에 스펙트럼이고, $Y_a^*(\omega)$ 는 푸리에 스펙트럼 $Y_a(\omega)$ 의 켈레복소수이다. 그리고 $E[\cdot]$ 는 기대치 연산자이다.

PSD와 CSD는 푸리에스펙트럼의 곱으로 계산되므로 스펙트럼이 클수록 중요 주파수를 의미한다. 그리고 CSD 위상으로부터 신호들 사이에 위상차를 알 수 있으며, PSD와 CSD로부터 coherency를 계산함으로써 신호 사이에 관련 정도를 알 수 있다. 또한 PSD에 Yule Walker 알고리즘[25]을 적용하면 계동계수를 얻을 수 있다.

이 논문은 한전계통의 synchrophasor에서 측정된 데이터에서 저주파수 진동을 검출하는데 주요 목적이 있고, 또한 데이터를 측정할 장소가 변전소이므로 계동계수와 위상차는 큰 의미가 없다. 그러므로 PSD만 계산하고, 이를 이용하여 순환정전 시 발생한 저주파 진동을 해석하였다.

4. 저주파진동 스펙트럴 해석 결과

이 장에서는 먼저 한전계통에서 실행한 순환정전과 synchrophasor 데이터에 대해서 기술하고 측정된 데이터에 스펙트럴 해석을 수행한 결과에 대해서 기술한다.

4.1. 순환정전

순환정전은 전력공급량보다 부하수요량이 많을 때, 부하를 감소하기 위하여 인위적으로 실행하는 정전이다. 이와 같은 순환정전은 발전량이 부족한 저개발 국가에서는 자주 발생하는 것으로 적절하게 실행하면 전체 계통이 붕괴되는 대정전을 막을 수 있다. 통상 전력회사에서는 순환정전을 계통유지를 위한 마지막 대안으로 생각하고, 가능한 최소의 부하 탈락을 목표로 순환정전을 실행한다. 이런 측면에서 광역 순환정전의 경험이 없는 우리에게 2011년 9월 15일 시행한 순환정전은 향후 안정적인 계통운용에 좋은 참고가 될 수 있다.

순환정전 당일 전력수급과 순환정전 과정은 의미하는 바가 매우 크다. 당일 공급능력 7,071만kW이고, 예측한 최대수요는 6,400만kW로 오전 11시까지 정상적으로 계통은 운용되고 있었다. 무더운 날씨로 부하수요는 오전부터 지속적으로 증가하였고, 오전 8시부터 가동한 양수발전의 발전량도 지속적으로 증가하였다. 10시 50분 예비력이 400만kW 이하로 저하된 뒤, 11시 35분 예비력이 300만kW 이하로 저하되었다. 오후 13시 이후 예비력이 다시 감소하기 시작하여 오후 13시 25분 100만kW 이하로 저하되었다.

그리고 예비력 부족이 예상됨에 따라 오후 15:11분 처음 긴급부하조정을 시행한 후, 순차적으로 총 500만

KW 긴급부하조정을 시행하였다.

4.2 Synchrophasor 데이터

한전계통에는 6기의 synchrophasor가 설치되어 운용 중에 있다. 이들 중에서 동서울 변전소와 아산변전소에는 각각 다른 선로를 감시하기 위해서 2기가 설치되어 있고, 청양변전소와 신제천 변전소에는 각각 1기가 설치되어 있다. 본 논문에서는 동서울변전소에 설치된 synchrophasor로부터 취득한 데이터를 이용하여 스펙트럴 해석을 수행하였다.

동서울변전소에 설치된 synchrophasor로부터 취득한 데이터에서 중요 시간대의 주파수와 유효전력을 그림 2에 나타내었다. 각 그림은 1/10 샘플링을 10분 동안 6,000개 샘플을 나타낸 것으로 중요한 변동성이 있는 시간대만 나타내었다. 그림에서 synchrophasor No.1은 동서울 변전소에 설치한 synchrophasor를 의미하고, D0915와 T1030은 각각 날짜와 시간을 의미한다. 예를 들면 T1030은 10시 30분부터 10분 동안 데이터를 의미하므로 그림에서 3분은 실제 시간으로 10시 33분을 나타낸다.

그림에 나타나 있는 유효전력은 변전소에서 취득한 것이므로 선로 조류를 나타낸다. 발전소와 달리 변전소의 유효전력이 급변함을 알 수 있다. 큰 선로조류 변동은 부하증감이나 발전력 변동, 인근 중요 선로 탈락으로 발생한다. 순환정전 당일 부하증감과 작은 발전기 탈락 고장은 발생하였으나 선로고장은 발생하지 않았으므로, 대부분 조류변화는 부하증감으로 발생한 것이다.

그림 2 (a)는 10시 30분부터 10시 40분까지 10분 동안의 주파수와 유효전력을 나타내고 있다. 주파수와 유효전력 모두 큰 변화가 없는 정상상태이다.

그림 2 (b)는 11시 20분부터 11시 30분까지 10분 동안의 주파수와 유효전력을 나타내고 있다. 11시 22분부터 선로조류가 1분 동안 최대 55MW가 변동한 것으로 이것은 순환정전 당일 분당 최대 조류변동이다. 이 시간은 예비력 400만kW 이하로 저하된 것 외에 부하조정이나 배전전압저감과 같은 특별한 조치가 없는 시간이다. 현재 주어진 데이터에서 조류변동의 원인

은 파악하기 어렵다.

그림 2 (c)는 부하가 감소하기 시작하는 12시부터 10분 동안 주파수와 조류를 나타낸 것이고, 그림 2 (d)는 순환정전을 시행한 후 오후 15시 30분부터 10분 동안 주파수와 조류를 나타낸 것으로 긴급부하조정이 실행된 시간이다. 긴급부하조정에서 동서울 변전소 인근 부하를 조정하지 않았거나 작게 조정하였기 때문에 선로조류의 큰 변동이 발생하지 않았다.

그림 2 (e)는 500MW 긴급부하조정이 모두 실행된 상태에서 주파수와 선로조류를 나타내고 있다. 그리고 그림 2 (f)는 긴급부하조정을 해제하는 과정의 주파수와 선로조류를 나타내고 있다.

4.3 저주파진동 스펙트럴 해석

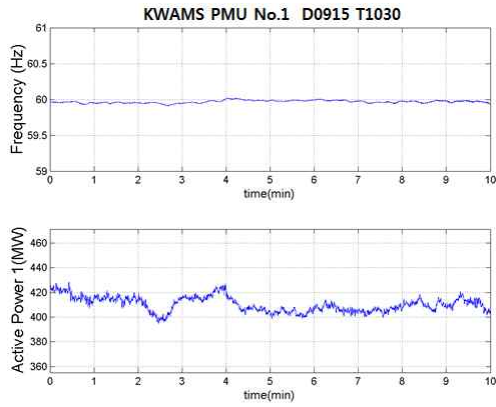
순환정전은 비교적 장시간 지속된 고장으로 실제 순환정전은 긴급부하조정을 지시한 오후 15시 11분에 시작하여 오후 19시 56분 긴급부하조정 해제로 종료되었다. 그러나 계통운용 측면에서 순환정전보다 예비력 부족으로 주파수 변동이 발생하기 시작한 시점부터 계통을 분석할 필요성이 있다. 예비력이 400만 kW 이하로 감소한 오전 10시 50분부터 비상계통운전 상황으로 인식하면, 이번 순환정전은 9시간 동안 지속된 계통고장으로 생각할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 계통에 중요한 이벤트가 발생한 시간대를 중심으로 스펙트럴 해석을 수행한다.

본 논문에서는 순환정전 당일 동서울변전소에서 측정된 시각 동기 신호에 대해서 스펙트럴 해석을 적용하였다. 발전소에 측정된 신호와 달리 변전소에서 측정된 신호이므로 CSD는 큰 의미가 없으므로 이 논문에서는 PSD만 계산하고 이를 이용하여 계통을 해석하였다.

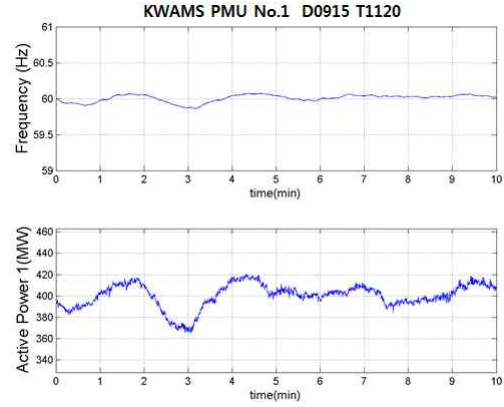
그림 3은 그림 2에 나타나있는 유효전력의 PSD를 계산하고 주파수에 대응해서 나타낸 것이다. 각 그림은 10분 동안 6,000개 샘플에 대한 PSD인데, 1,024개의 샘플링으로 이산푸리에변환을 수행하였다. 앞의 그림들과 동일하게 각 그림에서 D0915는 날짜를 의미하고, T1030은 데이터 시작 시간을 의미한다.

그림 3 (a)는 오전 10시 30분부터 10분 동안, 동서울

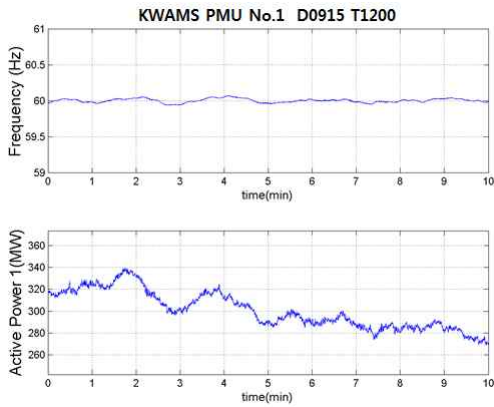
Synchrophasor를 이용한 한전계통의 저주파 진동 스펙트럼 해석



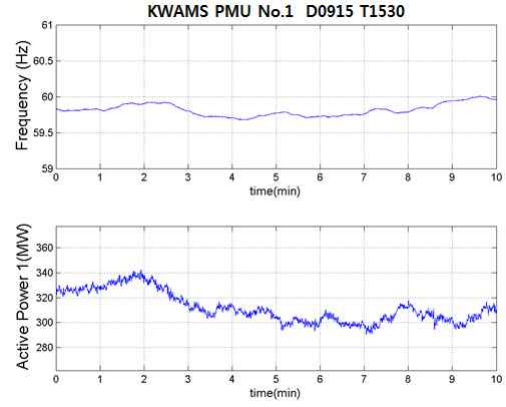
(a) at 10:30



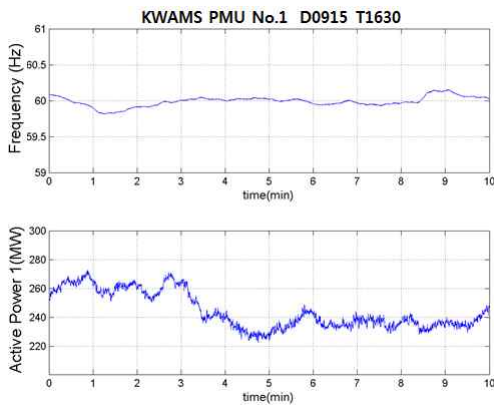
(b) at 11:20



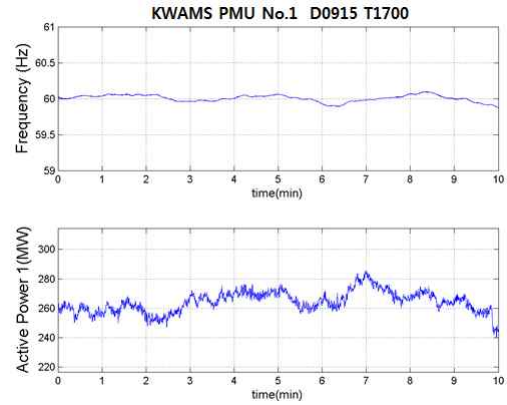
(c) at 12:00



(d) at 15:30



(e) at 16:30



(f) at 17:00

그림 2. 10분간 주파수와 유효전력
Fig. 2. Power and frequency for 10 Mins

변전소에서 측정된 선로조류의 PSD를 나타내고 있다. 이 시간은 예비력 부족이 발생하지 않은 정상적인 계통운용 상황으로 PSD가 작다.

그림 3 (b)는 오전 11시 20분부터 10분 동안 선로조류의 PSD를 나타내고 있는데, 주파수 0.683Hz 스펙트럼이 매우 큰 값을 가지고 있다. 이와 같이 형태의 스펙트럼은 11시 20분부터 11시 45까지 지속으로 나타났다. 이 시간은 전력조류가 가장 크게 동요한 시간대로 정상상태에서 나타나지 않은 하나의 지배적인 주파수가 계통 동적특성을 지배하고 있으므로 한전계통의 지배적 진동모드로 생각할 수 있다. 주파수 0.68Hz는 전형적인 광역모드 주파수 대역인데, 다른 지역 발전기 데이터가 없어 저주파진동의 정확한 원인을 판단하기는 어렵다. 이와 같은 지배적인 모드가 발생하는 것은 발전기 동요에 기인하므로 부적절한 발전기 투입으로 다른 발전기의 동요를 유발했을 가능성이 높다. 광역정전 측면에서 이와 같은 광역모드의 동요는 제어할 수 없는 계통 붕괴를 야기할 수 있으므로 매우 중요하다. 순환정전과 같이 계통주파수 저하 정도에 따라서 긴급부하조정을 시행할 경우, 부하차단은 이와 같은 동요모드가 활성화 되지 않게 실행해야 한다.

그림 3 (c)는 오전 12시부터 10분 동안 선로조류의 PSD를 나타내고 있다. 앞에서 기술한 주파수 0.68Hz 모드가 0.55Hz 근처 주파수 보다 작게 나타남을 알 수 있다. 점심시간대의 부하감소로 인하여 광역진동이 점점 사라지고 있음을 알 수 있다.

그림 3 (d)는 긴급부하조정을 시행한 후인 오후 15시 30분부터 15시 40분 사이의 선로조류 PSD를 나타내고 있다. 주파수 0.50Hz 모드가 가장 큰 스펙트럼을 가지고 있다. 이 시간대에는 일부 양수 발전이 정지되고 긴급부하조정을 실행한 시간이다. 계통주파수가 59.8Hz이하에서 급변동하지만 광역진동모드는 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 이것은 15시 27분 실행했던 긴급부하차단이 광역진동모드를 활성화하지 않음을 알 수 있다.

그림 3 (e)는 긴급부하조정을 모두 시행하고 대부분의 양수발전이 정지한 오후 16시 30분부터 10분 동안의 선로조류 PSD를 나타내고 있다. 더 이상 부하가

증가하지 않는 상태이고, 예비력을 확보한 시점이라 정상상태와 같은 스펙트럼 형태를 나타내고 있다.

그림 3 (f)는 오후 17시 선로조류 PSD를 나타내고 있다. 이 시간은 긴급부하조정 해제 단계로 주파수 0.55Hz 부근의 스펙트럼이 크게 발생하고 있다. 이로부터 부하차단 과정뿐만 아니라 부하차단 해제 즉 부하투입 과정도 적절하게 수행되어야 함을 알 수 있다.

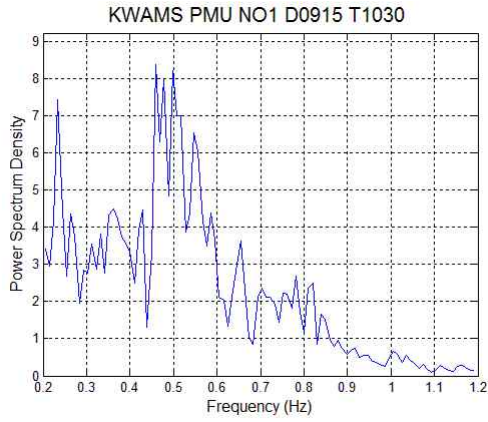
4.4 스펙트럴 해석 결과

앞에서 한전계통에 설치된 synchrophasor에서 취득한 데이터의 스펙트럴 해석을 기술하였다. 예비력이 400만kW 이하로 감소한 11시 이후, 주파수 0.68Hz의 PSD가 매우 큰 값을 가지고 있다(그림 3 (b)). 이와 같은 동요는 11시 20분부터 25분 동안 지속되었는데, 데이터 부족으로 동요의 주요 원인과 광역진동 여부는 판단하기 어렵다. 또한 긴급부하차단 이후, 부하를 재투입 단계에서도 진동모드가 발생함을 알 수 있다(그림 3 (f)).

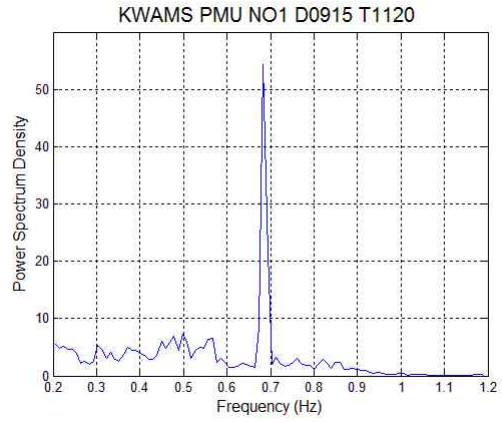
순환정전 당일 오전 10시 30분부터 긴급부하조정과 해제 단계를 포함한 오후 18시까지의 데이터에 대한 스펙트럴 분석한 결과, 전력예비력 부족으로 인한 계통주파수 변동뿐만 아니라 저주파수 동요와 관련된 동적특성도 민감하게 변화함을 알 수 있다. 결과적으로 순환정전은 오전 11시 20분에 발생하여 25분 정도 지속한 광역진동과 오후 14시 이후부터 오후 16시 15분까지 지속된 매우 큰 계통주파수 변동을 극복하고 광역정전으로 확대되지 않게 안정적으로 계통을 운용한 것은 향후 예비력 부족에 대한 좋은 대응 방안이 될 것이다.

한전계통의 예비력부족으로 발생한 순환정전에서 계통주파수는 광역계통의 안정운용을 판단하는 기본 지표로 사용되었다. 그러나 스펙트럴 해석 결과에서 광역계통의 동요문제와 함께 긴급부하조정 실행 및 해제 단계에서 저주파수 동요 문제도 고려할 필요성이 있다. 즉 순환정전 시 긴급부하차단과 재투입 조치로 중요 모드를 활성화 시키지 않도록 지역별 균등한 부하차단과 재투입이 필요하다.

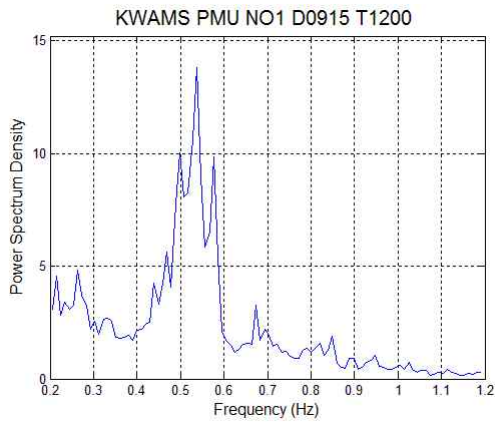
Synchrophasor를 이용한 한전계통의 겨주파 진동 스펙트럼 해석



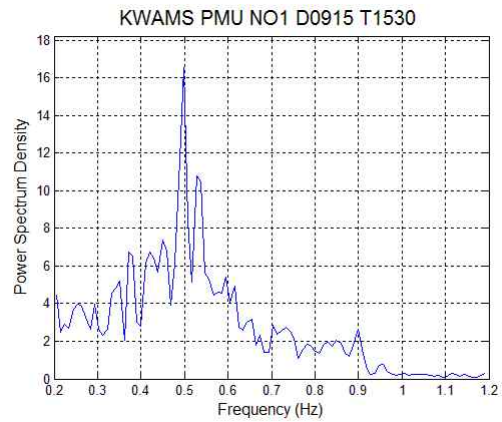
(a) at 10:30



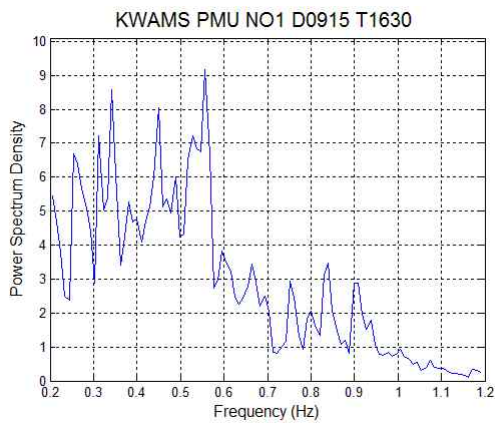
(b) at 11:20



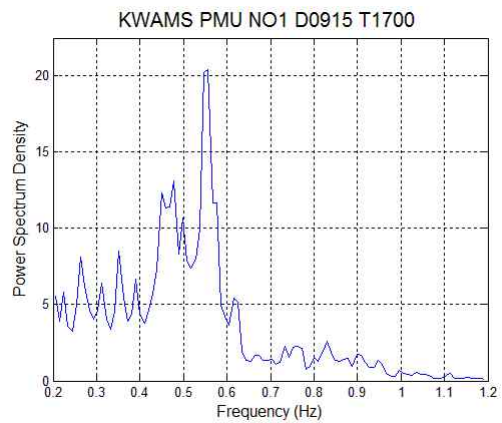
(c) at 12:00



(d) at 15:30



(e) at 16:30



(f) at 17:00

그림 3. 유효전력의 전력스펙트럼
Fig. 3. Power spectrum of active power

스펙트럴 해석 결과, 순환정전에서 긴급부하차단과 재투입으로 한전계통의 진동 모드가 활성화 되지는 않았다. 만일 발전기 탈락이나 중요 선로고장 또는 특정지역부하만 집중적으로 차단하거나 투입하여 중요 진동모드가 활성화되면, 이로 인하여 광역불안정이 발생하여 제어 불가능한 광역정전으로 확대될 수 있다. 취득한 실 데이터에서 광역진동모드가 검출되었다는 것은 현재 한전계통의 각 발전소에 설치되어 운전되고 있는 PSS(power system stabilizer)가 주로 지역모드 제동특성 향상에 맞추어 설계되어 있으므로 광역진동모드를 제어할 수 없음을 의미한다.

또한 긴급부하조정에 대한 다양한 시나리오를 만들 필요성이 있다. 순환정전에서 긴급부하조정을 시행한 오후 15:11분 이후 4회의 급격한 주파수 변동이 발생하였고, 59.5Hz 이하로 3회 주파수가 강하되었다. 이것은 양수발전 정지가 예상되는 시점에서 긴급부하조정을 통해서 충분한 예비력이 확보되지 않았기 때문에 발생한 것이다. 만일 긴급부하조정 초기단계에서 보다 많은 예비력을 확보하기 위해서 긴급부하조정량을 단계별 일정하게 100만kW씩 조정하는 것이 아니라 초기에 보다 많은 부하조정을 수행하면 계통주파수 제어가 용이하고 주파수 급변동을 막을 수 있어 보다 안정하게 계통운용을 할 수 있다. 긴급부하조정량에 대한 것은 추가적인 연구가 필요하므로 이 논문에서는 기술하지 않는다.

4.5 발전기 탈락 고장과 비교

이 절에서는 한전계통에서 발생한 발전기 탈락 고장 시 스펙트럼과 순환정전 시 스펙트럼의 비교를 기술한다. 서해안지역 500MW급 발전기가 탈락한 고장이 발생하였을 때, 각 발전소에 설치된 synchrophasor에서 취득한 60분 데이터에 대해서 PSD(power spectral density)를 계산하고[25], 이를 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

발전소와 달리 변전소의 유효전력은 연결된 모선에 따라 급변하는 형태를 나타내고 있다. 그림 4는 동서울 변전소에서 취득한 데이터의 PSD이고, 그림 5는 아산변전소에서 취득한 데이터의 PSD이다. 모든 변

전소에서 유효전력들은 위상 동기 된 상태에서 취득한 데이터이고, 이를 이용한 스펙트럴 해석은 같은 시간에 대한 스펙트럼이다. 발전기 탈락 후 작은 동요현상이 발생하였으나 한전계통의 제동특성이 양호하여 심각한 저주파 진동은 발생하지 않았다.

그림 4는 동서울 변전소에서 40분 동안 취득한 데이터에서 계산한 PSD 결과를 나타낸 것이다. 샘플과 샘플링 비율은 각각 1,024개와 1/10초로 설정하고, PSD를 계산한 것으로 중요 모드들은 주파수 0.5Hz~0.7Hz 사이에 존재하고 있다.

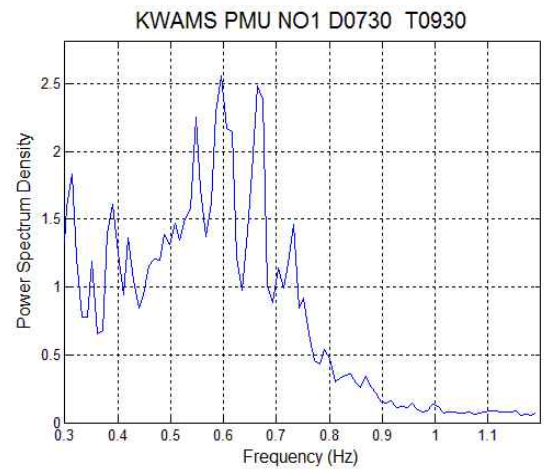


그림 4. 동서울변전소 전력스펙트럼밀도
Fig. 4. PSD of Dongseoul substation

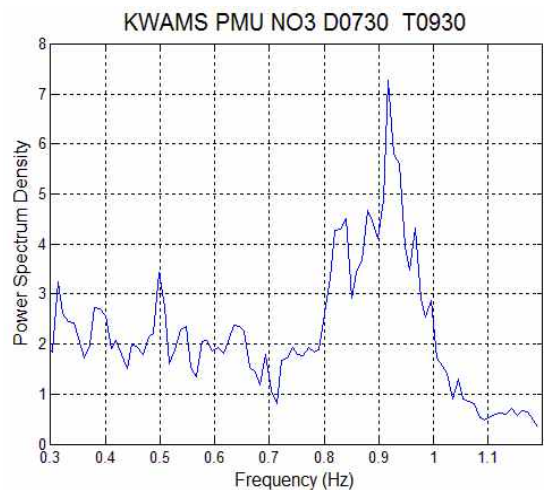


그림 5. 아산변전소 전력스펙트럼밀도
Fig. 5. PSD of Asan substation

그림 5는 아산변전소에서 취득한 데이터에서 PSD를 계산한 결과를 나타내고 있다. 샘플링은 동서울 변전소의 경우와 동일하게 적용하였다. 동서울 변전소와 달리 아산변전소에서 가장 중요한 모드로 0.92Hz가 추정되었다. 이것은 아산변전소가 보령지역과 직접 연결되어 있으므로 보령지역 발전기들의 지역모드가 고장 후에 나타나고 있음을 의미한다. 즉 0.92Hz 모드는 보령지역 발전기들의 지역 모드나 서해안 지역발전기들의 모드로 생각할 수 있다. 그러므로 아산변전소의 결과와 동서울 변전소의 결과를 비교해보면 보령지역 500MW 발전기 탈락 고장으로 동서울 변전소의 동적특성은 크게 변화하지 않았음을 알 수 있다.

순환정전시 11시 20분경에 발생한 0.68Hz의 저주파 진동을 포함하여 대부분 주파수 0.5Hz~0.7Hz 사이에 스펙트럼이 큰 값을 가지고 있다. 그리고 보령지역 500MW급 발전기 탈락 고장에서도 유사한 형태를 나타내고 있어 한전계통에 잠재적인 광역모드가 0.5Hz~0.7Hz 사이에 존재함을 알 수 있다. 동적특성 파악을 위한 보다 정확한 진동모드는 발전소에서 취득한 데이터로부터 얻을 수 있다.

이 논문에서 적용한 synchrophasor 데이터는 모두 변전소에서 취득한 데이터들이다. 따라서 발전기의 고유한 특성인 저주파수 동요와 광역 계통의 동적특성을 관찰하기에 적당한 데이터는 아니다. 그러나 광역계통의 진동은 전체 계통에 나타나므로 변전소에서 취득한 데이터에서도 잠재적인 광역진동을 확인하였다.

결과적으로 현재 한전 계통은 제동특성이 매우 양호하여 광역진동은 크게 문제가 되지 않는다. 이와 같은 특성은 순환정전에서 긴급부하차단을 수행하는 과정에서 알 수 있다. 그러나 한전계통에 잠재되어 있는 저주파 진동은 특정한 상태에서 활성화 될 수 있기 때문에 주요한 감시 대상이 될 수 있다. 이러한 측면에서 이 논문에서 추정한 한전 계통의 주요 광역모드는 한전 계통에 설치된 synchrophasor를 이용한 최초의 광역모드 추정으로 매우 의미 있는 결과로 생각된다.

5. 결 론

이 논문에서는 한전계통에 설치된 synchrophasor에서 취득한 데이터를 이용하여 광역순환정전에 대한 스펙트럴 해석을 기술하였다. 계측한 신호의 전력스펙트럼 분석을 통하여 한전계통의 중요 모드와 동적특성을 해석하였다. 그리고 보령지역의 발전기 탈락 고장시 synchrophasor에서 취득한 데이터와 비교를 통하여 잠재적인 한전계통의 모드를 검출하였다.

순환정전과 같이 예비력이 부족한 경우, 계통을 안정하게 운용하고, 광역계통 붕괴를 막기 위하여 순차적인 부하차단과 재투입을 시행하는데, 한전계통에 잠재해 있는 중요 진동모드들이 활성화 되지 않게 시행해야 한다. 순환정전에 대한 스펙트럴 분석은 향후 유사한 순환정전시 안정적인 계통운용에 참고 자료가 될 수 있다.

References

- [1] IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Std C37.118-2005, 2005.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] K. S. Shim, "Detection of low frequency oscillation in KEPCO system and WAMAC technology," KIEE 2011 Summer Meeting, July 2011.

[9] S. T. Kim, "Technology of Smart WAMAC infra construction," KIEE 2011 Summer Meeting, July 2011.

[10] K. S. Shim, S. T. Kim, H. K. Nam, J. H. Choi, B. H. Yoon, "Analysis of low frequency oscillation based on K-WAMS in 9.15 rolling blackout," KIEE 2012 Summer Meeting, pp.15-17, July 2012.

[11] 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.

[12] EPRI, Phase II: frequency domain analysis of low frequency analysis oscillations in large power system, Vol.2, Final Report EPRI EL-2348, 1982.

[13] KW-PSS. Available at:<http://www.kepri.re.kr/kwpss/index.jsp>.

[14] SSAT. Available at:http://www.dsatools.com/html/prod_ssat.php.

[15] 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.

[16] 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.

[17] B. Mohammadi-Ivatloo, M. Shiroei, M. Pamiani, "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.

[18] L. Ljung, System identification, theory for the user, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1999.

[19] K. S. Shim, H. K. Nam, "A fast parameter estimation of time series data using discrete Fourier transform," Trans. of KIEE, Vol.55, No.7, pp.265-272, July 2006.

[20] P. Stoica, R. Moses, Spectral analysis of signals, Prentice Hall Inc., New Jersey, 2004.

[21] P. A. Lynn, W. Fuerst, Introductory digital signal processing, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.

[22] Ministry of Economy, Trade and Industry, "Situation of rolling blackout implementation," 2011.

[23] Mack Grady, "The ERCOT rolling blackout," Texas Synchro-Phasor Network Special Report, Feb. 2011.

[24] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, "Power system dynamics: stability and control," John Wiley & Sons, Inc., UK, 2008.

[25] 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.

◇ 저자소개 ◇



심관식 (沈冠植)

1991년 전남대학교 전기공학과 졸업.
1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1997~2004년 서남대학교 전기공학과 조교수. 2004~2010년 전남대학교 공업 기술연구소 특별연구원.



최준호 (崔峻豪)

1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업.
1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
현재 전남대학교 전기공학과 부교수.



김상태 (金尙泰)

1996년 명지대학교 전기공학과 졸업.
1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사).
2003년 동대학원 전기공학과 졸업(박사).
현재 한진KDN(주) 전력IT연구원 차장.