

Analysis of the Harmonic Resonance in Primary Restorative Transmission Systems Using EMTDC

李興載[†] · 李垆燮^{*} · 朴誠民^{*} · 宋寅俊^{**} · 李南鎬^{***} · 裴周千[§] · 黃奉桓[§]
 (H.J. Lee · K.S. Lee · S.M. Park · I.J. Song · N.H. Lee · J.C. Bai · B.W. Whang)

Abstract - Power system restoration following a massive or complete blackout starts with energizing of primary restorative transmission lines. During this primary restoration, unexpected overvoltage may happen due to nonlinear interaction between the unloaded transformer and the transmission system. This is known as the harmonic resonance phenomenon that may cause burning out of transformer or other devices. By now the harmonic resonance is reported in the extra high voltage system. This paper reports the detection of the resonance in Korean power system. Basic analysis and simulation of the harmonic overvoltage is presented using EMTDC.

Key Words : Harmonic Resonance, Overvoltage, Transformer Saturation, EMTDC

1. 서 론

전력계통은 국가의 기간산업으로 국토의 전반에 광범위하게 설치되어 있으므로, 천재지변 등의 자연재해와 운영자의 오조작 및 설비의 노후화 등 매우 다양한 사고 요인을 내포하고 있으며, 최근 미국과 유럽등지에서 빈발하고 있는 여러 사고 사례에서 알 수 있듯이 전력계통에서의 사고 발생시 경제적·사회적 피해는 가히 엄청나다고 할 수 있다. 해외의 경우 지난 20여년전부터 이에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있으나 국내의 경우 계통의 구조가 건설하고, 비교적 높은 안정도를 유지하고 있으므로 계통 사고에 대한 연구는 취약한 실정이다.

광역정전 발생 후 필히 수행되어야 할 복구과정에서는 고려해야 할 많은 요소들이 존재한다[1-3]. 그 중에서 과전압은 복구 과정 전반에 걸쳐 계통의 안정성 문제 및 차단기 재트립 유발의 가능성을 내포하고 있으며, 이로 인하여 복구 시간의 지연 등 심각한 문제를 초래할 수 있다.

복구 과정에서 발생할 수 있는 과전압에 대한 현재까지의 연구를 요약하면 다음과 같이 대별할 수 있다[5].

- 무부하 송전선로 가압시 지속적인 정상상태 과전압
- 계통설비 스위칭 등에 의해 발생하는 서지전압

· 변압기의 비선형 특성에 의해 발생하는 고조파 공진에 의한 과전압

무부하 송전선로 가압시 지속적으로 발생하는 정상상태 과전압은 페란티 효과가 그 원인으로, 이것은 저전압으로 송전선로를 가압함으로써 해결할 수 있다. 과도 상태 과전압은 복구 단계뿐만 아니라, 정상상태 운전 중 설비의 투입/차단 과정에서 나타나는 일시적인 현상으로 예측이 가능하며, 이에 대한 많은 해결방안이 발표되었다.

그러나 고조파 공진에 의한 과전압은 그 발생사례도 적을 뿐만 아니라 계통의 전압과 및 선로 및 변압기의 비선형 특성에 기인하는 바, 이러한 공진의 발생에 대한 연역적 해석은 불가능하며, 공진의 발생시 이를 억제하기 위한 방안의 도출 역시 무수한 시물레이션을 통한 귀납적 방법으로 수행되어야 하므로 이에 대한 연구도 매우 적은 형편이다[4-5].

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 국내 시송전계통 복구에 대한 모의를 수행하였다. 모의 과정에서 고조파 과전압 발생 가능성을 확인하였다. 또한, 현재까지 알려진 해외의 연구 결과를 바탕으로 고조파 과전압에 대한 해결방안을 모색하였다.

2. 복구과정에서의 고조파 과전압

국내의 전정전 및 광역정전에 대한 복구 계획은 구미 선진국들과 마찬가지로 자체기동 발전기와 우선공급 발전소를 중심으로, 제주지역을 포함한 전국을 7개의 시송전계통으로 나누어 각각의 계통을 복구한 후, 각 계통간 연계를 통해 복구를 수행하는 병렬적 복구방식을 취하고 있으며, 이는 전세계적으로 대동소이하다[1-4]. 그림 1은 국내 시송전계통 중 일부인 경인북부 지역 시송전계통으로, 청평수력 발전소

[†] 교신저자, 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 E-mail ; hjlee@mail.kw.ac.kr

^{*} 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 博士課程

^{**} 正會員 : 韓電 電力研究院

^{***} 正會員 : LG產電 電力研究所

[§] 正會員 : 韓國電力去來所

接受日字 : 2004年 11月 30日

最終完了 : 2005年 3月 8日

와 부천복합 발전소가 자체기동 발전소이며, 서인천복합 발전소가 우선공급 발전소로 지정된 주선로와 예비선로를 나타낸다. 그림 2는 경인북부 지역의 시송전계통 중 청평수력 발전소에서 서인천복합 발전소까지 황색차단기를 통해 연결된 주선로에 대해 EMTDC 모의를 위한 계통구성으로 자체기동 발전소인 청평수력 발전기 3기와 시송전선로 및 계통 안정을 위해 덕소변전소에서 부하 투입(20MVA)을 모의할 수 있도록 구성하였으며, 표 1은 복구 절차를 기반으로 작성한 경인북부 시송전계통 주선로에 대한 EMTDC 모의 시나리오이다.

표 2. 모의 시나리오
Table 2. Simulation scenario

시간 (sec)	내용	비고
0.0	발전기 3기 동시기동, #1발전기 스텝업변압기 가압 및 자체부하 전력공급	자체부하 : 발전기 정격의 5%, pf=0.98
5.0	#1발전기 선로 가압	
7.0	덕소변전소 변압기 가압	
10.0	덕소변전소 부하투입	2MVA(pf=0.98)
12.5	#2발전기 계통병입	
15.5	#3발전기 계통병입	
20.0	덕소변전소 부하투입	8MVA(pf=0.98)
25.0	덕소변전소 부하투입	10MVA(pf=0.98)
30.0	선로 가압	
40.0	동특성 모의 종료	

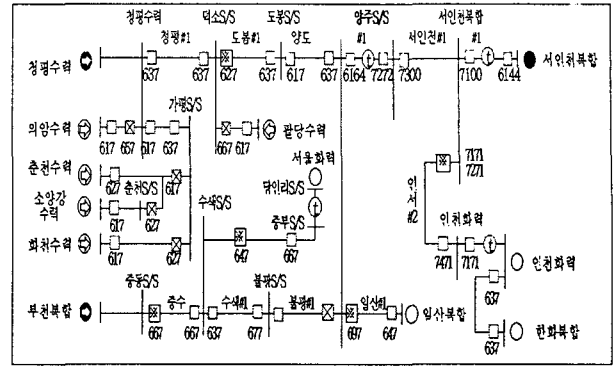


그림 1. 경인북부지역 시송전계통도
Fig. 1. The primary T/L at the Northern Kyonggi

2.1 고조파 공진의 발생

그림 3과 그림 4는 표 1의 시나리오에 대한 동특성 모의 결과로 덕소변전소에서 부하투입을 위해 무부하 상태의 변압기를 가압한 이후의 결과를 나타낸다. 모의 결과에서 표시된 바와 같이 덕소변전소에서 부하투입을 위하여 무부하 상태의 변압기를 가압했을 때, 변압기 1차측의 상전압(A상)은 불과 3 cycle 이내에 최대값이 300 [kV]를 초과하는 것이 검출되었고, EMTDC 프로그램은 7.2 초 이후 더 이상의 결과를 표시하지 않았다. (부동소수점 오

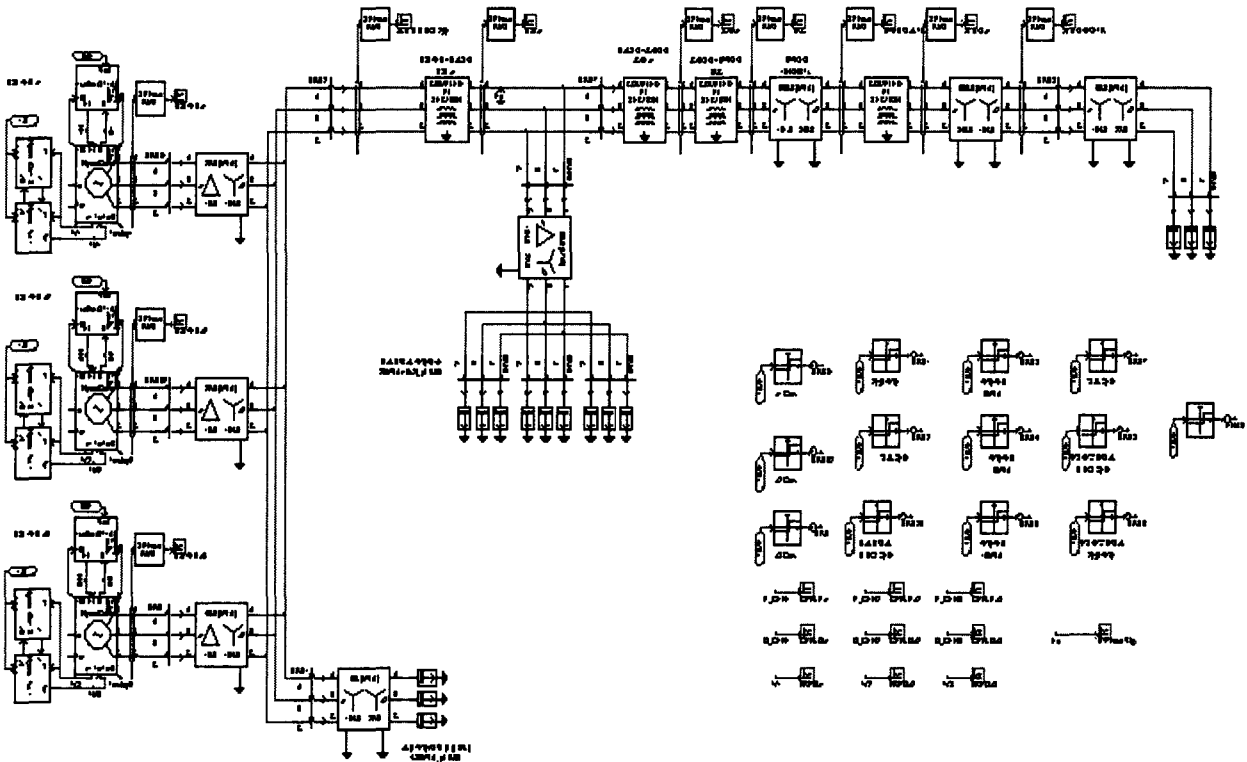


그림 2. 경인북부지역 시송전 모의 계통도
Fig. 2. The Simulation configuration of the primary T/L at the Northern Kyonggi

버플로우에 기인한 것으로 추정됨) 또한 청평수력 발전소의 단자전압(3상 RMS 전압) 역시 그림 4에서와 같이 불과 0.2 초 사이에 10^7 [pu] 이상으로 급격히 상승하였다.

따라서 이러한 과전압이 자기여자 현상에 의한 것인지 또는 다른 원인에 의한 것인지를 확인하기 위해 정특성 해석을 수행하였고[6], 그 결과 이러한 현상은 발전기의 자기여자에 의한 것이 아님을 확인하였다.

그림 3의 덕소변전소 A상 전압에 대한 분석에서 전압의 주파수는 정상주파수의 약 3.7배 정도이며, 제 3고조파 성분이 강한 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 캐나다와 EPRI에서 보고된 바 있는 고주파 공진현상에 의한 것임으로 추정되는 바, 해외의 연구 결과를 바탕으로 이를 확인하기 위하여 다음과 같이 검토를 수행하였다.

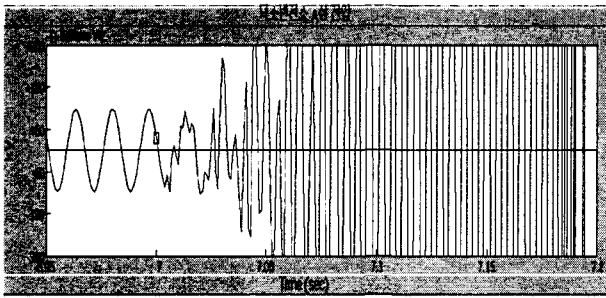


그림 3. 덕소변전소 A상 전압
Fig. 3. A-Phase voltage of Deokso S/S

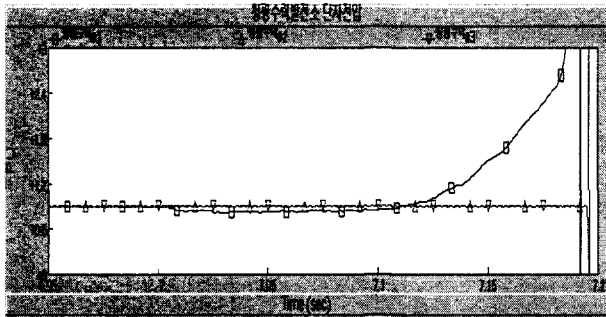


그림 4. 청평수력발전소 단자전압
Fig. 4. Terminal voltage of Cheongpyeong H/P

2.2 고조파 공진의 확인 및 해결방안 모의

시송전계통 가압시 발생할 것으로 예상되는 고조파 공진을 억제하기 위한 방안으로는 EPRI[5]에서 제시한 바와 같이 댐핑용 부하를 변압기 가압전에 인가하는 것이지만 본 연구에서는 우선 상술한 바와 같이 과전압의 3고조파 성분이 크다는 사실과, 델타결선의 순환전류에 의한 상쇄효과를 이용하기 위하여 다음과 같이 두 가지 경우를 검토하였다.

- 변압기의 1차측 결선을 Δ 로 변경
- 적당량의 부하가 투입된 변압기를 가압

2.1.1 변압기 결선을 Δ 로 변경

고조파 공진의 억제효과를 검증하기 위하여 덕소변전소 변압기의 1차측을 Δ 결선으로 변경한 후, 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2는 모의 시나리오이며, 그림 5와 그림 6은 모의 결과를 나타낸다. 모의 결과를 살펴보면, 변압기의 Δ 결선 후, 고조파 공진이 발생하지 않았음을 알 수 있고, 또한 사례연구 결과를 여기에 수록하지는 않았지만, EMTDC에서 제공되는 선형 변압기 모형인 UMEC(Unified Magnetic Equivalent Circuit)모형을 사용할 경우에도 이러한 현상이 발생하지 않는다. 따라서 본 사례에서 변압기 가압시의 과전압은 고조파 공진에 의한 것임을 확인할 수 있었다. 그러나 변압기 결선의 변경은 고조파 현상의 파악을 위한 방법일 뿐, 실제로 광역정전 사고 발생 확률은 매우 미약한 상황에서, 단지 계통의 시충전만을 위하여 특정 변전소의 변압기를 Δ 결선으로 변경하는 것은 또 다른 복잡한 문제를 유발하므로 현실적으로 적합하지 않은 방법이다.

표 2. 모의 시나리오
Table 2. Simulation scenario

시간 (sec)	내 용	비 고
0.0	발전기 3기 동시가동, #1발전기 스텝업변압기 가압 및 자체부하 전력공급	자체부하 : 발전기 정격의 5%, pf=0.98
5.0	#1발전기 선로 가압	
7.0	덕소변전소 변압기 가압	
10.0	덕소변전소 부하투입	2MVA(pf=0.98)
12.5	#2발전기 계통병입	
15.5	#3발전기 계통병입	
20.0	덕소변전소 부하투입	8MVA(pf=0.98)
25.0	덕소변전소 부하투입	10MVA(pf=0.98)
30.0	선로 가압	
40.0	동특성 모의 종료	

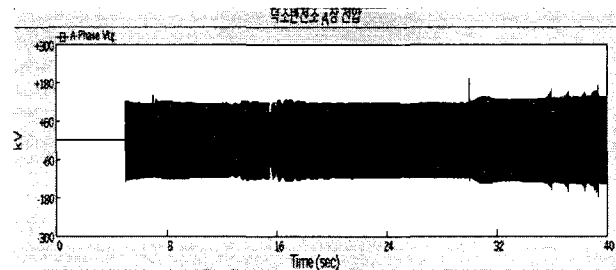


그림 5. 덕소변전소 A상 전압 (덕소변전소 주변압기의 1차측 Δ 결선)
Fig. 5. A-Phase voltage of Deokso S/S with delta connection of primary side of MTR.

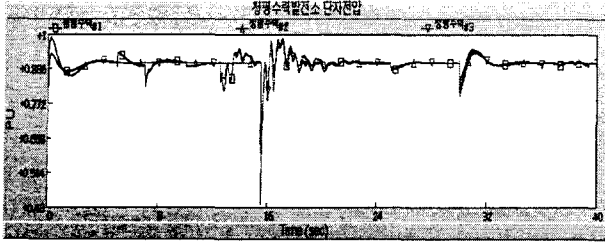


그림 6. 청평수력발전소 단자전압 (덕소변전소 주변압기의 1차측 △결선)

Fig. 6. Terminal voltage of Cheongpyeong H/P with delta connection of primary side of MTR in Deokso S/S.

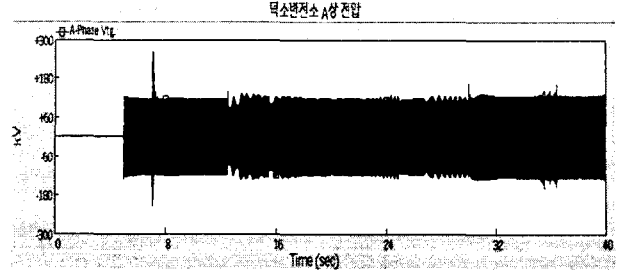


그림 7. 덕소변전소 A상 전압

Fig. 7. A-Phase voltage of Deokso S/S

2.1.2 부하가 연결된 변압기 가압

EPR의 Power System Restoration Working Group의 보고서에 따르면 마일당 약 3[MW]의 부하가 미리 투입된 변압기를 가압함으로써 고조파 공진의 영향을 감소시킬 것을 권장하고 있으므로, 본 연구에서는 덕소변전소에서 완충용 부하의 투입사례에 대한 모의를 수행하였다.

표 3은 미리 부하가 투입된 변압기 가압에 대한 모의 시나리오이며, 그림 7과 그림 8은 이에 대한 모의 결과이다.

ERPI 보고서의 권고안으로 모의한다면, 비록 정격전압이 캐나다와는 큰 차이가 있지만, 청평#1 선로의 길이가 약 15마일(24.282km)에 해당되므로 덕소변전소 변압기에 45[MW] 정도의 부하를 투입해야겠지만, 청평수력 발전기의 용량이 적으므로 본 논문에서는 2[MVA]를 투입한 경우를 소개하였다. 모의 결과를 살펴보면, 덕소변전소의 변압기 기압시(7sec)에 일시적인 과전압이 발생하였지만 전체적으로 안정적인 결과를 보였다. 이는 2[MVA] 정도의 부하만 미리 투입하여도 고조파 과전압의 발생을 억제할 수 있음을 보여준다. 그림 6과 8의 저전압은 발전기의 동기투입 기능을 EMTDC상에서 모의할 수 없기 때문에 나타난 것으로 실제 상황에서는 이러한 저전압이 발생하지 않는다.

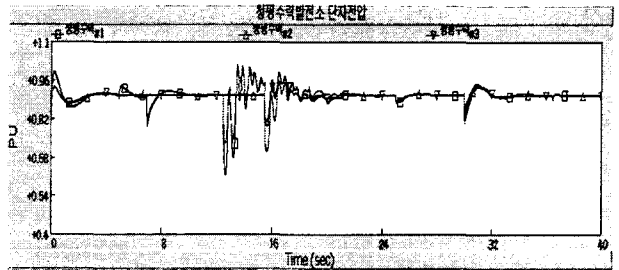


그림 8. 청평수력발전소 단자전압

Fig. 8. Terminal voltage of Cheongpyeong H/P

3. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시송전계통의 복구에 대한 모의를 수행하였다. 모의 과정에서 부하 투입을 위해 무부하 상태의 변압기 가압 순간에 고조파 과전압의 발생 가능성을 확인하였다. 과전압의 제 3고조파 억제에 효과적인 변압기 결선을 변경하는 방법과 변압기 가압 이전에 일정량의 부하를 미리 투입하는 방법에 대해 모의를 수행하였으며, 고조파 과전압의 해결 방안을 제시하였다.

그러나 우리나라는 구미선전국과 마찬가지로 정전 복구시 모든 차단기 개방전략(All-open strategy)을 채용하고 있으며, 완충부하의 투입은 운용자들에게 혼란을 유발 할 수 있으므로 좀 더 효율적인 방안이 연구되어야 할 것이다.

결론적으로 본 연구에서는 해외에서도 발생사례가 적은 고조파 공진현상이 우리나라 일부 계통에서 발생할 수 있음을 발견하였고, 앞으로 이에 대한 연구와 함께 우리나라 광역정전 및 전정전 복구계획 수립시 정밀한 사전검토가 필요함을 확인하였다.

표 3. 모의 시나리오

Table 3. Simulation scenario

시간 (sec)	내용	비고
0.0	발전기 3기 동시기동, #1발전기 스텝업변압기 가압 및 자체 부하 전력공급	자체부하 : 발전기 정격의 5%, pf=0.98
0.0	덕소변전소 무가압상태에서 부하투입	2MVA(pf=0.98)
5.0	#1발전기 선로 가압	
7.0	덕소변전소 변압기 가압	
12.5	#2발전기 계통병입	
15.5	#3발전기 계통병입	
20.0	덕소변전소 부하투입	8MVA(pf=0.98)
25.0	덕소변전소 부하투입	10MVA(pf=0.98)
30.0	선로 가압	
40.0	동특성 모의 종료	

감사의 글

본 연구는 한국전력거래소의 지원에 의하여 한국 전력연구원과 기초전력공학공동연구소 공동으로 수행되었으며, 2003년도 광운대학교 연구년에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] M. Adibi, P. Clelland, L. Fink, H. Happ, R. Kafka, J. Raine, D. Scheurer, F. Trefny, "Power System Restoration - A Task Force Report" IEEE Trans. on PWRS, Vol. 2, No. 2, pp. 271-277, May 1987.
- [2] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration Issues", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp. 19-24, April 1991.
- [3] M. M. Adibi et al., "Special Consideration in Power System Restoration The Second Working Group Report", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 9, No. 1, pp. 15-21, February 1994.
- [4] G. Morin, "Service Restoration Following a Major Failure on the Hydro-Quebec Power System", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 2, No. 2, pp. 454-462, April 1987
- [5] M. M. Adibi, R. W. Alexander, "Overvoltage Control During Restoration (Power System Restoration Working Group Report)", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 7, No. 4, pp. 1464-1470, November 1992.
- [6] 이흥재, 박성민, 이경섭, 배주천, 황봉환, 송인준, 이남호 "시송전 계통에서 자기여자 현상의 새로운 알고리즘 개발", 대한전기학회 논문집 A권, 2005. 3. 게재대기

저 자 소 개



이 흥 재(李興載)

1958년 1월 28일 생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공학박). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수
 Tel : 02-940-5147
 E-mail : hjlee@mail.kw.ac.kr



이 경 섭(李峯燮)

1974년 7월 5일 생. 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기 공학과 박사과정
 Tel : 02-940-5147
 E-mail : kyeong@explore.kw.ac.kr



박 성 민(朴誠民)

1976년 2월 13일 생. 1999년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 02-940-5147
 E-mail : smpark@explore.kw.ac.kr



송 인 준(宋寅俊)

1961년 2월 7일 생. 1982년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전자계산기공학과(공학박). 현재 한전 전력연구원 선임연구원
 Tel : 042-865-5832
 E-mail : injun@kepeco.co.kr



이 남 호(李南鎬)

1973년 7월 26일 생. 1998년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~2004년 한전 전력연구원 위촉연구원. 현재 LG 산전 전력연구소 주임연구원
 Tel : 043-272-6553
 E-mail : nam100@lgis.com



배 주 천(裵周千)

1958년 11월 23일 생. 1981년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전력거래소 계통계획팀장
 Tel : 02-3456-6720
 E-mail : jcbae@kpx.or.kr



황 봉 환(黃奉桓)

1966년 11월 28일 생. 1994년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 미국 유니온 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력거래소 계통 운영처 과장
 Tel : 02-3456-6763
 E-mail : bhhwang@kpx.or.kr