

The Study on Autonomous State Estimator for Smart Grid

박종찬[†] · 이세인^{*}
(Jong-Chan Park · Se-In Lee)

Abstract - In this study, authors have proposed the autonomous state estimation which has been composed with IEC61850, GPS time synchronization and objective model design concept. The proposed method is able to supervise/correct measurement and communication error from SCADA. The major advantages of the proposed autonomous state estimation are that it is possible to evaluate integrity of data measured and transferred from SCADA, to reduce human intervention and to expense national-size applications such as EMS (Energy Management System), WAMS (Wide Area Monitoring System) or WAPS (Wide Area Protection System). This study addresses the issues related to the operation of the smart grid and proposes a new automated approach to achieve this goal. Through applying the proposed system to IEEE 14-bus test electric system, we prove the possibility of the proposed idea.

Key Words : Autonomous State Estimation, IEC61850, IED (Intelligent Electrical Device)

1. 서론

스마트그리드는 기존 전력망에 IT 기술을 접목해 전력 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환함으로써 에너지 효율을 최적화하고자 하는 차세대 전력망을 말한다. 기존 전력망에 신재생에너지를 중심으로 하는 다양한 분산전원이 도입되면 전력계통의 규모에 따라 분산적이고 독립적으로 운영할 수 있는 유연한 형태를 갖추게 되며, 각 계통에 센서, 미터들을 장착하여 소비자의 요구에 실시간으로 반응하는 지능화된 기능을 할 수 있게 된다. 또한 신재생에너지를 포함한 분산전원을 스마트그리드에 적용함으로써 현재의 중앙 집중형 방식의 단방향인 전력 계통의 비효율성을 극복하기 위한 노력이 진행 중에 있다.

기존의 전력망은 자기 진단이 어렵고, 고장 및 정전 발생 가능성이 상존하며, 사고시 수동 복구를 해야 하는 반면, 스마트그리드는 자기 진단이 가능하고, 시스템의 보호와 단독 운전이 가능하며, 사고시 반자동으로 복구하여 자기 치유를 할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 이러한 스마트그리드의 핵심기술 중에 하나가 에너지관리시스템이다. 에너지관리시스템의 중요기술에는 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition), 발전계획 수립, 전력계통해석, 급전계획 수립 등으로 나눌 수 있다.[1,2]

SCADA 운영 및 개발기술은 국내의 탁월한 IT 기술을 기반으로 충분히 개발이 가능하나, 발전계획 및 전력계통해석 분야는 학문적 기초 연구가 수반되어야 하기 때문에 외국 선진국(미국, 유럽 등)과 비교하면 다소 미진한 단계이다.

전력계통해석 분야의 가장 기초가 되는 기능이 상태관측

기능이다. 상태관측은 변전소에서 계측된 정보의 오류가 있는지를 판단하고 오류가 있으면 정상적인 값으로 보정하는 역할까지를 수행한다. 기존의 중앙집중식 상태관측방식은 정확도가 낮고 비효율적이기 때문에 네트워크 기술을 이용한 자율형 상태관측의 필요성이 대두되고 있다. 기존 방식에서는 전력계통 모델의 상태변수인 계측정보를 넓은 전력계통에서 측정해야하기 때문에 정보간의 시간차이로 인하여 모델의 정확도가 떨어지는 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 GPS(Global Positioning System) 기준 시각에 동기화된 계측기술과 실시간 네트워크 기술을 이용하여 상태관측기의 연구가 국내외에서 수행되어지고 있다.[3]

본 연구에서는 스마트그리드의 주요 기술인 IEC61850 실시간 네트워크 기술, GPS 정밀시각동기 기술과 객체화된 데이터 모델 설계를 통하여 자율형 상태관측기를 제안한다. 전력계통의 상태를 측정하는 위해서 SEL사, GE사, AREVA 사 IED를 각각 사용하였고 서버용 시뮬레이터를 이용하여 다양한 시험이 가능하게 구성하였다. 각각의 IED와 시뮬레이터는 100Mbps 광통신케이블과 네트워크 스위치에 연결되어 IEC61850 통신을 수행하였다. 또한, OPC(OLE for process control) 클라이언트, 데이터베이스, SCADA 그리고 상태관측기로 구성하여 모의전력계통인 IEEE14 계통에 적용하여 성능을 검증하였다.

2. 본론

2.1 IEC61850를 이용한 상태관측 시스템구성

1990년 후반부터 객체모델 기술, 네트워크 기술과 지능화된 전력제어 기술을 기반으로 전력기기의 “plug-in-play“를 구현하려는 움직임이 시작되었다. 그 중에서 IEC TC57과 UCA가 주도한 IEC61850는 지난 10년간의 1차와 2차 국제표준발표를 거듭하면서 미래 전력계통에 가장 적합한 대표적인 통신 프로토콜로 성장했다. 이러한 성장을 기반으로

* 비회원 : 유투에스 연구소 수석연구원
[†] 교신저자, 시니어회원 : 오산대학 전기시스템제어과 교수 · 공박
 E-mail : jcpark@osan.ac.kr
 접수일자 : 2010년 12월 11일
 최종완료 : 2011년 2월 23일

IEC61850의 적용 분야를 초기의 "변전소내 통신 프로토콜"(protocol for inner-substation)에서 수도 및 가스를 포함한 사회 인프라를 관리할 수 있는 "유틸리티 통신 프로토콜"(protocol for utilities)로 확대되고 있는 추세이다.

변전소를 구성하는 다양한 장치가 하드웨어(hardware)로 연결되었던 스테이션 레벨(station level)을 시리얼 통신으로 변경하면서 변전자동화가 시작되었지만 많은 프로토콜이 난립하면서 상호운영성(interoperability)을 확보하기가 어려웠다. IEC 61850이 도입되면서 변전소의 다양한 장치들이 표준화된 통신을 통해서 데이터를 수수할 수 있게 되었다. IEC 61850이 담당하는 영역은 변성기, 개폐기, IED 그리고 스테이션 레벨의 장치들이 포함된다. IEC 61850의 목적은 IED의 호환성이며 자유롭게 시스템을 구성할 수 있다는 장점과 장시간의 안정성을 도모할 수 있다는 것이다. 즉 이전의 데이터 수집에서 데이터 관리로 관심이 이전되면서 IEC 61850의 필요성이 증대되고 있다.

IEC 61850은 기존의 통신 프로토콜과 달리 매우 넓은 범위를 갖는다. IEC61850은 프로세서간의 통신, object 모델방법, 표준화된 설정 언어 그리고 적합성 시험 등이 있다. IEC 61850-7-4, 3은 object 모델에 관한 표준이며 IEC 61850-7-2는 프로세서간 통신을 어떻게 하는가에 대한 규정이며 실제 통신을 하는 TCP/IP/Ethernet이나 MMS(Manufacturing Messaging Specification) 맵핑은 IEC 61850-8-1/9-2에서 각각 정의한다.

IEC 61850은 기존에 사용된 DNP(Distributed Network Protocol)통신 프로토콜에 비해서 다양한 리포트 서비스의 옵션을 제공한다. 예를 들어 클라이언트의 요청 없이도 주기적으로 서버에서 리포트를 전송하는 integrity 옵션이나 계측값이 미리 설정한 임계값을 벗어난 경우에 전송하는 data change 옵션이다. 특히, data change 옵션은 빠른 정보 전달이 가능하여 계통상황의 변화를 빠르게 상태관측기에 전달하는 역할을 수행한다. 또한 IEC61850의 객체화된 정보는 계측 시점의 시각정보를 포함하고 있어서 상태관측기가 여러 지역에 걸쳐서 수집된 정보를 동기화 할 수 있고 위상 오차에 대한 상태추정이 용이한 장점을 갖고 있다.

현재, 국내에서 2005년 10월부터 시작된 국가전략과제, 전력IT를 통해서 IEC61850의 기초연구가 이뤄졌고 2007년 한전 154kV 산청변전소를 시작해서 신울산 변전소, 연천 변전소, 동두천 변전소, 제주 성산변전소 그리고 2010년 한전 154kV 풍동변전소까지 시범사업을 수행하고 있고 향후 한전 변전소의 자동화 표준으로 모든 신설변전소에 적용될 계획이다. 민수용 변전소의 경우에는 하이닉스 반도체나 현대제철 등 같이 규모가 크면서 높은 신뢰성을 요구하는 대수용가에 적용되고 있다.

2.2 상태관측기의 기술동향 분석

전력수요가 지속적으로 증가함에 따라 우리나라 전력계통은 규모가 커지며 더욱 복잡해지고 있다. 이러한 전력계통을 안정적으로 운영하기 위하여 고도의 계통운전기술이 필요하며 이를 위해 EMS를 이용하고 있다. EMS에서 조류, 전압 등을 감시하는 것이 계통 안전도 유지에 중요하다. 하지만, SCADA 측정장치에 통신장비 장애 및 잡음으로 인한 에러가 존재한다. 이로 인해 시스템의 상태를 정확하게 추정하기 위하여 상태추정(state estimation)이 도입되었다. 상

태추정에서 작은 오차는 가중치를 변경하여 영향을 줄이고 큰 오차는 여러 위치를 찾아 알려주며 통신 장애에서는 의사 측정값을 사용 할 수 있게 한다.[4,5]

본 연구에서는 상태추정은 계측값에 포함된 오차의 합을 최소로 하는 최소자승법(WLS: Weight Least Square)방식을 사용하였다. 최소자승법을 이용하여 m개 상태 추정오차를 식(1)과 같이 표현할 수 있고 이 값을 최소화하면 실제 계통에 부합하는 상태값을 갖는다.

$$J(x) = \frac{\sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (1)$$

여기서 z_i 는 계측값, $h_i(x)$ 추정값 그리고 R_{ii} 는 표준편차이다.

EMS 상태추정에서 입력 데이터는 SCADA 측정값을 우선 사용하며, 이 값을 사용할 수 없는 경우에 따라 모델링 값, 운전원이 입력한 값을 사용한다. 모델링 값과 운전원이 입력한 값을 의사측정(pseudo measurements)이라고도 한다. 상태관측은 측정값을 이용한 방정식과 키르히호프의 전류법칙을 이용한 방정식으로 구성된다. 측정값이 많을수록 더 정확하게 계산할 수 있고, 틀린 측정값을 찾아낼 수 있다. 문제점은 잡음으로 인해 측정값이 틀리는 경우가 많다는 것

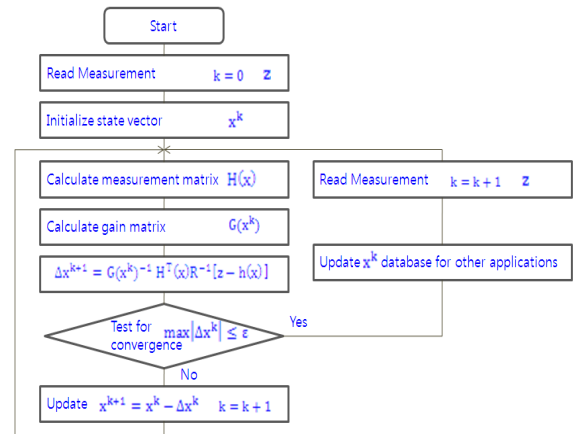


그림 1 WLS 방식의 상태관측 흐름도
Fig. 1 Flow chart for WLS state estimation

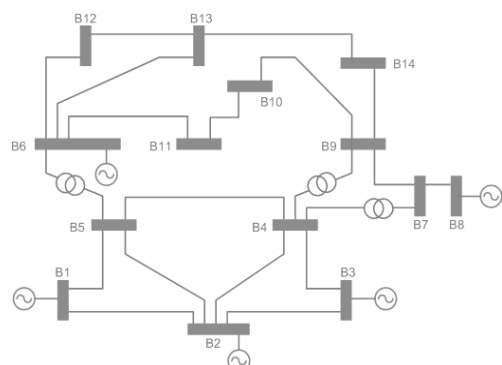


그림 2 IEEE 14 시험 전력계통
Fig. 2 IEEE 14-bus test power system

이다. 이를 해결하기 위해 가중치를 도입해 영향도를 차별화한다. 가중치는 각각의 측정값과 방정식에 적용되는 통계적 불확실성모델로부터 계산된다. 그림 1은 WLS 방식을 이용한 상태관측의 흐름도를 나타내고 있다.[6] 전력계통을 모델링하고 편미분방정식인 Jacobian 상태관측기의 정확도를 증명하기 위해서 그림 2와 같은 IEEE-14 전력계통에 계측 오차를 발생시켜 오차를 검출하고 보상하는 것을 확인하였다. 발전원은 1, 2, 3, 6 그리고 8번 모선에 각각 연결되어 있고 IED를 통해서 각 모선의 전압, 위상, 유효전력과 무효전력을 계측하여 IEC61850 통신방식으로 SCADA에 전송하게 구성하였다.

2.3 자율형 상태관측기 구조설계

자율형 상태관측기는 전력계통의 상태 정보를 감시하는 IEC61850 기반의 SCADA와 전력계통의 모델을 관리하는 데이터베이스 그리고 상태관측기로 그림 3과 같이 구성했다.

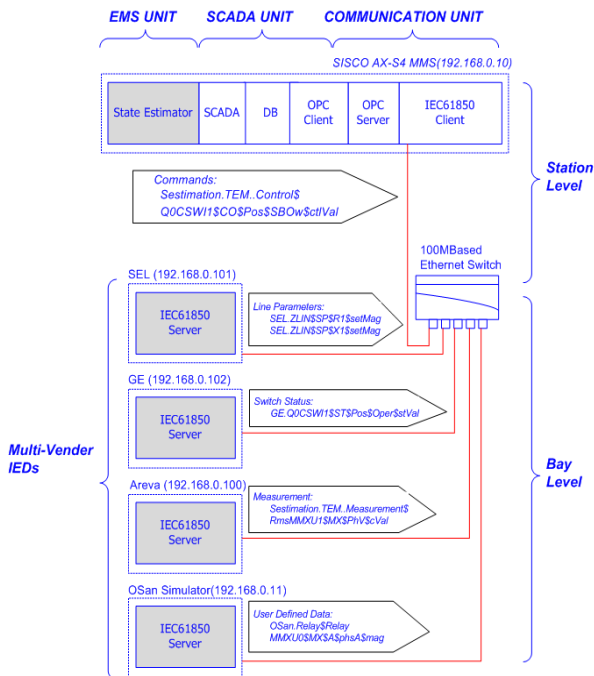


그림 3 IEC61850을 이용하여 상태 관측 시스템구성
Fig. 3 System configuration for state estimation based on IEC61850

IEC61850은 표준 프로토콜이므로 여러 회사 제품이 상호 운영성을 가지므로 SEL, GE, AREVA 그리고 서버용 시뮬레이터를 그림 4와 같이 시험용 시스템을 구성하다. 100Mbps 광통신케이블과 네트워크 스위치를 통해서 IEC61850 클라이언트에 수신된다. 실제 변전소에 설치된 SCADA와 IED간의 통신을 구리 통신선을 이용하는 경우에 인근 전력기기로 인하여 발생하는 전자기간섭(EMI, Electromagnetic interference)으로 통신이 두절되어 실제 계통값을 반영하지 못하거나 잘못된 값을 전송하여 정확한 상태관측이 불가능한 경우가 발생하다.[7] 이러한 문제점을 해결하기 위해서 전자기간섭에 영향을 받지 않는 광통신을 사용하는 것이 바람직하다. 수집된 데이터를 SCADA의 다른 응용프로그램에 전달하는 여러

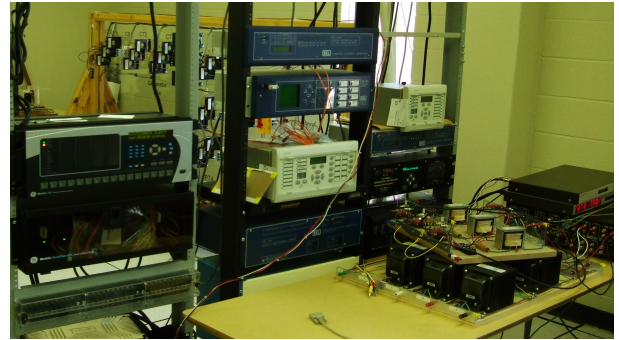


그림 4 IEC61850 통신 실험구성
Fig. 4 Experimental set for IEC61850 communication

방법 중에 OPC(OLE for Process Control)는 표준 프로토콜을 제공하므로 구축이 용이하다.

본 연구에서는 SISCO사의 AX4-MMS를 이용하였고 그림 5와 같이 OPC 클라이언트, 데이터베이스, SCADA 그리고 상태관측기로 시스템을 구성하였다. IED로부터 계측된 정보는 IEC61850 data change 리포트 방식으로 SCADA에 있는 IEC61850 클라이언트에 전송된다. 이 값을 같은 PC 나 네트워크에 연결된 다른 PC의 데이터베이스에 전송하기 위해서 표준 통신프로토콜인 OPC를 이용하였다. 마지막으로 SCADA는 데이터베이스 값을 이용하여 상태관측을 수행하는 방식으로 구성되었다. 데이터베이스는 네트워크정보, 부하모델, 계측값, 상태추정값 그리고 SCADA 데이터가 관계형으로 구축되어있다. 전력계통 파라미터 수정이 용이하고 유사한 전력계통에 대해서 운전원의 간섭을 최소화할 수 있기 때문에 관계형 데이터베이스의 구성은 자율적인 상태관측기 구성을 가능하게 한다.

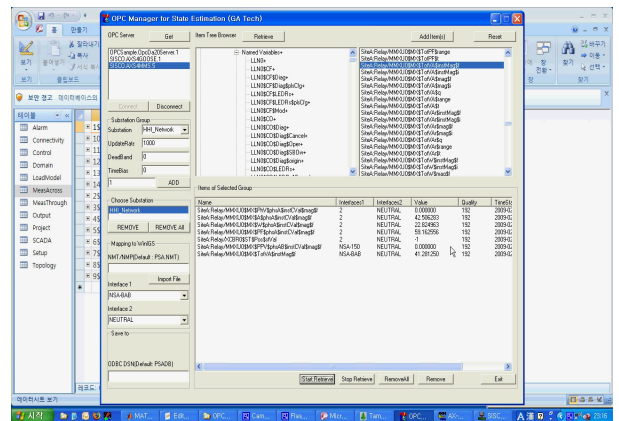


그림 5 OPC 클라이언트와 데이터베이스 구성
Fig. 5 Configuration of OPC client and database

전형적인 전력계통인 IEEE14 모델에서 제어와 보호에 필요한 상태를 추출하여 상태 모델방정식을 데이터베이스에 구축하였다. SCADA로부터 수집된 계측정보를 상태 모델방정식의 입력으로 사용하면 상태값의 변화나 미지 상태값을 관측할 수 있게 된다. 제안된 자율형 상태관측기의 성능을 검증하기 위해서 그림 6과 같이 모선2와 3번에서 계측된 전압에 고의로 오차를 인가하였을 때 오차의 크기를 추정

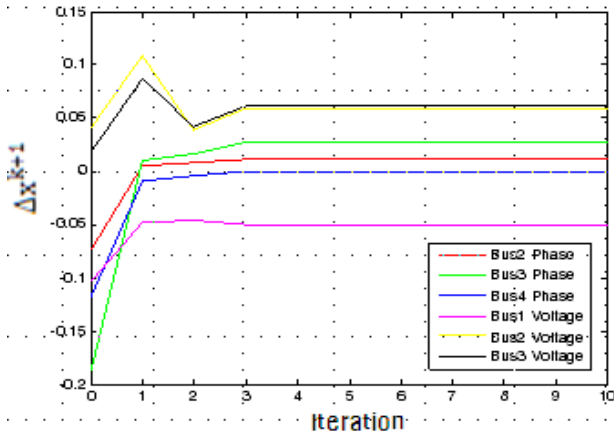


그림 6 초기값 오차에 대한 상태관측기의 수렴성
 Fig. 6 Convergence of state estimation with initial error (tolerance = 0.07)

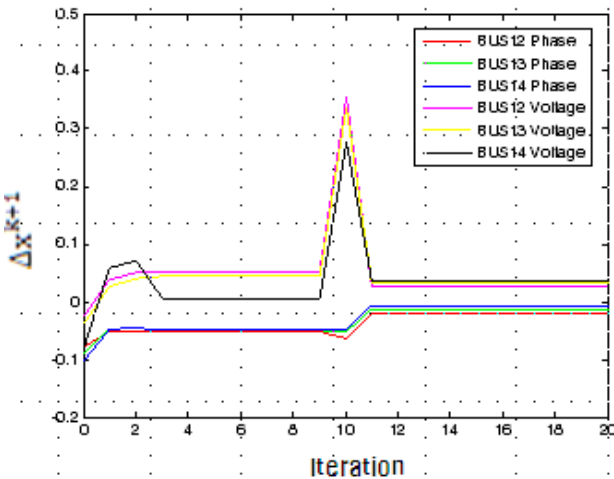


그림 7 계측오차에 대한 상태관측기의 수렴성
 Fig. 7 Convergence of state estimation with measurement error (100%)

하고 보상하여 일정한 주기 이후에 상태 추정값이 허용범위에 수렴하는 것을 확인하였다. 그림 7과 같이 운전 중에 모선 12, 13, 14번에서 측정된 전압과 위상에 100%의 오차를 고의로 부가하였을 때에 오차를 검출하고 이 오차를 보상하여 두 주기 이후에 오차 허용범위로 수렴하는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 스마트그리드에서 제시하는 정보통신기술인 IEC61850 실시간 네트워크 기술, GPS 정밀시각동기 기술과 객체화된 데이터 모델 설계를 통하여 자율형 상태관측기를 구성하였다. 정확한 상태관측을 어렵게하는 계측에러와 통신잡음을 해결하기 위해서 IEC61850 통신기술을 적용하였다. 제안된 상태관측기의 성능을 검증하기 위해서 IEEE14 계통에 적용하여 성능을 검증하였고 IEC61850 Client, SCADA 그리고 상태관측기를 제작하여 상태관측기의 성능을 실험을 통해서 검증하였다.

기존의 상태관측기와 제안된 자율형 상태관측기를 비교하면 계측오차와 통신잡음을 검출 할 수 있고 IEC61850 표준 프로토콜을 통해서 제어성, 편리성 그리고 확장성을 확보하였다. GPS 시각 동기화된 정밀한 위상검출 정보와 상태관측기에서 시각정보를 감시하므로 위상 정보가 갖는 에러를 검출하였다. 기존의 시리얼 통신을 광통신으로 변경하여 전자기간섭(EMI)를 해결하였으며 IEC61850 표준 프로토콜과 데이터베이스 기술을 이용하여 계통의 정보를 자동적으로 상태관측기가 인식할 수 있는 자율형 상태관측기를 구성하였다. 향후, 실시간 데이터베이스 기술을 이용하여 광역계통에 적용할 수 있는 자율형 상태관측기를 연구할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2010학년도 오산대학 교내 학술연구 지원에 의하여 이루어진 연구로써 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A. P. Sakis Meliopoulos, George J. Cokkinides, Floyd Galvan, Bruce Fardanesh and Paul Myrda, "Delivering Accurate and Timely Data to All: Model Based Substation Automation Applications for Advanced Data Availability", IEEE Power & Energy Magazine, Volume 5, No: 3, pp 74-86, May/June 2007.
- [2] A. P. Sakis Meliopoulos and George Stefopoulos, "Characterization of State Estimation Biases", Probability in the Engineering and Informational Sciences, Cambridge University Press, 20, pp 157-174, 2006.
- [3] A. P. Sakis Meliopoulos, George Stefopoulos, Hedrington, C. and Conrad, T.L., "The supercalibrator - A fully distributed state estimator", Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE.
- [4] Fang Yang, A. P. Sakis Meliopoulos, George Cokkinides and George J. Stefopoulos, "A Bulk Power System Reliability Assessment Methodology", European Transactions on Electrical Power (ETEP), Vol. 17, Issue 4, pp. 413-425, July/August 2007.
- [5] G. J. Cokkinides, A. P. Meliopoulos, George Stefopoulos, Ramiz Alaileh and Apurva Mohan, "Visualization and Characterization of Stability Swings via GPS-Synchronized Data", Proceedings of the of the 40st Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Kona, Hawaii, January 3-6, 2007.
- [6] Salman Mohagheghi, Ramiz H. Alaileh, George J. Cokkinides and A. P. Sakis Meliopoulos, "A Laboratory Setup for a Substation Scaled Model", Proceedings of the 2007 Power Tech, Paper #591, Pages 6, Lausanne, Switzerland, July 1-5, 2007.
- [7] EPRI EMI Immunity Testing Final Report, *Electro-Magnetic Immunity Tests of Shielded Twisted Pair Copper Cable for 100 Mbps Ethernet*, 1997.

저 자 소 개



박종찬 (朴鍾讚)

1955년 12월 19日生. 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1988년 同 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 同 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년 ~ 현재 오산대학 전기시스템제어과 교수.

Tel : 031) 370 - 2674

Fax : 031) 375 - 9601

E-mail : jcpark@osan.ac.kr



이세인 (李世仁)

1970년 4월 20日生. 1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 同 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1997년 ~ 2006년 네이버월드 및 KMData 연구소 근무. 현재 유투에스 연구소 수석연구원.

Tel : 031) 436 - 0695

Fax : 031) 436 - 0694

E-mail : tpdls70@naver.com