

LabVIEW를 이용한 가상 배전계통의 HILS

시스템 구축에 관한 연구

A Study on HILS System for Virtual Distribution System Using LabVIEW

이 원 석*, 황 선 환*[★], 김 태 성**

Won-Seok Lee*, Seon-Hwan Hwang*[★], Tae-Seong Kim**

Abstract

Overcurrent and abnormal voltages in the distribution system can cause not only burden of power plant but also damage to customers. As a result, researches related to the distribution automation have been widely conducted by utilizing a real time digital simulation to improve the reliability of power supply through rapid failure handing, reduction of power failure intervals and failure recovery. However, the distribution automation systems using the real time digital simulator are expensive and limited to verify actual hardwares. Therefore, in this paper, an external hardware devices was developed based on the distribution system analysis results of the digital simulator. And real-time simulation and functional verification are implemented by the real feeder remote terminal units used in distribution automation. The effectiveness of the proposed system is verified through several experiments.

요 약

배전계통에서의 과전류 및 이상 전압 현상은 전력설비에 부담을 줄 뿐만 아니라 수용가에 치명적인 피해를 입힐 수 있다. 그로 인해 실시간 배전계통 시뮬레이터를 활용하여 신속한 고장처리와 정전구간 축소 및 고장복구를 통한 전력공급의 신뢰도를 높이는 배전자동화 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 디지털 시뮬레이터를 이용한 배전계통 모의시스템은 고가의 설비로 시스템 구축에 제약이 있고 실 배전계통을 통한 검증 또한 불가능하다. 본 논문에서는 배전계통 디지털 시뮬레이터의 계통해석결과를 기반으로 배전자동화용 단말장치와의 연동을 통해 실시간 시뮬레이션 및 기능검증이 가능한 시스템을 개발하였다. 제한한 시스템의 효용성은 실험을 통해 검증하였다.

Key words : Hardware In the Loop Simulation, Distribution Automation System, Real Time Digital Simulator

*[★] Dept. of Electronics Engineering, Kyungnam University

** Eco-friendly Vehicle R&D Division, Korea Automotive Technology Institute

[★] Corresponding author

E-mail : seonhwan@kyungnam.ac.kr, Tel : +82-55-249-2744

Manuscript received Mar. 3, 2020; revised Mar. 30, 2020; accepted Jun. 9, 2020.

※ Acknowledgment

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 전력수요의 급증과 분산전원의 확대에 의해 배전계통운영의 복잡성이 증대되고 있다. 이런 상황에서 전력시스템은 국토의 전반에 산재되어 있고 발전, 송/변전, 배전계통의 다양한 전력 설비로 구성되어있는 특성상 실계통을 이용한 실험의 어려움으로 인해 주로 시뮬레이션을 통한 연구가 진행되고 있다.

전력계통의 시뮬레이션 결과는 모델링의 방법과

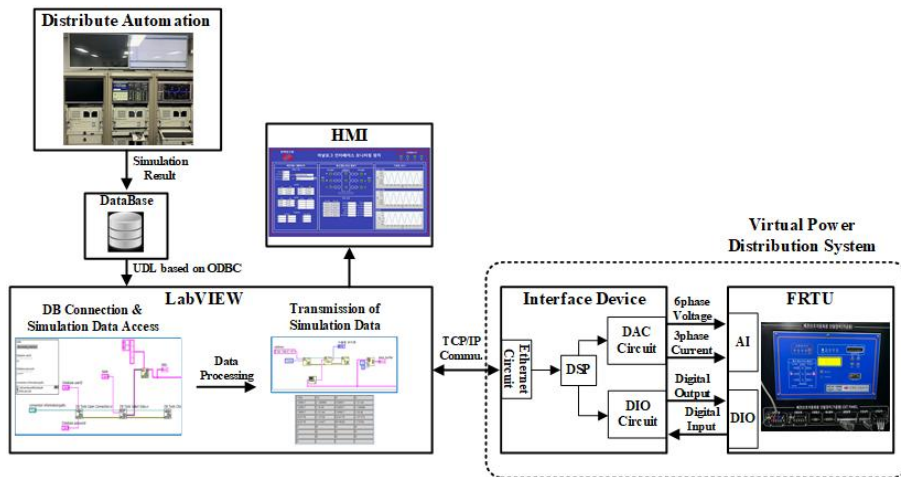


Fig. 2. HILS system structure interlocked with actual hardware.
그림 2. 실제 하드웨어와 연동된 HILS 시스템 구조

레이션 결과보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있어 시뮬레이션의 신뢰도가 높고 다양한 시나리오로 구성할 수 있어 비용과 시간을 줄일 수 있고 실험 장소의 제약이 없다는 장점이 있다. 또한, 모델링하기 어려운 단말장치와 실 계통을 이용하여 시뮬레이션 할 수 없는 단선, 위상불일치 및 FI 고장상황 등을 쉽게 모의할 수 있다.

오차 없이 아날로그 및 디지털 값의 모의를 위해서는 LabVIEW 프로그램과 인터페이스 장치의 유연한 통신환경이 구축되어야 한다.

이를 위해 각 단말장치와의 연동을 위한 인터페이스 장치내의 이더넷 IC 소자를 이용하여 LabVIEW로부터 계통해석결과를 송/수신하고 DSP 내의 외부 데이터라인을 통해 계통해석결과 값을 얻는다.

나. 배전자동화 시뮬레이터와 인터페이스 장치 연동
배전자동화 시뮬레이터는 계통해석 값을 실시간으로 DB(Database)에 업데이트 하게 된다. 따라서 배전계통의 실시간 시뮬레이션을 위해서는 배전자동화 시뮬레이터에서 모의한 배전계통의 전압/전류의 아날로그 값과 FI신호, 단상/결상, 위상불일치 등의 디지털 값을 인터페이스 장치로 정확히 전달하여야한다.

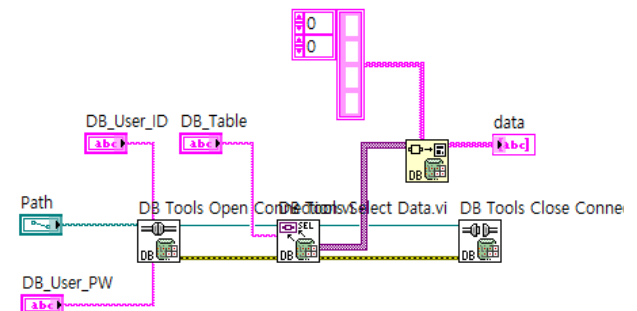


Fig. 3. DB data extraction using LabVIEW.
그림 3. LabVIEW를 이용한 DB 데이터 추출

(1) LabVIEW 기반 계통해석결과 추출

그림 3은 ODBC(Open Database Connectivity)를 이용하여 DB에 저장된 시뮬레이션 값을 UDL 형태로 저장하고 이를 LabVIEW 프로그램으로 추출하는 과정이다. LabVIEW의 DB 접속 툴을 이용하여 전체 프로그램 주기마다 업데이트된 계통해석결과를 배열형태로 저장한다. 이후 각 인터페이스 장치와의 통신을 통해 실시간으로 가공된 계통해석결과를 전송한다.

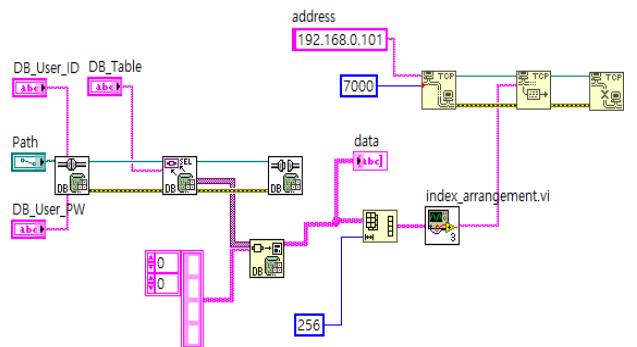


Fig. 4. Transmission of analysis results using TCP/IP.
그림 4. TCP/IP 통신을 이용한 해석결과 전송

(2) TCP/IP 통신 기반 계통해석결과 전송

계통해석결과를 기반으로 인터페이스 장치에서

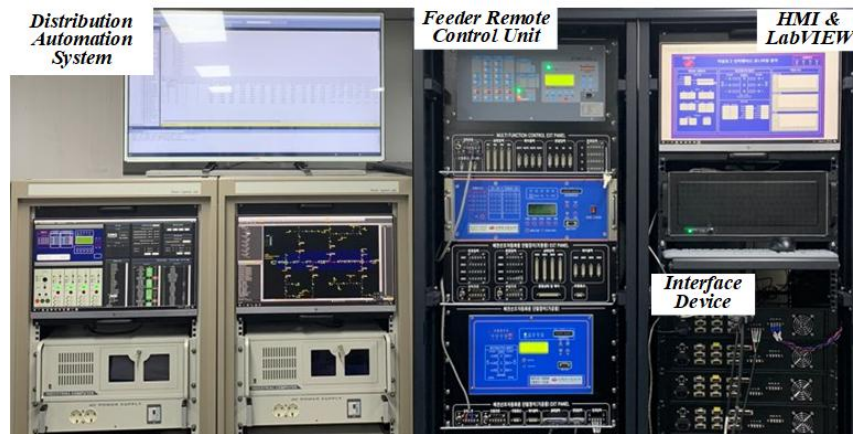


Fig. 5. Overall system configuration.
그림 5. 전체 시스템 구성

다. 단말장치와 인터페이스장치 연동

배전계통 모의를 위한 인터페이스 장치는 송신 받은 계통해석결과를 기반으로 전압/전류의 크기 및 위상정보와 각종 고장신호를 오차 없이 반영하여야 한다. 이를 위해 그림 5와 같이 DSP를 기반으로 아날로그 입/출력회로 및 디지털 입/출력회로를 이용하여 단말장치와 연동한다.

인터페이스 장치는 실시간 배전계통 모의를 위해 표 1과 같은 특징을 가지는 고성능 DSP를 기반으로 단말장치로의 전압/전류 모의를 위한 외부 DAC 회로, 모의된 전압/전류를 센싱하여 이상 유무를 자체적으로 판단할 수 있는 외부 ADC회로 및 배전자동화 시뮬레이터와의 실시간 연동을 위한 양방향 TCP/IP 통신회로로 구성된다.

IV. HILS 기반 단말장치의 연동시험

Table 1. Specifications of interface device.

표 1. 인터페이스 장치의 사양

Parameters	Value	Unit
Digital Signal Processor	TMS320F28335	
Clock Speed	150	MHz
Floating Point Unit		
Flash ROM	512	KB
SRAM	68	KB
External Memory	4	MB
Analog Input Pins	6	Ch
Analog Current Output Pins	3(±3A)	Ch
Analog Voltage Output Pins	6(±10V)	Ch
Digital Input Pins	8	Ch
Digital Output Pins	12	Ch
Communication	TCP/IP	

배전계통 시뮬레이션은 신뢰성 높은 전력공급을 위해 여러 알고리즘을 적용하여 고장상황을 신속히 검출하고 이를 복구하는데 그 목적이 있다.

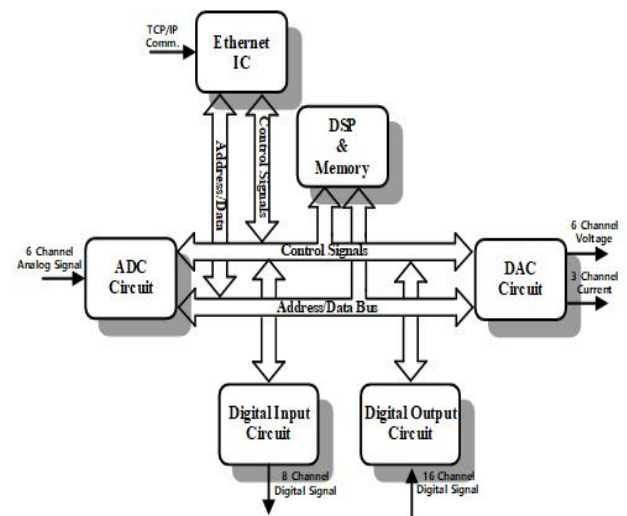


Fig. 6. Hardware configuration of interface device.
그림 6. 인터페이스 장치의 하드웨어 구성

이를 위해 본 논문에서는 실제 배전계통에서 사용되는 가공용 FRTU 단말장치를 대상으로 배전자동화 시뮬레이터의 계통 해석결과를 오차 없이 모의할 수 있는 HILS 시스템을 이용하여 적용한 알고리즘의 타당성을 높일 수 있는 개발환경을 구축하고 대표적인 고장상황을 모의하였다.

그림 7은 HILS 기반 단말장치 연동시험의 주요 동작 흐름도이다. 가공용 FRTU 단말장치의 동작 시험은 단선/결상시험, 위상불일치 시험, 지락고장 및 복구 시험을 진행하였다. 이를 통해 구현된 HILS 시스템이 정상적으로 동작됨을 검증하였다.

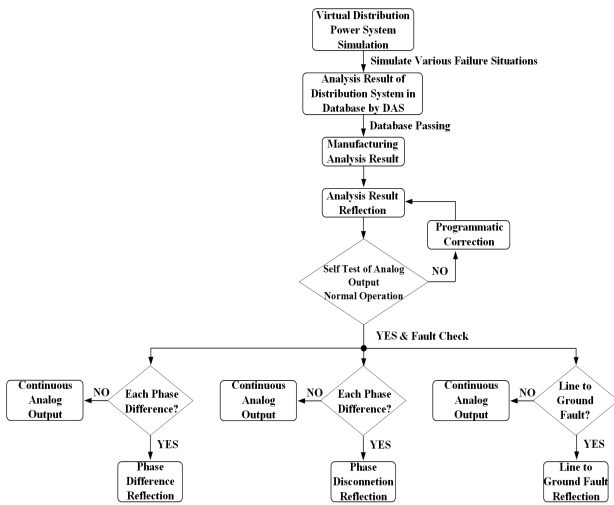
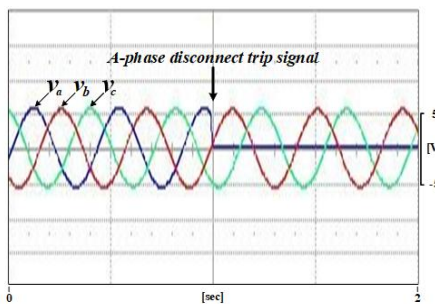


Fig. 7. Flow chart based on HILS.
그림 7. HILS 기반 동작 흐름도

가. 단선/결상 시험

그림 8은 디지털 시뮬레이터의 A상 전압 단선/결상 시뮬레이션 결과를 기반으로 고장상황을 모의한 결과이다. 디지털 시뮬레이션의 동작 과정에서 A상 전압의 단선/결상 지령 시 DSP 기반 인터페이스 장치의 A상 전압출력이 단선/결상되고 해당 FRTU 단말장치 또한 A상 단선/결상에 해당되는 LED 신호를 출력하는 것을 알 수 있다.



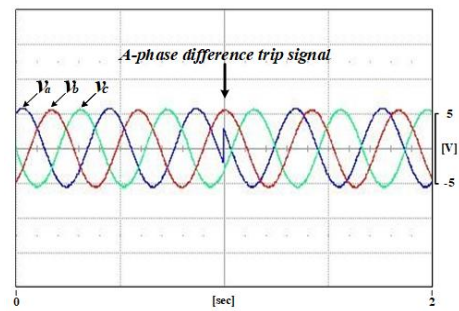
(a)



(b)

Fig. 8. Phase disconnection test (a) Voltage waveforms, (b) Output results of FRTU.

그림 8. 단선/결상 시험 (a) 전압파형, (b) FRTU 출력결과



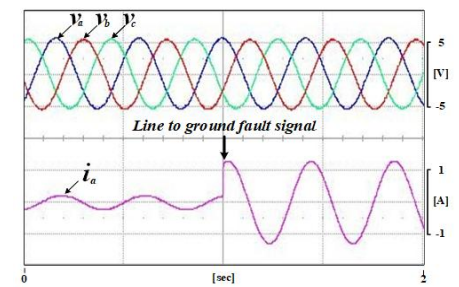
(a)



(b)

Fig. 9. Phase difference test (a) Voltage waveforms, (b) Output results of FRTU.

그림 9. 위상불일치 시험 (a) 전압파형, (b) FRTU 출력결과



(a)



(b)

Fig. 10. Line to ground fault test (a) Voltage and current waveforms, (b) Output results of FRTU.

그림 10. 지락고장 시험 (a) 전압 및 전류파형, (b) FRTU 출력결과

나. 위상불일치 시험

그림 9는 배전계통내의 개폐기 상태를 감시하는 FRTU 단말장치를 기준으로 A상과 R상의 위상불

일치 고장상황을 모의한 결과이다. 정상동작 과정에서 A상의 위상불일치 지령 시 인터페이스 장치의 전압출력은 다음과 같이 변동하고 단말장치 또한 위상불일치 신호에 해당되는 LED가 동작됨을 알 수 있다.

다. 지락고장 및 복구 시험

그림 10은 A상 지락사고에 의한 과전류 및 FRTU 단말장치에서의 FI 신호 발생여부를 확인하고 이를 복구하는 연동시험 결과이다. 정상동작 과정에서 A상 전류의 지락고장 지령 시 DSP 기반의 인터페이스 장치 전류출력은 그림 10의 (a)와 같이 변동하고 해당 FRTU 단말장치 또한 FI 신호를 출력한다. 이후, 디지털 시뮬레이터에서는 고장검출 알고리즘을 통해 고장구간을 배전계통과 분리하고 고장을 신속하게 처리한 후 정상적인 선로로 복구하는 과정을 진행한다.

III. 결론

본 논문에서는 고성능 DSP를 기반으로 실제 배전계통의 상황을 유기적으로 모의하여 줄 수 있는 아날로그 인터페이스 장치와 배전자동화 디지털 시뮬레이터의 계통해석결과를 DB에서 실시간으로 추출하고 가공하여 송/수신할 수 있는 LabVIEW와의 연계를 통해 배전계통을 실시간 시뮬레이션 할 수 있는 Hardware In the Loop Simulation 시스템을 구축하였다. 뿐만 아니라 실제 배전계통에서 운용되는 가공용 단말장치와의 연동시험을 통해 시스템의 신뢰성과 운용 가능성을 검증하였다. 향후 배전계통의 연속적인 모의 동작이 가능하도록 배전자동화용 지중용 단말장치, 다회로 차단기 및 리클로저 등을 배전계통 디지털 시뮬레이션과 연동이 될 수 있도록 HILS 시스템을 확장하고자 한다.

References

- [1] Z. C. Zhang, K. S. Kim, M. H. Sung and G. S. Jang, "Comparative of fault immunity performance of hybrid bipolar HVDC and FACTS based on RTDS," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.163-165, 2018.
- [2] M. H. Song, W. H. Ko, S. B. Kim, D. H. Son and S. R. Nam, "RTDS-based performance test of distance relaying algorithm for protecting 154kV transmission line," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.277-278, 2018.
- [3] Y. S. Lee, B. M. Han, D. J. Won and H. J. Lee, "Real-time Operation analysis for stand-alone microgrid using RTDS," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.63, no.10, pp.1393-1401, 2014.
DOI: 10.5370/KIEE.2014.63.10.1393
- [4] S. R. Heo, G. H. Kim, H. G. Lee, C. S. Hwang, M. W. Park, I. K. Yu, J. D. Park, D. Y. Yi and S. J. Lee, "Simulation analysis of a renewable energy based microgrid using RTDS," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.60, no.12, pp.2190-2195, 2011.
- [5] X. Wu and A. Monti, "Methods for partitioning the system and performance evaluation in power hardware in the loop simulations," *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, pp.251-256, 2005, DOI: 10.1109/IECON.2005.1568912
- [6] Y. V. Pavan Kumar and R. Bhimasangu, "Alternative hardware-in-the-loop(HIL) setups for real-time-simulation and testing of microgrids," *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, pp.1-6, 2016.
DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853522
- [7] F. Ebe, B. Idlbi, D. E. Stakic, S. Chen, C. Kondzialka, M. Casel, G. Heilscher, C. Seitzl, R. Brundlinger and T. I. Strasser, "Comparison of power hardware-in-the-loop approaches for the testing of smart grid control," *Energies*, vol.11, no.12, 2018. DOI: 10.3390/EN11123381
- [8] N. P. Mahalik and K. S. Kim, "A prototype for hardware-in-the-loop simulation of a distributed control architecture", *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C*, vol.38, no.2, pp.189-200, 2008,
DOI: 10.1109/TSMCC.2007.913891

BIOGRAPHY

Won-Seok Lee (Member)

2020: BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
2020~Present : MS Course in Electrical Engineering, Kyungnam University.

Seon-Hwan Hwang (Member)

2004 : B.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
2006 : M.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2011 : Ph.D. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2011~2012 : Postdoctoral Researcher, Center for Advanced Power Systems(CAPS), Florida State University, Tallahassee, FL, USA.

2012~Present : Professor in Department of Electrical Engineering, Kyungnam University.

Tae-Seong Kim (Member)

2018: BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
2020 : MS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.

2020~Present : Researcher, Electrical Energy Control R&D Center, Eco-friendly Vehicle R&D Division, Korea Automotive Technology Institute