

# 소형화된 배전선로의 실험적 제작을 위한 기초 연구

오세필\* · 최성철\* · 김영민\* · 강하나\* · 고윤석\*\*

## A Study on Basic Technology for the Experimental Making of Miniaturized Electrical Power Distribution Line

Se-Pil Oh\* · Seong-Cheol Choi\* · Young-Min Kim\* · Ha-Na Kang\* · Yun-Seok Ko\*\*

### 요 약

본 논문에서는 소형화된 배전선로의 실험적 제작에 대한 연구를 수행하였다. 배전계통을 분석하여 스마트 그리드 배전계통을 모델링하였으며, 소형화된 마이크로 3상 배전계통 리클로저를 설계하였다. 마이크로 리클로저는 센서부, 주제어부 그리고 릴레이부로 설계하였으며, 주제어부는 DSP를 기반으로 입력전류로부터 고장 여부를 판별하여 고장전류를 차단하도록 설계하였다. 끝으로 설계 결과를 기반으로 마이크로 3상 배전계통과 마이크로 3상 리클로저를 실험적으로 제작함으로써 기초 제작 기술을 확보하였다.

### ABSTRACT

In this paper, a miniaturized distribution line was experimentally made. The smart grid distribution system was modeled by analyzing the distribution system, and a miniaturized micro three phase distribution system recloser was designed. The micro recloser was designed as a sensor part, a main part and a relay part, and the main part was designed to cut off the fault current by determining the fault from the input current based on the DSP. Finally, based on the results of the modeling, the micro three phase power distribution line and the micro three phase recloser were experimentally fabricated, and the basic making technology of the miniaturized micro smart grid was obtained through the making process.

### 키워드

Micro Smart Grid Distribution Line, Smart Grid, Protective Device, Distribution System Recloser  
마이크로 스마트 그리드 배전 선로, 스마트 그리드, 보호 기기, 배전 계통 리클로저

### 1. 서 론

전기는 우리에게 없어서는 안 될 소중한 에너지원이다. 하지만 화석연료의 고갈과 지구 온난화 문제로 인해 탄소 배출을 줄이고 전력 이용률을 극대화하기 위한 노력들이 전 세계적으로 이루어지고 있으며, 그

일환으로 태양광 및 풍력 에너지와 같은 신재생 에너지들의 계통도입이 큰 관심을 받고 있다. 특히, 분산전원의 효율적 관리 및 전력 이용률을 극대화하기 위해, 기존의 전력망에 최근 급속한 발전을 이룬 센서기술, 마이크로프로세서 기술 그리고 통신기술등을 기반으로 하는 강력한 양방향 통신능력을 가지는 디지털

\* 남서울대학교 전자공학과 (ohsepir@naver.com, tjdojf9553@naver.com, gokym88@naver.com, khn5963@naver.com)

\*\* 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과

• 접수일 : 2017. 10. 27  
• 수정완료일 : 2017. 11. 20  
• 게재확정일 : 2017. 12. 15

• Received : Oct 27, 2017, Revised : Nov 20, 2017, Accepted : Dec 15, 2017

• Corresponding Author : Yun-Seok Ko

Dept. of Electronic Engineering, Namseoul University,

Email : ysko@nsu.ac.kr

통신망을 결합한 스마트 그리드가 큰 관심을 받고 있다. 스마트 그리드는 분산전원들이 도입되어, 수직상선로와 루프 선로가 결합된 복합 선로구조를 가지므로서 기존의 전력망과는 다른 더욱 복잡한 전기적 현상들을 보인다. 따라서 스마트 그리드의 안정성과 신뢰성을 제고하기 위한 보호 및 제어전략들이 새롭게 요구되고 있다[1-9].

스마트 그리드의 운전 제어전략들을 개발하기 위해서는 스마트 그리드의 고장실험을 통해 전기적 현상들을 관찰, 분석하고 이들에 최적화된 제어전략들을 개발하는 것이 필요한데, 스마트 그리드가 공칭전압 23kV, 고장 차단 전류 10kA 이상의 전기적 레벨을 가지기 때문에 실험적 접근이 매우 어렵다. 최근 이 문제를 해결하기 위해 참고문헌 [10]에서는 마이크로 스마트 그리드 시뮬레이터 개념이 새롭게 제안되는데, 기본적으로 스마트 그리드의 크기 및 전기레벨을 엔지니어들이 실험실에서 자유롭게 실험할 수 있도록 축소하는 데 목적을 둔다. 그리고 스마트 그리드의 소형화를 위한 설계 방법론들이 연구되고 있어, 궁극적으로 설계 사양에 적합한 마이크로 스마트 그리드 시뮬레이터의 제작기술이 요구될 것으로 예상된다. 하지만 스마트 그리드 구성이 복잡하고 각 구성요소들의 구조와 기능이 복잡하기 때문에 이들에 대한 소형화 제작 기술은 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 소형화된 3상 배전선로를 실험적으로 제작함으로써 마이크로 스마트 그리드 시뮬레이터 기초제작기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 배전계통을 분석하여 스마트 그리드의 배전선로 구성을 모델링하며, 소형화된 마이크로 3상 배전계통 리클로저를 설계한다. 3상 마이크로 리클로저는 전력신호 처리를 위해 요구되는 강력한 고속 연산 처리능력을 가지는 DSP를 이용하여 입력전류로부터 고장여부를 판별하여 고장전류를 차단하도록 설계한다. 끝으로 모델링 결과를 기반으로 마이크로 3상 배전계통과 마이크로 3상 리클로저를 실험적으로 제작하여, 소형화된 마이크로 스마트 그리드 시뮬레이터 제작을 위한 기초 기술을 확보한다.

## II. 배전선로 모델링

마이크로 배전선로의 실험적 제작을 위해 기본적으로 요구되는 배전선로의 구성과 배전선로의 핵심 보호기기인 배전선 리클로저의 구조가 분석된다.

### 2.1 배전선로 구성

배전계통은 154kV 송전선로로부터 전력을 공급받아 변전소 변압기를 통해 가압된 전압 22.9kV를 얻는다. 그리고 변전소 변압기로부터 시작되는 배전선로들은 면적으로 널리 분포되는 전기 수용가들에게 전력을 공급하기 위해 부하지역을 직접 경유하게 되는데 선로상의 고장으로부터 전력설비들을 보호하기 위해 리클로저가 설치되며, 개폐기들에 의해서 구분되는 n개의 선로구간들로 구성된다. 각 선로구간들은 선로정수들과 구간부하들을 가진다. 그림 1은 대표적인 배전선로 모델을 보인다.

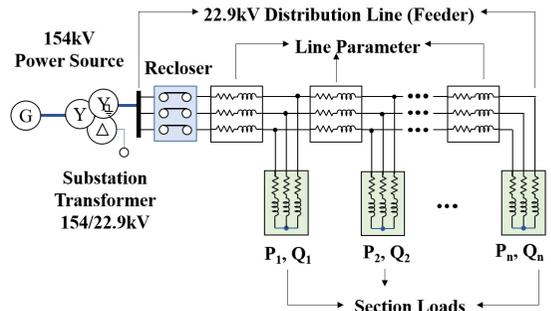


그림 1. 대표적인 배전계통 모델  
Fig. 1 Typical distribution system model

### 2.2 배전선 리클로저의 구조

가공 배전선로상에서 발생하는 사고의 대부분은 조류와에 의한 접촉, 강풍 그리고 낙뢰 등에 의한 플래시 오버 사고 등인데, 사고 발생 시 선로 및 전력설비를 보호하기 위해 신속하게 고장 구간을 차단하고 사고 점의 아크를 소멸시킨 후 즉시 재투입이 가능한 개폐장치가 리클로저이다. 리클로저의 동작은 일반적으로 개폐로 동작을 2-3회 반복하여 투입 차단 동작을 하며, 2-3회 개폐 후, 영구 고장으로 구분하여 완전 개방 상태로 만든다[11]. 일반적으로 리클로저는

그림 2에 보이바와 같이, 전압센서와 전류센서를 가지며, 전류센서로부터 측정되는 전류가 동작전류보다 크면 자계 액츄에이터에 의해 진공 인터럽터가 구동되어 고장전류를 차단하는 기능을 가진다. 그림 2는 Sojo Electric Company<sup>1)</sup>에서 제공하는 고체절연 방식 리클로저의 구조를 보인다.

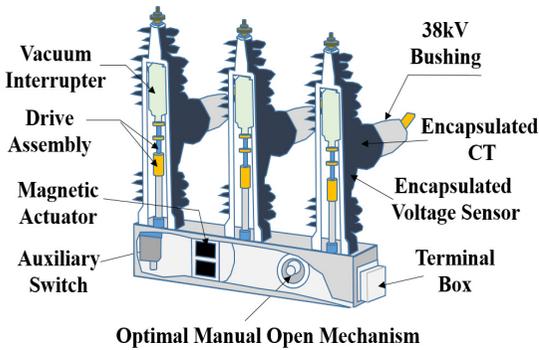


그림 2. 리클로저의 구조  
Fig. 2 The structure of the recloser

일반적으로 리클로저는 그림 2에 보이바와 같이, 선로 상태를 확인하기 위해 전압센서와 전류센서를 가진다. 그리고 전류센서로부터 측정되는 전류가 계통 상태에 적합하게 미리 설정되는 보호기 동작전류보다 크면 자계 액츄에이터에 의해 진공 인터럽터가 구동되어 고장전류를 차단, 고장구간을 선로로부터 분리하는 기능을 가진다.

### III. 배전선 리클로저의 기본 설계

#### 3.1 전압 및 전류 신호 측정 회로 설계

리클로저는 앞 절에서 설명된 바와 같이 보호협조 및 제어동작을 위해 기본적으로 전압과 전류 정보를 요구한다. 본 논문에서는 전류 측정에 CT(Current Transformer), 전압 측정에는 저항분압방식을 이용한 회로를 이용한다. 전류 측정을 위한 방법은 크게 전류 센서와 CT로 나눌 수 있다. 모듈화된 전류 센서의 경우 교류뿐만 아니라 직류 등 여러 종류의 전류 신호

를 측정할 수 있다. 또한 감도가 높고 단 전압 방식의 마이크로프로세서와의 동기를 위한 오프셋 회로가 내장되어있는 장점을 가진다. CT는 솔레노이드를 통한 유도현상으로 전류를 측정하므로 교류전류에 대한 측정만 가능하며, 50Hz와 60Hz의 신호만 측정 가능하도록 권선비 등이 제작되어있다. 일반적으로 여러 장 단점에도 불구하고 측정 범위와 경제성 그리고 편이성 때문에 CT가 이용된다. 기존 리클로저는 2단 CT 회로로 구성되지만 본 논문에서는 마이크로 스마트 그리드 시뮬레이터의 고장전류가 최대로 수십 A로 제한되도록 설계된다는 가정 하에서 주파수 60Hz, 변류비 2500:1의 CT가 사용된다.

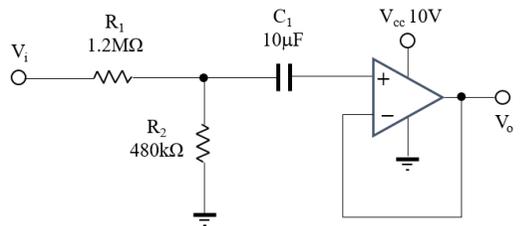


그림 3. 분압저항기를 이용한 전압측정회로  
Fig. 3 Voltage measuring circuit with resistor divider and op-amp

전압 센서의 경우 저항 분압 방식과 Op-Amp를 버퍼 모드로 동작시켜 구현된다. 이상적인 전압센서의 동작은 측정하고자 하는 계통에 영향을 미치지 않으면서 출력되는 파형을 측정하고자 하는 범위로 제한하여야 한다. 구현한 전압 센서는 출력 범위의 제한은 저항의 분압 방식을 이용하며, 임피던스가 높은 저항을 병렬로 결선하여 측정하고자 하는 계통에 영향을 최소화하도록 설계된다. 그림 3은 분압방식과 버퍼를 이용한 전압측정 방식을 보이는데 전압을 측정하는 회로이기 때문에 간략하게 PT로 정의한다.

이 때 전류 및 전압 측정을 위한 두 센서 CT와 PT로부터 출력되는 신호는 양과 음전압이 동시에 존재하는 교류신호의 형태를 가진다. 하지만 본 논문에서 사용하는 TMS320F28335를 포함하여 대부분의 마이크로 프로세서들은 단전압 방식의 입력신호 레인지를 가지기 때문에 센서에서 출력되는 아날로그 신호를 단방향 전압으로 보정하기 위해 전압 오프셋을 위한 기본 회

1) <http://sojoelectric.com>

로가 필요하다. 본 논문에서는 DSP의 단방향 입력 레인지 적용에 적합한 DC 오프셋 회로로서 Op-Amp 회로 기반의 가산회로의 특징을 가지는 그림 4와 같은 간단한 DC 오프셋 회로를 설계하였다[12].

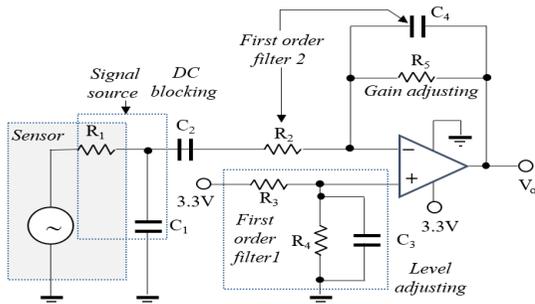


그림 4. DC 오프셋 회로  
Fig. 4 DC offset circuit

### 3.2 셀링-키 필터 회로 설계

3상 배전선로로부터 CT와 PT를 통해 받아들이는 아날로그 신호는 A/D 컨버터를 통해 표본화 과정을 필요로 한다. 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환할 때 샘플링 주파수가 높으면 높을수록 실제 신호와 가까운 값을 가지는데, 최소 샘플링 주파수가 아날로그 신호의 두 배 이상이 되어야 한다는 나이퀴스트 조건이 적용되어야만 한다. 샘플링 주파수가 신호의 최대 주파수의 2배보다 작거나 필터링이 부적절하면 인접한 스펙트럼들이 서로 겹쳐 에일리어싱(Aliasing) 현상이 발생한다. 또 신호의 크기가 A/D 컨버터가 수용할 수 있는 크기보다 클 경우 샘플링 결과는 범위 밖의 부분은 클램핑 된다.

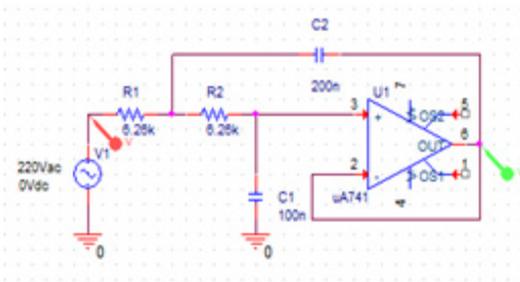


그림 5. 차단주파수 180[Hz]의 셀링-키 필터  
Fig. 5 Sallen-key filter with cut-off frequency 180Hz

본 논문에서는 DSP의 A/D 컨버터의 사양과 실제 짜여진 코딩에 맞춰 신호의 진폭과 주파수의 제한을 위해 단순한 구조로 증폭기와 2차 능동 필터를 동시에 구현하는 셀링-키 필터를 채택하였다. 입력 임피던스가 무한대, 출력 임피던스가 제로 값을 가지는 Op-Amp의 고유한 특성을 이용해 2극의 저역 통과 필터, 고역 통과 필터, 대역 통과 필터, 대역 저지 필터, 버퍼의 응답을 구현 가능하다. 본 논문에서는 에일리어싱(Aliasing)의 억제에 위해 저역 필터를 설계한다. 본 논문에서는 우리나라의 상용 주파수에 3고조파에 해당하는 180Hz가 차단 주파수가 되도록 필터를 설계하였는데, 그림 5는 설계결과를 보인다.

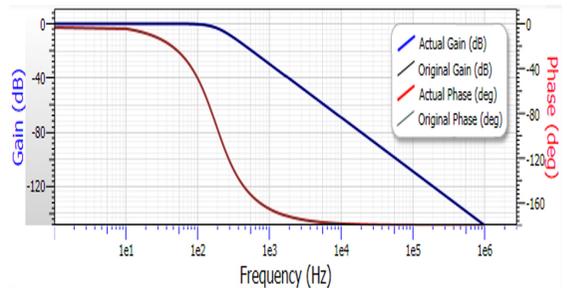


그림 6. 설계한 필터의 주파수 응답 곡선  
Fig. 6 The frequency response curve

그림 6은 이상적인 Op-Amp일 때 고속 푸리에 변환 그래프를 보인다. 그림 7은 버터워스 필터의 단점인 그룹 딜레이 현상 정도를 나타낸다[2].

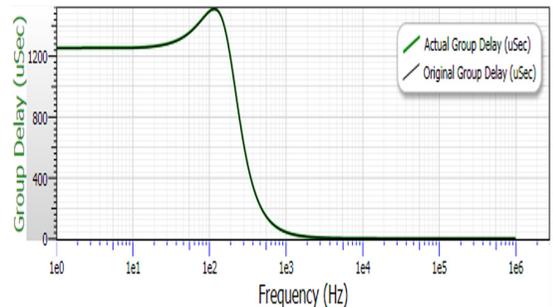


그림 7. 버터워스 필터의 그룹 딜레이  
Fig. 7 Group delay of Butterworth filter

2) Texas Instrument, 2008,

### 3.3 주제어장치 설계

모터 제어 산업분야와 전력 계통 분야에서 DSP 계열 제품군은 고속연산을 위해 사용되는데, 본 논문에서는 DSP 계열에서 TMS320F28335를 사용하며, 그 사양은 표 1와 같다).

표 1. TMS320F28335 사양  
Table 1. Specification of TMS320F28335

#	Components	Values
1	Operation clock	150[MHz]
2	Calculation speed	150[MFLOPS], 150[MMAC]
3	Peripheral equipment	12 Channel ADC, ePwm 12 Channel PWM
4	RAM	RAM : 68[KByte], Flash : 512[KByte]
5	Power	Core : 1.9[V], I/O : 3.3[V]
6	GPIO	87 pin

DSP는 총 176개의 핀으로 구성되는데 이들 핀들 중 전압, 전류를 측정하기 위해 A/D 컨버터 핀들이 사용되며, 릴레이 구동을 위해 GPIO 핀들이 사용된다. A/D 컨버터는 전압 및 전류 아날로그 데이터를 디지털 데이터로 변환하여 주 제어 프로그램에 제공하는데, 본 논문에서 사용하는 내부 A/D 컨버터의 사양은 표 2과 같다[12].

표 2. 내부 A/D 컨버터  
Table 2. Internal A/D converter

#	Attributes	Values
1	Resolution	16 Bit
2	Channel	8 Channel × 2
3	Sampling speed	6.25[MSPS]
4	Input type	Single ended
5	Analog input	0[V] to 3[V]

### 3.4 소프트웨어 설계

본 논문에서는 DSP에 내장된 A/D 컨버터를 이용하여 인터럽트 방식을 통해 아날로그 신호를 이진화한다. 샘플링 주기는 ePwm를 통해 설정되며, 설정된 주기에 따라 일정한 주기로 인터럽트가 발생되어 샘플링이 수행된다. A/D 컨버터의 모든 채널에 대한 이

진화가 종료되면 복귀하여 아날로그 신호에 대한 RMS 값을 계산한다. RMS 연산 결과를 통해 고장전류가 발생했다고 판단되면 GPIO 핀을 통해 릴레이 구동 신호를 출력, 고장전류를 차단한다.

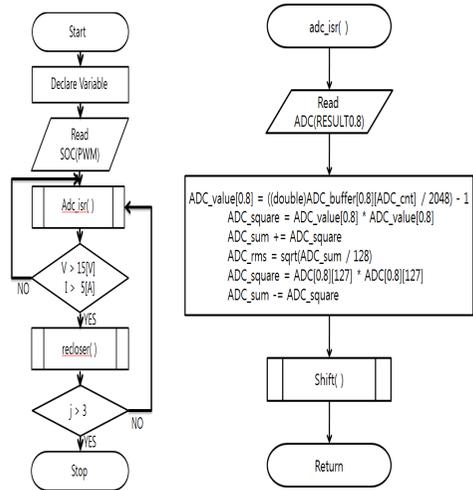


그림 8. 리클로저 동작 알고리즘  
Fig. 8 The operating algorithm of recloser

리클로저의 동작 알고리즘은 전체적으로 그림 8과 같이 설명될 수 있다. 먼저, 시스템이 구동되면 전류, 전압의 아날로그 신호가 A/D 컨버터를 통해 입력된다. A/D 컨버터는 입력되는 신호에 대해 이진화 작업만 수행하므로 이진화된 데이터의 '0'값은 실제 전압(혹은 전류)의 '0'을 의미하지 않으며, 기준이 되는 값을 설정하여야 한다. 원하는 값에 맞도록 정규화한 후 RMS를 계산하는 수식을 적용한다. 그림 8에서 Declare Variable에서는 먼저 아날로그 신호를 받아와 데이터를 128개를 축적하는 버퍼 역할의 배열과 이를 RMS 값으로 변환하기 위한 변수들을 선언한다. 이때 하나의 사이클에 대하여 128개의 샘플링을 위하여 샘플링 속도를 결정하여야 하는데 본 논문에서는 내장된 타이머/카운터를 이용하여 PWM파형을 만들어내고 이 파형을 A/D 컨버터로 보내어 변환의 시작을 알리는 신호 SOC (Start of Conversion)로 사용한다. A/D 컨버터는 이 PWM 파형을 통하여 인터럽트 방식으로 변환을 시작한다. 즉 1/(60\*128)초 마다 A/D 컨버터는 인터럽트 서비스루틴(adc\_isr) 함수를 수행

하여 128개의 버퍼를 쉬프트 연산을 통해 갱신하며, RMS 값으로 변환한다. 이렇게 변환된 값들의 전압, 전류를 측정하여 기준 값보다 크면 제페로 동작을 수행한다.

#### IV. 마이크로 배전선로의 실험적 제작

본 연구에서는 마이크로 배전선로 제작을 위한 기초 기술 개발을 목표로 한다. 따라서 하나의 마이크로 배전선로와 그 선로 상에 설치되는 하나의 마이크로 리클로저 제작하였다. 그림 9는 본 연구에서 실험적으로 제작한 하나의 마이크로 배전선로와 마이크로 리클로저를 보인다. 제작된 마이크로 배전선로에서 주변 압기는 80VA의 용량을 가지는 3개의 단상 변압기를  $\Delta$ -Y 방식으로 결선하여 380V로부터 상 전압 12V를 가지는 3상 교류전원을 얻을 수 있도록 제작하였다. 마이크로 배전선로에서 선로정수들은 고려되지 않았으며, 모든 구간 부하들은 제작의 편의성을 위하여 하나의 집중된 부하로 제작하였다.

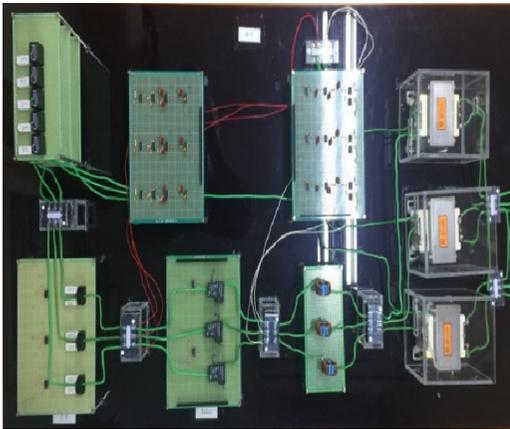


그림 9. 마이크로 배전선로의 실험적 제작  
Fig. 9 Experimental making of micro distribution line

#### V. 결론

본 논문에서는 소형화된 배전선로의 실험적 제작에 대한 연구를 수행하였다. 배전계통을 분석하여 스마트 그리드 배전계통을 모델링하였으며, 소형화된 마이크로

로 3상 배전계통 리클로저를 설계하였다. 마이크로 리클로저는 센서부, 주제어부 그리고 릴레이부로 설계하였으며, 주제어부는 DSP TMS320F28335를 기반으로 입력전류로부터 고장여부를 판별하여 고장전류를 차단하도록 설계하였다. 끝으로 모델링 결과를 기반으로 마이크로 3상 배전계통과 마이크로 3상 리클로저를 실험적으로 제작하여 봄으로서 소형화된 마이크로 스마트 그리드 제작을 위한 기초 기술을 확보할 수 있었다.

하지만 본 연구의 목적은 마이크로 배전선로의 상세 설계가 아닌, 실험적 기초 기술을 연구하는데 중점을 두었다. 따라서 차후, 본 연구에서 확보된 마이크로 배전선로 및 리클로저 제작 기초 기술을 기반으로, 마이크로 배전선로 및 리클로저의 상세 설계에 대한 연구가 수행될 예정이며, 더 나아가 마이크로 배전선로 및 리클로저의 프로토타입 개발을 추진할 예정이다.

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (NRF-2016R1D1A1B01013749)

#### References

- [1] Y. Ko, "A Self-Isolation Method for the HIF Zone under the Network-Based Distribution System," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 2, 2009, pp. 884-891.
- [2] Y. Ko, T. Kang, H. Park, H. Kim, and H. Nam, "FRTU-based Fault Zone Isolation Method in the Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 25, no. 2, 2010, pp. 1001-1009.
- [3] I. Siddiqui, S. Lee, A. Abbas, and A. Bashir, "Optimizing Lifespan and Energy Consumption by Smart Meters in Green-Cloud-Based Smart Grids," *IEEE Access*, vol. 5, 2017, pp. 20934-20945.
- [4] W. Seo and M. Jun, "A Direction of Convergence and Security of Smart Grid and Information Communication Network," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 5, 2010, pp. 477-486.

- [5] K. Park and Y. Lee, "Implement of Watt-Hour Meter Monitoring System by Internet Map Based GUI using Power Line Communication," *J. of the Electrical Engineering and Technology*, vol. 8, no. 10, 2013, pp. 1435-1441.
- [6] H. Song, K. Park, and E. Kim, "Design and Implementation of Stand-alone Microgrid Monitoring System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 4, 2015, pp. 527-532.
- [7] Y. Ko, "A Study on the Agent (Protective Device)-based Fault Determination and Separation Methodology for Smart Grid Distribution System," *J. of the Electrical Engineering and Technology*, vol. 10, no. 1, 2015, pp. 102-108.
- [8] Y. Chai and W. Do, "Development of 2KW Power Bidirectional LDC for Electrical Vehicle," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 1, 2016, pp. 65-72.
- [9] Y. Ko, "The Development of Collection Solution of the Three-Phase Power Data based on the Personal Computer for Supporting the Smart Grid," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 4, 2011, pp. 553-558.
- [10] Y. Ko, S. Oh, H. Kim and I. Kim, "A Study on the Fault Analysis for a Micro Smart Grid Simulator Design Using MEMS' Miniaturization Technology," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 2, 2017, pp. 315-324.
- [11] Korea Electric Power Company, "Protection Relay Practice 1,2 : Digital Protection Relay 3," Kyobo Book, Seoul, Korea, Jan. 1992.
- [12] Synkworks, "TMS320F28x Input Stage Circuit Design," *ADC Handbook*, Feb. 2009.

저자 소개

**오세필(Se-Pil Oh)**



2011년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중

**최성철(Seong-Cheol Choi)**



2012년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중

**김영민(Young-Min Kim)**



2012년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중

**강하나(Ha-Na Kang)**



2014년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중

**고윤석(Yun-Seok Ko)**



1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업(공학사).  
1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).  
1986년~1996년 한국전기연구소 선임연구원.  
1996년~1997년 포스코 경영연구소 연구위원.  
1997년~현재 남서울대학교 전자공학과 교수.  
2012년~2013년 University of Utah 방문교수  
※ 관심분야 : 전력시스템 자동화, 배전자동화, 스마트그리드, 주택자동화, 인공지능, 로봇제어

