

# 벽 컨버터의 새로운 고장전류 고속차단 기법

## New Fault Current Fast Shutdown Scheme for Buck Converter

박 태 식\*, 김 성 환\*

Tae-Sik Park\*, Seong-Hwan Kim\*

### Abstract

This paper presents a novel fast shut-down scheme for Buck converter by using a coupled inductor. Generally, a controller for Buck converter stops generating PWM patterns in various fault cases: Overcurrent, Short circuit, or Overvoltage, but the inductor and capacitor keep supplying their stored energy to loads although the switching operations in Buck converter stopped. The stored energy in the inductor and capacitor could cause electrical stresses on breakers and safety problems. The main idea of the proposed fast shutdown scheme is to demagnetize the inductor core by using a coupled inductor, and its performance and operations are verified by using PSIM Simulation.

### 요 약

벽 컨버터는 전압 직류 계통(LVDC), 가진 분야 및 전기차 충전 분야에서 다양하게 적용되고 있는 전력변환장치이며, 일반적으로 벽 컨버터는 부하측에 단락 등 고장 발생시 반도체 스위칭 소자를 개방시켜 벽 컨버터의 운전을 중지시킨다. 그러나 벽 컨버터의 출력단에 인덕터와 캐패시터에 저장된 에너지로 인해 고장 전류가 지속적으로 부하로 전달되는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 벽 컨버터의 출력측 저역통과 필터에 일반적인 인덕터 대신 커플드 인덕터(Coupled-inductor)를 사용하여 인덕터에 저장된 전기에너지를 부하단에 공급되지 않도록 소모시키는 구성을 포함하는 벽 컨버터의 새로운 고장전류 고속차단 방식을 제안하며, 제안된 방식은 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다.

*Key words* : DC-DC, Buck, converter, fault current, shut-down, coupled inductor

### 1. 서론

그림 1에서와 같이 DC 마이크로그리드내에서는 다수의 DC-DC 컨버터가 사용되고 있다. 특히 DC-DC 컨버터의 출력단에는 인덕터와 캐패시터로 구성된 저역통과 필터가 필수적인 구성요소이다. DC 마이크로그리드내에 컨버터는 기본적으로 과전류, 과전압, 단락 등의 부하단 또는 계통상에 고장이

발생하면 DC-DC 컨버터는 스위치의 동작을 멈춰 출력단으로의 에너지 공급을 중단한다. 그러나 저역통과 필터로 사용되는 인덕터와 캐패시터에 저장된 전기에너지는 스위치의 동작이 중단된 이후에도 부하로 지속적인 전기에너지를 공급하게 되어 고장 처리가 지연되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 벽 컨버터의 출력측 저역통과 필터에 일반적인 인덕터 대신 커플드 인덕터를

\* Dept. of Electrical and Control Engineering, Mokpo National University

★ Corresponding author

E-mail : shkim@mokpo.ac.kr, Tel : +82-61-450-2753

※ Acknowledgment

This paper was supported by Research Funds of Mokpo National University in 2017

Manuscript received Mar. 3, 2019; revised Mar. 6, 2019; accepted Mar. 6, 2019

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.

사용하여 인덕터에 저장된 전기에너지를 부하단에 공급되지 않도록 소모시키는 구성을 포함하는 벽 컨버터의 새로운 고장전류 고속차단 방식을 제안하며, 제안된 방식은 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다[1]-[12].

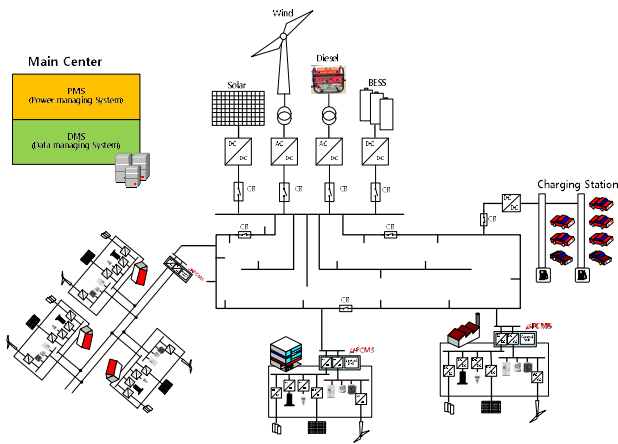


Fig. 1. Example Layout of DC Grid.  
그림 1. DC 마이크로그리드의 기본 구성 예시

## II. 기존의 벽컨버터 고장시 섷다운 방식

### 1. 스위칭 소자 오픈을 이용한 운전정지 방식

기존의 벽 컨버터와 차단기의 구성은 그림 2와 같이 전력용 스위치(SW1)와 프리휠링 다이오드, 그리고 LC 출력필터로 구성되어 있다. 또한, 벽 컨버터의 부하측 또는 자체 고장이 발생시 그림 2에서 벽 컨버터의 PWM 발생을 중단 시켜 전력용 스위치(SW1)를 개방하여 부하측으로의 전기 에너지 전달을 중지시킨다. 그러나 전원측과 부하측의 연결은 차단되지만 출력측에 연결된 인덕터와 캐패시터로 구성된 저역통과필터에 저장된 에너지가

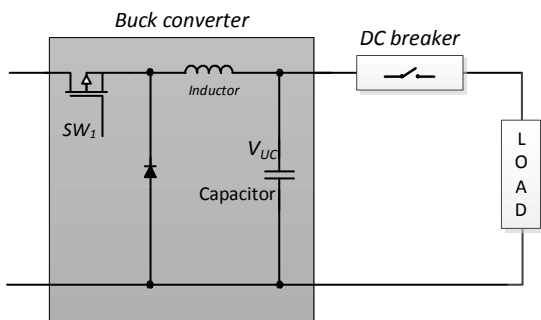


Fig. 2. Conventional Buck Converter and DC Breaker.  
그림 2. 일반적인 벽 컨버터와 DC 차단기 구성 예

부하측에 지속적인 전기에너지를 공급하게 되어 고장전류가 지속적으로 발생되고 차단기 및 계통에 스트레스로 작용하게 된다.

## III. 제안된 벽컨버터 고속 섷다운 방식

### 1. 커플드 인덕터를 이용한 고장전류 고속 섷다운 방식

가. 커플드 인덕터의 구성 및 동작원리

커플드 인덕터의 구성과 형태는 그림 3과 같다. 그림에서와 같이 기존 인덕터와 동일하게 코어와 코일로 구성되어 있으며, 변압기와 유사하게 2차측 코일이 포함되어 있으며 동작원리 역시 변압기와 유사하다. 실제 2차측 코일이 개방되어 있을 경우 커플드 인덕터는 기존의 인덕터와 유사하게 동작하며 2차측 코일에 전류가 흐르는 상황이 되면 일종의 변압기와 유사한 동작원리를 보인다. 커플드 인덕터의 등가회로는 그림 4와 같다. 여기서 M은 상호인덕턴스이고,  $L_1$ ,  $L_2$ 는 자기 인덕턴스 그리고  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ 는 각각 1차측 2차측 전류와 전압을 의미한다. 등가회로에서와 같이 커플드 인덕터는 변압기와 유사한 기능을 가지는 인덕터의 일종으로 볼 수 있다.

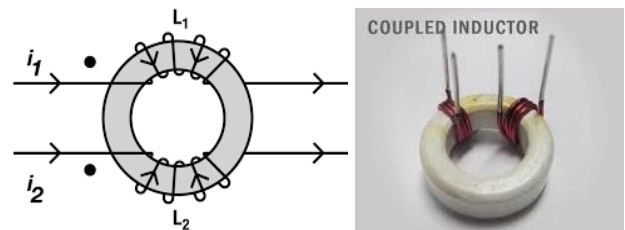


Fig. 3. Coupled Inductor structure.  
그림 3. 커플드 인덕터의 구성

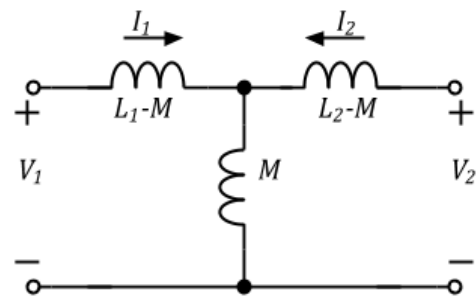


Fig. 4. Equivalent Circuit of Coupled Inductor.  
그림 4. 커플드 인덕터 등가회로

나. 커플드 인덕터를 이용한 벡컨버터 고속 섯다운 방식의 구성 및 동작원리

그림 5는 커플드 인덕터를 이용한 벡 컨버터 고속 섯다운 방식의 기본적인 구성도를 보여준다. 그림에서와 같이 기존 일반적인 인덕터 대신에 커플드 인덕터를 사용하고 있으며 커플드 인덕터의 2차측에는 스위칭부(Switching unit)와 에너지 소모부(Energy Consumption unit)를 포함하고 있다. 벡 컨버터의 정상 운전시에는 스위칭부는 개방상태로 커플드 인덕터는 일반적인 인덕터스로 작용한다. 만약 부하측 단락사고 또는 컨버터의 자체 고장 등이 검출되면 SW1은 개방 상태가 되고 스위칭부는 단락 상태로 변동된다. 이때 인덕터에 저장된 에너지는 에너지소모부에서 소모되어 부하측으로의 전력 공급이 급속하게 감소하게 되며 벡 컨버터의 고속 섯다운이 가능하게 된다. 또한 고속 섯다운부(스위칭부 및 에너지 소모부)가 기존 벡 컨버터 회로로부터 갈바닉 절연상태이기 때문에 고전류에 따른 이차 위험 발생을 방지하게 된다.

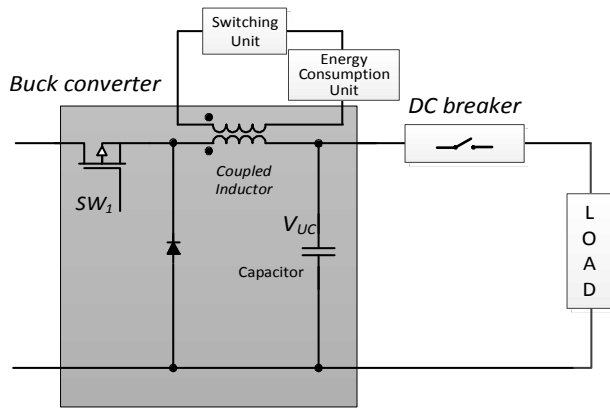


Fig. 5. Proposed Fast shutdown scheme for converter.  
그림 5. 제안된 컨버터 고속 섯다운 방식 구성도

고장 발생으로 인한 고속 섯다운 모드 진입시 벡 컨버터 출력단의 등가회로는 그림 6과 같다. 여기서  $I_{L1}$ 은 인덕터 전류,  $I_C$ 는 캐패시터 전류,  $I_{Load}$ 는 부하전류이며  $I_{L2}$ 는 고속 섯다운 회로부에 전류이다. 부하로 공급되는 전류는 커플드 인덕터에 저장된 에너지와 캐패시터에 저장된 에너지가  $I_{Load}$ 의 형태로 부하에 공급된다.

$$I_{Load} = I_{L1} + I_C \quad (1)$$

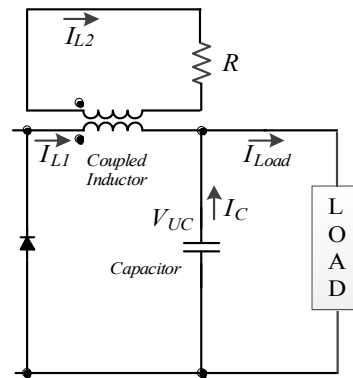


Fig. 6. Equivalent Circuit in Fast-shutdown Mode.  
그림 6. 고속 섯다운 모드시 출력단 등가회로

여기서 인덕터에 저장된 에너지로 인해 부하로 공급되는 전류  $I_{L1}$ 은 그림 7에 간략화된 회로로부터 구할 수 있다. 여기서 벡 컨버터의 부하는 저항 부하로 가정하였으며 다이오드의 전압강하는 무시하였다.

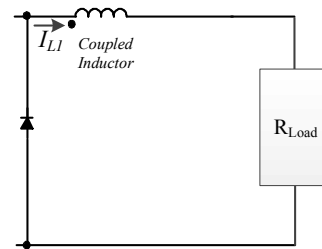


Fig. 7. Simplified RL equivalent circuit.  
그림 7. 간략화된 RL 등가회로

그림 7에서 전압방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} + R_{Load} I_{L1} = 0 \quad (2)$$

식(2)로부터 라플라스 방정식을 유도하고 역라플라스변환을 통해 인덕터 전류 및 전압을 구하면 식 (5), (6)과 같다.

$$L_1 s I_{L1}(s) + R_{Load} I_{L1}(s) = 0 \quad (3)$$

$$I_{L1}(s) = \frac{V_{in}}{L_1 s + R_{Load}} \quad (4)$$

$$I_{L1}(t) = \frac{V_{in}}{R_{Load}} e^{-\frac{R_{Load}}{L_1} t} \quad (5)$$

$$V_{L1}(t) = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = V_{in} e^{-\frac{R_{Load}}{L_1} t} \quad (6)$$

여기서 커플드 인덕터의 1차측과 2차측의 턴수비를 1: n이라 하면 2차측에 유기되는 전압은 식(7)과 같으며, 2차측에 유기되는 전류는 식(8)과 같다.

$$V_{L2}(t) = nL_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = nV_{in} e^{-\frac{R_{Load}t}{L_1}} \quad (7)$$

$$I_{L2}(t) = n \frac{V_{in}}{R} e^{-\frac{R_{Load}t}{L_1}} \quad (8)$$

따라서 커플드 인덕터에 저장된 에너지는 커플드 인덕터의 2차측에서 소모되어 부하로의 전력 공급을 급속하게 소모시켜, 벅 컨버터의 고속 셧다운을 가능하게 한다.

#### IV. 모의 시험 및 고찰

제안된 벅 컨버터의 고장전류 고속 셧다운 방식은 PSIM 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다. 그림 8은 벅 컨버터의 고장전류 고속 셧다운 방식의 시뮬레이션 회로도이다.

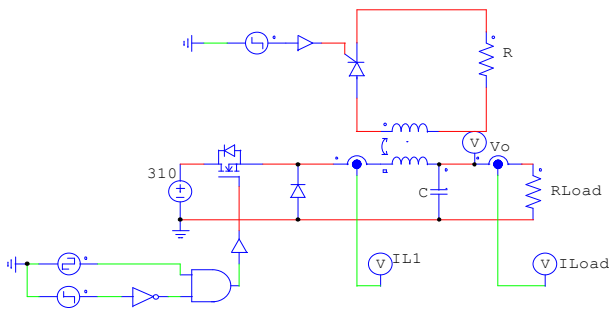
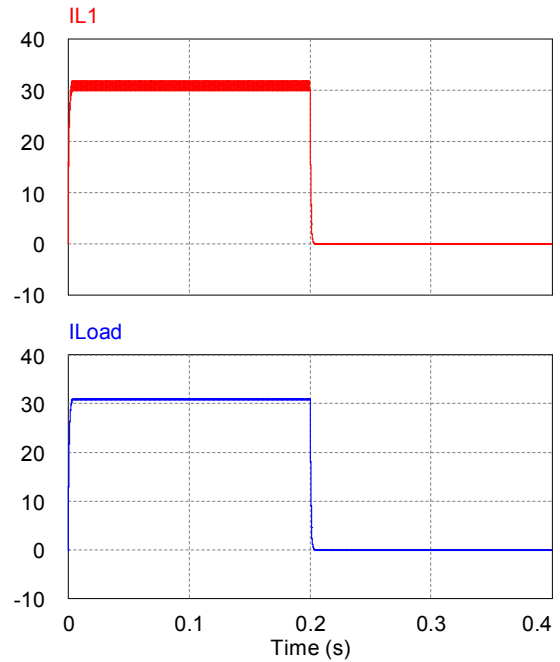


Fig. 8. PSIM Simulation schematic diagram of Proposed method.

그림 8. 제안된 방식의 PSIM 시뮬레이션 회로도

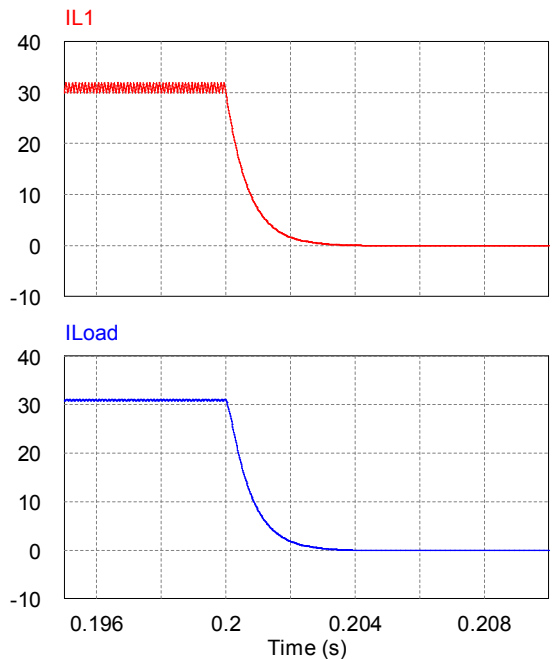
시뮬레이션에 사용된 벅 컨버터의 설계 파라미터는 표 1과 같다. 그림 9는 벅 컨버터의 기존의 셧다운 방식의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서와 같이 정격의 25% 이하가 되는 시점이 0.20076초임을 알 수 있다. 그림 10은 벅 컨버터의 제안된 셧다운 방식의 시뮬레이션 결과이다. 인덕터 전류가 정격의 25%가 되는 시점은 0.20033초이며, 커플드 인덕터의 2차측에 전류( $I_{L2}$ )가 흘러 인덕터의 저장된 에너지가 소모됨을 알 수 있다. 표 2는 벅 컨버터의 기존 셧다운 방식과 제안된 셧다운 방식의 성능 비교이다. 표 2에서는 두 방식의 비교를 위해 전류가 감쇄하여 10A가 되는 시점(정격전류의 25%)의 시

간을 비교하였다. 시뮬레이션에서 0.2에 셧다운을 진행하였으며 기존 방식의 경우 0.20076초에 제안된 방식의 경우 0.20033초에 인덕터 전류가 정격의 25%로 감쇄되었으며 기존 방식에 비해 약 2배 이상의 고속 셧다운이 가능함을 알 수 있다.



(a)  $I_{L1}$  and  $I_{Load}$  waveform.

(a)  $I_{L1}$ 과  $I_{Load}$  파형



(b) magnification of  $I_{L1}$  and  $I_{Load}$  waveform.

(b)  $I_{L1}$ 과  $I_{Load}$  확대 파형

Fig. 9. Conventional Buck converter shutdown.

그림 9. 기존 벅컨버터 셧다운 방식

Table 1. Design Parameter of Buck Converter.

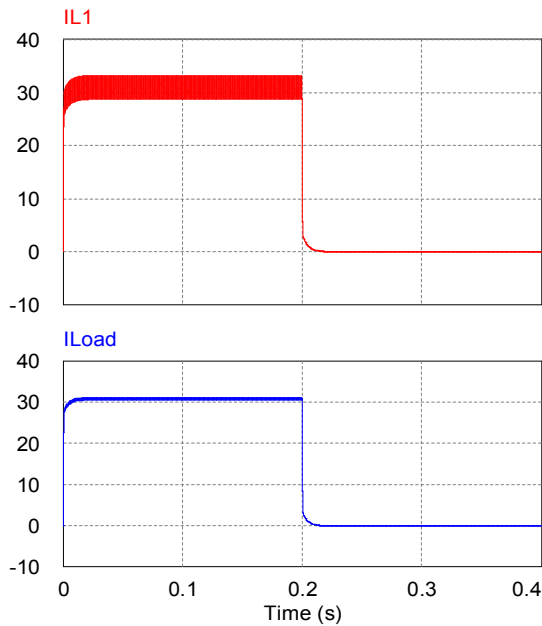
표 1. 벅 컨버터 설계 사용

파라미터	값	파라미터	값
입력전압	310V	정격전류	40A
출력전압	155V	스위칭f	10kHz
자기인덕턴스	3mH	상호인덕턴스	2mH
캐패시턴스	47uF	에너지소모저항	2Ω

Table 2. Comparison of Shutdown Time (t=0.2s Shutdown).

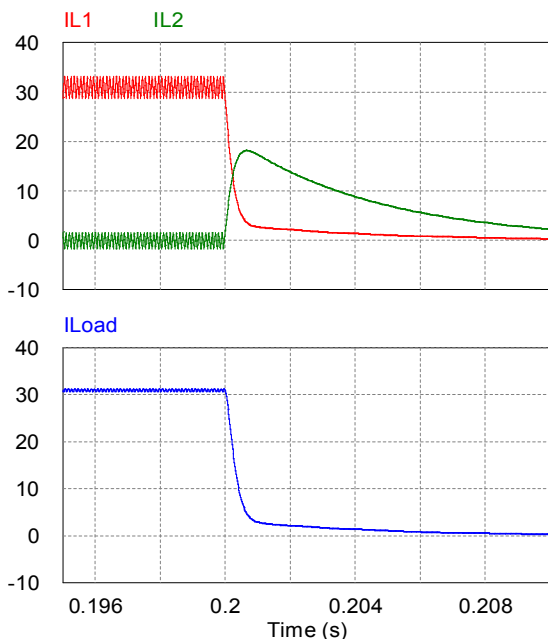
표 2. 고장전류 감쇄 시간 비교 (t=0.2s 섷다운)

	기존 방식	제안된 방식
섷다운 완료시간	2.0076e-001	2.0033e-001
$I_{L1}$	1.0028e+001	1.0393e+001
$I_{Load}$	1.1743e+001	1.2133e+001



(a)  $I_{L1}$  and  $I_{Load}$  waveform.

(a)  $I_{L1}$ 과  $I_{Load}$  파형



(b) magnification of  $I_{L1}$  and  $I_{Load}$  waveform.

(b)  $I_{L1}$ 과  $I_{Load}$  확대 파형

Fig. 10. Proposed Buck converter shutdown scheme.

그림 10. 제안된 벅컨버터 섷다운 방식

### V. 결론

본 논문에서는 벅 컨버터의 출력측 저역통과 필터에 일반적인 인덕터 대신 커플드 인덕터(Coupled-inductor)를 사용하여 부하측 단락 및 컨버터 자체 고장시 인덕터에 저장된 전기에너지를 부하단에 공급되지 않도록 소모시키는 구성을 포함하는 벅 컨버터의 새로운 고장전류 고속차단 방식을 제안하였으며, 제안된 방식은 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다. 제안된 방식은 기존의 섷다운 방식에 비해 2배 이상의 고속 섷다운이 가능하였으며, LVDC 등 다수의 컨버터가 사용되는 계통에 있어서 벅 컨버터 자체의 고속 섷다운 기능은 계통내 DC 브레이커의 스트레스 저감 및 계통 안정화 그리고 사고 안정도에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

### References

[1] Pasi Nuutinen, "Short-Circuit Protection in a Converter-Fed Low-Voltage Distribution Network," *IEEE Trans. on POWER ELECTRONICS*, Vol. 28, No. 4, 2013. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2213845

[2] ABB, "Faults in LVDC microgrids with front-end converters," *ABB SACE Technical Application Papers* No.14, 2015.

[3] Marek Bartosik, Ryszard Lasota, Franciszek Wóojcik, "Modern dc circuit breakers," *tts* 9, 2006.

[4] Wang Y. Kong, "Review of DC Circuit Breakers for Submarine Applications," *Maritime Platforms Division, Defence Science and Technology Organisation*, 2012.

[5] Harald Fien, "High-voltage circuit-breakers:

Trends and recent developments,” *Siemens AG*, 2011.

[6] ABB, “ABB circuit-breakers for direct current applications,” ABB SACE, *Technical Application Papers* No.5, 2015.

[7] Dragan Jovcic, Boon Teck Ooi, “Developing DC Transmission Networks Using DC Transformers,” *IEEE Trans. on POWER DELIVERY*, Vol. 25, No. 4, 2010. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2052074

[8] Suwat Kitcharoenwat, Mongkol Konghirun, “A Novel Single-Phase AC - AC Converter for Circuit Breaker Testing Application,” *IEEE Trans. on INDUSTRY APPLICATIONS*, Vol. 50, No. 6, 2014. DOI: 10.1109/TIA.2014.2311504

[9] Abdullah A. S. Emhemed and Graeme M. Burt, “An Advanced Protection Scheme for Enabling an LVDC Last Mile Distribution Network,” *IEEE Trans. on SMART GRID*, VOL. 5, NO. 5, 2014. DOI: 10.1109/TSG.2014.2335111

[10] L. Tang and B.-T. Ooi, “Locating and isolating DC faults in multiterminal DC systems,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, 2007. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899276

[11] Jae-Do Park, Jared Candelaria, Liuyan Ma, and Kyle Dunn, “DC Ring-Bus Microgrid Fault Protection and Identification of Fault Location,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 28, No. 4, 2013. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2267750

[12] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, “Protection of low-voltage DC microgrids,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 24, No. 3, 2009. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2016622

## BIOGRAPHY

### Tae-Sik Park (Member)



1994 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
1996 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
2000 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2000~2005 : Senior Engineer, Samsung Electronics.

2005~2013 : Administrative Official, Korea Intellectual Property Office.

2013~Present : Associate Professor, Electrical and Control Engineering, Mokpo National University

### Seong-Hwan Kim (Member)



1991 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
1995 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
1998 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

1999~Present : Professor, Dept. Electrical and Control Engineering, Mokpo National University