

# PSCAD/EMTDC를 활용한 LVDC 고장분석

## A Study on the Fault Analysis of the LVDC Using PSCAD/EMTDC

김수환\* · 최규완\* · 문종필† · 김태훈\*\* · 김주용\*\*\*

(Soo-Hwan Kim · Gyu-Wan Choi · Jong-Fil Moon · Tae-Hoon Kim · Ju-Yong Kim)

**Abstract** - DC microgrid system is attracted attention in the world, because DC distribution system is more energy efficient than AC distribution system. To analyse the contribution effects of distributed generation(DG) in LVDC distribution system through modeling the Rectifier, DC/DC converter, Energy Storage System(ESS) and Photovoltaic(PV). using PSCAD/EMTDC. This paper analyses fault response characteristics in LVDC distribution system according to the interconnection and islanding operation of DG. Based on research results on the paper, direction for development of fault current reduction method for LVDC distribution system is suggested.

**Key Words** : Low-voltage DC, Microgrid, Fault analysis

### 1. 서론

마이크로그리드란 소규모 지역에 풍력, 태양광, ESS 등을 배전계통에 연계하여 자급자족할 수 있는 시스템이다. 마이크로그리드를 구성하는 분산전원들은 대부분이 직류로 발전되고, 직류는 전력변환 손실이 교류보다 적으므로 손실의 최소화를 통하여 신재생에너지의 효율을 10~15%를 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 전력변환손실이 적은 직류 시스템이 전력공급에 보다 적합한 것으로 평가되고 있다. 또한, 직류 시스템은 교류 시스템보다 더 많은 전력을 전송할 수 있으므로 마이크로그리드 네트워크를 더 효율적으로 사용할 수 있다[1-4]. DC 고장해석에 대한 기존의 연구에서는 교류시스템을 직류배전계통으로 변환하기 위하여 필수적으로 요구되는 전력변환기기를 대한 고장분석 위주로 연구가 진행되어왔다[5-7]. 그러나 LVDC시스템이 실제로 적용되기 위해서는 전력변환기기가 실제 배전계통에 적용되었을 경우에 대한 종합적인 고장분석 및 분산전원이 포함된 직류계통에 대한 고장분석이 필수적이다. 또한, 매 반주기마다 전류가 영이 되는 교류배전 방식과는 달리 직류배전은 단방향으로 연속적으로 전류가 흐르기 때문에, 향후 과전류의 차단을 위해서는 분산전원이 포함된 직류배전계통에 대한 고장해석이 반드시 필요하다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에

서는 분산전원이 포함된 배전계통의 구성을 설명하고, 3장에서는 저압직류배전계통에 단락사고시 고장응답특성을 분석하였다. 4장에서는 PSCAD/EMTDC를 통해 부하추중 시뮬레이션을 수행하여 모델링의 유효성을 검증하고 단락사고시 고장루프의 형성에 따른 LVDC배전계통의 영향을 살펴보고 있으며, 고장전류 저감방안에 대하여 설명하였다.

### 2. LVDC 배전계통의 구성

그림 1은 LVDC 배전계통의 구성을 나타낸다, 변환기기는 AC의 3상 전압을 ±750[V]의 직류전압으로 변환하는

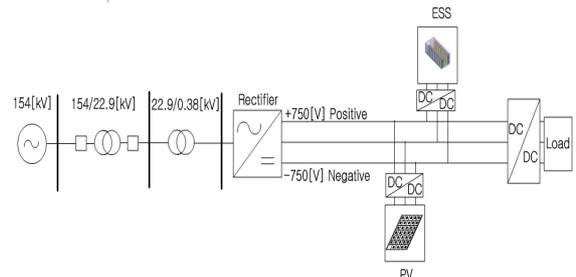


그림 1 DC 배전계통 구성도  
 Fig. 1 DC distribution system configuration

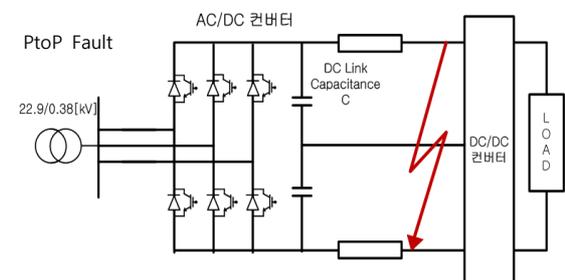


그림 3 DC 배전계통 회로도  
 Fig. 2 Circuit of DC distribution system

† Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

E-mail : moon@ut.ac.kr

\* Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

\*\* Korea Electrical Engineering & Science Research Institute(KESRI), Korea

\*\*\* Korea Electric Research Institute(KEPRI), Korea

접수일자 : 2016년 8월 8일

수정일자 : 2016년 8월 22일

최종완료 : 2016년 8월 25일

Rectifier, 직류전압을 부하에 공급하기 위한 DC/DC컨버터, 분산전원을 계통에 연계하기 위한 DC/DC컨버터가 있으며, 분산전원으로는 ESS와 태양광시스템(PV)을 설치하였다. Rectifier의 회로도, 선로, DC/DC컨버터, 부하, 그리고 단락 사고가 포함된 LVDC 배전계통 회로도에는 그림 2와 같다.

### 3. LVDC 고장특성

DC 배전계통에서 Positive-Negative 단락사고(PtoP)의 경우 3단계로써 해석할 수 있다[6]. 1단계로, 계통전압의 유지와 전류의 리플감소를 위하여 Rectifier에 DC-link Capacitor를 설치하는데, 단락사고 시 이 커패시터에 충전되어 있던 전하가 방전하게 되고 전력소자가 자기 보호를 위해 개방되는 단계이다. 그림 3은 1단계에 대한 고장전류의 흐름과 회로도를 나타낸다. 2단계로, 선로 인덕터 성분에 의한 ‘전류의 연속성’ 때문에 Rectifier는 자기 보호를 위하여 역병렬다이오드를 도통하는 단계가 나타난다. 이에 대한 고장전류의 흐름과 회로도는 그림 4와 같다. 마지막으로, 역병렬 다이오드는 6펄스 다이오드 정류기로써 동작하게 되고 공급전원에 의한 전류가 정류되어 DC배전선로에 흐르게 된다. 고장전류의 흐름과 회로도는 그림 5와 같다.

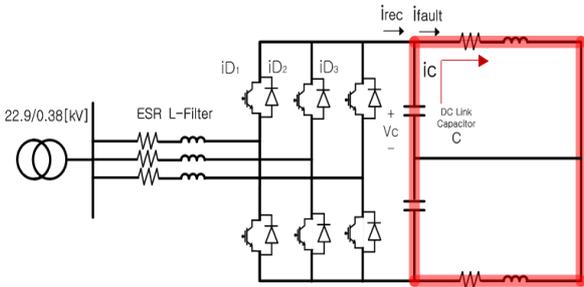


그림 3 DC-Link capacitor에 의한 고장전류 흐름  
Fig. 3 fault current path contributed by DC-Link capacitor

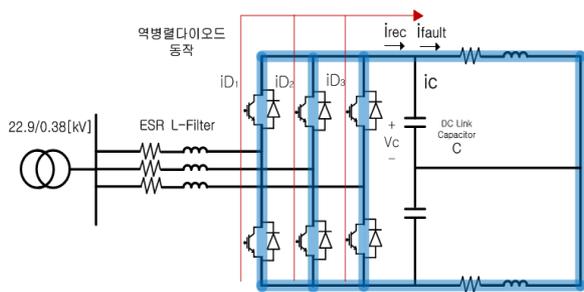


그림 4 선로 인덕터에 의한 고장전류 흐름  
Fig. 4 fault current path contributed by line inductor

다음 그림 6은 0.6[s]에 선로 단락사고시 Rectifier의 출력 전류를 나타내고 있으며, 2가지의 고장전류가 선로 측으로 흐르게 된다. 그림 6(a)의 경우는 단락사고시 DC-link Capacitor에 의한 방전전류이며 3,300[A] 정도의 매우 큰 전류가 매우 짧은 시간인 2[ms]동안 방전을 한다. 이때 전력소자들은 자기보호를 위하여 개방된다. (b)는 DC-link

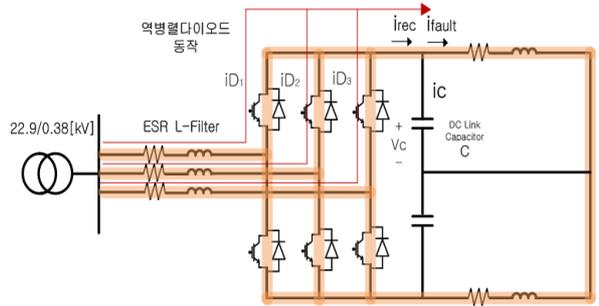
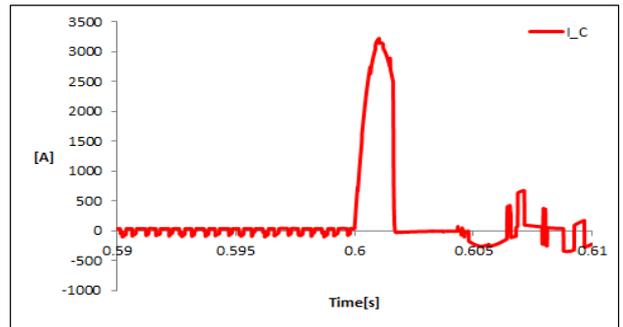
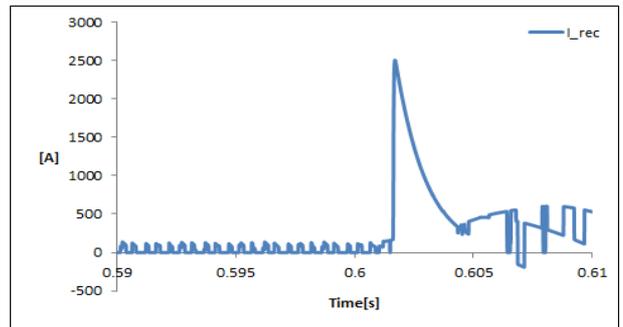


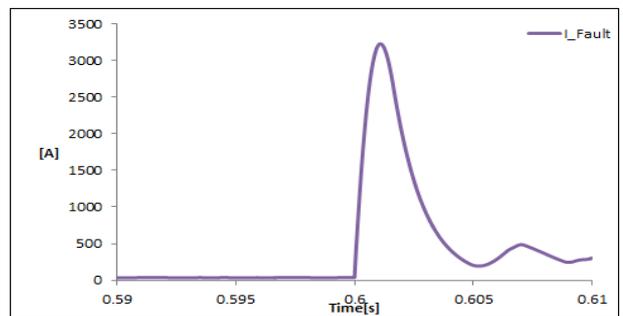
그림 5 공급 전원에 의한 고장전류 흐름  
Fig. 5 fault current path contributed by input source



(a) DC-link capacitor 방전전류



(b) 역병렬 다이오드 방전전류



(c) 합성전류

그림 6 Rectifier의 고장전류  
Fig. 6 Fault current at Rectifier

Capacitor의 방전이 끝난 후 Rectifier의 전력소자들이 자기 보호를 위하여 개방되었으므로 다이오드는 역병렬 다이오드로써 동작하고 이때 흐르는 전류는 약 2,500[A] 정도가 흐르게 된다. 따라서 Rectifier의 고장 전류는 DC-link Capacitor

에 의한 방전전류 (a)와 역병렬 다이오드에 흐르는 전류 (b)와의 합성 전류인 (c)의 고장전류가 선로에 흐르게 된다. 고장전류는 3,300[A]이며 약 5[ms]동안 방전하며 DC/DC컨버터의 고장특정도 유사함을 보이고 있다[6, 7].

#### 4. LVDC 시뮬레이션

본 장에서는 LVDC 배전계통에 분산전원 연계시 두 가지 운전모드(연계, 독립)에 대한 단락사고(PtoP)에 대한 고장분석을 수행하였다. 표 1은 LVDC 배전계통 구성기기에 대한 파라미터를 나타낸다. 여기서 부하는 100[kW]로 고정하였다.

표 1 AC/DC 배전계통 파라미터

Table 1 Parameters of DC Distribution System

DC Distribution System	
Transformer	Base MVA : 2[MVA]
	22.9/0.38 [kV] $\Delta$ -y
Distributed Generation	PV, ESS
Line Impedance	3.48+j7.44[%/km]

##### 4.1 분산전원 연계·독립운전 시나리오

표 2는 분산전원의 연계 및 독립 운전모드에 대한 시나리오를 나타낸다.

표 2 분산전원 운전 시나리오

Table 2 Scenarios of distributed generation operation

Operation	Cases	Capacity
Interconnection	Case1	Rectifier 100 kW
	Case2	Rectifier 50 kW PV 50 kW
	Case3	Rectifier 20 kW / PV 50 kW ESS 30 kW (방전)
Islanding	Case4	PV 100 kW
	Case5	PV 50 kW ESS 50 kW (방전)
	Case6	PV 150 kW ESS 150 kW (충전)

그림 7의 Case1, 2, 3은 AC계통과 연계운전을 하는 경우이며, Case 4, 5, 6은 LVDC 계통이 독립운전을 하고 있는 경우에 대한 전원 및 각 분산전원의 출력을 나타낸다.

Case1은 0.25[s]에 Rectifier 100[kW]의 부하에 전력을 모두 공급하고 있다. Case2는 시간별 동작으로써, 0.05[s]에 50[kW]의 PV가 투입되고 0.25[s]에 100[kW]의 부하가 투입된다. 부하가 투입 되기전 Rectifier는 50[kW]의 잉여전력을 AC계통에 공급하는 역송운전을 하고 있다. Case3은 시간별 동작으로써, 0.05[s]에 50[kW]의 PV가 투입되고 0.25[s]에 100[kW]의 부하가 투입된다. 부하가 투입되기 전까지 20[kW]의 용량을 가진 Rectifier는 잉여전력 20[kW]를 AC

계통에 역송운전을 하며, 나머지 잉여전력 30[kW]는 ESS에 충전된다. 부하투입 후 직류배전계통의 필요전력에 대한 응답으로 Rectifier는 역송운전을 중단하여 직류배전계통에 20[kW]의 전력을 공급하고 ESS는 방전하여 30[kW]의 전력을 공급한다. Case4는 0.05[s]에 100[kW]의 부하가 투입되고 부하가 투입되기 전까지인 0.25[s] 동안 Rectifier는 AC계통에 100[kW]의 전력을 역송운전하고 있다. 부하 투입 후, Rectifier는 역송운전을 중단하고 PV는 독립운전을 하여 부하를 모두 감당하고 있는 경우이다. Case5는 시간별 동작으로써, 0.05[s]에 50[kW]의 PV가 투입되고 0.25[s]에 100[kW]의 부하가 투입된다. 부하가 투입되기 전까지 ESS는 잉여전력인 50[kW]를 충전하고 있다. 부하 투입 후 직류배전계통에 필요전력에 대한 응답으로 ESS는 방전하여 계통의 필요전력을 만족하고 있다. Case6은 0.5[s]에 150[kW] 전력의 PV가 투입되고 0.25[s]에 100[kW]의 부하가 투입된다. 부하가 투입되기 전까지 ESS는 150[kW]의 잉여전력을 충전하고 있다. 부하 투입 후 ESS는 직류배전계통의 필요전력과 PV의 공급전력과의 차인 50[kW]의 전력을 충전한다.

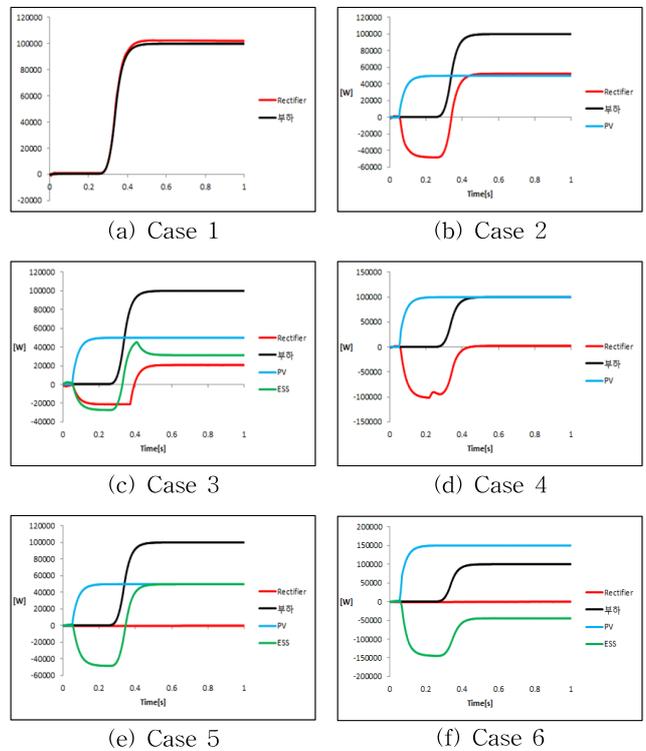


그림 7 고장 시나리오 시뮬레이션

Fig. 7 Scenario of fault simulations

##### 4.2 고장전류 분석

그림 8은 고장분석을 위한 계통 구성도를 나타낸다. 고장전류 측정지점은 Rectifier 출력측으로 설정하였다.

그림 9는 표 2에서 계획한 고장시나리오에 따른 Positive, Negative 그리고 Neutral의 고장전류를 측정하였다. 0.6[s]에 단락사고시 고장전류의 측정결과, 연계운전 case1, 2, 3 독립운전 case4, 5의 경우 3장에서 설명한 단락사고 시 고장응답

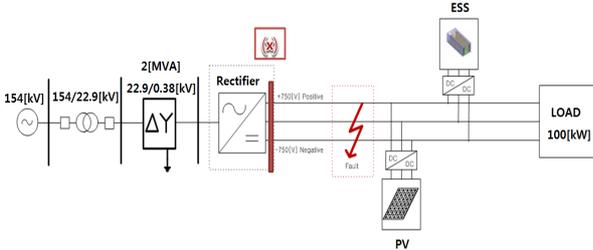


그림 8 고장전류 측정지점  
Fig. 8 Measurement point of fault current

특성과 동일한 결과를 보이고 있으며 분산전원의 연계·독립 운전과는 관계없이 Rectifier측에서 측정된 고장전류가 모두 동일한 고장응답 특성을 보이므로 분산전원이 연계된 직류 배전계통에서는 상시전류, 분산전원 용량이 고장전류 기여효과가 크다고 볼 수 없으며, DC-link capacitor에 의한 방전 전류가 LVDC의 단락사고 고장해석에 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

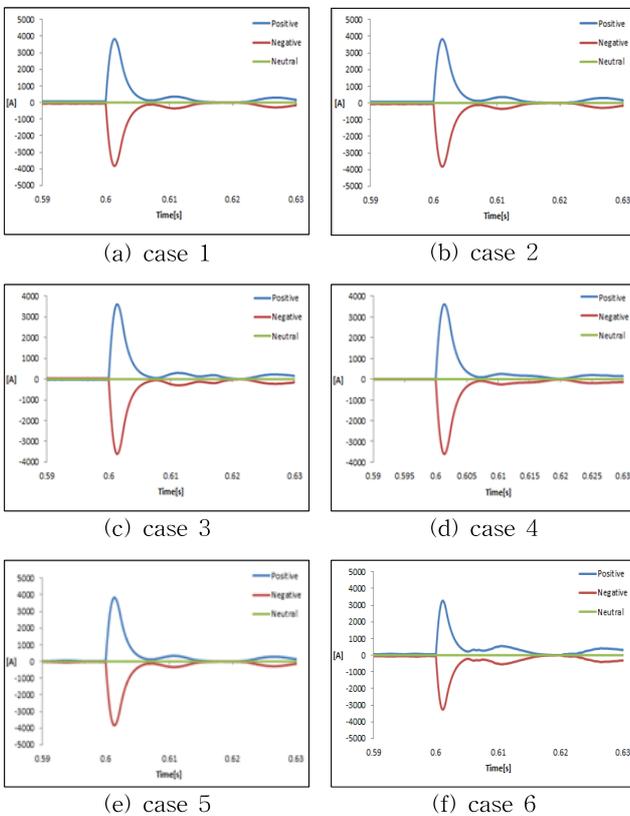


그림 9 Rectifier측 고장전류 파형  
Fig. 9 Flow of Fault current of contributed by Rectifier

### 4.3 고장전류 저감 방안

그림 10은 Rectifier측의 DC-link capacitor 용량을 10[mF], 7[mF], 5.2[mF], 1.5[mF]으로 가변 하여 단락고장시 고장전류 파형을 나타내고 있다. 4.1절에서 수행한 시뮬레이션의 Rectifier측 DC-link Capacitor의 용량은 5.2[mF]이다. 용량가변 시뮬레이션 결과로써, 용량 5.2[mF]보다 큰

10[mF], 7[mF]의 경우 약 4,000[A], 3600[A]의 고장전류가 측정되었고, 용량 5.2[mF]보다 작은 1.5[mF]의 고장전류의 크기는 약 2000[A]가 측정되었다. 따라서 DC-link Capacitor의 용량이 크면 클수록 Rectifier측의 고장전류의 크기가 증가함을 볼 수 있으며 반대로 작으면 작을수록 고장전류의 크기가 감소됨을 보이고 있으므로 DC-link capacitor 용량에 따라 고장전류 크기가 달라짐을 확인할 수 있다. 그러나 고장전류 감소를 위하여 DC-link Capacitor의 용량을 낮추게 되면 상시전류에 리플이 발생하여 전기품질을 저하시킬 수 있으므로 다양한 요소를 고려하여 커패시터의 용량을 결정해야 할 것으로 사료된다.

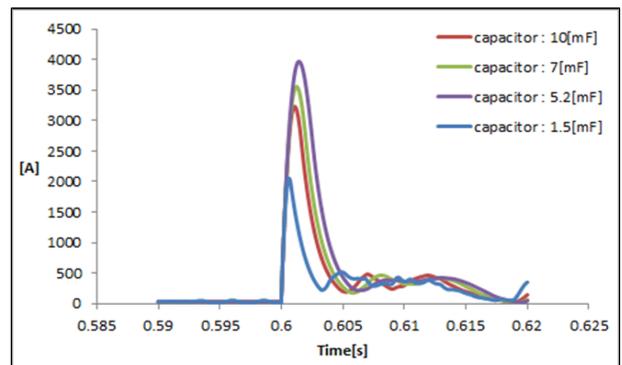


그림 10 DC-link capacitor 용량가변에 따른 고장전류  
Fig. 10 Fault current of contributed by variation dc-link capacitor

## 5. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 활용하여 LVDC 배전계통을 모델링하고 단락사고에 대한 고장응답특성을 분석하였다. 단락사고시 고장응답특성은 3단계로 분류하여 해석할 수 있다. DC-link capacitor 방전에 의한 전류인 약 3,300[A]의 매우 큰 전류가 약 2[ms]동안 선로측으로 방전하는 첫 번째 단계, 선로 인덕터 '전류의 연속성'에 의한 방전전류 약 2,500[A]가 3[ms]동안 선로측으로 방전하는 두 번째 단계, 마지막으로 전원에 의한 유입전류인 세 번째 단계로 분류할 수 있다. LVDC 배전계통에 분산전원을 투입하여 분산전원 용량에 따른 연계·독립 운전시 단락고장에 대한 고장분석에 대한 결과로써, 직류배전계통에서 단락사고시 고장전류의 기여요소에는 분산전원에 대한 영향은 적으며, DC-link capacitor의 방전전류가 계통에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 시뮬레이션을 통하여 모델링의 유효성 및 고장응답특성을 검증하고 고정전류 저감 방안에 대하여 제시하였다. 고장전류 저감방안과 그에 대한 문제점을 분석하였으며, 추후 고장종류에 따른 고장루프형성, 고장방향 등에 대한 고장분석을 수행할 계획이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원 재원으로 기초 전력연구원(1551)주관으로 수행된 과제입니다.

## References

- [1] Seung-Yoon Lee, "KEPCO's power distribution DC power industry efforts to promote new markets", Journal of Electrical world Monthly magazine, pp. 38-43, July. 2015.
- [2] Gun-Woo Park, "Status and Outlook of LVDC Power Distribution ", Journal of Electrical world Monthly magazine, pp. 61-67, September. 2014.
- [3] R. Dugan and T. McDermott, "Distributed Generation", IEEE Ind. appl. Mag., Vol. 8, No. 2, pp. 19-25, Mar. 2012.
- [4] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol 53, No. 5, pp. 1398-1407, Oct. 2006.
- [5] Dong. D, "Grid-Interface Bidirectional Converter for Residential DC Distribution Systems", Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 28, No. 4, pp. 1655-1679, 2013.
- [6] Jin Yang, "Short-Circuit and Grounding Fault Analyses and Location in VSC-Based DC Network Cables", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol, 59, No. 10, 2012
- [7] Chul-Ho Noh, Gu-Hyeon Gwon, Jong-Il Song, et al. "An Analysis of Fault Response Characteristics in Low Voltage DC Distribution System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65. No. 6, pp. 911-917, 2016

## 저 자 소 개

**김수환 (金洙煥)**

2015년 한국교통대 전기공학과 졸업.  
2015년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 043-841-5151

Fax : 043-841-5140

E-mail : soohwan89@ut.ac.kr

**최규완 (崔圭完)**

2015년 한국교통대 전기공학과 졸업.  
2015년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 043-841-5151

Fax : 043-841-5140

E-mail : ut-kyuwan@ut.ac.kr

**문종필 (文鍾必)**

2000년 숭실대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).  
2009년~현재 한국교통대학교 전기공학과 부교수

Tel : 043-841-5146

Fax : 043-841-5140

E-mail : moon@ut.ac.kr

**김태훈 (金泰勳)**

1079년 6월 23일생. 2005년 경북대 전기공학과 졸업. 2007년 경북대학교 전기공학과 졸업(석사). 2016년 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 2012년~현재 기초전력연구원 차세대변전연구팀장 재직

E-mail : kth79@snu.ac.kr

**김주용 (金周勇)**

1969년 9월 27일생. 1992년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원스마트배전연구소 책임연구원.

Tel : 042-865-5981

Fax : 042-865-5944

E-mail : juyong.kim@kepco.co.kr