

루프화 배전계통에 초전도 한류기 적용에 따른 Recloser-Fuse 보호협조 분석

Analysis on Recloser-Fuse Coordination in Loop Power Distribution System with Superconducting Fault Current Limiters

최 규 완* · 김 수 환* · 문 중 필†
(Kyu-Wan Choi · Soo-Swan Kim · Jong-Fil Moon)

Abstract - Recently, protection coordination issues can occur due to increased fault current in power system when power system being changed radial power system to grid system such as loop power system, micro grid and smart grid. This paper analyzed Recloser-Fuse coordination in loop power distribution system with Superconducting Fault Current Limiters(SFCLs) when single line ground fault occur in loop power distribution system with SFCLs. We analyzed Recloser-Fuse Coordination in radial power distribution system and changed coordination caused by increased Fault current because of loop system when single line ground fault occur in power distribution system. This paper simulated to improve changed coordination using SFCLs in loop power distribution system. Power distribution system, SFCLs and protective devices are modeled using PSCAD/EMTDC

Key Words : Loop power distribution system, Recloser-fuse coordination, Superconducting fault current limiters

1. 서 론

오늘날 우리나라의 전력수요는 큰 폭으로 증가하고 있으며, 이에 대응하기 위하여 전원설비와 분산전원이 신증설 및 전체계통의 규모가 지속적으로 확대되고 있다. 전원설비의 지속적인 증설과 계통의 루프화로 인하여 등가 임피던스는 감소하고 고장전류는 증가하고 있다. 고장전류가 차단기의 차단내력을 상회하는 변전소가 생기며, 이 경우 계통의 고장전류를 안정되게 차단하지 못하여 전력설비 및 보호기기 등에 고장이 파급 될 수 있다[1].

현재 배전계통은 방사상 형태의 계통에서 루프화 배전계통, 스마트그리드, 마이크로그리드 등으로 변화를 위한 많은 연구가 진행 중이다[2, 3]. 현재 우리나라의 배전계통은 방사상 형태로 구성되어 있으며 점차적으로 루프, 스마트그리드로 변화하게 될 것이다. 루프화 배전계통의 경우 기존의 방사상 배전계통보다 고장전류는 증가하게 되고, 양방향 계통으로 변화하게 된다. 이에 따라 기존의 보호협조 또한 변화하게 되고 이에 대한 연구가 진행되고 있다[4, 5]. 참고문헌 [6]의 경우 방사상 배전계통에서 루프화 배전계통으로 전환 시 상정사고에 대한 루프화 배전계통의 신뢰도가 방사상 배전계통에 비하여 전반적으로 향상된 것을 기술 하고 있다.

배전계통의 루프화를 통하여 변화되는 보호협조, 신뢰도에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 보호협조의 경우 통신을 이용한 보호협조[4, 5]에 관한 연구도 진행되고 있다. 배전계통의 단상분기의 보호기기의 경우 대부분 선로용 퓨즈를 사용하고 있다. 선로용 퓨즈는 I^2R 의 열에너지를 이용한 보호기기로 통신을 통한 보호협조가 불가능 할 수 있다.

루프 배전계통에서 고장 발생 시 증가된 고장전류 및 전압 Sag를 저감하기 위해 초전도 한류기 적용에 관한 연구가 진행되었다[7]. 그러나 방사상 배전계통에서 부하를 동일하게 유지하여 루프화 하였을 때, 리클로저와 퓨즈간의 보호협조가 변화되어 보호협조 방식에 재구성이 필요하다. 이에 대한 선행 연구는 거의 없는 상태이며, 기존에 설치되어 있는 보호기기를 교체하거나 추가적인 설치는 많은 인력과 비용이 요구되므로 현재 설치되어 있는 보호기기를 활용하여 보호협조를 구성하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 방사상 배전계통을 루프화하여 변화된 리클로저-퓨즈 보호협조를 재구성하기위해 루프화된 피더 중심에 초전도 한류기를 적용하여 기존의 고장피더가 아닌 루프화로 인하여 다른 피더에서 발생하는 고장전류를 제한하여 방사상 배전계통의 리클로저-퓨즈 보호협조와 비교 분석하였다. 방사상, 루프화 배전계통, 보호기기 및 부하등은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 모델링 하였다.

2. 배전계통 구성 및 모델링

본 논문에서는 현재 우리나라에서 사용되는 형태인 방사상 배전계통에서 운용되고 있는 리클로저-퓨즈 보호협조가 루프화 배전계통으로 변경하였을 때 루프화로 증가된 고장전류로 인하여 변화되는 보호협조를 분석하기위해 방사상

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering
Korea National University of Transportatio, Korea
E-mail : moon@ut.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering Korea National University
of Transportatio, Korea

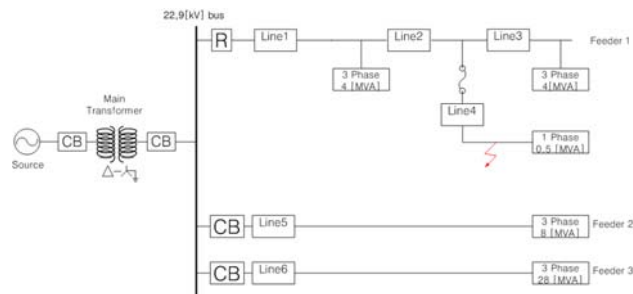
접수일자 : 2015년 6월 17일

수정일자 : 2015년 8월 7일

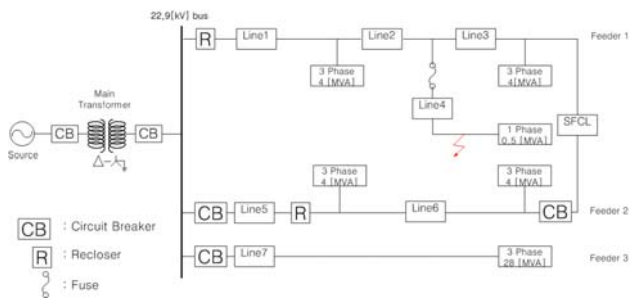
최종완료 : 2015년 8월 10일

배전계통과 루프화 배전계통을 모델링 하였으며, 루프화 배전계통에 고장 발생 시 고장피더가 아닌 루프화를 통한 다른 피더에서 공급되는 고장전류를 저감하기 위해서 피더1과 피더2의 중간 지점에 초전도 한류기를 적용하여 모델링 하였다. 그림 1은 시뮬레이션을 하기위한 모의 배전계통 구성도이며, 그림 1(a)는 방사상 배전계통을 그림 1(b)는 루프화 배전계통을 나타낸다.

주 전원은 154[kV]로 모델링하여 154/22.9[kV]의 변압기를 통하여 배전계통에 공급되는 전압은 22.9[kV]로 하였으며, 배전계통 전체 부하용량은 44.5[MVA]로 모델링 하였다.



(a) Radial power distribution system



(b) Loop power distribution system

그림 1 배전계통 모델링

Fig. 1 Modeling of power distribution system

표 1은 배전계통 구성에 필요한 파라미터를 보여준다. 계통의 정전력부하와 정저항부하는 80%, 20%로 구성하였다. 피더1은 4[MVA], 0.5[MVA], 4[MVA]로 구성되었으며 0.5[MVA]의 단상분기회로에서 1선 지락고장을 모의 하였다. 초전도 한류기는 루프화 배전계통에서 적용하였고, 피더1과 피더2의 중간 지점에서 초전도 한류기를 적용하여 고장이 발생하지 않은 피더에서 공급되는 전류를 감소시키는 역할을 수행할 수 있도록 하였다. 그림 1에서는 피더2가 보조적인 역할을 하기 때문에 부하를 증가화하여 표현하였으며, 그림 2의 피더2는 피더1과 루프화되어 고장에 직접적인 영향을 미치므로 상세하게 표현하였다. 그림 2의 피더2는 계통의 신뢰도를 높이기 위해 참고논문[5]의 통신을 이용한 보호 협조를 적용하기 위해 리클로져와 차단기를 추가 하였다. 피더3의 경우 피더1과 피더2의 용량과 다르게 모델링 하였으며, 여러 피더를 하나의 피더로 증가화한 것으로 28[MVA]로 나타내었다.

표 1 배전계통 구성 파라미터

Table 1 Parameters of Power Distribution System

구분	데이터
전원	154 [kV], 100 [MVA]
변압기	154/22.9 [kV], 45 [MVA]
선로임피던스	3.48+j7.44 [%/km] (정상)
	8.68+j22.86 [%/km] (영상)
(a)선로길이 [km]	Line 1, 2, 3, 4 = 1, 1, 1, 0.5
	Line 5 = 3
	Line 6 = 6
(b)선로길이 [km]	Line 1, 2, 3, 4 = 1, 1, 1, 0.5
	Line 5, 6 = 1.5, 1.5
	Line 7 = 6
부하용량	피더1 8.5 [MVA], pf 0.95 lag
	피더2 8 [MVA], pf 0.95 lag
	피더3 28 [MVA], pf 0.95 lag

3. 초전도 한류기 모델링

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 저항형 초전도 한류기를 모델링하여 루프화 배전계통의 중간 부분에 적용하여 피더1 또는 피더 2의 고장전류를 감소시키기 위해 사용 하였으며, 켄치 및 회복 동작에 관한 특성식은 다음 식(1)과 같다[8].

$$R_{SC}(t) = \begin{cases} 0 & \\ R_n \sqrt{1 - e^{-\frac{T - t_{quenching}}{T_f}}} & \\ a_1(t - t_{recovery1}) + b_1 & \\ a_2(t - t_{recovery2}) + b_2 & \end{cases} \quad (1)$$

저항형 초전도 한류기는 고장이 발생하지 않은 상태에서는 저항이 0(Zero)이기 때문에 계통에 영향을 주지 않는다. 계통에 고장이 발생하게 되면 계통전류가 상승하여 초전도 소자가 초전도성을 잃고 켄치되어 상전도상태로 변화하게 되며 정해진 저항값을 갖게 되어 계통의 고장전류를 감소시키는 역할을 하게 된다. 계통의 고장이 제거된 후에는 1차 회복과 2차 회복을 통하여 초전도 상태가 되어 저항이 0(Zero)가 된다. 식에서 R_n 은 초전도 소자가 켄치되어 초전도성을 잃어 최종적으로 도달하는 상전도 저항의 크기이며, T_f 는 켄치 발생 시 저항 발생 시정수를 의미한다. $t_{quenching}$, $t_{recovery1}$, $t_{recovery2}$ 는 각각 켄치 발생시간, 1차 회복 발생시간, 2차 회복 발생시간을 의미하며, a_1 과 a_2 는 회복 시 초전도 소자의 저항 기울기를 나타내며 a_1 과 a_2 는 저항이 0으로 수렴하기 위해 0보다 작을 값을 가지며 크기는 a_2 가 a_1 보다 크게 모델링되었기 때문에 1차 회복이 2차 회복보다 더디게 회복하게 된다. b_1 은 1차 회복이 발생하는 시간에 초전도 소자의 저항크기를 의미하며, b_2 는 2차 회복이 발생하는 시간의 초전도 소자의 저항크기를 의미하며, b_1 크기의 1/3의 크기가 b_2 가 된다.

4. Recloser-Fuse 보호협조

리클로저는 부하측에 고장 발생 시, 고장전류를 감지하여 지정된 시간안에 계통의 고장전류를 고속차단하고, 자동으로 재폐로 동작을 수행하여 부하측에 재가압하는 동작을 반복한다. 순간고장 발생 시 리클로저는 차단-재폐로 동작을 반복하여 순간고장을 제거하여 선로의 정전을 예방 할 수 있으며, 일시고장 발생 시 설정된 정정치 횟수만큼 동작한 후에 영구개방(Lock-out) 함으로써 고장구간을 분리하여 고장구간을 최소화 시켜주는 대표적인 보호기기이다[9]. 리클로저 모델링은 과전류 보호계전 방식을 사용하였으며, 계통의 전류가 계전기의 동작전류보다 크면 계전기의 시간-전류 곡선(Time-Current Curve : TCC)에 의해 동작특성을 갖도록 모델링 하였다[10]. 시간-전류 곡선의 동작에 관한 특성식은 다음 식 (2)와 같다.

$$T_{trip}(I) = TD \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) + K \quad (2)$$

여기서, T_{trip} 은 입력전류에 대한 계전기의 동작 시간, TD는 Time Dial(Lever)로 계전기의 동작곡선 상하 이동을 의미하며, M은 입력전류/동작전류의 비를 나타낸다. A, B, p, K는 계전기의 특성을 결정하는 상수로서 규격 및 제조사별로 그 값이 다르며 표 2은 본 논문에서 사용한 한국전력공사에서 사용하는 특성곡선 파라미터를 보여준다.

표 2 한국전력공사 특성곡선 파라미터
Table 2 Characteristic Parameter of KEPCO

type	A	B	K	tr	p	q
Inverse	0.110	0.420	0	2.0	0.020	2.0
very Inverse	39.85	1.084	0	2.0	1.950	2.0

리클로저의 동작순서는 2F1D로 설정 하였으며, F는 순시 동작(Fast trip)을 의미하며, D는 지연동작(Delay trip)을 의미한다. 순시동작은 5[cycle]이내 재폐로시간은 0.1초로, 지연동작은 10[cycle]이내 순시동작과 지연동작사이를 0.2초로 모델링 하여 시뮬레이션 하였다.

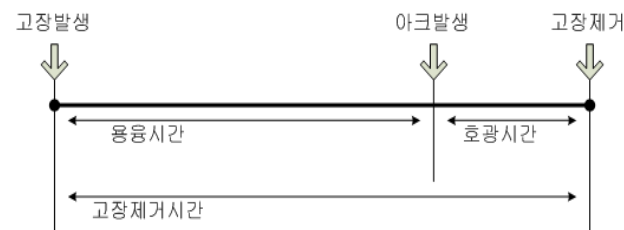


그림 2 퓨즈의 고장시간 구성
Fig. 2 Configuration in fault clearing time of fuse

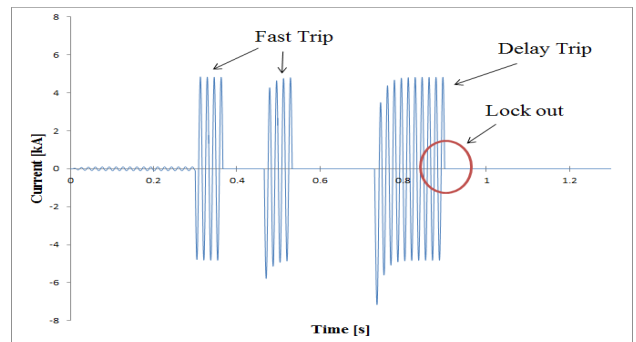
퓨즈는 TCC특성을 가지고 있으므로 고장전류의 크기에 따라 동작시간이 달라지는 반한시성 특성을 가지고 있다. 퓨즈의 최소동작전류 이상의 전류가 흐르게 되면 퓨즈는 녹

기 시작하고 아크가 발생하여 결국 끊어지게 된다. 퓨즈에서 아크가 발생하기 전에 고장이 제거되면 원래의 상태로 되돌아오게 된다. 그림 2는 퓨즈의 고장시간을 분류하여 나타낸다. 퓨즈가 녹기 시작하여 아크가 발생할 때까지의 시간을 용융시간, 아크가 발생한 이후 퓨즈가 완전히 절단되는 호광시간으로 나뉘며 용융시간과 호광시간의 합을 고장제거 시간이라 한다[11].

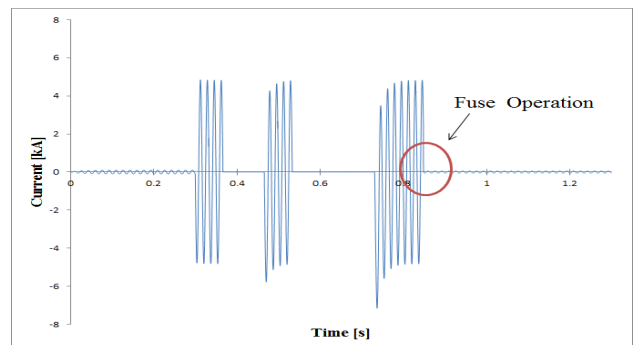
본 논문에서는 단상분기를 보호 할 수 있는 보호기기로는 선로용 퓨즈를 사용하였으며, 퓨즈링크의 종류로는 K형, T형과 H형이 있다. 본 논문에서는 빠른 시간에 고장을 제거 할 수 있으며 반한시성 보호기기와 협조가 용이한 K형을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

5. 방사상 배전계통 Recloser-Fuse 보호협조

그림 3은 방사상 배전계통의 피더1의 단상분기회로에서 1선 지락 고장이 발생 하였을 때 리클로저의 고장전류 파형을 보여준다. 고장시간은 0.3초에 발생하도록 시뮬레이션 하였다. 그림 3(a)는 계통의 단상분기회로의 퓨즈가 없을 때의 리클로저의 전류파형을 보여주며, 2회 순시동작(4[cycle]) 후 1회 지연동작(10[cycle])으로 작동하는 것을 보여준다. 그림 3(b)는 계통의 단상분기회로에 퓨즈가 설치되었을 때 리클로저의 전류파형을 보여준다.



(a) Waveform of recloser current without fuse



(b) Waveform of recloser current with fuse

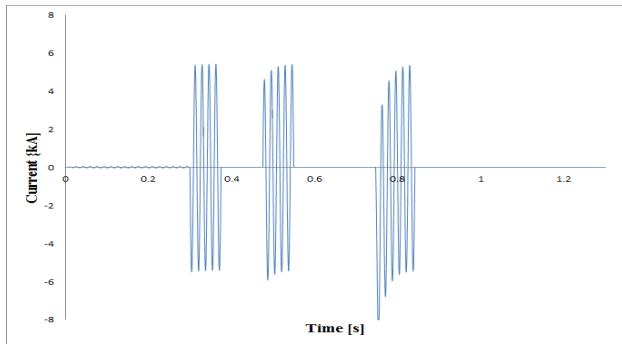
그림 3 방사상 배전계통 전류 파형
Fig. 3 Current waveform of radial power distribution system

그림 3(a)와 (b)를 비교 했을 때 고장전류의 크기는 동일하며 퓨즈를 사용하여 보호협조를 사용한 경우 마지막 지연

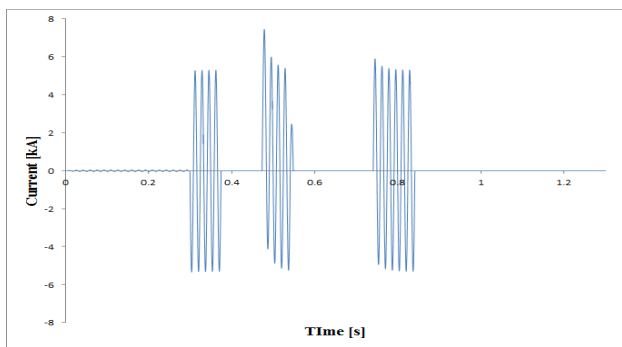
동작에서 3[cycle] 만에 차단되었다. 이것은 리클로저가 Lock out이 되기 이전에 퓨즈가 용단되고 리클로저는 차단되지 않고 닫힌 상태를 유지하여 고장점만 분리되어 전류를 공급하게 된다.

6. 루프화 배전계통 Recloser-Fuse 보호협조

그림 4는 방사상 배전계통이 루프화 되었을 때 그림 3과 같이 피더1의 단상 분기회로에서 1선 지락 고장이 발생하였을 때 고장점의 전류파형을 보여준다. 그림 4(a)는 고장 발생 시 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우를 보여주며, 그림 4(b)는 피더1과 피더2의 루프화 중간에 초전도 한류기를 설치하였을 때 고장점의 전류파형을 보여준다. 초전도 한류기는 루프화 계통에 고장이 발생하였을 때 고장이 발생하지 않은 피더의 고장전류를 줄여 주는 역할을 하게 된다. 저항형 초전도 한류기를 사용 하였으며, 고장이 발생하여 전류가 상승하면 초전도 소자가 켄치되어 2[Ω]의 상전도 저항이 발생한다.



(a) Waveform of fault current without SFCL



(b) Waveform of fault current with SFCL

그림 4 루프화 배전계통 전류 파형

Fig. 4 Current waveform of Loop power distribution system

그림 4(a)의 고장전류는 그림 3과 비교하면 루프화로 인하여 4.8[kA]에서 5.4[kA]로 증가한 것을 알 수 있다. 피더1의 단상 분기회로에서 고장발생시 고장점으로 피더1에서 고장전류를 공급함과 동시에 고장이 발생하지 않은 피더2에서도 루프화로 인하여 고장전류를 공급하여 고장전류는 상승하게 된다. 또한 루프화로 인해 증가된 고장전류로 인하여

리클로저의 지연동작 3[cycle] 만에 용단되었던 퓨즈가 루프화로 인하여 4.5[cycle] 만에 차단되었다. 초전도 한류기를 루프화된 계통 중간에 설치하면 고장전류를 감소시켜 주는 것을 그림 4를 통하여 알 수 있다. 그림 4(a)와 (b)의 첫 번째 순시동작의 고장전류를 비교하면 5.2[kA]로 감소한 것을 알 수 있으며, 피더1과 피더2 모두 고장전류를 공급하지만 피더2에서는 초전도 한류기로 인하여 감소된 고장전류를 공급하기 때문에 고장전류를 감소하게 된다. 또한 리클로저의 지연동작 4.5[cycle]에 용단되었던 퓨즈가 4[cycle] 만에 용단이 발생하여 리클로저-퓨즈 보호협조가 개선되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 방사상 배전계통을 루프화 배전계통으로 변화 하였을 때 증가된 고장전류로 인하여 변화된 리클로저-퓨즈 보호협조를 정정하기 위하여 루프화 중간지점에 초전도 한류기를 사용하여 고장전류를 제한하여 보호협조에 관하여 분석 하였다. 루프화 배전계통에서 고장발생시 고장 피더뿐만 아니라 루프화된 다른 피더에서도 고장전류를 공급하기 때문에 고장전류가 증가하게 되어 퓨즈가 지연동작의 5.5[cycle] 만에 용단 되었다. 그로 인해 5[cycle]이내에 동작하는 순시동작과 큰 차이를 보이지 않았으며, 보호협조에도 문제가 발생 할 수 있다. 2[Ω]의 초전도 한류기 설치 후 퓨즈는 지연동작 6[cycle] 후에 용단 되었으며, 초전도 한류기 설치를 통하여 보호협조가 개선된 것을 확인할 수 있다. 하지만 방사상 배전계통의 리클로저-퓨즈 보호협조와는 차이를 보이게 된다. 그 원인으로는 초전도 소자의 켄치 이후 상전도 저항이 한계가 있으며, 루프화 배전계통의 고장발생 시 고장이 발생하지 않은 루프화 피더측의 고장전류를 초전도 한류기로 감소시켰을 때 고장이 발생한 피더측에서 고장전류가 다시 상승하게 되어 기존의 방사상 배전계통의 고장전류를 감소시키는 것 보다 어려움이 따른다.

References

- [1] 김준환, 이강완, “전력계통, 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, pp. 19-31, 1988.
- [2] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papatlianassiou, N. Hatziargyriou, “Making microgrids work”, IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 6, No. 3, 2008.
- [3] B. Kroposki, C. Pink, T. Basso, R. DeBlasio, “Microgrid standards and technology development”, IEEE PES General Meeting, 2007.
- [4] H. T. Lee, J. F. Moon, J. C. Kim, “A Study on the Protective Coordination of Distribution Automation System under Loop Operation”, Transactions of the Korea Institute of Electrical Engineers Vol. 58, No 7, JUL, 2009.
- [5] H. T. Lee, J. F. Moon, “A Study on the Comparison of Reliability for Protective Coordination of Loop Power Distribution using Communication of Circuit Breaker and Recloser”, Transactions of the Korea

Institute of Electrical Engineers Vol. 60P, NO. 3, SEP, 2011.

- [6] J. H. Park, J. C. Kim, S. M. Cho, H. S. Shin, B. H. Cho, "Analysis on the Reliability Evaluation of Loop Distribution System", The Korea Institute Electrical Engineers Summer Conference, 2010.
- [7] J. P. Moon, J. S. Kim, "Voltage Sag Analysis in Loop Power Distribution System With SFCL", Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, Vol23, Issue 3, June 2013.
- [8] J. S. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, "Comparative Analysis on Current Limiting Characteristics of Hybrid Superconducting Fault Current Limiters (SFCLs) with First Half Cycle Limiting and Non Limiting Operations", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 659-663, 2012.
- [9] 북스힐, "최신 배전시스템공학", pp. 352-355, 2014.
- [10] M. H. Kim, J. S. Kim, I. K. You, S. W. Wang, J. F. Moon, S. H. Lim, J. C. Kim, "Analysis of Bus Voltage Sag Caused by Recloser-Fuse Coordination in a Power Distribution System with SFCL", The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 12, No. 1, 2010.
- [11] 한국전력공사, "배전보호기술서", pp. 65-67, 2008.



문 종 필 (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

저 자 소 개



최 규 완 (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



김 수 환 (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