

# 분산전원이 도입된 배전계통에 초전도한류기 적용에 따른 과전류계전기 동작향상 연구

## Study on Improvement of Overcurrent Relay (OCR)'s Operation Due to Application of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power Distribution System with a Dispersed Generation

임 승 태\* · 임 성 훈\*  
(Seung-Taek Lim · Sung-Hun Lim)

**Abstract** - Due to the introduction of various types of dispersed generations (DGs) with larger capacity in a power distribution system, the short-circuit current is expected to be increased, which more requires for the effective fault current limiting methods. As one of the promising countermeasures, the superconducting fault current limiter (SFCL) has been noticed. However, the decreased fault current by SFCL affects the operation of the overcurrent relay (OCR), representative protective device in a power distribution system. In this paper, the operation of the overcurrent relay due to the application of a SFCL in a power distribution system with DG linked by its bus line was analysed through the short-circuit tests. To analyze the effect of the SFCL application in a power distribution system with DG, the experimental simulated circuits were designed and the short-circuit tests for the power distributed system assembled with the DG, the OCR and the SFCL were carried out. Through the analysis on the short-circuit tests, the application of the SFCL in a power distribution system with DG could be confirmed to be contributed to the operational improvement of overcurrent relay.

**Key Words** : Dispersed generation (DG), Power distribution system, Superconducting fault current limiter (SFCL), Overcurrent relay (OCR).

### 1. 서 론

배전계통의 효율향상과 효율적인 운영을 위한 스마트그리드화로 다양한 분산전원이 도입되고 있으며, 분산전원 연계에 따른 전압변동억제와 전력품질향상을 위한 연구가 진행되고 있다. 최근들어, 배전계통에 증가되고 있는 대용량의 분산전원도입은 배전계통의 고장전류 증가를 야기하게 되며, 관련보호설비의 용량 증대로 차단기의 교체가 예상되고 있다. 차단기 교체를 억제시키기 위한 대안으로 모선분리, 직렬리액터 적용과 같은 연구들이 진행되어 왔으나, 전력공급의 신뢰도 저하와 평상시 손실발생 등으로 최근에는 초전도체의 퀘치특성을 이용한 초전도한류기를 적용한 실증연구가 국내외적으로 검토되어 운영되고 있다 [1-4].

하지만, 초전도한류기 적용으로 분산전원도입에 따른 배전계통의 고장전류가 감소될 경우, 배전계통의 보호계전기의 동작에 영향을 주게 되며, 보호계전기의 오동작 또는 부동작을 야기하게 되어 보호계전기간의 동작협조를 위한 연구가 선행되어야 것으로

사료되고 있다 [4-7].

본 논문에서는 분산전원이 도입된 배전계통에 초전도한류기 적용에 따른 배전계통의 대표적인 보호계전기인 과전류계전기의 동작영향과 협조를 위한 방안들을 모의실험을 통해 검토하였다. 검토를 위한 모의실험을 위해 인버터형 분산전원, 과전류계전기, 초전도한류기 모의장치와 함께, 배전계통 모의를 위한 회로를 구성하고 단락모의실험을 통한 실험결과들에 대한 분석을 통해 초전도한류기 적용에 따른 과전류계전기 동작과 보호협조를 위한 방안들을 검토하였다.

### 2. 모의 배전계통 회로구성 및 동작 검토

그림 1은 본 논문의 모의실험을 위해 구성한 분산전원(DG)이 모선에 연계된 배전계통 실험회로 구성도를 보여주며, 각 피더단의 인출점에는 과전류계전기에 의해 동작하는 차단기가 설치되어 있고 피더간에 분기되는 선로는 재폐로차단기에 의해 보호되도록 구성하였다, 고장전류제한을 위한 초전도한류기(SFCL)는 각 피더단에 설치하여 구성하였다. 고장발생시 초전도한류기 동작에 따른 과전류계전기의 동작영향을 검토하기 위해 피더선로( $R_i$ ,  $L_i$ ) 중간에 고장( $F_1$ )을 모의하였다.

더불어, 분산전원이 도입된 배전계통에 초전도한류기적용에 따

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.

E-mail : superish73@ssu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.

Received : January 16, 2017; Accepted : January 30, 2017

른 과전류계전기 동작특성을 모의실험을 통해 분석하기 앞서 각  
각의 분산전원 모의장치와 과전류계전기, 초전도한류기 모의장치

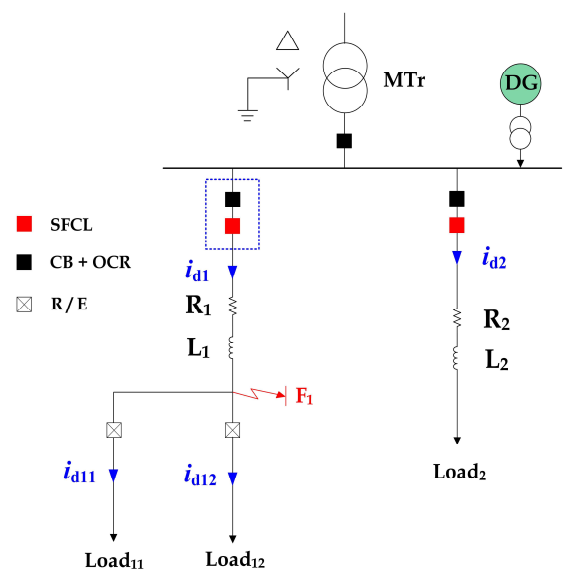


그림 1 분산전원이 연계된 배전계통 실험회로 구성도  
Fig. 1 Experimental circuit configuration of power distribution system linked by dispersed generation

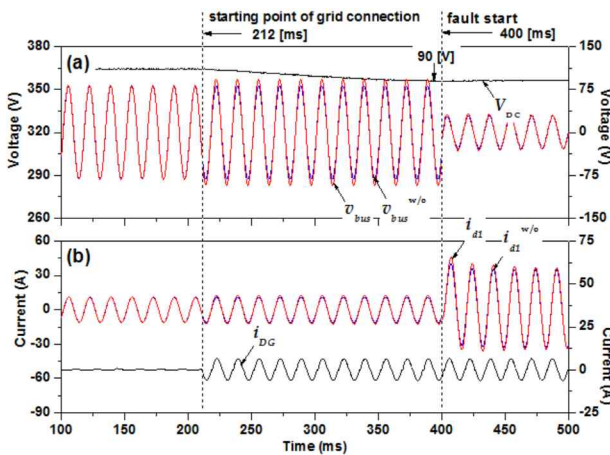


그림 2 인버터형 분산전원 배전계통 연계후 고장발생시 모선전  
압 및 선로전류; (a) 배전계통 모선전압( $v_{bus}$ ) 및 인버터  
형 분산전원 입력전압 ( $V_{DC}$ ), (b) 선로전류 ( $i_{d1}$ ) 및 인버  
터형 분산전원 출력전류 ( $i_{dG}$ )

Fig. 2 Bus voltage and line current in case that the fault  
occurred after a dispersed generation was connected  
into power distribution system; (a) Bus voltage ( $v_{bus}$ )  
and input voltage of inverter type dispersed  
generation ( $V_{DC}$ ), (b) Line current ( $i_{d1}$ ) and  
output current of inverter type dispersed generation  
( $i_{dG}$ )

의 동작특성을 검토하였다.

그림 2는 출력전류를 5 [A]로 설정한 인버터형 분산전원 모의  
장치를 구성한 모의배전계통에 연계후(212 [ms]) 고장발생시(400  
[ms]) 모선전압( $v_{bus}$ )과 선로고장전류( $i_{d1}$ ) 및 분산전원 출력전류  
( $i_{dG}$ )를 보여준다. 비교를 위해 분산전원 모의장치를 연계하지 않  
은 경우( $v_{bus}^{w/o}$ ,  $i_{d1}^{w/o}$ )를 같이 나타내었다. 분산전원 모의장치를  
배전계통에 연계된 후 모선전압과 선로전류가 증가되는 것을 연  
계하지 않은 경우( $v_{bus}^{w/o}$ ,  $i_{d1}^{w/o}$ )와 비교할 수 있으며, 고장발생시  
에 선로전류( $i_{d1}$ )가 분산전원 모의장치가 연계되지 않은 경우  
( $i_{d1}^{w/o}$ )보다 증가되는 것도 모의실험을 통해 비교할 수 있다.

그림 3은 본 논문의 모의실험에 사용한 트리거형 초전도한류  
기의 구성도를 보여준다. 트리거형 초전도한류기는 국내외적으로  
실증에 적용하고 있는 대표적인 모델로서 접점스위치(SW)와 초  
전도모듈( $R_{SC}$ ), 상전도저항(current limiting resistor, CLR)로 구  
성된다 [2-3]. 동작원리는 평상시에는 초전도모듈과 접점스위치  
를 통해 전류가 흐르게 되고 고장발생시 초전도모듈에 흐르는 전  
류( $i_{SC}$ )가 임계전류( $I_C$ )를 초과하여 켈치에 의해 저항이 발생하게  
되면 초전도모듈에 유기된 전압( $v_{SC}$ )이 설정된 전압을 넘게 되면

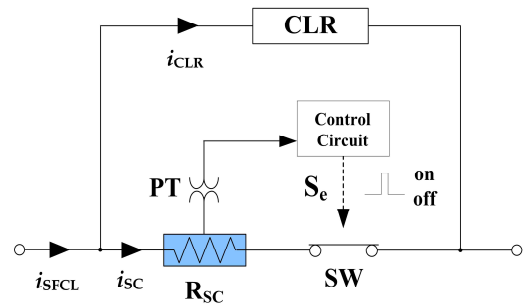


그림 3 트리거형 초전도한류기 구성도  
Fig. 3 Configuration of a trigger type SFCL

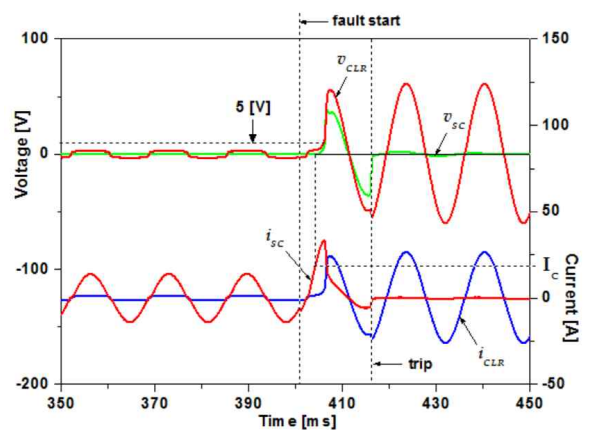


그림 4 트리거형 초전도한류기 모의장치 동작파형 ( $v_{CLR}$ ,  $v_{SC}$ ,  
 $i_{SC}$ ,  $i_{CLR}$ )  
Fig. 4 Operational waveform of simulated trigger type SFCL  
( $v_{CLR}$ ,  $v_{SC}$ ,  $i_{SC}$ ,  $i_{CLR}$ )

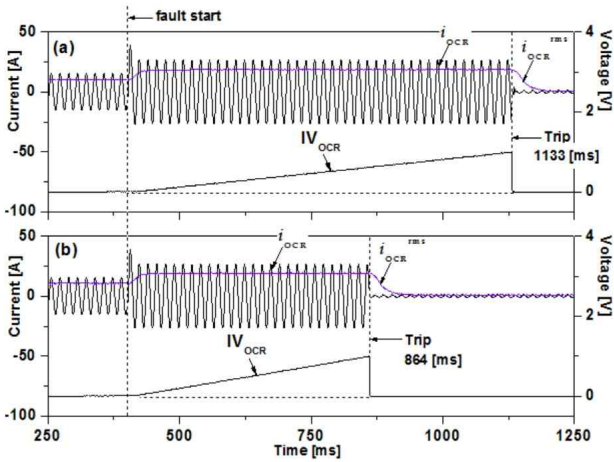


그림 5 과전류계전기 모의장치 레버값에 따른 동작파형; (a) 0.50 레버로 설정시 계전기 전류( $i_{OCR}$ ) 및 계전기 동작값 ( $IV_{OCR}$ ); (b) 0.25 레버로 설정시 계전기 전류( $i_{OCR}$ ) 및 계전기 동작값 ( $IV_{OCR}$ )

Fig. 5 Operational waveform of simulated overcurrent relay due to its lever value; (a) Relay current ( $i_{OCR}$ ) and operational value of overcurrent relay ( $IV_{OCR}$ ) in case that its lever is set to 0.5, (b) Relay current ( $i_{OCR}$ ) and operational value of overcurrent relay ( $IV_{OCR}$ ) in case that its lever is set to 0.25

점점스위치를 개방시키게 된다. 이후 점점스위치가 개방되면 고장전류는 상전도저항(CLR)으로 흐르게 되어 제한된다. 본 논문의 실험에서는 모의 배전계통의 구성과 고장발생시 고장전류크기 등을 고려하여, 초전도모듈에 유기된 전압이 5 [V]를 초과할 경우 점점스위치를 개방시키도록 설정하였으며, 상전도저항은 2.3 [ $\Omega$ ]으로 설정하였다. 실험에 사용한 초전도모듈의 임계온도와 임계전류( $I_c$ )값은 87 [K], 19 [A]이며, 그림 4에 설명한 트리거형 초전도한류기의 동작을 모의한 실험파형을 나타내었다.

배전계통의 대표적인 보호계전기로서 과전류계전기의 설정값에 따른 차단기개방을 모의하였으며, 고장발생시 기준전류값을 초과된 이후 과전류 계전기 동작값( $IV_{OCR}$ )이 증가되어 1에 도달되면 트립신호를 발생시켜 차단기개방을 모의하였다. 과전류계전기의 동작을 모의하기 위한 변수로 레버값을 0.5와 0.25로 설정한 경우 과전류계전기 동작에 따른 차단기개방을 모의한 결과파형을 그림 5에 나타내었다. 레버값이 0.25인 경우가 0.5인 경우보다 트립신호 발생시간이 짧아짐에 따라 차단기개방으로 인한 고장전류 차단시간이 1,133 [ms]에서 864 [ms]로 짧아지는 것을 그림 5에서 비교할 수 있다.

앞에서 동작모의를 검토한 분산전원 모의장치와 과전류계전기, 초전도한류기 모의장치를 모의배전계통에 설치하여 고장발생시 초전도한류기 적용유무와 분산전원 도입유무에 따른 과전류계전기 동작특성을 검토하고 동작협조를 위한 방안들을 검토하였다.

### 3. 결과 및 분석

구성한 모의배전계통에 분산전원이 연계되지 않은 경우와 연계되어 운전중에 고장발생을 모의하였으며, 과전류계전기 동작으로 측정된 모선전압( $v_{bus}$ )과 선로전류( $i_{d1}$ )를 그림 6과 7에 도시하였다. 분산전원이 배전계통의 모선에 연계되어 운전하고 있는 정상시 배전계통의 모선전압은 102 [V]에서 115 [V]로 증가되었고 정상시 선로전류도 13.6 [A]에서 16.4 [A]로 증가되는 것을 비교할 수 있다. 또한, 고장이 발생한 경우 모선전압은 30 [V]에서 32.5 [V]로, 선로의 고장전류는 36 [A]에서 38 [A]로 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이와 더불어, 분산전원이 모선에 연계된 경우 고장전류가 증가함에 따라 과전류계전기 동작에 따른 차단기동작을 위한 트립 발생시간도 857 [ms]에서 781 [ms]로 짧아지는 것도 분석할 수 있다.

그림 7에서 검토한 것처럼 배전계통에 분산전원이 연계된 경우 고장전류 증가로 인한 고장전류 저감을 위해 초전도한류기를 적용한 모의실험을 통해 얻은 모선전압과 선로전류를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 비교할 수 있는 것처럼 고장이 발생한 후 초전도한류기 동작으로 선로고장전류는 초전도한류기를 적용하지 않은 경우 38 [A]에서 27 [A]로 제한되는 것을 비교할 수 있으며, 모선전압 또한 초전도한류기를 적용하지 않은 경우 32.5 [V]에서 적용한 경우 73 [V]로 전압강하 억제효과가 있는 것을

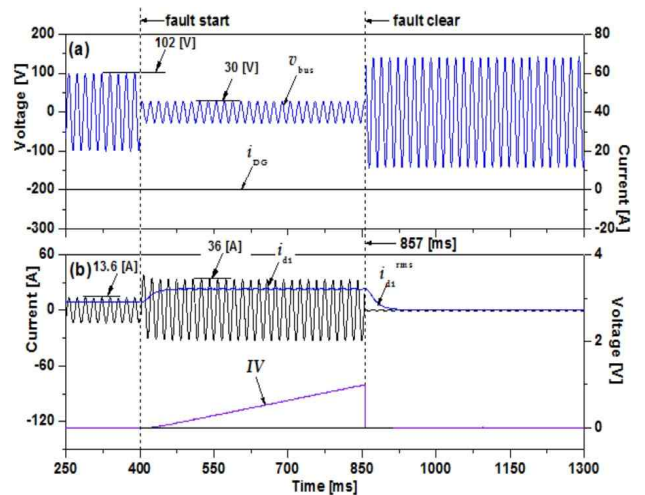


그림 6 배전계통에 분산전원이 연계되지 않은 경우 고장발생시 과전류계전기 동작에 따른 모선전압 및 선로전류; (a) 배전계통 모선전압( $v_{bus}$ ) 및 인버터형 분산전원 출력전류( $i_{dG}$ ), (b) 선로전류( $i_{d1}$ ) 및 과전류계전기 동작값 ( $IV$ )

Fig. 6 Bus voltage and line current due to operation of OCR in case that the fault occurred after a dispersed generation was not connected into power distribution system; (a) Bus voltage ( $v_{bus}$ ) and output current of inverter type dispersed generation ( $i_{dG}$ ), (b) Line current ( $i_{d1}$ ) and operational value of overcurrent relay ( $IV$ )

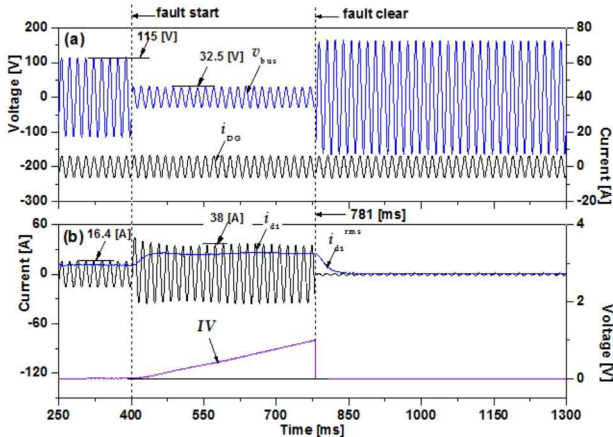


그림 7 배전계통에 분산전원이 연계된 경우 고장발생시 과전류계전기 동작에 따른 모션전압 및 선로전류; (a) 배전계통 모션전압( $v_{bus}$ ) 및 인버터형 분산전원 출력전류 ( $i_{DG}$ ), (b) 선로전류 ( $i_{d1}$ ) 및 과전류계전기 동작값 (IV)

Fig. 7 Bus voltage and line current due to operation of OCR in case that the fault occurred after a dispersed generation was connected into power distribution system; (a) Bus voltage ( $v_{bus}$ ) and output current of inverter type dispersed generation ( $i_{DG}$ ), (b) Line current ( $i_{d1}$ ) and operational value of overcurrent relay (IV)

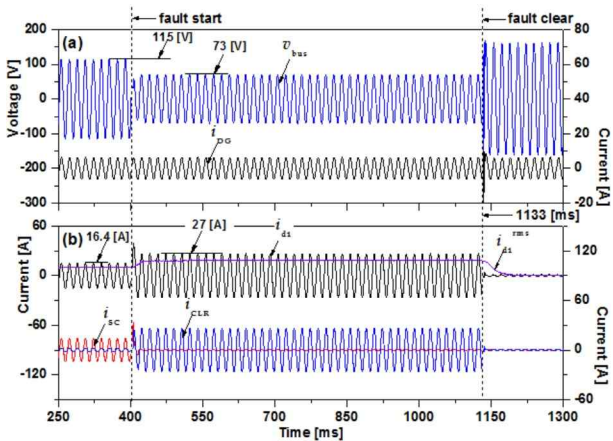


그림 8 분산전원이 연계된 배전계통에 초전도한류기를 적용한 경우 고장발생시 과전류계전기 동작에 따른 모션전압 및 선로전류; (a) 배전계통 모션전압( $v_{bus}$ ) 및 인버터형 분산전원 출력전류 ( $i_{DG}$ ), (b) 선로전류 ( $i_{d1}$ ,  $i_{d1}^{rms}$ ), 초전도도물전류 ( $i_{sc}$ ) 및 상전도저항 전류 ( $i_{CLR}$ )

Fig. 8 Bus voltage and line current due to operation of OCR in case that the fault occurred in a power distribution system lined by dispersed generation, which was applied with SFCL; (a) Bus voltage ( $v_{bus}$ ) and output current of inverter type dispersed generation ( $i_{DG}$ ), (b) Line current ( $i_{d1}$ ,  $i_{d1}^{rms}$ ), currents of both HTSC module and CLR ( $i_{sc}$ ,  $i_{CLR}$ )

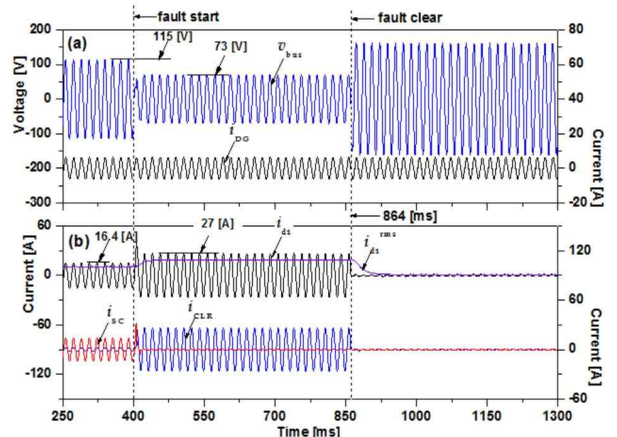


그림 9 분산전원이 연계된 배전계통에 초전도한류기를 적용한 경우 정정을 통한 과전류계전기 동작에 따른 모션전압 및 선로전류; (a) 배전계통 모션전압( $v_{bus}$ ) 및 인버터형 분산전원 출력전류 ( $i_{DG}$ ), (b) 선로전류 ( $i_{d1}$ ,  $i_{d1}^{rms}$ ), 초전도도물전류 ( $i_{sc}$ ) 및 상전도저항 전류 ( $i_{CLR}$ )

Fig. 9 Bus voltage and line current due to operation of OCR with its resetting in case that the fault occurred in a power distribution system lined by dispersed generation, which was applied with SFCL; (a) Bus voltage ( $v_{bus}$ ) and output current of inverter type dispersed generation ( $i_{DG}$ ), (b) Line current ( $i_{d1}$ ,  $i_{d1}^{rms}$ ), currents of both HTSC module and CLR ( $i_{sc}$ ,  $i_{CLR}$ )

확인할 수 있다. 반면에, 초전도한류기 동작으로 고장전류가 제한됨에 따라 과전류계전기의 동작은 1,133 [ms]에서 트립되어 차단기가 개방되는 것을 볼 수 있다.

분산전원이 연계되기 이전의 트립시간인 857 [ms]에서 연계된 경우 781 [ms]로 감소되었지만 초전도한류기 적용으로 트립 시간이 증가되는 것을 비교할 수 있다. 만약, 초전도한류기를 구성하는 상전도저항값을 감소시켜 적용할 경우 분산전원이 연계되기 이전의 트립시간으로 복구할 수 있을 것으로 분석된다. 위의 실험분석 결과로부터, 분산전원이 배전계통에 연계될 경우 과전류계전기의 동작에 영향을 주어 오동작 또는 부동작을 초래할 수 있지만, 적절한 임피던스를 갖는 초전도한류기를 적용할 경우 과전류계전기의 영향을 감소시켜 보호협조 향상에 기여할 수 있음을 고찰할 수 있다.

분산전원이 연계된 배전계통에 초전도한류기 적용에 따라 과전류계전기의 정동작을 유지하기 위한 또 다른 방법으로 과전류계전기의 정정을 통해 검토하였다. 과전류계전기를 정정할 수 있는 변수로 레버값을 0.5에서 0.25로 정정하여 모의실험을 진행하였다. 그림 9는 분산전원이 연계된 배전계통에 초전도한류기를 적용한 경우 고장발생시 정정을 통한 과전류계전기 동작에 따른 모션전압 및 선로전류파형을 보여준다. 그림 9에서 확인할 수 있는 것처럼 과전류계전기의 정정을 통해 분산전원이 연계된 배전계통에 초전도한류기 적용시 과전류계전기의 동작이 864 [ms]에서 이루어지는 것을 볼 수 있으며, 이는 분산전원이 연계되지 않

은 배전계통에 초전도한류기를 적용하지 않은 경우의 과전류계전기 동작과 유사한 시간을 유지할 수 있게 되는 것을 그림 6과 비교할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 분산전원이 도입된 배전계통에 초전도한류기 적용에 따른 과전류계전기의 동작영향과 협조를 위한 방안들을 모의실험을 통해 검토하였다. 이를 위해 인버터형 분산전원과 과전류계전기, 트리거형 초전도한류기를 모의하기 위한 장치들의 동작들을 모의실험을 통해 검토하였으며, 인버터형 분산전원이 모선에 연계된 배전계통을 구성한 후 피더인출단에 과전류계전기에 의한 차단기와 초전도한류기를 설치하여 단락모의실험을 실시하였다.

분산전원이 연계된 배전계통에 초전도한류기를 적용함으로써 분산전원이 연계되기 이전의 과전류계전기 동작을 유지할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 또 다른 방법으로 과전류계전기의 정정을 통해 과전류계전기의 정동작을 확인할 수 있었다. 추후, 본 논문의 모의실험결과를 바탕으로, 배전계통에 분산전원의 연계위치에 따른 초전도한류기 동작과 이를 고려한 과전류계전기의 동작향상을 위한 방안들을 검토하고자 한다.

### References

[1] L. Ye, L. Lin, and K. P. Juengst, "Application studies of superconducting fault current limiters in electric power system," IEEE Trans. appl. Supercond., vol. 18, no. 2, pp. 624-627, Jun. 2008.

[2] KEPCO, Long-Term Prospects for Transmission System (2002-2015) 2002.12.

[3] S. R. Lee, J. Y. Kim, and J. Y. Yoon, "A study on SFCL systems for korean power system application," in 2005/2006 IEEE PES T&D.

[4] I. K. You, S. H. Lim, J. C. Kim, and O. B. Hyun, "Study on Protection Coordination Between Protective Devices in a Power Distribution System with an SFCL," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3, pp. 1168-1171, June 2010.

[5] J. Driesen, P. Vermeyen, and R. Belmans, "Protection issues in microgrids with multiple distributed generation units," in Power Conversion Conf., Nagoya, April 2007, pp. 646-653.

[6] A. Henning, A. Wehner, and M. Kurrat, "Feasibility study of superconducting current limiter application in a cogeneration plant," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1908-1912, June 2009.

[7] T. Genji, K. Miyazato, H. Tsutsushio, and T. Nishiwaki,

"Study on required performance of fault current limiter for dispersed generator," Trans. IEE Japan, vol. 124-B, no. 1, pp. 15-21, Jan. 2004.

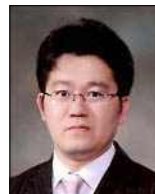
[8] T. Sato, M. Yamaguchi, T. Terashima, S. Fukui, J. Ogawa, H. Shimizu, and T. Sato, "Study on the Effect of Fault Current Limiter in Power System With Dispersed Generators," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 2331-2334, June 2007.

## 저 자 소 개



### 임 승택 (Seung-Taek Lim)

He is in B.S. and M.S. degree from Department of electrical engineering from Soongsil university.



### 임 성훈 (Sung-Hun Lim)

He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Chonbuk National Univ., Korea in 1996, 1998, and 2003, respectively. Currently, he is a professor in the Dept. of Electrical Engineering at Soongsil Univ., Korea.