

국내 실계통 적용을 위한 22.9kV 복합형 초전도한류기 동작전류 검토

Operating Current for the application of 22.9kV hybrid SFCL to real power grid in Korea

이승렬^{1,*}, 윤재영², 양병모³

Seung Ryul Lee^{1,*}, Jae-young Yoon², Byongmo Yang³

Abstract: In Korea, 22.9kV hybrid SFCL (Superconducting Fault Current Limiter) has been developed and carried out long-term field tests in Gochagn power test center of KEPCO through DAPAS program. The SFCL will be installed at a distribution line of Icheon substation in Korea. For the successful application, we have to design the specifications considering real power system operation. This paper proposes a concept of the operating current based rms value for the protection coordination with protective delays and studies a proper range of the current in Korean distribution power system.

Key Words: hybrid SFCL, critical current, operating current.

1. 서 론

최근 대도시의 고장전류 문제를 해소하기 위한 대안으로서 초전도한류기가 주목받고 있다. 전 세계적으로 초전도한류기의 개발 및 실증시험 연구가 진행 중에 있다[1-4]. 이러한 전 세계적인 흐름에 맞추어 국내에서도 DAPAS 프로그램을 통하여 저항형, 리액터형 등 다양한 종류의 초전도한류기를 개발하였다[5]. 특히, DAPAS 2단계 사업에서는 상용화를 위해서 22.9kV 급 복합형 초전도한류기를 개발하여, 한전 고창시험센터에서 장기 실증시험을 완료하였다[6]. 현재는 이천 변전소 내에 22.9kV 630A 복합형 초전도한류기를 설치하여 일부하 운전을 추진 중에 있다[7]. 이러한 시점에서 초전도한류기의 국내 실계통 적용을 위한 설계사양 검토는 매우 중요한 사항이다[8]. 본 연구에서는 실계통 내에 22.9kV급 복합형 초전도한류기를 적용하기 위한 동작전류의 개념을 제안하고, 국내 배전계통 운영을 고려하여 초전도한류기 동작전류의 적절한 범위를 검토하였다.

2. 초전도한류기 동작전류 개념

¹정 회 원 : 한국전기연구원 선임연구원
²정 회 원 : 한국전기연구원 책임연구원
³정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
*교신저자 : srlee@keri.re.kr
원고접수 : 2010년 09월 07일
심사완료 : 2010년 09월 13일
게재확정 : 2010년 09월 13일

현재 국내에서 상용화를 목적으로 개발하고 있는 반주기후한류형 복합형 초전도한류기에서, 초전도체는 고장감지 역할만 하며 실제 고장전류 제한은 상전도 저항 또는 리액터로 구성된 한류임피던스(CLR : Current Limiting Reactor/Resistor)가 그 역할을 하도록 구성되어 있다[6]. 본 연구에서는 일반적인 초전도한류기의 임계전류와는 조금 다른 개념인 동작전류라는 개념을 제안한다. 동작전류란 복합형 초전도한류기에 고장전류가 흐르는 경우, 복합형 초전도한류기가 계통고장을 감지하고 한류임피던스(CLR)를 투입하여 고장전류를 제한하기 시작하는 최소 전류를 의미한다. 일반적으로 초전도체의 임계전류라 함은 DC전류를 기준으로 정의되지만, 복합형 초전도한류기의 동작전류는 실효치 전류를 기준으로 결정된다. 그 이유는 초전도한류기의 동작이 배전계통의 보호시스템 동작과 긴밀하게 연동되고, 보호시스템은 실효치 전류를 기준으로 동작하기 때문이다. 결국, 복합형 초전도한류기의 동작전류를 보호기기의 동작기준과 통일시키기 위해서는 실효치 전류를 기준으로 선정하는 것이 보다 바람직하다. 본 연구에서는 현재 국내 실계통에서 복합형 초전도한류기를 적용하는 경우, 동작전류의 합리적인 설계치를 제안하고자 한다.

3. 동작전류 설계방안

본 장에서는 복합형 초전도한류기의 동작전류 설계방안으로서, 배전선로의 리클로저(R/C : Recloser) 설치단 고장전류 이상에서 동작하는 경우와 배전선로의 돌입전류를 제한하는 경우, 이렇게 2가지의 설계개념을 기본으로 한 (안)을 제안한다. 제안된 각 (안) 별로 계통영향, 현장설치, 경제성 등 다양한 관점에서 고찰하면 다음과 같다.

3.1. (1안) R/C단 고장전류 이상에서 동작

초전도한류기 본연의 역할은 큰 고장전류를 제한하는 것이므로, 고장전류 제한의 필요성이 있는 큰 고장전류 영역에서만 초전도한류기가 동작하는 것이 합리적이다. 본 연구에서 제안하는 (1안)은 고장전류 제한의 필요성이 큰 고장전류에서만 복합형 초전도한류기(이하 초전도한류기)가 동작하도록 동작전류를 결정하는 것이다. 국내 배전선로의 R/C단 고장전류는 계통마다 다르지만, 대체로 1.5~3.5kArms 정도이다. 또한, 국내 60MVA 주변압기 적용계통에서 초전도한류기 한류임피던스를 저항형으로 약 1.0Ω을 가정할 때[8], 3.5kArms 이하의 고장전류에서는 초전도한류기의 고장전류 제한효과가 10% 미만이다. 결국, 배전선로 인출단에 설치된 과전류계전기의 보호구간(배전선로 인

출단~R/C단)의 고장전류 영역인 3.5kArms 이상의 고장전류에서만 초전도한류기가 동작을 하도록 선정할 수 있다. 본 설계방안 (1안)의 장단점을 요약하면 다음과 같다.

○ 장점

- 초전도한류기가 동작할 필요가 없는 작은 전류에서는 한류기가 동작하지 않고, 큰 고장전류에서만 동작한다. 즉, 한류기의 불필요한 동작이 거의 없다고 할 수 있다.
- 초전도한류기를 배전선로에 적용할 경우, 배전선로 보호용 (지락)과전류계전기(OC(G)R : Over Current (Ground) Relay)의 정정 필요성이 낮다. 즉, 초전도한류기 적용에 따른 기존 보호시스템 정정영향이 (2안)에 비해서 상대적으로 작다 (Fig.1~4 참조).
- OC(G)R의 순시/한시 탭 정정은 불필요할 가능성이 높다.
- 한시레버는 경우에 따라서 정정이 필요하다. 이는 한류기에 의한 고장전류 감소에 따른 OC(G)R의 동작시간 지연을 보정하기 위한 것이다.
- 전위보호기기가 없는 배전선로에 한류기를 적용

하는 경우, 한류기 적용에 의한 OC(G)R 동작영향 없다(Fig.4 참조). 즉, 한류기의 적용 전후의 기존 OC(G)R 순시/한시 보호동작이 동일하다.

○ 단점

- 전위보호기기가 설치된 선로에 한류기를 적용하는 경우, OC(G)R의 순시보호 축소구간이 (2안)에 비해서 크다. 이 경우, 해당 구간이 한시보호 구간으로 전환되므로, 계통보호가 불가능한 것은 아니며, 단지, 고장전류 기기통전관점에서 불리한 측면이 있다(Fig. 1, 3 참조).
- (2안)에 비해서 한류기의 단가가 높아지고, 부피가 증가한다. 결국, 경제성 관점과 22.9kV GIS 실 내 한류기설치 관점에서 (2안)에 비해서 불리하다고 할 수 있다.
- 초전도한류기의 이천변전소 시범적용사업의 경우는 한류기의 정상동작과 고장전류 제한효과를 확인하는 것이 목적이다. 일반적으로 배전선로의 고장은 대부분 고저항지락고장이기 때문에 3.5 kArms 이상의 큰 고장 발생 가능성이 낮다. 결국, 초전도한류기의 동작전류를 너무 큰 값으로 선정할 경우, 시범적용기간이 짧기 때문에 해당 기간동안 초전도한류기의 동작 이벤트가 없을 가

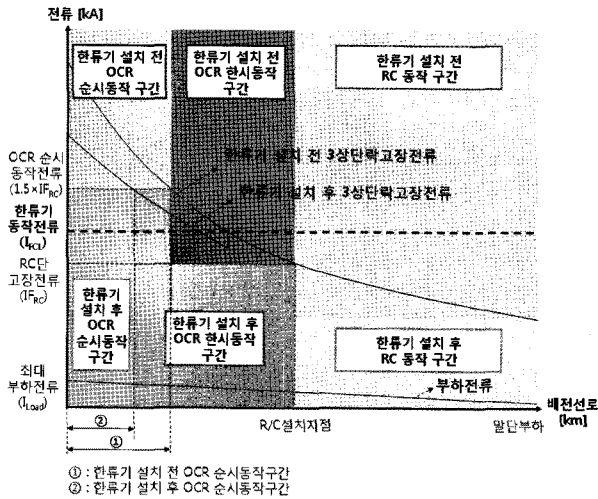


Fig. 1. Operation of OCR(Over Current Relay) installed at a distribution line with a R/C (Recloser) by the first scheme.

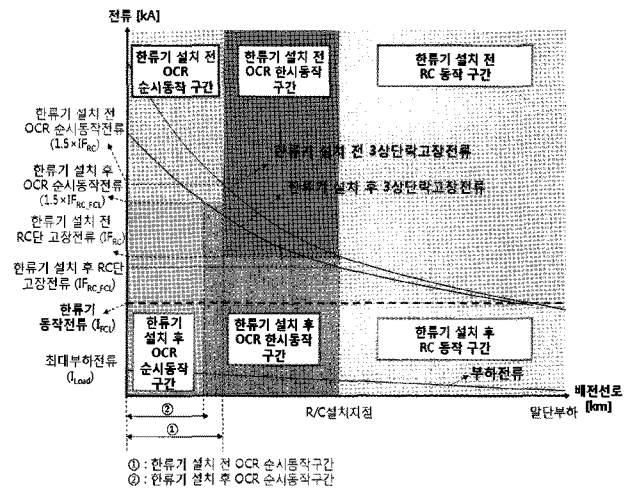


Fig. 3. Operation of OCR(Over Current Relay) installed at a distribution line with a R/C (Recloser) by the second scheme.

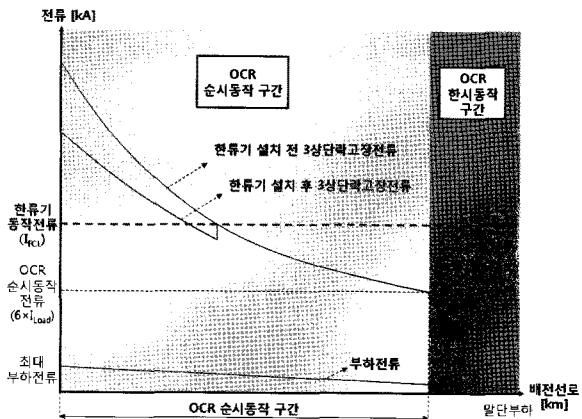


Fig. 2. Operation of OCR(Over Current Relay) installed at a distribution line without a R/C (Recloser) by the first scheme.

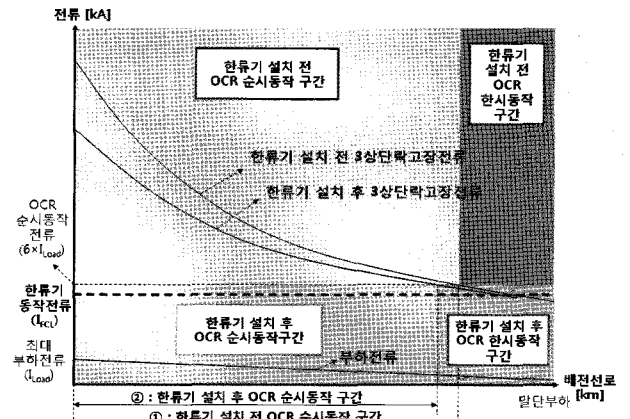


Fig. 4. Operation of OCR(Over Current Relay) installed at a distribution line without a R/C (Recloser) by the second scheme.

능성이 매우 높다.

3.2. (2안) 배전선로 돌입전류에 동작

돌입전류는 계통측면에서 계통보호, 기기충격 측면에서 악영향을 주는 요소이므로, 초전도한류기로 돌입전류를 제한할 수 있다면 바람직하다고 할 수 있다. 국내 배전선로의 OC(G)R 정정지침에 따르면, 최대 돌입전류를 배전선로 최대운전전류의 6배까지 고려하고 있다[9]. 설계방안 (2안)은 돌입전류를 제한할 수 있도록 최대 운전전류의 6배 이하에서 초전도한류기의 동작전류를 선정하는 방안이다. 본 연구에서 제안하는 (2안)의 장단점을 고찰하면 아래와 같다.

○ 장점

- 배전선로 보호용 OC(G)R이 고려하고 있는 돌입전류(최대부하전류의 6배) 이하에서 동작함으로써 돌입전류를 다소 제한하는 효과(약 4-5%)가 있다.
- 작은 고장전류에서도 동작하므로 이천변전소 시범적용에서 단기간 동안 초전도한류기의 동작 이벤트를 확인하기에는 (1안)보다 유리하다.
- 전위보호기기가 설치된 배전선로에 초전도한류기를 적용하는 경우, 배전선로 보호용 OC(G)R의 순시보호영역 축소구간이 (2안)에 비해 작다 (Fig.1, 3 참조).
- (1안)에 비해서 초전도한류기의 단가가 낮고, 부피가 작다. 결국, (1안)에 비해서 경제적이며, 22.9kV GIS실 내부에 초전도한류기를 설치하는 관점에서 공간확보/소음회피 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

○ 단점

- 초전도한류기의 동작 필요성이 없는 작은 고장전류에서도 동작한다. 그러나, 계통에 미치는 악영향은 거의 없다. 단지, 초전도한류기의 빈번한 동작으로 인하여 초전도한류기의 수명 측면에서 불리할 수 있다.
- 초전도한류기 적용에 따른 기존 배전선로 보호용 OC(G)R 정정에 미치는 영향이 (1안)보다 크다. 즉, (1안)보다 OC(G)R의 순시/한시 탭 및 한시레버 정정의 필요성이 높다.
- 전위보호기기가 없는 배전선로에 초전도한류기를 적용하는 경우, 초전도한류기 적용에 의한 OC(G)R 순시동작 구간이 축소된다. 다시 말해서, 일부 구간에서 순시보호동작이 한시보호동작으로 전환된다. 그러나, 이 경우, 계통보호측면에서 그리 큰 문제는 되지 않을 것으로 판단된다 (Fig.2, 4 참조).

로 판단된다. 그러나, 이천변전소 시범적용과 같이, 그 목적이 초전도한류기의 정상동작과 고장전류 제한효과를 확인하는 경우는, 시범적용기간 동안 초전도한류기의 고장전류 제한동작 이벤트 발생 가능성이 높은 (2안)이 보다 적합할 것으로 판단된다.

4.2. 동작전류 설계사양

본 절에서는 현재 진행 중인 이천변전소 시범적용을 염두에 두고, 상기 제안된 (2안)에 따라서 22.9 kV 630A 복합형 초전도한류기의 동작전류 설계사양을 검토하였다. 여기서 설계기준으로서 아래와 같이 2가지 기준을 고려할 수 있다.

○ (기준-1) 정격전류 통전 마진(2배) 고려

- 배전 설계기준(3001) 및 운영기준에 따르면, 과부하운전 허용치를 정격전류의 약 1.5배정도까지 고려하고 있다(10MVA 선로 → 비상시 14MVA, 15MVA 선로 → 비상시 20MVA, 변압기 1.5배 등). 또한, 배전설계기준(DS-5901)에 따르면, 배전기자재 비상시(비상지속시간 2시간 기준) 허용전류를 정상상태의 약 1.53배 이상을 고려한다[10](예, 600mm² CNCV 케이블 정상상태 허용전류 479.1A, 비상시 허용전류 734.1A). 이는 비상시에 배전기자재 정격전류의 약 1.5배 이상의 전류를 통전시켜서 운전하는 경우가 있다는 의미이다.
- 게다가, 통상적으로 배전계통에서 정격전류의 진폭률을 최대 2배까지 고려한다.
- 따라서, 최대 마진을 초전도한류기 정격전류의 약 2배 이상으로 고려해서 동작전류를 계산하면 아래와 같다.
: 동작전류 = 정격전류 630Arms × 마진
= 1,260Arms ≒ 1.2kA 이상

○ (기준-2) 돌입전류(최대부하전류의 6배)에 동작

- 배전선로 보호용 과전류계전기(OCR/OCGR)의 정정지침에서 고려하고 있는 돌입전류 기준은 최대부하전류의 6배이다.
- 이 의미는 정전 후 재가압시 돌입전류에 의한 순시요소동작을 방지하기 위해서 일반적으로 최대 돌입전류를 부하전류의 6배까지 고려한다는 의미이다.
- 현재 국내 22.9kV 배전계통에서 사용되고 있는 배전선로 용량별로 동작전류를 계산하면 다음과 같다.
· (10MVA선로)
: 동작전류 = 최대부하전류 252 Arms × 6
= 1.5 kArms 이하

4. 동작전류 설계사양 검토

4.1. 동작전류 설계방안 제안

한류기가 계통에 적용되는 경우, 기존 보호기기의 정정은 필수적인 사항이다. 한류기 적용에 따른 보호기기의 순시/한시보호동작 구간이 다소 변화될 수는 있지만 큰 문제가 되지 않는 사항이며, 특히, 배전선로의 전위보호기기가 없는 경우는 보호시스템 측면에서 설계방안 (1안)이 오히려 장점을 갖는다. 따라서, 국내 계통에서 초전도한류기의 본연의 설치목적인 큰 고장전류의 제한을 고려할 때, 보호시스템에 미치는 영향이 그리 크지 않다면, (1안)이 바람직할 것

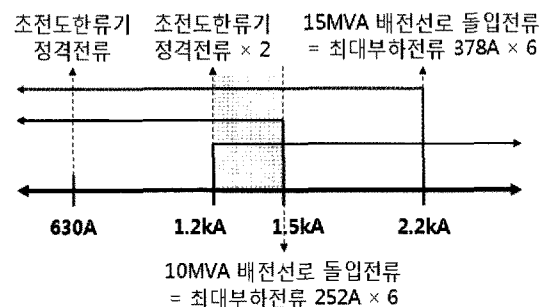


Fig. 5. Operating current of 22.9kV 630A hybrid SFCL in Korean distribution power system.

(15MVA선로)

$$\begin{aligned} \text{동작전류} &= \text{최대부하전류 } 378 \text{ Arms} \times 6 \\ &= 2.2 \text{ kArms 이하} \end{aligned}$$

상기 기준 1 및 2에 따라서 초전도한류기의 동작전류를 선정하면, Fig. 5와 같이 약 1.2 kArms ~ 1.5 kArms가 합리적일 것으로 판단된다.

4.3. 이천변전소 초전도한류기 고장전류 제한효과

현재 이천변전소 장평D/L(Distribution Line) 인출단에 22.9kV 630A 복합형 초전도한류기를 Fig.6과 같이 설치할 계획이다. 본 절에서는 상기 제안된 동작전류 범위에서 1.2kArms를 적용하여 이천변전소의 해당 배전선로에서의 초전도한류기의 고장전류 제한효과를 확인하였다.

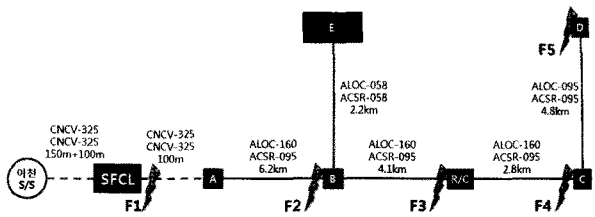


Fig. 6. One-line diagram of Jangpyong D/L with SFCL in Icheon substation.

본 검토에서 초전도한류기의 한류임피던스는 실제 개발 중인 리액터형 0.4Ω을 적용하였다. 이는 변압기 2차측에 설치된 NGR(Neutral Ground Reactor) 0.6Ω에 의한 1선지락 고장전류의 감소영향을 고려하고 초전도한류기의 고장전류 최대 제한율을 20% 이하로 가정하여 설계된 것이다[8]. 참고로, 이천변전소에 적용될 복합형 초전도한류기의 설계사양을 간략하게 요약하면,

Table 1. Specifications of the hybrid SFCL for the application to Icheon substation.

항목	사양	비고
정격전압	25.8 kV	공칭전압 22.9kV
정격전류	630 Arms	-
한류 임피던스	종류	리액터형
	크기	0.4 Ω
한류동작전류	1.4 kArms	본 연구결과 반영
복귀시간	0.3초 이하	-
고장전류 제한율	10 % 이상	최대고장전류 기준
정격단시간전류	12.5 kArms	2초

Table 2. 3 phase fault current.

고장 지점	3상단락 고장전류		고장전류 감소율
	초전도한류기 적용 전	초전도한류기 적용 후	
F1	6.63 kA	5.52 kA	16.71 %
F2	2.89 kA	2.66 kA	8.14 %
F3 (R/C단)	2.09 kA	1.97 kA	5.94 %
F4	1.76 kA	1.67 kA	5.01 %
F5	1.32 kA	1.27 kA	3.72 %

Table 3. 1 phase ground fault current.

고장 지점	1선지락 고장전류		고장전류 감소율
	초전도한류기 적용 전	초전도한류기 적용 후	
F1	6.32 kA	5.30 kA	16.04 %
F2	1.84 kA	1.74 kA	5.29 %
F3 (R/C단)	1.24 kA	1.20 kA	3.61 %
F4	1.02 kA	한류기미동작	-
F5	0.76 kA	한류기미동작	-

Table 1과 같다. Table 1의 설계사양은 기 검토된 한류임피던스[8]와 본 논문에서 제안된 동작전류 사양을 반영하여 현재까지 결정된 사항이다.

고장전류 검토결과를 요약하면 Table 2~3과 같다. 본 사례의 검토결과에서 알 수 있듯이 R/C단에서의 고장전류 크기는 약 2kA이다. 또한, R/C단 이후 (F3~F5 지점)의 고장전류 감소율은 약 6% 이하로 그 효과는 그리 크지 않다. 특히, 국내 배전시스템의 고장 종류 중 대부분을 차지하고 있는 1선지락고장의 경우는 R/C단 이후의 고장에서는 초전도한류기가 동작하지 않는다. 이는 현재 배전시스템에서 R/C단 이후의 고장전류에 대해서는 초전도한류기의 고장전류 제한 필요성이 매우 낮음을 의미한다. 결국, 본 결과에서 알 수 있듯이 고장전류 제한효과 측면에서는 초전도한류기의 동작전류를 R/C단 고장전류 이상의 큰 전류로 선정하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

본 연구는 현재 국내에서 상용화를 위해서 개발하고 있는 22.9kV 복합형 초전도한류기의 동작전류(실효치) 개념을 제안하고, 2가지 설계방안을 제시하였다. 설계통 운전 측면에서 본다면, 제안된 설계방안 중 (1안)의 배전선로 R/C단 고장전류 이상의 전류에서 초전도한류기가 동작하도록 설계하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 그러나, 이천변전소 시범적용사업의 경우는 (2안)에 따라서 설계하는 것이 더욱 효과적이며, 그 설계사양은 약 1.2 kArms ~ 1.5 kArms 범위에서 선정해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] DOE Peer Review, 2009.
 [2] Songtao Wu, Yu Wu, Yuntao Song, Weiyue Wu, Yanfang Bi, Weibin Xi, Liye Xiao, Quliang Wang, Yanwei Ma, Xianghong Liu, Pingxiang Zhang, Yin Xin, Bo Hou, Rui Liu, Hongjie Zhang, Zenghe Han, Jun Zheng, Jiasu Wang, Suyu

- Wang, Jing Shi, Yuejin Tang, Ming Qiu, Bin Wei, and Yunfei Tan, "Recent Main Events in Applied Superconductivity in China", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 1069-1080, June 2009.
- [3] Ndeye K. Fall, and Brian Marchionini, "Fault Current Limiter -R&D Status and Testing Issues", IEEE Power System Conference and Exposition, pp. 1-4, 2009.
- [4] M. Noe, M. Steurer, S. Eckroad, and R. Adapa, "Progress on the R&D of Fault Current Limiters for Utility Applications", Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-4, 2008.
- [5] Young-Sik Jo, Kang-Sik Ryu, and Minwon Park, "1st Phase Results and Future Plan of DAPAS Program", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 2, June 2006.
- [6] Gyeong-Ho Lee, Kwon-Bae Park, Jungwook Sim, Young-Geun Kim, Il-Sung Oh, Ok-Bae Hyun and Bang-Wook Lee, "Hybrid Superconducting Fault Current Limiter of the First Half Cycle Non-Limiting Type", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp.1888-1891, June 2009.
- [7] 양병모, 원영진, 김병현, 강지원, 윤재영, 이승렬, 문영현, "초전도케이블/한류기 실계통 적용 변전소 및 설치위치 선정 기술검토", 한국초전도저온공학회논문지, 11권, 3호, pp.55-59, 2009년 9월.
- [8] 이승렬, 박종영, 윤재영, 이병준, 양병모, "국내계통 보호시스템을 고려한 22.9kV 초전도케이블/한류기 설계사양 제안", 한국초전도저온공학회논문지, 11권, 3호, pp.50-549, 2009년 9월.
- [9] "계통업무편람", 한국전력공사, 2009년 12월.
- [10] "배전설계기준(DS-5901) : 전력케이블의 허용전류 계산", 한국전력공사, 2009년 12월.

저 자 소 개



이승렬(李 烈)

1975년 9월 23일생, 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2010년 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국전기연구원 스마트그리드연구본부 Smart Grid 연구센터 선임연구원.



윤재영(尹在映)

1962년 7월 30일생, 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1994년 기술사(발송배전), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 한국전기연구원 스마트그리드연구본부 Smart Grid 연구센터 책임연구원.



양병모(梁炳模)

1969년 4월 24일생, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997년 한전 전력연구원 입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소 선임연구원.