전력수급의 신뢰도 확보를 위한 고속 인터럽터 동작 특성

Operational Characteristics of the High-speed Interrupter for Reliability Enhancement of Power Supply and Demand

최 혜 원* · 최 효 상[†] · 정 병 익**

(Hye-Won Choi · Hyo-Sang Choi · Byung-Ik Jung)

Abstract - When the fault occurs in power system, the fault-current exceeds breaking capacity of the circuit breaker. So, reliability of the power system is decreased sharply. Superconducting fault-current limiter (SFCL) is operated without impedance in normal state. The fault-current is limited by its impedance during the fault condition. However, the SFCL has several weak points such as huge size, high-price, liquid-nitrogen operation for the real power system. In this paper, We suggested the high-speed interrupter to limit the fault-current in case of the single line-to-ground fault. In addition, we compared the high-speed interrupter with the SFCL to ensure the operation reliability. The proposed interrupter detected the fault-current through the CT, and the power was supplied by operation of the SCR control system. In this experiment, the power of high-speed interrupter was applied after the 4.8[msec] from fault instant. The on-off operation of the interrupter was started after half-cycle from the fault. The fault-current was flowed into the impedance element by the switching operation of the high-speed interrupter. So, the fault current was limited within one cycle, and then it didn't exceed the capacity of a circuit breaker. We confirmed that there was slight difference between the SFCL with high-speed interrupter in terms of limiting-time of the fault-current and switching speed of the SCR. The high-speed interrupter was considered to be more efficient than the SFCL in size, cost or reliability.

Key Words : High-speed interrupter, SFCL, SCR control system, Sol valve

1. 서 론

국내의 전력계통은 지속적인 전력수요량의 증가로 전원 설비 증대와 송·변전 계통의 규모가 확대되고 있다. 이로 인해 전력계통의 임피던스가 낮아지고 사고 발생 시 사고전류는 점점 증가하고 있다. 154kV 전력계통은 일찍부터 사고전류가 차단기의 차단내력을 초과하여 차단용량이 큰 상위 차단기로 교체되었다[1]. 2024년까지 전력 수요량은 계속해서 증가할 것으로 예측되며 최근에는 전력 수송의 중추역할을 담당하는 345kV 전력계통 마저도 사고전류가 차단기의 차단용량을 초과하고 있다. 이에 따라 더욱 체계적이고 효과적인 고장전류 저감 대책이 절실히 필요하다. 고장전류 증가에 따른 대책으로 모선분리, 차단기교체 직렬 리액터 설치 등 여러 방안이 제시되어 왔으나, 이러한 대책들은 전력 계통의 신뢰성 및 운용상 유연성 저하 등 또 다른 문제점을 가져왔다 [2-5]. 이로 인해 초전도 한류기가 주목 받고 있다. 초전도 한류기는 정상 시에는 임피던스가 없이 동작하여 선로에 아무런 영향을 주지 않지만 사고 시에 임의의 임피던스를 발생시켜 사고전류를 제한한다. 현재 여러 기관에서 저항형, 매트릭스형, 박막형, 하이브리드형 등을 개발하여 활발히 연구하고 있다. 그러나 초전도 한류기는 실 계통에 적용하기에

는 보호기기와의 협조, 크기, 가격, 경쟁력 등 여러 면에서 어려움을 겪고 있다 [6]. 이 에 본 논문에서는 새로운 한류기로 고속 인터럽터를 제안하고자 한다. 고속 인터럽터는 진공 인터럽터와 솔레노이드 밸브를 일체형으로 융합시킨 기기이다. 진공 인터럽터는 밀폐된 진공관에서 통전 및 차단 기능을 수행하는 기기이지만 본 논문에서는 솔레노이드 밸브와 융합시켜 사고 발생 시 사고 전류의 선로를 변경하는 스위칭 동작을 수행하도록 설계하였다. 선행 연구를 통해 사고 전류의 선로를 변경하는 스위칭 소자를 반도체 소자를 사용했을 경우 0 전류 특성으로 인해 제한 동작이 지연됨을 확인하였고 이에 따라 고속 인터럽터를 사고 전류의 선로를 변경하도록 설계하였다. 본 실험에서는 사고 발생 시 사고 전류 제한율과 제한 시간, 고속 인터럽터의 동작시간을 분석하기 인가전압에 따른 1선 지락 사고 실험을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 3상 고속 인터럽터의 실험 회로도 및 사고 전·후 전류 흐름도

그림 1은 3상 고속 인터럽터의 모의실험 회로도 및 사고 전·후 전류 흐름도이다. 본 실험은 현 계통과의 유사성을 높이기 위하여 3상 전원(R, S, T Phase)을 구성하였다. 전원인 가 스위치 SW_{R-1}을 통해 전원을 인가하고 사고 발생 스위치 SW_{R-2}를 이용하여 사고를 발생시켰다. 또한, 사고 전류를 감지하는 CT와 고속 인터럽터에 전원을 인가하는 SCR Control System, 그리고 사고 발생 시 빠른 스위칭 동작을

* Dept. of Electrical Engineering, Chosun University, Korea

** Dept. of Electrical Engineering, Chosun University, Korea

[†] Corresponding Author : Prof. of Chosun University

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

Received : October 23, 2012; Accepted : December 27, 2012

그림 1 3상 고속 인터럽터의 모의실험 회로도

Fig. 1 Circuit diagram of the three-phase high-speed interrupter

솔레노이드와 진공 인터럽터를 융합시킨 고속 인터럽터를 자체 제작하여 구성하였다. 사고 전류를 제한하는 Limiter 소자는 20[Ω]의 저항 2개를 병렬로 연결하여 10[Ω], 2[kW] 용량이 되도록 구성하였다. SW_{R-1}을 통해 전원을 공급한다. 정상 시에는 전류가 Normal_Line으로 유입되어 안정적으로 동작한다. 그러나 SW_{R-2}으로 1선 지락 사고를 발생시키면 CT가 사고 전류를 감지하여 SCR Control system으로 전달한다. SCR Control system이 솔레노이드 밸브에 전원을 인가하여 고속 인터럽터를 동작시킨다. 고속인터럽터는 빠른 스위칭 동작을 이용하여 b접점은 Turn-Off, a접점은 Turn-On 동작을 수행한다. b와 a접점의 Turn-On, Off 동작으로 선로가 변경되어 사고 전류는 Fault_Line으로 유입되어 Limiter 소자인 10[Ω]의 R에 의해 제한된다.

2.2 인가전압에 따른 동작 특성 분석

그림 2는 1선 지락 사고 시 160V에서의 전압 및 전류 동작 특성이다. 그림 2(a), (b)는 사고 상인 R상의 사고 전류 제한 크기와 제한시간 및 고속 인터럽터의 동작 시간을 분석하였다. 160V 인가했을 경우 111.2[A]의 사고 전류가 발생하였다. 이 때 사고 전류를 CT가 감지하고 SCR Control system이 Sol Valve에 전원을 인가하였다. 이로 인해 사고 발생 5.53[msec]이후에 고속 인터럽터에 전원이 인가되었다. 그러나 SCR의 스위칭 개폐서지로 인해 전원이 인가된 후 10.56[msec]이후에 접점 b, a의 Turn-On, Off 스위칭 동작이 이루어졌다. 이에 따라 Normal_Line으로 흐르던 103.46[A]의 사고전류는 선로를 변경하여 Fault_Line으로 흐르게 되고 Limiter인 저항 소자에 의해 사고 발생 16.58[msec]이후에 7.73[A]로 제한되었다. 그림 2(c), (d)는 건전 상인 S, T상의 전압 및 전류 동작 특성이다. R상에서 사고가 발생했음에도 불구하고 전압과 전류의 파형이 일그러짐 없이 안정적인 동작을 수행하였다. 그림 3은 1선 지락 사고 시 200V에서의 전압 및 전류 동작 특성이다. 그림 3-(a), (b)는 사고 상인 R상의 사고 전류 제한 크기와 제한시간 및 고속 인터럽터의 동작 시간을 분석하였다. 사고 전

그림 2 160V 인가 시 전압 및 전류의 동작 특성 분석

(a),(b) 사고 상인 R상, (c),(d) 건전 상인 S, T상

Fig. 2 Voltage and current operation characteristics in 160V

(a),(b) Fault-phase R, (c),(d) Normal-phase S, T

류는 140.46[A]가 발생하였다. 마찬가지로 CT가 사고전류를 감지하고 SCR Control system이 사고 발생 5.10[msec]이후 고속 인터럽터에 전원을 인가하였다. 이 역시도 스위칭 개폐서지로 인해 전원이 인가된 후 9.56[msec]이후에 접점 b, a의 Turn-On, Off 스위칭 동작이 이루어졌다. 이로 인해 Normal_Line으로 흐르던 130.82[A]의 사고전류는 선로를 변경하여 Fault_Line으로 흐르게 되고 사고 발생 13.44[msec]이후에 12.6[A]로 제한되었다. 그림 3(c), (d) 건전상인 S, T상의 전압 및 전류 동작 특성이다. 앞에서 언급한 바와 같이 R상의 영향을 받지 않는 안정적인 동작을 수행하였다.

그림 4는 1선 지락 사고 시 240V에서의 전압 및 전류 동작 특성이다. 그림 4(a), (b)는 사고 상인 R상의 사고 전류 제한 크기와 제한시간 및 고속 인터럽터의 동작 시간을 분석하였다. 167.47[A]의 사고전류가 발생하였다. 이 경우도 앞에서 언급한 바와 같이 발생한 사고 전류를 CT가 감지하고 Sol valve에 전원이 인가된 후 4.55[msec]이후에 고속 인터럽터가 동작하였다. 그러나 스위칭 개폐서지로 인해 전원

그림 3 200V 인가 시 전압 및 전류의 동작 특성 분석
(a),(b) 사고 상인 R상, (c),(d) 건전 상인 S, T상

Fig. 3 Voltage and current operation characteristics in 200V
(a),(b) Fault-phase R, (c),(d) Normal-phase S, T

이 인가된 후 8.95[msec]이후에 Turn-On, Off 동작이 이루어졌다. 이로써 Normal_Line으로 흐르던 156.96[A]의 사고 전류는 고속 인터럽터의 스위칭 동작으로 Fault_Line으로 흐르게 되어 사고 발생 12.7[msec]이후에 15.86[A]로 제한되었다. 그림 4(c), (d)는 건전상인 S, T상이다. 마찬가지로 파형의 일그러짐 없이 안정적인 동작을 수행하였다.

그림 5는 1선 지락 사고 시 280V에서의 전압 및 전류 동작 특성을 분석하였다. 그림 5(a), (b)는 사고 상인 R상의 사고 전류 제한 크기와 제한시간 및 고속 인터럽터의 동작시간을 분석하였다. 사고전류는 191.02[A]가 발생하였다. 앞에서 언급한 것처럼 전원이 인가된 후 4.40[msec]이후에 고속 인터럽터가 동작하였다. 마찬가지로, 스위칭 계폐서지로 인해 전원 인가 후 7.65[msec]이후에 스위칭 동작을 수행하였다. 이에 따라 Normal_Line으로 흐르던 176.94[A]의 사고 전류는 고속 인터럽터의 스위칭 동작으로 Fault_Line으로

그림 4 240V 인가 시 전압 및 전류의 동작 특성 분석
(a),(b) 사고 상 R상, (c),(d) 건전 상인 S, T상

Fig. 4 Voltage and current operation characteristics in 240V
(a),(b) Fault-phase R, (c),(d) Normal-phase S, T

흐르면서 사고 발생 12.66[msec]이후에 18.26[A]로 제한되었다. 그림 5(c), (d)는 건전상인 S, T상의 전압 및 전류 동작 특성이다. 이 역시 사고 상의 영향을 받지 않았다.

2.3 초전도 한류기의 사고 전류 제한 특성

3상 고속 인터럽터의 신뢰성 확보를 위해 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기의 1선 지락 사고 시 모의 실험을 설계하였다. 그림 6은 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기의 모의실험 회로도이다. 고속 인터럽터와 마찬가지로 전원 인가 스위치(SW-1)를 통해 3상 전원을 공급하고, 사고 발생 스위치(SW-2)를 이용해 1선 지락 사고를 발생시켰다. 이 때 1차 측에 연결된 CT가 발생된 사고 전류를 감지하여 SCR Control system이 동작됨으로써 SCR-A, B가 Turn-On, Off되어 중성선에 흐르던 사고 전류를 초전도

그림 5 280V 인가 시 전압 및 전류의 동작 특성 분석
(a),(b) 사고 상 R상, (c),(d) 건전 상인 S, T 상
Fig. 5 Voltage and current operation characteristics in 280V
(a),(b) Fault-phase R, (c),(d) Normal-phase S, T

소자가 연결된 3차 측으로 우회 시켜 초전도 한류기가 차단기의 차단내력을 초과하지 않는 값으로 제한하였다. 그림 7은 1선 지락 사고 발생 시 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기의 각 상의 전압 및 전류의 동작 특성이다. 사고 상인 R상의 경우 사고 발생 직후 SCR-B가 턴 온 동작을 수행하여 사고전류는 3차 측으로 우회시킨다. 그러나 중성선에 연결된 SCR-A는 유입되는 전압의 증가로 인해 턴 오프 조건을 만족하지 못한다. 이로 인해 SCR-A는 반주기 이후에 턴 오프 동작을 수행하고 사고 전류는 반주기 이전 84.13[A], 반주기 이후 32.26[A]로 제한하였다. 건전상인 S상과 T상의 경우 3상 일체화된 변압기의 사용으로 인해 전류가 약간 증가하였으나 반주기 이내에 정상적인 동작을 수행하였다. 그림 8, 9, 10의 200V, 240V, 280V의 전압을 인가했을 경우도 앞에서 언급한 바와 같은 동작을 수행하

그림 6 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기의 모의실험 회로도
Fig. 6 Circuit diagram of the SFCL applied into third-winding transformer

그림 7 160V 인가 시 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기의 전압 및 전류의 동작 특성
Fig. 7 Voltage and current operation characteristics of the SFCL applied into third-winding transformer in 160V

였다. SCR의 Turn-Off 동작이 반주기 이후에 이루어 졌다. 이로 인해 사고 전류는 반주기 이전 82.67, 106.97, 126.67, 139.73[A], 반주기 이후 22.4, 37.73, 44.53, 52[A]로 제한되었다. 건전 상인 S상, T상 또한 160V를 인가했을 경우와 같은 동작을 수행하였다. 실험 결과 초전도 한류기는 사고 발생 동시에 SCR Turn-On 동작이 이루어져 초기 사고 전류가 낮게 발생하였다. 1주기 이내에 사고 전류를 제한한 뒤 회복하여 정상 동작을 수행하였다.

그림 8 200V 인가 시 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기의 전압 및 전류의 동작 특성

Fig. 8 Voltage and current operation characteristics of the SFCL applied into third-winding transformer in 200V

그림 9 240V 인가 시 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기의 전압 및 전류의 동작 특성

Fig. 9 Voltage and current operation characteristics of the SFCL applied into third-winding transformer in 240V

2.4 실험 고찰

그림 11에서 3상 전원을 인가했을 경우 고속 인터럽터와 초전도 한류기의 사고 전류 제한 특성을 비교하였다. 3상 고속 인터럽터를 적용하였을 경우 인가 전압에 따라 사고전류가 111.2, 140.46, 167.47, 191.02 [A]가 발생하였다. 이를 제

그림 10 280V 인가 시 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기의 전압 및 전류의 동작 특성

Fig. 10 Voltage and current operation characteristics of the SFCL applied into third-winding transformer in 280V

그림 11 고속 인터럽터와 초전도 한류기의 사고 전류 제한 동작 특성 비교

Fig. 11 Operation characteristics Comparison of High-speed interrupter and SFCL

한하기 위하여 사고 발생 5.35, 5.10, 4.55, 4.40[msec]이 후에 고속 인터럽터에 전원이 인가되었다. 그러나 스위칭 계폐 서지로 인해 고속 인터럽터의 b, a접점 Turn-On, Off 동작이 10.56, 9.56, 8.95, 7.65[msec] 이후에 이뤄졌다. 즉, 사고 발생 16.58, 13.44, 12.7, 12.66[msec] 이후에 사고 전류는 7.73, 12.6, 15.86, 18.26[A]로 제한되었다. 동작 신뢰성 확보를 위해 실시한 초전도 한류기가 융합된 3상 변압기의 경우도 인

가전압이 증가함에 따라 사고 전류가 증가하였다. 사고 직후 SCR-A의 Turn On 동작을 수행하여 초기 사고 전류의 크기가 낮았으나, SCR-B의 Turn Off 동작이 반주기 이후 200.29, 201.16, 201.44, 201.65 [msec]에 이루어져 사고 전류는 반주기 이전 82.67, 106.97, 126.67, 139.73[A], 반주기 이후 22.40, 37.73, 44.53, 52[A]로 제한되었다. 고속 인터럽터와 초전도 한류기 모두 각각의 Limiter 소자를 이용하여 사고 전류를 초기 사고 전류 보다 훨씬 낮은 값으로 제한하였다. 또한 1주기 이내에 사고 전류 제한 동작을 수행하였다. 다만 초전도 한류기를 적용했을 경우에 초기 사고 전류의 크기가 더 낮게 발생하였다. 결과적으로, 사고 전류 제한크기, 제한 시간 등 동작 특성에서 초전도 한류기와 고속 인터럽터의 큰 차이점을 발견할 수 없었다. 그러나 본 실험은 모의배전 계통을 구성하여 현 계통에 비하면 극히 낮은 저전압을 인가하여 초전도 한류기와 비교실험을 실시하였다. 따라서 앞으로 본 모의실험을 바탕으로 현 계통과 같은 고전압을 인가하여 초전도 한류기와 동작 특성을 비교·분석 실험을 할 필요가 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 3상 고속 인터럽터가 적용된 상전도 한류기의 사고전류 제한크기와 제한시간 및 고속 인터럽터의 동작 시간을 인가전압에 따라 분석하였다. 사고 발생 시 CT가 감지하면 SCR Control system이 솔레노이드 밸브를 통해 고속 인터럽터에 전원이 인가한다. 전원이 인가 된 후 고속 인터럽터는 스위칭 동작으로 전로를 변경하고 Limiter 소자인 저항에 의해 사고전류는 제한된다. 실험 결과, 인가전압이 증가할수록 사고 전류가 증가하였고 이에 따라 고속 인터럽터의 동작 속도 또한 단축되었다. 이로 인해 스위칭의 개폐시간도 감소하여 사고전류는 더욱 빠르고 낮게 제한되었다. 또한, 고속 인터럽터의 동작 신뢰성을 확보하기 위해 3권선 변압기에 융합된 초전도 한류기와 비교 실험을 하였다. 그 결과 사고전류 제한크기, 제한시간 등 성능 면에서 별다른 차이점을 보이지 않았다. 실험 결과를 바탕으로 현재 실 계통에 적용이 어려운 초전도 한류기보다는 성능이 비슷하고 비용이나 크기 등 여러 면에서 강세를 보이고 있는 고속 인터럽터를 적용시키는 것이 더욱 실용적이라 생각된다. 하지만, 본 실험은 극히 낮은 저전압을 인가하여 실시한 실험이기에 현 계통과 같은 고전압을 인가하여 고속 인터럽터의 신뢰성 확보를 위한 연구가 더욱 필요할 것이라 사료된다.

References

- [1] H. S. Choi, O. B. Hyun, and H. R. Kim, "Quench characteristics of resistive superconducting fault current limiters based on YBCO films," *Physica C*, vol. 351, pp. 415-420, 2001.
- [2] H. S. Choi, O. B. Hyun, H. R. Kim, K. B. Park, "Switching properties of hybrid type superconducting fault current limiter using YBCO stripes," *IEEE Trans. Appl. Supercond*, Vol 12, pp. 1833-1838, Sep 2002.
- [3] J. T. You, "A study on the improvement of reliability on electric power system as the increase of fault capacity," 2005.
- [4] H. R. Kim, S. W. Yim, O. B. Hyun, J. Sim, S. Y. Oh, "Analysis on recovery characteristics of superconducting fault current limiter," *MT-20 Conference on Magnet Technology*, 2007.
- [6] K. H. Ha, S. G. Choi, Y. S. Cho, H. S. Choi, "Operational Behaviors of Flux-Coupling Type SFCL Using Integrated Three Phase Transformer Under Transient State," *IEEE Trans*, Vol.22 No.3, pp.5601604, June 2012.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2011T100100243)

저 자 소 개

최혜원 (崔惠圓)

1989년 10월 04일 생. 2012년 조선대 전기공학과 졸업(학사). 2012~현재 동 대학원 석사 과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : vjvldnjs@naver.com

최효상 (崔孝祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년 한전 전력연구원 선임연구원. 현재 조선대 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

정병익 (鄭柄益)

1981년 8월 25일 생. 2003년 조선대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007~현재 동 대학원 박사 과정.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : chuzang@naver.com