

배전계통에 초전도한류기 적용시 전압요소를 이용한 과전류계전기 정정 연구

Study on the OCR Setting Using the Voltage Component Considering Application of the SFCL in a Power Distribution System

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

Abstract - In south korea, the government make a plan to generate the 20% of the total electrical power as renewable source like wind generation and solar generation. This plan will accelerate the increase of fault current with power industry's growth. As the increase of fault current, the superconducting fault current limiter (SFCL) has been studied. In case that the SFCL is applied in power system, it can cause the overcurrent relay (OCR)'s trip delay because of the reduced fault current. In this paper, the overcurrent relay with voltage component was suggested to improve the OCR's trip delay caused by the SFCL and compensational constant was introduced to have the trip time similar to the trip time of case without the SFCL. For conforming the effect of the suggested OCR with voltage component, the PSCAD/EMTDC simulation modeling and analysis were conducted. Through the simulation, it was conformed that the trip delay could be improved by using the suggested OCR and compensational constant.

Key Words : Fault current, Overcurrent relay (OCR), Superconducting fault current limiter (SFCL), Trip delay, Voltage component

1. 서 론

최근 온실가스의 저감을 위해 친환경 에너지원에 대한 관심이 높아지고 있으며 신재생 분산전원의 효율과 수용 능력을 향상하기 위한 노력을 하고 있다. 이와 함께 전력 산업의 성장과 확장은 전력계통의 복잡화와 변화를 불러오고 있고 이는 고장전류의 증가라는 문제점을 야기하고 있다[1-2]. 이러한 계통의 변화는 지금까지의 보호기기로는 기능적/용량적으로 계통보호에 제한을 받게 된다. 고장전류의 증가에 대한 해결책으로 대용량의 보호기기로 교체를 필요로 하지만 비용적인 문제로 이는 거의 불가능하다고 보고 있다. 따라서 차선책으로 현재 네트워크 계통의 모선 분리 운영, 한류 리액터 설치, 고임피던스 전력 기기의 사용과 같은 방법을 도입하고 있지만 계통 운영상의 단점을 가지고 있다[3-4].

따라서 이에 대한 다른 해결책으로써 초전도한류기(SFCL, Superconducting Fault Current Limiter)에 대한 연구가 진행되고 있다. 초전도한류기는 정상시 전력 손실이 없으며 임계전류 이상의 고장 전류를 1/4 주기 이내에 제한이 가능한 빠른 응답력을 갖는 장점을 가지고 있다[5-7]. 하지만 초전도한류기는 현

재 계통에 적용되어 사용되고 있는 보호기기에 영향을 끼쳐 오·부동작을 발생시키는 문제점을 가지고 있다. 따라서 기존의 보호기기 정정을 그대로 사용하기 보다는 다시 정정을 해야 할 필요가 있다. 그 문제점 중 한가지로 초전도한류기 적용시 고장전류의 감소로 인해 발생하게 되는 과전류계전기의 트립동작 지연 현상이 있다. 이를 해결하기 위해 과전류계전기 정정값의 변경, 초전도한류기 동작에 따른 2개의 연산 등의 기존 연구가 있다[8-11].

본 논문에서는 초전도한류기 적용시 발생하는 과전류계전기의 트립지연 오동작 현상을 개선하기 위해 전압요소를 이용하여 전압요소를 갖는 과전류계전기를 도입하였다. 이를 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통해 모의하였으며 제안하는 방법의 효과를 검증하였다.

2. 초전도한류기의 과전류계전기 영향

초전도한류기는 초전도체의 퀘치특성을 이용한 전류제한 장치로 정상시에는 초전도상태로 계통에 영향을 끼치지 않지만 고장 발생시 상전도체의 한류리액터로 작용하여 고장전류를 크게 제한할 수 있는 능력을 가지고 있다[5].

우리나라의 과전류계전기는 일반적으로 고장전류의 크기와 트립시간이 반비례하는 반한시성 특성을 사용하며 이에 대한 특성식은 식 (1)과 식 (2)와 같다. 여기서 A, B, K, p는 상수, TD와 I_{pickup} 은 타임레버(Lever)와 전류탭(Tap)을 의미한다. 식 (1)의 변

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

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr

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

Received : July 7, 2018; Accepted : November 8, 2018

수에 해당하는 값은 분모의 M에 해당하며 이는 식 (2)의 값을 갖는다. 이러한 반한시성의 과전류계전기의 동작시간은 고장전류의 크기에 영향을 받으며 한류기가 도입될 경우 고장전류의 감소로 인해 과전류계전기의 트립시간은 증가하게 된다[12].

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

$$M = \frac{I_f}{I_{pickup}} \quad (2)$$

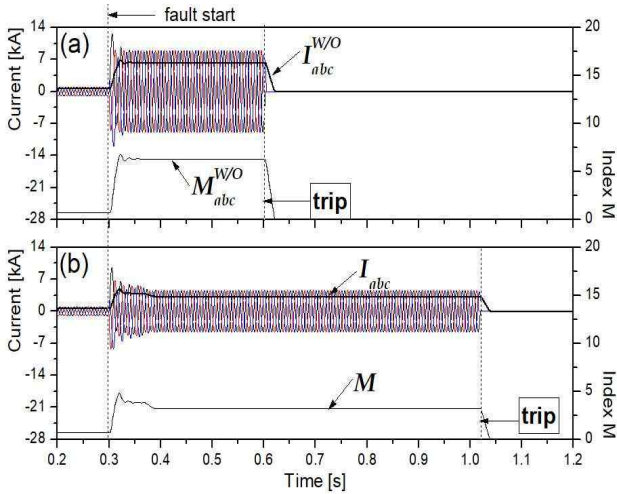


그림 1 초전도한류기 적용으로 인한 과전류계전기의 트립지연 파형 (a) SFCL 적용 전 (b) SFCL 적용 후

Fig. 1 Waveforms of OCR's trip delay by applying the SFCL (a) without SFCL (b) with SFCL

그림 1은 그림 3의 모의계통을 통해 확인한 초전도한류기 적용 전후의 전류와 식 (2)의 M 값으로 초전도한류기의 고장전류 저감효과와 과전류계전기의 트립동작 지연을 확인할 수 있다. 여기서 윗첨자 W/O는 초전도한류기가 적용되지 않은 경우를 의미한다. 그림 1(a)는 초전도한류기 적용 전의 파형으로 고장 발생시 9 [kA]의 고장전류를 가지며 과전류계전기 트립동작으로 고장이 제거되기까지 0.298 [s]의 시간이 필요로 하였다. 반면, 그림 1(b)는 초전도한류기 적용 후의 파형으로 고장 발생시 4.7 [kA]의 고장전류를 가지며 과전류계전기의 트립동작으로 고장이 제거되기까지 0.719 [s]의 시간이 필요했으며 초전도한류기의 적용전보다 0.421 [s]의 트립지연이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 2는 방사상 계통에서 전위 과전류계전기(OCR₂) 후비 과전류계전기(OCR₁)의 반한시성의 동작시간-전류 곡선(TCC, Time Current Curve)을 보여준다. TCC1은 후비, TCC2는 전위 과전류계전기의 동작시간-전류 곡선을 나타내며 TCC3은 TCC1과 TCC2의 차로 협조시간차를 의미한다.

기존 A의 고장전류를 갖는 계통에서 초전도한류기의 도입할 경우 고장전류의 감소로 좌측으로 이동하며 과전류계전기의 트립동작 시간이 증가한다. 초전도한류기 적용전의 협조시간차는

ΔT_1 이며 적용후의 협조시간차는 ΔT_2 이다. 그림 2에서는 ΔT_2 가 ΔT_1 보다 작은 것으로 보이지만 Y축이 Log 단위임을 감안한다면 ΔT_2 가 ΔT_1 보다 크며 TCC3를 통해 확인할 수 있다. 이러한 협조시간의 증가는 보호기간 협조 측면에서 긍정적 작용을 할 수 있지만 한국전력공사의 지침 표 1을 만족하지 못할 수 있으므로 정정이 필요하다.

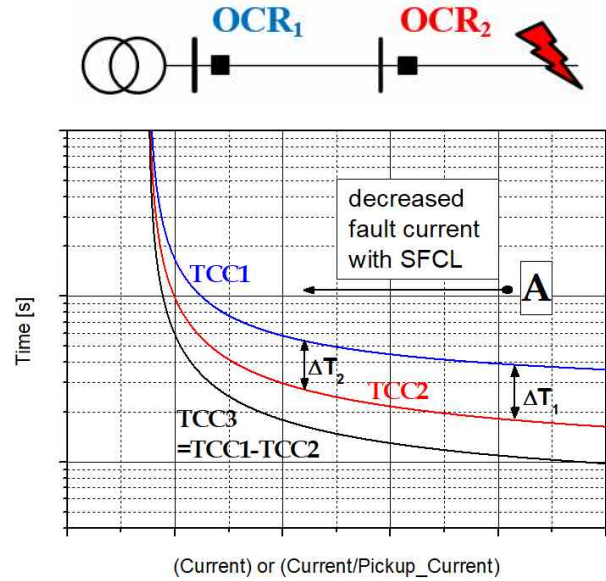


그림 2 초전도한류기 적용시 보호협조 시간차 영향

Fig. 2 Influence of protective coordination time interval (CTI) by applying the SFCL

표 1 배전계통보호장치간 협조시간차(한국전력공사지침)

Table 1 Cooperation time interval between protective devices of distribution system (KEPCO Guideline)

후비 보호장치	전위 보호장치	협조시간차[Cycle]
OC(G)R	Recloser	10
OC(G)R	OC(G)R	17
Recloser	Recloser	3.5 또는 2.7
Recloser	OC(G)R	6

초전도한류기의 도입시 발생하는 과전류계전기의 트립동작을 해소하기 위한 기존의 정정 방법으로는 과전류계전기의 탭 또는 레버 변경 등의 방법을 제시하고 있다[8]. 하지만, 정상상태에서 영향이 없는 초전도한류기의 경우 탭 변경을 통한 정정은 바람직하지 않다고 사료되며, 레버 변경의 경우 초전도한류기의 동작을 전제로 정정한 값이므로 초전도한류기의 부동작시 과전류계전기의 오·부동작을 유발할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 초전도한류기의 동작 유무와 관계없이 트립지연 시간을 개선할 수 있도록 초전도한류기의 전압요소를 도입한 전압요소를 갖는 과전류계전기를 제안했다.

3. 초전도한류기로 인한 과전류계전기 트립지연 정정

3.1 시뮬레이션 모델링

본 논문에서는 초전도한류기의 계통 적용시 발생할 수 있는 트립지연 동작과 이를 개선하기 위한 방법의 효과를 검토하기 위해 PSCAD/EMTDC를 사용하여 모델링을 진행하였다. 그림 3은 22.9kV의 방사형의 모의 배전계통으로 피더 당 2개의 보호계전기를 가진다. 고장위치는 선로 Z_{11} 로 과전류계전기에 의해 동작하는 차단기 CB_{11} 으로부터 1.5 [km] 떨어진 지점에서 3상고장을 모의하였다. 모의배전계통에 대한 파라미터는 표 2에 나타나 있다.

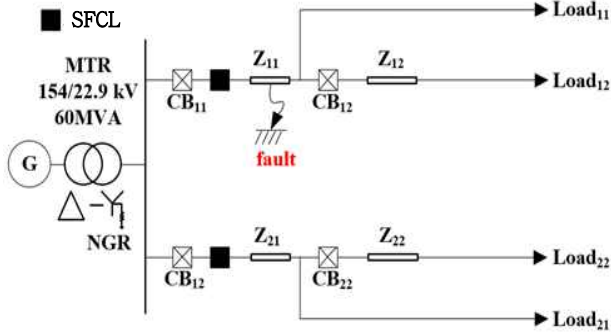


그림 3 모의 배전계통 회로도
Fig. 3 Simulation circuit of a distribution power system

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 참고문헌 [13]을 참조하여 트리거형 초전도한류기를 구성하였다. 트리거형 초전도한류기는 그림 4와 같이 초전도체(HTSC, High Temperature Superconductor), 전류제한 리액터(current limitign reactor, CLR), 스위치(SW)와 제어회로(Control Circuit)로 구성된다. 고장전 정상상태의 모든 전류는 초전도소자를 통해 흐르며 고장발생시 초전도소자의 퀀치로 인한 전압 발생을 감지하여 스위치를 개방시켜 전류제한 리액터로 고장전류를 제한시킨다. 이후 고장 제거로 전류제한 리액터에 흐르는 전류가 설정값 이하로 될 경우, 스위치는 다시 투입되어 고장전의 상태로 복구하게 된다. 본 논문에서는 2 [Ω] 값을 CLR로 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

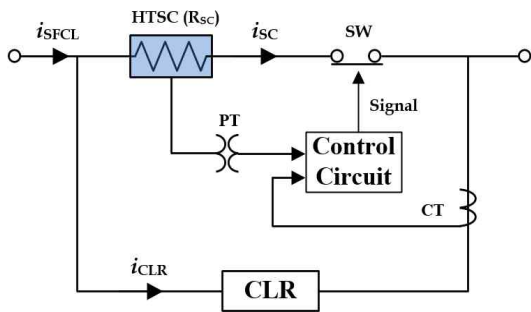


그림 4 트리거형 초전도한류기 회로도
Fig. 4 Simulation circuit of the trigger type SFCL

표 2 모의 배전계통 파라미터

Table 2 Parameters of the simulation circuit

변압기(MTR)	154/22.9 [kV], 60 [MVA] j15 [%], NGR=j5 [%]	
선로 임피던스 (ACSR 160mm ² 100 [MVA])	(영상분) 3.86+j7.42 [%/km] (정상분) 9.87+j22.68 [%/km]	
	선로길이	$Z_{11}, Z_{21} = 3$ [km] $Z_{12}, Z_{22} = 4$ [km]
부하 용량	Load ₁₁ =Load ₁₂ =5 [MVA] Load ₂₁ =Load ₂₂ =5 [MVA]	

3.2 과전류계전기 트립지연 정정방법

초전도한류기의 적용은 고장전류의 저감에 따른 식 (2) M값의 감소로 인해 발생한다. 이런 고장전류의 저감에도 식(1)의 값을 유지한다면 트립지연의 개선이 가능하다. 이를 위해서는 감소된 식 (2)의 값을 식 (1)의 정정을 통해 보상하는 방법과 식 (2) M값의 변화 자체를 억제하는 방법이 있다.

3.2.1 레버(Lever) 변경을 통한 정정

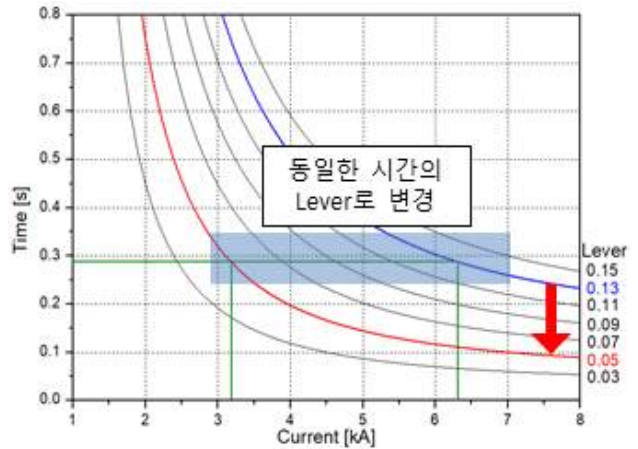


그림 5 Lever 변경을 통한 트립지연 개선
Fig. 5 Improvement of the trip delay with the SFCL by resetting the Lever

레버 변경을 통한 트립지연의 개선은 M 값의 변화를 식 (1)의 정정을 통해 동작시간을 유지하는 방법이다. 그림 5는 레버 변화에 따른 과전류계전기의 동작시간-전류 그래프이다. 초전도한류기의 적용전 6.32 [kA]의 고장전류가 초전도한류기의 적용으로 3.21 [kA]로 감소할 경우 0.29 [s]의 동작시간은 약 0.75 [s]로 증가하는 것을 기존의 레버 0.13 그래프에서 볼 수 있다. 이를 정정하기 위해 0.13의 레버를 0.05로 변경하여 기존의 트립시간과 유사한 시간을 갖게 하는 효과를 얻을 수 있으며, 그림 6을 통해 확인할 수 있다. M값은 그림 1(b)와 동일하게 감소하였지만 초전도한류기 적용으로 인한 과전류계전기의 트립지연은 발생하

지 않고 개선되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 초전도한류기의 동작이 이루어지지 않는 경우에도 0.05의 곡선에서 트립시간을 갖기 때문에 오동작의 위험을 갖고 있다.

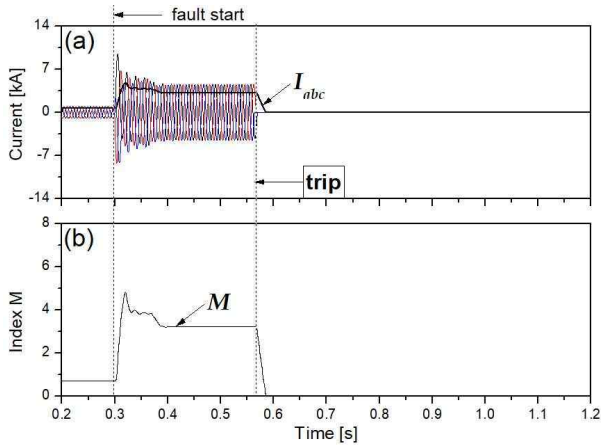


그림 6 Lever변경을 통한 트립지연 개선파형 (0.13→0.05)
(a) 전류 (b) M 값

Fig. 6 Improved trip delay waveform with the SFCL by resetting the Lever (0.13 → 0.05) (a) Currents (b) Index M

3.2.2 탭(Tap) 변경을 통한 정정

탭 변경을 통한 트립지연 개선은 식 (2) M 값의 변화를 억제하여 기존의 트립시간을 유지하는 방법이다. 그림 7은 탭 값의 변화에 따른 과전류계전기의 동작시간-전류 그래프이다. 초전도한류기의 적용으로 과전류계전기의 트립 동작시간은 약 0.75 [s]로 증가하는 것을 기존의 탭 값 1 [kA] 그래프에서 볼 수 있다. 이를 정정하기 위해 1 [kA]의 탭 값을 0.5 [kA]로 변경하여 기존

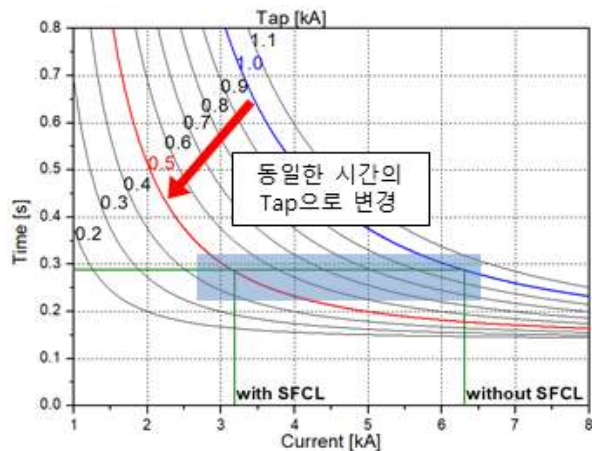


그림 7 Tap 변경을 통한 트립지연 개선

Fig. 7 Improvement of the trip delay with the SFCL by resetting the Tap

의 트립시간과 유사한 시간을 갖게 하는 효과를 얻을 수 있다. 하지만, 본 논문에서의 모계통은 부하전류가 0.5 [kA]보다 큰 경우로 탭을 이용한 트립지연 개선의 방법은 과전류계전기의 오동작을 유발한다. 또한, 과도한 탭 변경은 한국전력공사의 지침에 부합하지 않으므로 사용이 제한된다.

3.2.3 모선전압을 이용한 정정

배전계통에서 그림 3과 같이 피더 인출부에 초전도한류기를 적용할 경우 고장시 발생하는 모선의 전압강하 현상을 개선할 수 있다[3]. 이를 이용하여 초전도한류기 적용시 고장전류의 저감으로 발생하는 M값의 변동을 식 (3)을 사용하여 억제할 수 있다. 초전도한류기가 적용될 고장전류(I_f)는 감소하지만 모선전압(V_{bus})의 감소는 줄어들기 때문에 초전도한류기의 적용전보다 큰 값을 가지게 된다. 따라서 식 (3)의 변동을 억제할 수 있게 되어 과전류계전기의 트립시간 변화를 개선할 수 있다.

$$M = \frac{I_f}{I_{pickup}} \times \frac{V_{bus}}{V_{pickup}} \quad (3)$$

초전도한류기 적용시 식 (3)을 통해 트립시간의 변화를 억제할 수 있지만, 기존의 셋팅값(I_{pickup}, TD)을 사용할 경우 식 (3)의 M 값은 식 (2)를 사용하는 기존의 과전류계전기를 사용하는 경우보다 작은 값을 가지게 된다. 이로 인해 초전도한류기가 적용되지 않은 경우에도 기존의 과전류계전기를 사용하는 경우보다 긴 트립시간을 갖는다. 그림 8은 모선전압을 이용한 과전류계전기의 초전도한류기 적용 전 파형으로 전류, 모선전압, 식 (3) 값을 보여준다. 모선전압을 사용함으로써 그림 1(a)에 비해 M 값의 감소와 이로 인한 1.06 [s]에서의 트립동작을 확인할 수 있다.

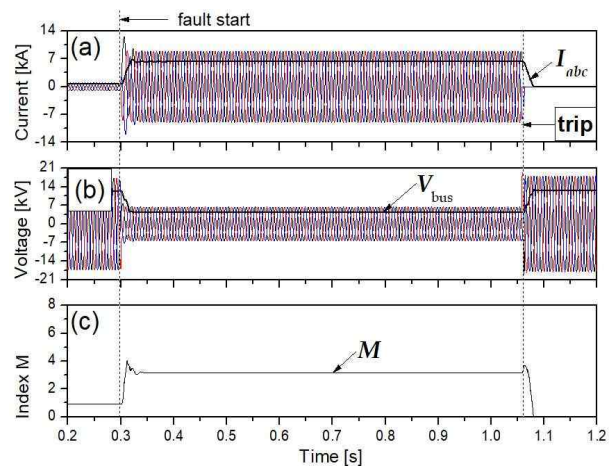


그림 8 SFCL 미적용시 모선전압을 이용한 과전류계전기 파형 (a) 전류 (b) 모선전압 (c) M 값

Fig. 8 Waveform of OCR using bus voltage without the SFCL (a) Current (b) Bus voltage (c) Index M

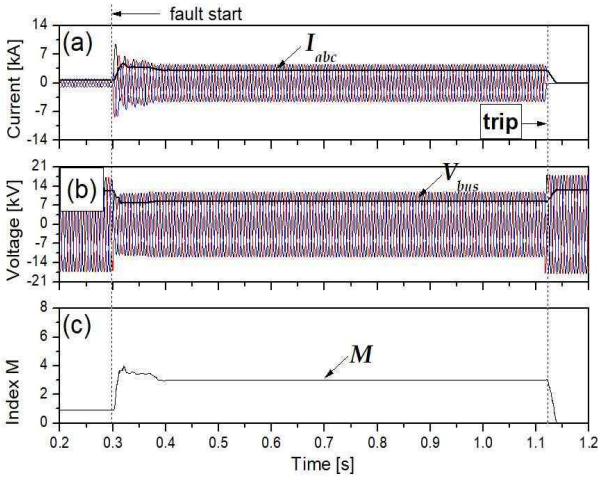


그림 9 SFCL 적용시 모션전압을 이용한 과전류계전기 파형 (a) 전류 (b) 모션전압 (c) M 값

Fig. 9 Waveform of OCR using bus voltage with the SFCL (a) Current (b) Bus voltage (c) Index M

그림 9는 모션전압을 이용한 과전류계전기의 초전도한류기 적용 후 파형으로 전류, 모션전압, 식 (3) 값을 보여준다. 초전도한류기의 적용으로 고장전류와 모션의 전압강하가 감소하며 그림 8과 유사한 M 값 및 트립시간을 갖는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 모션전압의 사용은 초전도한류기의 적용 전후 트립시간의 변동을 억제할 수 있지만 기존의 과전류계전기와 유사한 트립시간을 갖기 위해서는 추가적인 정정이 필요하다고 판단된다.

4. 전압요소를 갖는 과전류계전기

4.1 전압요소를 갖는 과전류계전기 특성

본 논문에서 제안하는 전압요소를 갖는 과전류계전기는 초전도한류기의 전압을 사용하는 방법으로 M 값의 변동을 억제하여 트립시간을 유지하는 방법이다. 이를 위해 본 논문에서는 식 (4)와 같이 고장전류의 제한시 발생하는 초전도한류기의 전압을 사용하여 M값의 변화를 억제하였다.

$$M = \frac{I_f + \alpha V_{SFCL}}{I_{pickup}} \quad (4)$$

여기서, V_{SFCL} 은 초전도한류기의 양단 전압, α 는 전압보정 계수를 의미한다. 초전도한류기의 미적용 즉, 동작하지 않을 경우 식 (4)의 V_{SFCL} 은 0이므로 식 (2)와 같은 값을 갖는다. 고장으로 인해 초전도한류기가 동작할 경우 식 (4)의 V_{SFCL} 은 0이 아닌 양수의 값을 갖게 되고 고장전류의 감소분을 보상하여 M값의 감소를 억제하는 역할을 한다. 결과적으로 초전도한류기의 적용 유무와 상관 없이 식 (2)와 유사한 M값을 가지게 되며 과전류계전기의 트립지연을 줄일 수 있다.

4.2 전압요소를 갖는 과전류계전기의 보정계수(α) 선정

본 논문에서 제안한 전압요소를 갖는 과전류계전기의 트립동작이 초전도한류기의 적용과 무관하게 기존의 시간과 유사하다면 보호계전기 정정과 보호협조 관계를 유지하기가 유리하게 된다. 따라서, 전압요소인 V_{SFCL} 을 보정하기 위한 보정계수(α)를 도입하였다. 초전도한류기의 적용 전 식 (2)값과 적용 후의 식 (4) 값이 같도록 보정계수(α)를 선정하면 식 (5)가 도출된다.

$$\frac{I_f}{I_{pickup}} = \frac{I_f^{SFCL} + \alpha V_{SFCL}}{I_{pickup}}, \quad \alpha = \frac{(I_f/I_f^{SFCL}) - 1}{Z_{SFCL}} \quad (5)$$

여기서, 초전도한류기 적용전의 고장전류(I_f)와 초전도한류기 적용후의 고장전류(I_f^{SFCL})는 계통 분석을 통해 알고 있음을 가정하였으며, Z_{SFCL} 은 초전도한류기의 임피던스를 의미한다. 이때, 고장전류(I_f)가 흐르는 초전도한류기의 임피던스를 사용하여 보다 정확한 전압보정 계수의 선정이 가능하다. 이를 통해 기존의 과전류계전기의 타임레버와 전류탭을 변경하지 않고 초전도한류기의 적용 전과 유사한 과전류계전기의 트립동작 시간을 기대할 수 있다. 다만, 식 (5)는 고장의 위치에 따른 고장전류의 차이로 인해 오차가 발생할 수 있어 적절한 오차범위를 고려할 필요가 있다.

4.3 전압요소를 갖는 과전류계전기의 적용 효과

본 논문에서 제안한 전압요소를 갖는 과전류계전기의 효과를 확인하기 위하여 식(1)과 식(4)를 특성식으로 사용하였다. 표 3은 시뮬레이션에서 사용된 과전류계전기의 설정값이며 전압보정 계수는 해당 과전류계전기의 후보호 구간의 중간지점 고장을 기준으로 선정하였다. 즉, OCR₁₁의 경우 모션으로부터 1.5 [km] 고장으로 초전도한류기 적용 전 고장전류 6.32 [kA], 적용 후 고장전류 3.21 [kA]의 값으로 전압보정 계수는 0.485를 가진다.

표 3 전압요소를 갖는 방향성 과전류계전기의 설정 파라미터

Table 3 Parameters of the simulation circuit

공통	A : 39.85, B : 1.084, K : 0, p : 1.95
OCR ₁₁ , OCR ₂₁	I_{pickup} : 1.0 [kA], TD: 0.13, α : 0.485
OCR ₁₂ , OCR ₂₂	I_{pickup} : 0.675 [kA], TD: 0.1, α : 0.2758

그림 10은 과전류계전기(OCR₁₁)가 설치된 지점의 선로전류 (I_{abc}), 초전도한류기의 전압(V_{SFCL}), 과전류계전기의 M값을 보여준다. 초전도한류기의 적용으로 고장전류의 크기는 그림 1(a)와 비교하여 50 [%] 수준으로 감소하였으며 초전도한류기의 전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 초전도한류기 전압의 사용으로 M 값과 트립시간 또한 그림 1(a)와 유사하여 트립지연의 개선효과를 확인할 수 있었다.

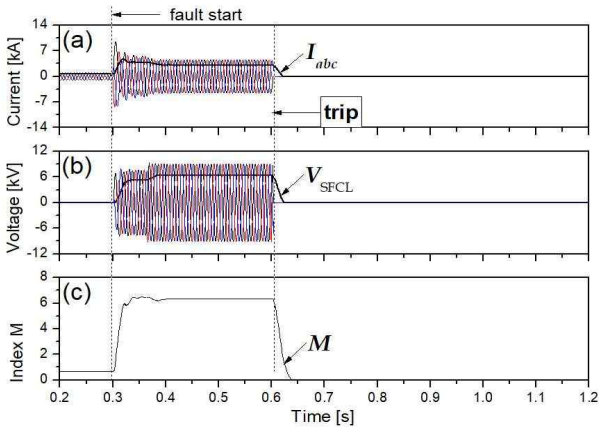


그림 10 SFCL 적용에 따른 전압요소를 갖는 과전류계전기의 동작파형 (a) 상전류 (b) 초전도한류기 전압 (c) M 값

Fig. 10 Operational waveforms of OCR with voltage component by applying the SFCL (a) current (b) SFCL's voltage (c) Index M

4.4 전압보정 계수(α) 적절성

본 논문에서 도입한 전압보정 계수(α)의 적절성을 확인하기 위하여 계수값에 따른 시뮬레이션을 진행하였다. 전압보정 계수 변화에 따른 트립신호의 발생 시간을 표 4에 정리하였다. 초전도한류기를 사용하지 않은 경우 과전류계전기의 트립동작은 0.598 [s]에서 발생하였다.

표 4 전압보정 계수(α)에 따른 전압요소를 갖는 과전류계전기의 트립동작 시간

Table 4 Trip time of OCR with voltage component according to the voltage compensator(α)

전압보정 계수(α)	trip signal 발생 시간 [s]	SFCL 사용으로 인한 트립동작 지연시간 [ms]
SFCL 미사용	0.598	-
1	0.522	-76
0.6	0.572	-22
0.5	0.595	-3
0.433	0.599	1
0.4	0.627	29
0.3	0.670	72

전압보정 계수를 사용하지 않고 초전도한류기의 전압을 그대로 사용한 경우($\alpha=1$) 0.522 [s]로 식 (4)의 과도한 보상으로 초전도한류기 적용 전보다 빠른 트립이 이루어졌다. 전압보정 계수가 감소하면서 트립시간도 감소하였으며 식 (4)에 의한 값 0.433에 도달할 때 초전도한류기 적용 전과 1[ms]의 차이로 초전도한류기의 미적용시와 유사함을 확인할 수 있었다. 또한, 계산값 이하의 계수를 가질 경우 트립시간은 증가하여 지연동작이 발생하였

다. 식 (5)를 통한 전압보정 계수보다 작은 경우의 트립시간 변화율이 전압보정 계수보다 큰 경우의 트립시간 변화율보다 큼을 볼 수 있다. 이는 식 (1)의 기울기가 M 값이 작을수록 큰 값을 갖기 때문이다.

4.5 거리에 따른 전압보정 계수(α)

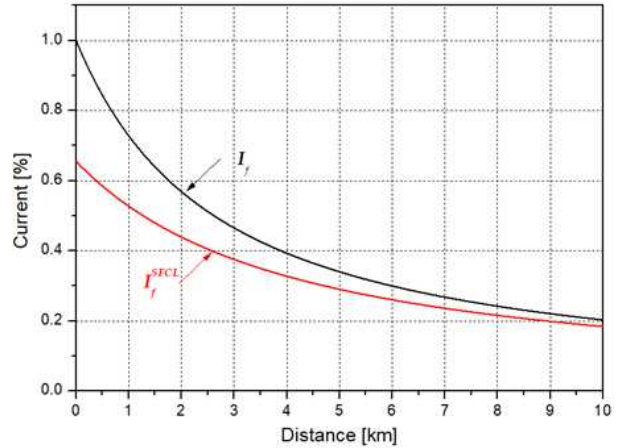


그림 11 고장 위치에 따른 SFCL의 고장전류 제한효과

Fig. 11 SFCL's fault current limiting effect according to fault distance

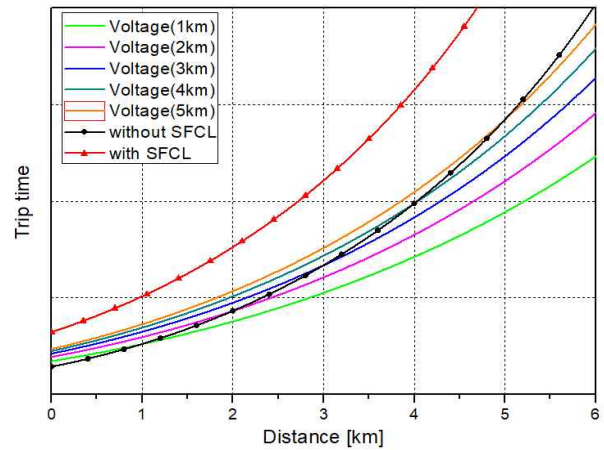


그림 12 전압보정 계수에 따른 전압요소를 갖는 과전류계전기의 동작시간 그래프

Fig. 12 Trip time curve of SFCL with voltage component according to the voltage compensator

그림 11은 초전도한류기의 적용 전후 고장 거리에 따른 고장전류의 비로 보았을 때 SFCL은 초전도한류기의 적용을 의미한다. 초전도한류기의 고장전류 제한효과는 모선으로부터 먼 지점의 고장일수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 식 (5)의 값은 설정에 사용된 고장위치의 전류에 따라 다르며 설정시 고려가 필

요하다.

그림 12는 식 (5)의 계산시 사용된 고장위치의 전류별 트립시간을 고장위치에 따라 보여준다. 범례에서 괄호 안의 값은 전압보정 계수의 계산시 사용된 모선으로 부터의 고장거리를 의미한다. 각 곡선은 초전도한류기가 적용되지 않은 경우의 곡선과 교점을 가지며 그 지점은 계산시 사용된 고장지점에 해당한다. 교점보다 가까운 지점의 고장에서는 기존의 트립시간보다 긴 트립시간을 가졌다. 반면, 교점보다 먼 지점의 고장에서는 기존보다 빠른 트립시간을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 위에서 언급한 것과 마찬가지로 고장위치가 멀수록 초전도한류기의 한류효과가 작아지기 때문이다. 또한, 식 (1)의 기울기 차이로 인해 먼 거리의 고장으로 일수록 기존의 트립시간과 차이가 더 발생하게 된다.

주보호 구간의 보호만을 생각한다면 구간의 중간 부분에 대한 전압보정 계수를 선정하여 주보호 구간의 트립 시간을 전체적으로 유지시키는 것이 유리할 것으로 보인다. 반면, 후비 보호계전기와의 보호협조를 고려한다면, 주보호 구간 이외의 넓은 고장 구간에서 기존의 트립시간과 유사한 트립이 가능하도록 먼 고장 지점에 대한 전압보정 계수 선정이 바람직한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문은 전력계통에 초전도한류기를 적용할 경우 발생할 수 있는 보호계전기의 오·부동작을 방지하기 위한 연구로서 초전도한류기의 적용 유무와 관련 없이 과전류계전기의 트립시간을 유지하기 위한 방안을 검토하였다. 초전도한류기를 적용할 경우 고장전류의 저감으로 인해 기존의 과전류계전기는 트립 동작시간의 지연이 발생하게 된다. 이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 기존에 제시된 방법을 검토하였으며, 전압요소를 갖는 과전류계전기를 제안하였다. 또한 초전도한류기의 적용전과 가장 유사한 트립동작 시간을 갖기 위하여 전압보정계수를 도입하여, PSCAD/EMTDC를 통해 분석하였다. 그 결과 전압요소를 갖는 과전류계전기를 사용함으로써 초전도한류기 적용 유무와 관계없이 개선된 과전류계전기의 트립동작을 확인하였다. 또한 전압보정 계수의 선정의 적절성과 고장 위치에 대한 트립시간의 오차 발생원인을 확인하였다. 차후에, 고장위치에 따른 트립시간의 변동이 보호계전기 간 보호협조에 미치는 영향에 대한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

This research was supported by Korea Electric Power Corporation. (Grant number : R17XA05-33)

References

[1] Jun-Hwan Kim, Kang-Wan Lee, "Countermeasure for Increase of Fault Current in Power System", *Journal of*

Electrical World, no. 256, pp. 19-25, Apr. 1998.

- [2] R. C. Dugan, T. E. McDermott, "Distributed generation", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, Issue: 2, pp. 19-25, Mar/Apr. 2002
- [3] Y. G. Kim, S. E. Noh, J. S. Kim, J. C. Kim, S. H. Lim, and H. R. Kim, "Analysis on Voltage Sag According to Impedance and Application Location of SFCL with Recloser-Recloser Coordination", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 2, pp. 230-236, 2014
- [4] H. H. Zeineldin, H. M. Sharaf, D. K. Ibrahim, and E. E. D. A. El-Zahab, "Optimal Protection Coordination for Meshed Distribution Systems With DG Using Dual Setting Directional Over-Current Relays", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, Jan. 2015
- [5] O. B. Hyun, S. W. Yim, S. D. Yu, S. E. Yang, W. S. Kim, H. R. Kim, G. H. Lee, J. W. Sim, and K. B. Park, "Long-Term Operation and Fault Tests of a 22.9 kV Hybrid SFCL in the KEPCO Test Grid", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, Jun. 2011
- [6] S. H. Lim, J. S. Kim, J. F. Moon, J. C. Kim, S. B. Rhee, C. H. Kim, and O. B. Hyun, "Quench and Recovery Characteristics of a SFCL Applied Into Neutral Line of a Three-Phase Power System", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, Jun. 2009
- [7] S. Lee, J. Yoon, B. Yang, Y. Moon, B. Lee, "Analysis model development and specification proposal of 154 kV SFCL for the application to a live grid in South Korea", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 504, pp. 148-152, Sep. 2014,
- [8] J. S. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, "Study on Application Method of Superconducting Fault Current Limiter for Protection Coordination of Protective Devices in a Power Distribution System", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, Jun. 2012
- [9] K. A. Saleh, H. H. Zeineldin, A. Al-Hinai, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using a New Time-Current-Voltage Characteristic", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, Apr. 2015
- [10] I. K. You, "Study on Application of Superconducting Fault Current Limiter for the Fault Current Reduction and the Protective Coordination in a Loop Power Distribution System", *a Master's Thesis, Graduate school of electrical engineering, Soongsil university*, 2011.
- [11] K. Y. Shen, J. C. Gu, "Protection coordination analysis of closed-loop distribution system", *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, vol.

2, pp. 702-706, 2002

- [12] IEEE Std C37.230 - IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines, 2008
- [13] J. S. Kim, "A Study on Components of MI-SFCL considering Transient Characteristics of Circuit Breaker in Power System", *a Doctor's Thesis, Graduate school of electrical engineering, Soongsil university*, 2013.

저 자 소 개



Seung-Taek Lim

He is in Ph. D. degree from Department of electrical engineering from Soongsil University, Korea.



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.