

HVDC 선로 내 초전도 한류기와 전력기기들의 복합 구성을 통한 고장 검출에 관한 연구

The Study on The Complex Composition By SFCL and Power Equipments for Fault Detection in HVDC Line

김 명 현* · 김 재 철†
(Myong-Hyon Kim · Jae-Chul Kim)

Abstract - Protection in HVDC(High Voltage Direct Current) have the very fast velocity of fault detection. Because Fault in HVDC has the fast propagation, large currents, high interruption cost. The focus to velocity caused possibility of errors like a detection error like a high impedance fault. In this paper, Proposed complex composition for get the reliability and velocity. That used SFCL(Super Conducting Fault Current Limiter), Protection Zone and DTS(Distributed Temperature Sensing). The SFCL was detect the fault by quench and DTS&Protection Zone were perceive the detect by variation too. To examine the proposed method, PSCAD/EMTDC simulated. The results of simulation, proposed methods could the detect of fault to whole HVDC line. And that improved the reliability of fault clearing.

Key Words : HVDC line, Relay, Reliability, Fault detection, Superconducting fault current limiter, Quench

1. 서 론

HVDC를 활용한 전력전송은 기존 HVAC(High Voltage Alternative Current)의 주파수와 무효 전력 문제점을 타개함으로써, 국가 간 전력계통의 연계와 신·재생에너지의 연계 등이 가능하게 되었다. 이로 인해 현재 많은 국가와 다양한 프로젝트들에서 적용을 고려하고 있으며 지속 확대 적용이 예상되고 있다.

직류 전력계통은 고가의 구성 기기들과 대용량 전력 전송에 따른 정전 비용 등을 고려시, 계통의 보호가 매우 중요하다. 이로 인해 관련 연구가 활발히 진행중이며 다양한 연구 결과와 문제점들이 분석되어 나타나고 있다[1~2].

HVDC 전력 계통은 HVAC 전력계통 대비 주파수에 의한 리액턴스 성분의 임피던스가 거의 없어 시스템 임피던스가 매우 작다. 이로 인해 고장 발생 시 고장전류의 증가와 전압의 감소가 매우 빠르게 일어나고 고장의 파급 또한 빠르다. 이러한 특성 때문에 고장 발생 시 빠른 고장 제거를 필요로 하며 이를 위한 다양한 고장 검출 방안이 제시되고 있다[3~4].

최근에는 전류와 전압의 변화량을 기반으로 하는 방식이 주요하게 논의되고 있으나 현재까지는 규정화되거나 신뢰성이 검증된

명확한 방안은 없으며 빠른 검출을 위한 다양한 방안만이 제안되고 있다. 고장 검출 속도 위주의 연구와 적용은 차단기의 오·부동작을 유발 가능하다. 한 예로 고저항, 원거리 사고와 같이 변화량이 작은 경우에 시간당 변화량을 활용한 방안은 동작 시간이 느려지거나 부동작 하는 경우가 발생 가능하다. 또한 제안되고 있는 모든 방안들이 신뢰성을 검증하거나 고려하는 연구는 미흡한 상황이다[5~11].

본 논문에서는 초전도 한류기(Superconducting Fault Current Limiter)와 DTS(Distributed Temperature Sensing) 그리고 계전기를 활용한 복합 구성의 고장 검출 방안을 제안하였다.

초전도 한류기는 정상 상태일 경우 저항을 갖지 않으나 고장 발생시에는 퀘칭 현상으로 인해 임피던스를 갖게 되므로 임피던스의 변화량 계측을 통해 고장 검출이 가능하다. 또한 퀘칭으로 인한 초전도체의 상태 변화가 매우 빠르게 발생하므로 고장 검출 속도도 매우 빠르다. DTS는 통전 전류와 온도의 변화량을 계측 가능하며 고장 발생 시 고장전류와 전류의 증가로 인한 열 변화량이 함께 발생하므로 해당 정보를 이용하여 고장 판단이 가능하다. 디지털 계전기는 다양한 알고리즘이 적용 가능하며 본 논문에서는 고장 발생 시 변화하는 고장전류와 임피던스를 기반으로 Protection Zone을 설정하여 고장 검출에 활용하였다.

위의 제시된 방안들은 각 방식별로도 고장 검출이 가능하나 계측, 연산 등의 과정에서 오·부동작 발생 가능성이 존재하므로 검출 신뢰성 향상을 위하여 상호 교차 검토가 가능하도록 복합 구성 형태를 갖는 것이 적절하다.

† Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.
E-mail : jckim@ssu.ac.kr

* Ph.D. candidate, Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea .

Received : June 7, 2018; Accepted : July 6, 2018

2. 고장 검출 방안

2.1 초전도한류기의 켄치를 활용한 고장 검출

초전도한류기는 초전도체의 특성상 평상시에는 전력 손실이 발생하지 않고 고장 발생 시에만 임피던스가 발생하여 고장 전류를 저감 시켜주므로 이상적인 기기로 평가되고 있다. 근래에는 직류 차단기의 기술적 한계와 비용 문제, 고장전류 저감 등을 위한 관련 연구가 활발히 진행 중이나 고장 판단을 위한 활용 관련 연구는 미흡한 상황이다[12~14].

초전도한류기의 초전도체는 임계전류 이상의 전류가 흐르면 초전도 상태에서 벗어나는 켄치 현상이 발생하며 본 논문에서는 해당 현상을 활용하여 고장을 검출하였다. 임계전류 이상의 전류는 정상 전류가 아니므로 고장으로 판단 가능하며 켄치 현상은 매우 빠르게 상태 변화가 일어나므로 고장 판단의 속도도 빠르다. 이러한 특성들은 기존 계전기 활용 방안 대비 정확성과 속도 등의 측면에서 고장 검출의 신뢰성을 향상 가능하다.

켄치 현상은 초전도체의 임피던스와 온도 변화를 수반한다. 아래 수식 1은 본 논문에 적용된 저항형 초전도 한류기의 상전도 저항을 계산하기 위한 수식이다. 상전도 저항은 지수 함수적으로 증가하고 회복 시에는 1, 2차로 나누어 회복시간과 기울기를 갖는 것으로 설정하였다[15~16]. 또한 온도 변화는 주열 열을 이용하여 계산하였으며 두 정보의 상호 검토를 통하여 신뢰성을 확보하였다.

$$R_{SC}(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_0) \\ R_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{T_F}\right) \right]^{\frac{1}{2}} & (t_0 < t < t_1) \\ a_1(t-t_1) + b_1 & (t_1 < t < t_2) \\ a_2(t-t_2) + b_2 & (t_2 < t) \end{cases} \quad (1)$$

- R_n : 상전도 저항
- T_F : 상전도 저항 도달까지의 시정수
- t_0 : 켄치 발생 시간
- t_n : n 차 회복 시간 ($n : 1, 2$)
- a_n : n 차 회복시 기울기 ($n : 1, 2$)
- b_n : n 차 회복시 초기저항값 ($n : 1, 2$)

2.2 Protection Zone 설정을 통한 고장 검출

아래 그림 1과 같이 직류 전력계통을 구성시 사전 검토와 조정을 통하여 Protection Zone을 구성하고 Zone 특성에 적합한 보호 방안들을 적용하는 것이 일반적이다.

이 중 Zone5에 해당되는 직류 선로의 경우, 앞서 서술된 바와 같이 전류와 전압 변화량 등을 통해 빠른 고장 검출 방안들이 검토되고 있다. 변화량을 활용한 계전 방식은 매우 빠르게 고장 검출이 가능한 장점이 있으나 고저항, 원거리 지락사고 등과 같이 시간 변화량이 작아지는 경우에는 고장 검출이 어려운 한계가

존재 한다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 Zone 5 직류 선로 내에 선로 임피던스와 고장전류의 크기를 기반으로 하는 하위 Protection Zone을 설정하였다. 직류 계통은 고장 발생 시 주파수에 의한 영향이 크지 않아 전류와 전압의 변화가 비교적 일정하게 나타나므로 Protection Zone을 통해 고장 판단뿐만 아니라 위치 추정도 가능하다.

사전에 모의 상정 사고 분석에 의해 Protection Zone 설정을 위한 궤적을 구할 수 있으며 본 논문에서는 3개의 Zone을 설정하였다. 고장 검출은 고장 발생 시 나타나는 고장전류와 임피던스의 궤적선의 궤도 내에 설정을 하였으며 이는 귀착점에서 설정을 할 경우 계산 오류, 지락저항 등에 따른 값의 변동으로 검출이 어려울 수 있기 때문이다. sampling rates를 고려하여 계측값이 Protection Zone 내에 해당되는 데이터 개수를 설정하여 궤적의 급격한 변화, 흔들림 등으로 인한 일시적인 궤적 이탈이 결과 판단에 혼란을 주지 않도록 설정 가능하며 검출 신뢰성을 높일 수 있다[17].

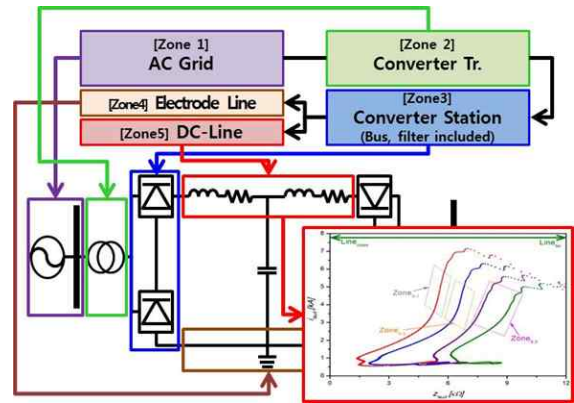


그림 1 Protection Zone 구성
Fig. 1 Composition of Protection Zone

2.3 DTSS의 케이블 온도 변화량을 활용한 고장 검출

DTSS는 케이블의 실시간 상태 감시, 허용 전류, 고장 위치 추정 등 다양한 기능을 가지고 있으며 이러한 정보를 고장 검출과 확인을 위한 정보로 활용 가능하다. DTSS의 온도 측정은 빛과 열의 특성을 활용하지만 시뮬레이션에서는 계산을 통해 검증을 진행하였다.

온도의 계산은 IEC 60287을 준용하였으며 현재 IEC에서는 5kV 이하의 직류케이블에 대한 수식만 규정되어 있어 해당 수식을 적용하였다.

수식 1의 $\Delta\theta$ 를 통해 온도 상승분을 구하였으며 케이블의 최고 동작 온도는 70°C로 계산되었다. 일반적인 교류용 케이블은 절연체의 가교(Crosslink) 공정으로 인해 90°C까지 활용이 가능하지만 현재 직류용 케이블은 가교 부산물이 절연체 신뢰성에 영향을 주어 가교가 거의 이루어지지 않은 상태로 제품이 제작·적용되고 있기 때문이며 최신 기술 현황을 적용하기 위함이다. 수

식 1의 T는 케이블 각 구성 층의 열 저항이며 이는 수식 2를 통해 계산되었다. 수식 2에 따른 케이블의 구조는 도체, 절연, 베딩, 외장, 피복으로 간략한 구성을 가지고 있다. 수식 2의 t와 d는 절연 두께(t₁), 베딩 두께(t₂), 피복 두께(t₃), 도체 지름(d₁), 금속시스 바깥지름(d₂), 외장 바깥지름(d₃) 이다[18~20].

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4)}} \quad (2)$$

$\Delta\theta$: 주위 온도 대비 도체 온도 상승 [K]

R' : 최고 동작 온도에서의 도체의 단위 길이당 직류 저항 [Ω/m]

T_1 : 도체와시스사이의 열저항 [$K \cdot m/W$]

T_2 : 시스와외장사이의 열저항 [$K \cdot m/W$]

T_3 : 외부방식층의 열저항 [$K \cdot m/W$]

T_4 : 주변매개체의 열저항 [$K \cdot m/W$]

n : 케이블 도체수

$$T_n = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_n}{d_n} \right] \quad (3)$$

ρ_t : 절연체의 열 저항 [$K \cdot m/W$]

t_n : 내층과 외층의 사이의 두께 ($n:1,2,3$) [mm]

d_n : 외층의 바깥 지름 ($n:1,2,3$) [mm]

2.4 상호 보완 구성을 통한 전 선로 보호 방안

앞서 제안된 고장 검출 방안들 중 하나를 적용하거나 각 방안을 독립적으로 적용하는 것으로는 고장 검출의 한계가 존재하며 검출 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 해당 방안들은 상호 검토가 가능하도록 구성이 되어야 하며 복합 구성 방식으로 적용 하는 것이 적절하다.

초전도 한류기의 켄치를 활용한 방안은 켄치 현상이 큰 고장 전류에 의해 발생이 되므로 고장을 판단할 수 있는 명확한 근거가 될 수 있으나 선로 전 구간 적용할 경우 비용 측면의 한계와 낮은 임계전류와 높은 부하 전류가 상충되며 신뢰성의 문제가 발생 가능하다. 그러므로 초전도 한류기는 높은 고장전류가 발생하는 BUS 근거리 사고를 검출하는 역할이 적절할 것으로 판단된다.

Protection Zone과 DTS를 활용한 방안은 초전도 한류기로 검출하기 어려운 BUS 근거리 사고 외에 전 구간을 검출한다. 계속의 오차로 검출 오류가 발생할 가능성이 존재 하므로 이를 방지하기 위하여 검출 정보를 상호 검토 하도록 적용하였다.

해당 3가지 방안을 혼합 구성하여 적용하는 방안을 도출하였으며 해당 방안은 그림 2와 같은 흐름을 갖는다.

Zone 5-1 고장은 큰 고장전류를 가지는 근거리 사고를 의미하며 초전도체의 켄치 여부를 통해 빠른 고장 판단을 한다. Zone 5-2 고장은 초전도 한류기의 임계전류보다는 낮은 고장전류를 갖는 구간이다. Zone 5-3은 앞서 최근 문제가 되고 있는 고저항 지락 사고, 원거리 사고, 낮은 고장전류로 고장 검출의 어려움을 갖고 있는 구간이다.

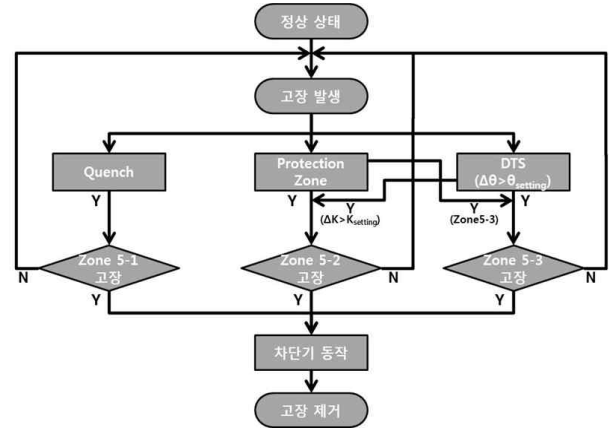


그림 2 상호 보완적인 계전기 알고리즘 구성

Fig. 2 Composition of Relay algorithm by mutual supplementation

3. 시뮬레이션 결과

앞서 제안된 방안을 검토하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 활용하여 아래의 그림과 같은 PTP(Pole To Pole) 기반의 회로를 구성하였다. PTP 회로 구성은 복잡하지 않으므로 제안된 방안의 특성이 가장 명확하게 확인 가능하다.

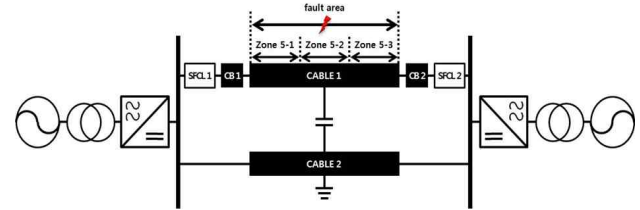


그림 3 시뮬레이션 회로

Fig. 3 Circuits for simulation

CABLE 1은 전력 전송을 위한 케이블이며 DTS 설비를 갖추고 있다. 총 100km의 선로 길이를 갖으며 선로 내에서 고장을 모의하였다. 고장 점은 Zone 5-1, 5-2, 5-3을 검토하기 위하여 10, 50, 90 km 총 3개의 고장 점을 지정하고 시뮬레이션을 진행하였다. CABLE 2는 귀로 회로이며 초전도 한류기와 차단기는 각 인버터 측과 컨버터 측 근거리 배치하였다. 인버터 측 초전도 한류기와 차단기는 SFCL 1, CB 1이며 컨버터 측 초전도 한류기와 차단기는 SFCL 2, CB 2이다.

켄치 현상은 SFCL 1에서 검출을 하고 Protection Zone과 DTS 신호는 CABLE 1에서 계속·판단하였으며 차단기의 동작은 CB 1을 통해 확인하였다.

3.1 Zone 5-1 사고 발생시

Bus로부터 10km 떨어진 지점에 1선 지락 고장 발생을 모의

하였으며 앞서 설정한 Zone 5-1의 모의 결과이다. 해당 결과는 아래 그림 4와 같다. 그림 4의 A는 고장 전류를 나타낸 결과이며 초전도 한류기 도입에 따른 영향을 확인 가능하다. B는 초전도 한류기 동작시 발생하는 상전도 저항과 주열 열 발생 결과이며 이를 활용하여 켄치 현상을 판단하고 발생시킨 차단기의 동작 신호 결과이다.

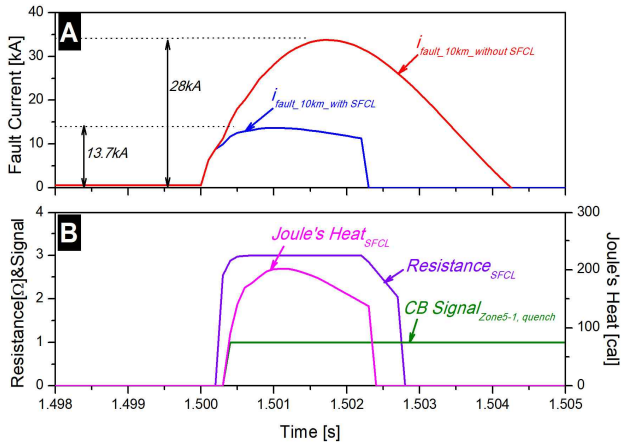


그림 4 Zone 5-1 고장 발생 결과
Fig. 4 Fault Results of Zone 5-1

초전도 한류기가 동작하지 않고 고장 검출에 1ms가 소요되고 이후 차단기가 즉시 동작을 한다고 가정할 경우 최대 고장전류 피크치는 약 28kA 수준이다. 하지만 초전도 한류기가 동작함에 따라 고장전류의 증가가 제한되고 최대 고장전류 피크치도 약 13.7kA로 낮아짐을 확인 가능하였다.

이로 인해 직류차단기의 요구 성능이 낮아지고 설계 및 구현, 경제적 비용의 부담 저감, 동작 신뢰성 향상 등 다양한 이점을 도모할 수 있다.

그림 4의 B는 초전도 한류기에서 발생한 상전도 저항과 주열 열 그리고 켄치 여부로 발생된 차단기의 신호를 나타낸다. 고장 발생 후 설정된 임계전류를 상회함에 따라 상전도 저항이 발생하고 고장전류와 저항의 증가로 주열 열도 증가함을 확인 가능하다. 켄치 신호는 상전도 저항과 주열 열을 확인 후 발생되므로 고장과 상전도 저항 발생 시점보다는 미소하게 지연 발생한다.

초전도체는 고장 제거 이후 회복 기술기에 따라 초전도 상태로 복구되며 이는 초전도체와 냉각기의 구성에 따라 기술기는 다르므로 실 계통 구성시 사전 검토가 필요 된다.

3.2 Zone 5-2 사고 발생시

Bus로부터 50km 떨어진 지점에 모의 고장 발생 결과를 그림 5를 통해 나타내었으며 Zone 5-2의 보호가 적절히 이루어지는지 확인하기 위함이다.

Zone 5-2는 앞서 초전도 한류기의 켄치 현상을 이용하여 고장 발생 여부를 판단하지 않는 구간이며 Protection Zone 설정과 DTS를 활용하여 고장을 검출하는 구간이다. 앞서 서술된 바와 같이 초전도 한류기를 이용한 전 구간 선로의 검출은 비용 측면의 한계가 존재하고 작은 고장전류까지 임계전류로 설정시 높은 부하전류를 갖는 HVDC 계통에서의 검출 신뢰성이 떨어질 수 있기 때문이다.

그림 5의 A는 고장 전류와 케이블 도체의 온도 변화 결과이다. 케이블 도체 온도의 변화 요인이 도체에 흐르는 전류이므로 두 파형은 유사하게 나타난다. 그림 5의 B는 Protection Zone과 DTS를 활용하여 고장을 검출한 결과이다. Protection Zone 설정에 의해 해당 Zone의 고장 여부를 확인하고 DTS를 통해 온도 변화량 정보를 활용하여 상호 교차 검토를 수행한다. 이후 최종적으로 차단기에 동작 신호를 보내게 되며 고장 검출이 가능함을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

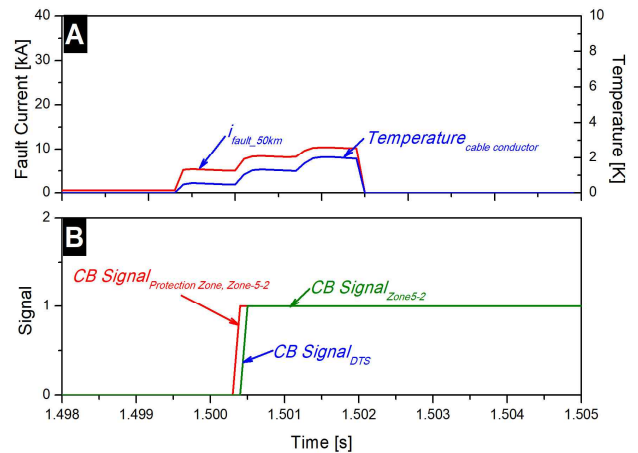


그림 5 Zone 5-2 고장 발생 결과
Fig. 5 Fault Results of Zone 5-2

3.3 Zone 5-3 사고 발생시

그림 6은 통해 Bus로부터 90km 떨어진 지점의 모의 결과이며 Zone 5-3에 해당되는 결과이다. 앞서 서술된 근래에 문제가 되고 있는 고저항, 원거리 구간 사고의 고장 검출이 가능한지 확인하기 위함이다.

그림 6의 A는 고장 전류와 케이블 도체의 온도 변화, B는 Protection Zone과 DTS를 활용한 고장 검출 결과이다. 고장전류의 크기가 작아 고장 발생 여부를 검토해주는 역할인 DTS의 정보가 이전보다 늦게 발생 하여 최종적인 차단기의 신호가 이전 50km 고장 발생 시보다 늦게 전달되었다. 이는 Δθ의 설정을 낮추면 더 빠르게 검출도 가능하나 온도 변화의 폭이 높지 않으므로 주의하여야 할 것으로 판단된다. 그림 6의 결과를 통해 문제가 되고 있는 고저항, 원거리 사고 등에 대해서도 제안된 방안을 통하여 해결이 가능하였다.

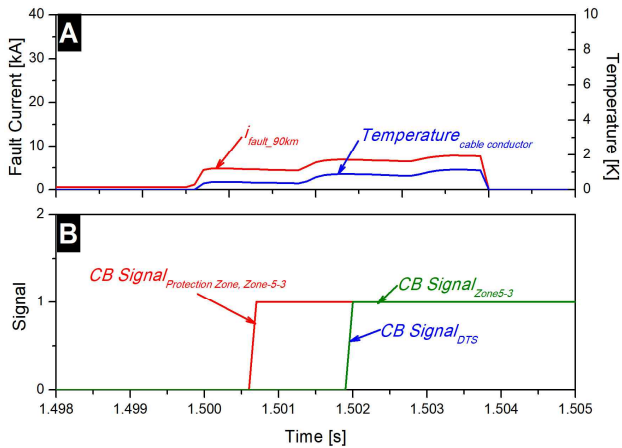


그림 6 Zone 5-3 고장 발생 결과
 Fig. 6 Fault Results of Zone 5-3

4. 결 론

본 논문에서 HVDC 계통 내에 고장 검출을 위하여 초전도 한류기의 켄치 특성, DTS의 온도 변화량 계측, 변동성이 적은 HVDC 계통 내에 고장 전류와 임피던스의 특성 기반의 Protection Zone의 설정을 복합 구성하는 방안을 제안하였다. 해당 방안을 통하여 기존 방안들 대비 고장 검출의 신뢰성을 향상 가능하였고 고저항, 원거리 사고 등 고장 검출이 어려운 현안 문제를 해결 할 수 있었다.

초전도 한류기의 켄치 현상은 큰 고장 전류가 발생할 경우에만 나타나므로 고장 검출에 높은 신뢰성을 갖는 방안이나 선로 전 구간에 적용하는 것은 비용, 수명, 신뢰성 등에 영향으로 어려운 부분이 있으므로 이를 보완하기 위하여 Protection Zone과 DTS를 함께 적용하였다. Protection Zone과 DTS를 활용한 방안은 선로 전 구간에 적용이 가능한 방안이며 계측 및 연산에서 발생할 수 있는 오류는 상호 검토를 통하여 보완하였다. 이를 통하여 선로 전 구간에 높은 신뢰성을 갖는 고장 검출이 가능하였다.

해당 방안의 부수적인 효과로 초전도 한류기 도입에 따른 고장 전류의 제한과 이를 통해 직류 차단기의 부담도 저감 가능함을 예상 할 수 있었다.

향후 다양한 토폴로지와 기기적 구성을 갖는 HVDC 계통을 대상으로 검토를 수행 후 적합성을 판단하여 해당 방안을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

References

[1] Johannesson, Kenneth, et al., "HVDC Light Cables for long distance grid connection", *Proc. of European Offshore Wind Conference*, pp. 14-16, 2009.

[2] N. Negra, J. Todorovic and T. Ackermann, "Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms", *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 11, pp. 916-927, 2006.

[3] Chuanxin Xi, Qing Chen, Lei Wang, "A single-terminal traveling wave fault location method for VSC-HVDC transmission lines based on S-transform", *Proc. of Power and Energy Engineering Conference*, 2016.

[4] John P. Triveno, Victor P. Dardengo, Madson C. de Almeida, "An approach to fault location in hvdc lines using mathematical morphology", *Proc. of Power and Energy Society General Meeting*, 2015.

[5] Yingdan Aiu, Haifeng Li, Jiyang Wu, Yanxun Guo, Gang Wang, "An improved time-domain fault-location algorithm for HVDC transmission line", *Proc. of Power and Energy Engineering Conference*, 2016.

[6] Kai Liu, Jianping Wang, "Pilot polarity comparison protection for serial multi-terminals DC grid", *Proc. of Power and Energy Engineering Conference*, 2016.

[7] L. Tang and B.-T.Ooi, "Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 3, pp. 1877-1884, 2007.

[8] Jin Yang, John Fletcher John O'Reilly, "Multi terminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 2308-2318, 2010.

[9] Masood Hajian, Lu Zhang, Dragan Jovcic, "DC transmission grid with low speed protection using mechanical DC circuit breakers", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 3, pp. 1383-1391, 2015.

[10] Jeongho Kim, Byungwook Kang, Hyengjin Lee, Jaechul Kim, "Control Strategies of Offshore Wind Farms Connected Voltage Source Converter HVDC under Grid Fault", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers.*, vol. 30, no. 5, pp. 18-24, 2016.

[11] Byungwook Kang, Hyeongjin Lee, Jaechul Kim, "A Study on Protection Requirements for DC Faults in Multi-Terminal HVDC System", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers.*, vol. 31, no. 9, pp. 44-50, 2017.

[12] Hoyun Lee, Mansoor Asif, Kyuhoon Park, Bangwook Lee, "Feasible Application Study of Several Types of Superconducting Fault Current Limiters in HVDC Grids", *IEEE Transactions on applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, June 2018.

[13] Quingqing Yang, Simon Le Blond, Fei Liang, Weijia Yuan, Min Zhang, Jianwei Li, "Design and Application of Superconducting Fault Current Limiter in a

- Multiterminal HVDC System”, *IEEE Transactions on applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, June 2017.
- [14] Lihui Zhang, Jing Shi, Zuoshuai Wang, Yuejin Tang, Zhangwei Yang, Li Ren, Sinian Yan, Yuxiang Liao, “Application of a Novel Superconducting Fault Current Limiter in a VSC-HVDC System”, *IEEE Transactions on applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, June 2017.
- [15] Botong Li, Fangjie Jing, Bin Li, Xiaolong Chen, Jianfei Jia, “A Study of the Application of Active Saturated Iron-Core Superconductive Fault Current Limiters in the VSC-HVDC System”, *IEEE Transactions on applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 5602906, 2018.
- [16] Kim, J. S, Lim, S. H, Moon, J. F, Kim, J. C, Hyun, O. B, “Analysis on the Protective Coordination on Neutral Line of Main Transformer in Power Distribution Substation with Superconducting Fault Current Limiter”, *Journal of KIEE*, vol. 58, no. 11, pp. 2089-2094, 2009.
- [17] Myonghyon Kim, Jaechul Kim, “A Study on the Detection of High Impedance fault to Relay Setting in HVDC”, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers.*, vol. 32, no. 3, pp. 102-107, 2018.
- [18] D. Fabiani, G. C. Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre, P. H. F. Morshuis, R. Bodega, L. A. Dissado, “HVDC Cable Design and Space Charge Accumulation. Part 3: Effect of Temperature Gradient”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 2, pp. 5-14, 2008.
- [19] D. Fabiani, G. C. Montanari, R. Bodega, P. H. F. Morshuis, C. Laurent, L. A. Dissado, “The Effect of Temperature Gradient on Space Charge and Electric Field Distribution of HVDC Cable Models”, *Proc. of IEEE 8th International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials*, 2006.
- [20] Kaiyu Qian, Jiandong Wu, Weikang Li, Yi Yin, “Effect of thickness on space charge behavior in XLPE under different temperature”, *Proc. of International Symposium on Electrical Insulating Materials*, 2017.

저 자 소 개



김 명 현(Myong-Hyon Kim)

1986년 9월 23일생. 2011년 안양대 전기·전자공학과 졸업. 2013년 송실대학교 대학원 전기공학과 석사졸업. 2016년 동대학원 전기공학과 박사과정 수료. 일진전기 근무 2012~2016. 2016~현재 한국전기산업연구원 연구원



김 재 철 (Jae-Chul Kim)

1955년 7월 12일생. 1979년 송실대 전기공학과 졸업, 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 송실대 전기공학과 교수.