

이중화 기반 고속 보호전략을 활용한 MVDC 계통 신뢰도 최적화 연구

조윤진*, 남준혁*, 조동일*, 문원식*

*송실대학교 전기공학과

e-mail:space012345@naver.com

Reliability Optimization of MVDC Systems Using Redundant High-Speed Protection Strategies

Yun-Jin Cho*, Jun-Hyuk Nam*, Dong-Il Cho*, Wom-Sik Moon*

*Dept. of Soongsil University

요약

Medium Voltage Direct Current (MVDC) systems, lacking a natural current zero-crossing, face rapid fault-current escalation that challenges conventional protection schemes. This study compares four strategies—legacy AC protection, basic DC protection, high-speed DC breakers with automatic reclosing, and redundant protection architecture—using SAIFI, SAIDI, and EENS indices. Results show that high-speed interruption reduces outages by over 30%, and redundancy achieves the lowest interruption rate (0.4 events/year) and duration (2 hours/year). These findings highlight the need for MVDC-specific high-speed and redundant protection to maximize system reliability

1. 서론

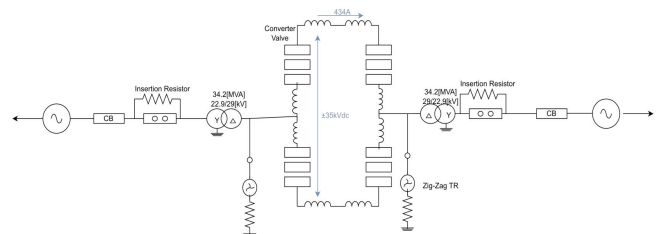
신재생에너지와 분산전원의 비중이 지속적으로 증가하는 현대 전력계통에서, 송·배전 손실 저감 및 전력 품질 향상을 위한 대안으로 Medium Voltage Direct Current(MVDC) 시스템이 각광받고 있다. AC 배전망은 매주기 전류 영점(zero-crossing)이 존재하여 자연스럽게 아크가 소호되지만, MVDC 시스템은 이러한 영점이 없어 고장 시 전류가 순식간에 급증할 수 있다. 이로 인해 고장 전류의 초고속 상승을 효과적으로 제어하기 위해서는 기존 AC 보호 개념을 넘어서는 새로운 보호 체계 구축이 필수적이다. 본 논문에서는 MVDC 시스템이 지닌 구조적·운영적 특성을 고찰하고, 고속 차단기 및 이중화된 보호 전략이 시스템 신뢰도에 미치는 영향을 기존 AC 배전망과 비교·분석한다.

2. 본론

2.1 MVDC 구성요소 및 신뢰도 지수

MVDC 시스템은 크게 AC-DC 변환부, DC 송배전부,

그리고 부하 및 기존 AC 계통과의 연계부로 구성된다. 변환부에서는 AC 전원을 DC로 변환하며, 고장 발생 시 차단 로직(block-trip)을 수행한다. 송배전부에서는 직류의 열적·절연 특성을 고려한 케이블과 가공선을 통해 부하까지 전력을 전달하며, 급격히 상승하는 고장 전류를 차단하기 위해 하이브리드 또는 반도체 기반의 DC 차단기를 활용한다. 부하 및 연계부에서는 필요 시 DC-AC 변환을 통해 기존 AC망과도 상호 연계된다. 이 가운데 컨버터, DC 차단기, 케이블, 보호 계전기 등 주요 설비들이 MVDC 시스템의 안정적인 운용과 신뢰도 확보를 위한 핵심 요소로 작용한다 [1].



[그림 1] ±35kV 30MW MVDC 시스템 단선도

MVDC 특유의 직류 환경에서 발생 가능한 고장 유형으로는 선간(short-circuit), 선로-접지(ground) 고

장, 컨버터 내부 고장 및 부하 측 절연 파괴 등이 있다. 이러한 고장은 순간적으로 전류를 급증시켜 넓은 구역에 정전을 초래할 수 있기 때문에, 고속 검출·차단과 신속한 복구 절차가 필수적이다. 시스템 신뢰도 평가는 주로 SAIDI(System Average Interruption Duration Index), SAIFI(System Average Interruption Frequency Index), EENS(Expected Energy Not Supplied) 지표를 통해 이루어진다[2]. SAIDI는 사용자가 연간 겪는 평균 정전 지속시간을, SAIFI는 정전 빈도를, EENS는 공급되지 못한 에너지량을 정량화하여 시스템 성능을 종합 판단한다.

2.2 MVDC 시스템 보호전략 별 시나리오 및 결론

보호 전략의 효과를 검증하기 위해 네 가지 시나리오를 정의하였다. 시나리오 A는 기존 AC 보호 방식을 그대로 적용한 기준점이며, B는 기본적인 DC 차단기와 보호 계전기만을 도입한 경우이다. 시나리오 C는 하이브리드 DC 차단기와 자동 재폐로 기능을 갖춘 고속 보호 전략을 적용하였고, 시나리오 D는 주요 보호 장치 및 경로 이중화를 통해 고신뢰도 환경을 조성한 경우이다.

[표 1] 보호 시스템별 시나리오

시나리오	설명
A	기존 AC 보호 방식 그대로 사용
B	기본 DC 차단기, 보호계전기만 도입
C	고속 DC 차단기, 자동 재폐로 적용
D	보호 장치, 경로 이중화로 고신뢰도 환경 구성

각 시나리오에 대한 SAIFI·SAIDI 계산 결과, A는 낮은 정전 횟수에도 복구 시간이 길었고, B는 보호 미비로 정전 범위 확산 위험이 관찰되었다. 반면 C는 고속 차단으로 정전 횟수와 시간을 크게 감소시켰으며, D는 이중화된 보호로 SAIFI 0.4회/년, SAIDI 2시간/년 수준으로 모든 시나리오 중 최저의 신뢰도 지표를 달성하였다.

[표 2] 보호 시나리오별 신뢰도 지수 계산 결과

시나리오	SAIFI(회/년)	SAIDI(시간/년)
A	1.2	30
B	1.5	48
C	0.8	12
D	0.4	2

3. 결론

본 연구를 통해 MVDC 시스템에 최적화된 보호 전략

이 시스템 신뢰도 향상의 핵심임을 확인하였다. 직류 특성상 고장 전류가 초고속으로 상승하므로, 이를 신속히 차단할 수 있는 고속 차단기의 도입이 필수적이며, 보호 장치 및 경로의 이중화는 단일 고장으로 인한 광역 정전을 사실상 방지한다. 향후 MVDC 계통의 확산에 따라 실제 운용 데이터를 기반으로 한 정밀 신뢰도 모델 구축과, 분산전원 및 배터리 에너지 저장장치(BESS)와의 통합 보호 체계 설계·운영에 관한 후속 연구가 중요 과제로 남는다.

감사의 글

본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20225500000120)

참고문헌

- [1] Kim, Jun-Hyeok, and Kim, Yun-Su. "Comparison and Analysis of Fault Currents in DC and AC Distribution Systems." In Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp. 795–796, 2019.
- [2] Billinton, Roy. Power System Reliability Evaluation. Taylor & Francis, 1970.