

DC 배전망의 안전성 평가를 위한 전기적 위해요인 발생 메커니즘에 관한 연구

김윤호, 김경화, 최성문, 정재범, 노대석
한국기술교육대학교,
e-mail:kimyunho2357@koreatech.ac.kr

Mechanism of Electrical Hazard for Safety Evaluation in DC Distribution System

Yun-Ho Kim, Kyung-Hwa Kim, Sung-Moon Choi, Jae-Beom Jung,
Dae-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

요약

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가 등의 이유로 DC 배전망에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 기존 AC 배전망을 DC 배전망으로 대체하여 전력을 공급하면 선로 및 설비의 이용률 향상, 공급용량 증대 등의 장점이 있지만, 이러한 DC 배전망을 안정적으로 운용하기 위한 안전성 평가 및 전기설비 기술기준이 미흡한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전망의 안전성을 평가하기 위하여, 전기적 위해요인으로 제시되고 있는 고장전류, CMV, 누설전류, 변압기 철공진의 발생 메커니즘을 제안한다. 여기서, 고장전류는 DC 배전망의 선로 및 타 설비에 열적/전기적 스트레스를 가할 수 있고, CMV는 정격을 초과하는 전압이므로 DC 설비의 절연에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 누설전류는 DC 배전설비에 전기부식을 발생시켜 설비의 성능을 저하시키고 작업자의 안전을 위협할 수 있으며, 변압기의 철공진은 순간적인 전압상승을 발생시킬 수 있어, DC 배전망의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

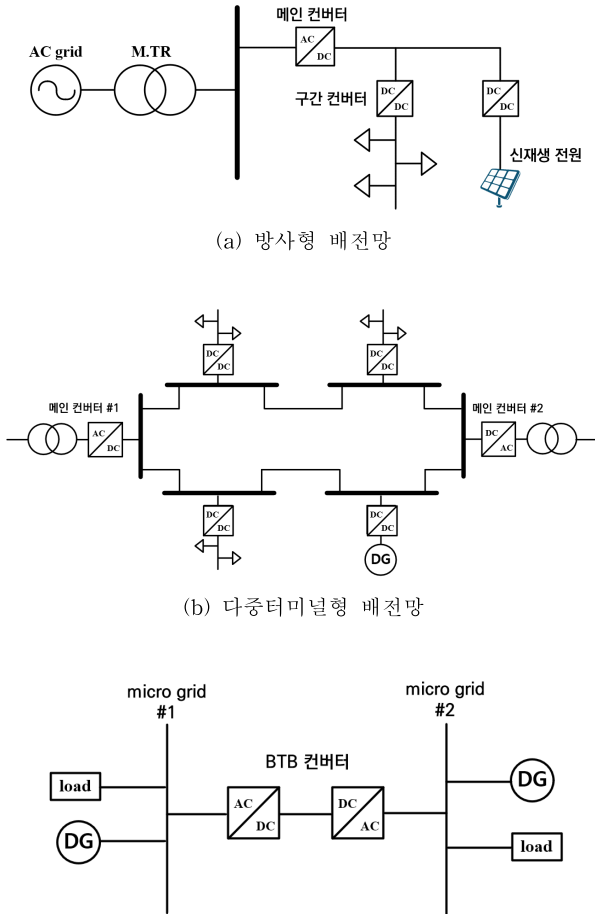
최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 기존 배전망 접속용량 포화 등의 이유로 DC 배전망에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 DC 배전망은 조류를 능동적으로 제어하여 선로 및 설비의 이용률을 높일 수 있고, 동일한 선로를 활용하여 기존의 AC 배전망보다 더 많은 용량을 공급할 수 있어 변전소 증설과 같은 불필요한 투자를 회피할 수 있는 장점을 가지고 있다[1]. 하지만, 기존에 운용되던 AC 배전망과 달리, DC 배전망은 계통연계 및 사용전 검사를 위한 전기설비기술기준이 미흡하고 안전운용 절차 및 운용 경험이 부족하므로, DC 배전망의 절연내력, DC 아크 등의 전기적 특성을 고려한 안전성 평가방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전망의 안정적인 운용을 위해, 주요한 전기적 위해요인으로 평가되는 고장전류, CMV, 누설전류, 변압기의 철공진을 분석하고, 전기적 위해요인의 발생 메커니즘을 제시한다. 이를 바탕으로, DC 배전망의 전기적 위해요인을 분석한 결과, 커패시터 방전 및 역병렬 다이오드에 의

한 고장전류는 수 ms 이내에 크게 증가하여 DC 배전망의 선로 및 타 설비에 열적/전기적 스트레스를 가할 수 있고, 개폐기 및 차단기의 동작, IGBT의 스위칭, 개폐서지 및 뇌서지 등에 의한 CMV는 정격을 초과하는 전압이므로 DC 설비의 절연에 악영향을 미칠 수 있다. 또한, IGBT의 스위칭 및 절연성능 저하에 의한 누설전류는 DC 배전설비에 전기부식을 발생시켜 설비의 성능을 저하시키고 작업자의 안전을 위협할 수 있으며, 이상전압에 의한 변압기의 철공진은 순간적인 전압상승을 발생시킬 가능성이 있어, DC 설비의 안전성에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서, 향후에는 상기의 전기적 위해요인 분석을 바탕으로 DC 배전망의 안전성 평가를 수행할 예정이다.

2. DC 배전망의 구성

일반적으로, DC 배전망은 그림 1과 같이 방사형(radial), 다중터미널, BTB(back-to-back) 등의 형태로 구분된다. 여기서, 방사형 구조의 배전망은 그림 1의 (a)와 같이 나타낼 수 있으며, 계통측의 AC 전력을 메인 컨버터를 통해 간선에 공급하고, 중간에 선로가 분기되어 수용가 또는 분산전원에 연

결된 형태로 낮은 공급신뢰도를 갖지만, 사고검출 및 보호가 용이하며 비교적 적은 비용으로 구현이 가능하다. 또한, 다중 터미널형 구조의 배전망은 그림 1의 (b)와 같이 나타낼 수 있는데, 여러 지점에서 메인 컨버터를 통해 계통측의 전원을 공급받으므로, 공급신뢰도가 매우 높지만 사고 발생 시 사고전류의 공급원이 여러 곳에 존재하므로 배전시스템의 보호와 제어가 어렵고, 구축비용이 많이 소요된다. 한편, BTB 배전망은 그림 1의 (c)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 BTB 구조는 AC-DC-AC의 변환단계를 거쳐 두 개의 네트워크를 비동기 연계하기 위한 방식인데, 대용량의 신재생에너지전원을 연계하거나 마이크로그리드 간의 연결을 위하여 사용할 수 있다. 이러한 방식은 두 대의 컨버터를 한 장소에 설치하므로 넓은 공간과 큰 비용이 필요하지 않고, 네트워크 간의 전력조류를 능동적으로 제어할 수 있어, 선로를 효율적으로 이용할 수 있다.



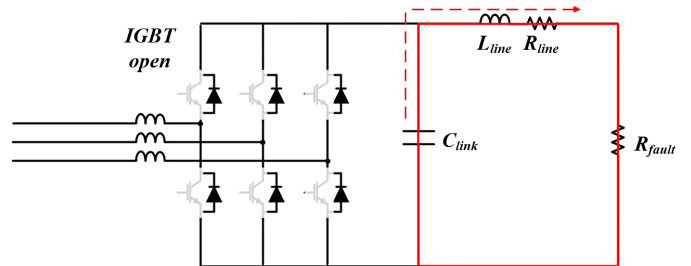
(a) 방사형 배전망
(b) 다중터미널형 배전망
(c) BTB형 배전망
[그림 1] DC 배전망의 구성

3. DC 배전망의 전기적 위해요인 분석

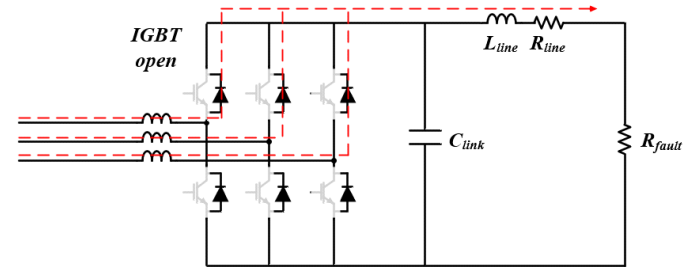
3.1 고장전류 발생 메커니즘

DC 배전망에서 사고에 의한 고장전류 발생 메커니즘은 그

림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 2의 (a)는 DC-link 커패시터의 방전에 의한 고장전류 특성이고, 그림 2의 (b)는 역병렬 다이오드 도통에 의한 고장전류 특성을 나타낸다. 먼저, 그림 2의 (a)와 같이, DC 배전망의 직류 배전선로에서 사고가 발생하면, IGBT는 자기보호 동작을 통해 빠르게 개방되고, DC-link 커패시터에 충전된 에너지가 방전을 시작한다. 또한, DC-link 커패시터가 방전하는 동안에는 DC-link 커패시터의 앞단이 격리되기 때문에, 고장회로는 RLC 등가 직렬회로로 나타낼 수 있다. 한편, 그림 2의 (b)와 같이 DC-link 커패시터가 방전을 완료하면, AC/DC 컨버터 내부의 역병렬 다이오드가 도통되면서 AC 전원이 다이오드를 통해 직류 측으로 전력을 공급하게 된다. 즉, 커패시터 방전에 의한 고장전류 및 역병렬 다이오드에 의한 고장전류는 수 ms 이내에 크게 증가하여 DC 배전망의 선로 및 타 설비에 열적/전기적 스트레스를 가할 수 있어, 계통 운영 측면에서 위험도가 높다.



(a) DC-link 커패시터 방전에 의한 고장전류 특성

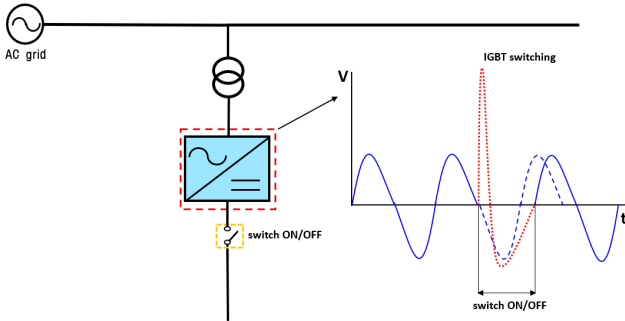


(b) 역병렬 다이오드에 의한 고장전류 특성
[그림 2] DC 배전망의 고장전류 발생 메커니즘

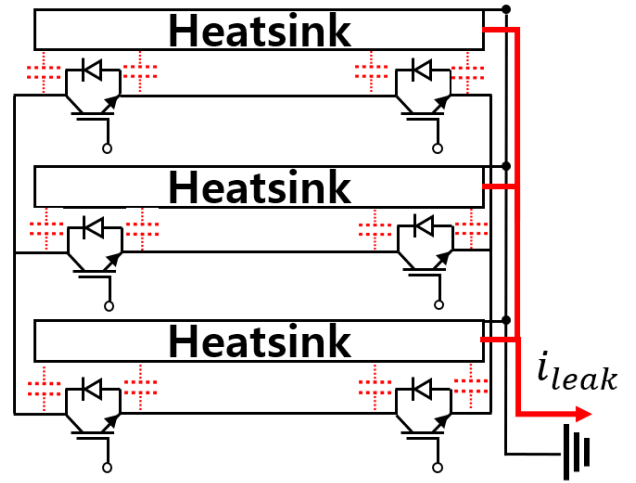
3.2 CMV 발생 메커니즘

CMV(common mode voltage)는 기생 커패시턴스와 전압의 변화량(dv/dt)에 의해 발생하는 전압으로 개폐기 및 차단기의 동작, IGBT의 스위칭, 개폐서지 및 뇌서지 등의 이유로 발생할 수 있다. 대표적으로, 개폐기에 의한 CMV 발생 메커니즘을 나타내면 그림 3과 같다. 이 그림에서와 같이, 배전망 운용 중에 유지보수가 필요하거나 전력공급을 중단해야 하는 경우, CMV는 기생 커패시턴스와 개폐 과정에서 발생하는 전압 변화량(dv/dt)에 의해 발생한다. 한편, CMV는 그림 4와 같이, 직류성분, 교류 기본파 성분, 스위칭 성분으로 나타낼

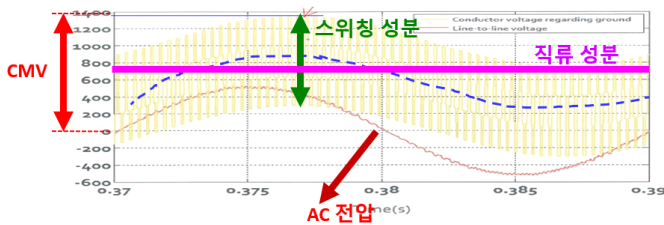
수 있고, 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다. 이러한 CMV는 정격전압의 수 배로 나타나기 때문에 DC 설비의 절연내력을 저감시킬 수 있다.



[그림 3] 정상상태 개폐에 의한 CMV 메커니즘



[그림 5] IGBT 스위칭에 의한 누설전류 메커니즘



[그림 4] CMV의 구성

$$V_{CMV} = \sqrt{V_{dc}^2 + V_{ac}^2 + V_{sw}^2} \quad (1)$$

여기서, V_{CMV} : CMV 전압, V_{dc} : CMV의 DC 성분, V_{ac} : CMV의 AC 기본파 성분, V_{sw} : CMV의 스위칭 성분

3.3 누설전류 발생 메커니즘

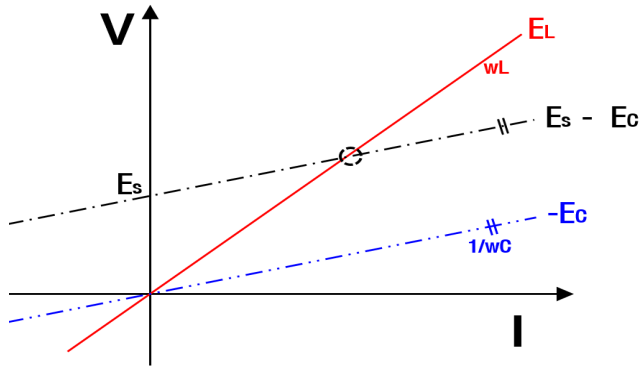
누설전류는 IGBT의 스위칭, 절연성능 저하 등의 이유로 발생할 수 있다. 여기서, IGBT의 스위칭에 의한 누설전류 발생 메커니즘을 나타내면 그림 5와 같다[2]. 이 그림에서와 같이, 컨버터의 IGBT는 전력변환을 목적으로 고주파수 스위칭 동작을 수행하는데, 전력변환 과정에서 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의하여, 누설전류가 발생할 수 있다. 또한, 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의한 누설전류는 식 (2)와 같이, 시간에 따른 IGBT 스위칭의 전압 변화량(dv/dt)과 기생 커패시턴스에 의해 산정된다. 이러한 누설전류는 DC 배전설비에 전기부식을 발생시켜 설비의 성능을 저하시키고 작업자의 안전을 위협할 수 있다.

$$i_{leak} = C_{stray} \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

여기서, i_{leak} : 누설 전류, C_{stray} : 기생 커패시턴스, v : DC 전압, t : 시간

3.4 변압기의 철공진 발생 메커니즘

변압기의 철공진은 순간적인 전압상승과 같은 이상전압에 의하여 철심을 가진 인덕터가 포화되어, 계통의 정전용량과 상호작용을 통해 발생하는 비선형적인 진동현상이다. 철공진이 발생하는 회로의 전압과 전류는 그림 6과 같이 도식적인 해석수법을 이용하여 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 인덕터의 양단전압(E_L)과 커패시터 양단전압(E_C)은 각각 wL 과 $1/wC$ 의 기울기를 가진 직선의 형태를 가진다. 즉, E_L 과 E_S-E_C 의 교차점은 1개만 존재하며, 이 교차점에서 정상상태의 전류와 E_L , E_C 가 구해진다. 이를 바탕으로, 커패시턴스와 인덕턴스에 의한 철공진 특성은 그림 7과 같다. 여기서, E_C 는 $1/wC$ 의 기울기를 가진 직선으로 전류에 비례하지만, E_L 은 포화현상에 의해 일정 값 이상의 전류에서 비례적으로 변하지 않는 곡선의 형태를 가진다. 즉, E_L 은 낮은 전류 영역에서 W_{Linear} 의 높은 기울기 값을 가지고, 일정 값 이상의 전류 영역에서는 W_{Lsat} 의 매우 낮은 기울기 값을 가지므로, 계통 정수에 따라 E_L 과 E_S-E_C 의 교차점은 1개에서 3개까지 발생할 수 있다. 즉, 변압기의 철공진은 하나의 교차점에서 다른 교차점으로 순간적인 전압상승을 발생시킬 가능성이 있어, DC 설비의 안전성에 악영향을 미칠 수 있다.



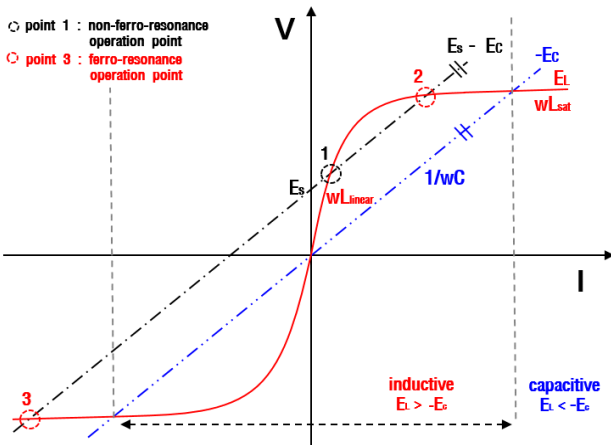
[그림 6] L-C 회로의 도식적인 해석

감사의 글

본 연구는 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이후동 외4, “±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 보호 협조 운용방안에 관한 연구”, 한국산화기술학회논문지, 24권 제3호, pp.533-542, 2023.
- [2] 최성문 외4, “CMV에 의한 ESS 안전성 평가에 관한 연구”, 한국산화기술학회 논문지, 24권 제5호, pp.635-646, 2023.



[그림 7] 커패시턴스와 비선형 인덕턴스에 의한 변압기 철공진 특성

4. 결 론

본 논문에서는 DC 배전망의 안정적인 운용을 위해, 주요한 전기적 위협요인으로 평가되는 고장전류, CMV, 누설전류, 철공진을 분석하고, 발생 메커니즘을 제시한다. 이를 바탕으로, DC 배전망의 전기적 위협요인을 분석한 결과, 커패시터 방전 및 역병렬 다이오드에 의한 고장전류는 수 ms 이내에 크게 증가하여 DC 배전망의 선로 및 타 설비에 열적/전기적 스트레스를 가할 수 있고, 개폐기 및 차단기의 동작, IGBT의 스위칭, 개폐서지 및 뇌서지 등에 의한 CMV는 정격을 초과하는 전압이므로 DC 설비의 절연에 악영향을 미칠수 있다. 또한, IGBT의 스위칭 및 절연성능 저하에 의한 누설전류는 DC 배전설비에 전기부식을 발생시켜 설비의 성능을 저하시키고 작업자의 안전을 위협할 수 있으며, 이상전압에 의한 변압기의 철공진은 순간적인 전압상승을 발생시킬 가능성이 있어, DC 설비의 안전성에 악영향을 미칠수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 향후에는 상기의 전기적 위협요인 분석을 바탕으로 DC 배전망의 안전성 평가를 수행할 예정이다.