

400V급 10kW LVDC 배전계통의 CMV 및 서지 발생 메커니즘에 관한 연구

이민행*, 김경화*, 김윤호*, 김세진*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:dlalsgod97@koreatech.ac.kr

A Study on Mechanism of CMV and Surge in 400V, 10kW LVDC Distribution System

Min-Haeng Lee*, Kyung-Hwa Kim*, Yun-Ho Kim*, Se-Jin Kim*, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

요약

최근, 기존의 AC 배전망에 DC 배전기술을 적용하여 신재생에너지 전원을 수용하는 실증연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한, DC 배전기술은 선로의 조류를 능동적으로 제어하여 선로 및 설비의 이용률을 증가시킬 수 있고, 동일한 선로에서 기존의 AC 배전망보다 더 많은 용량을 공급할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만, DC 배전에 대한 전기설비 기술기준과 안전운용 절차 및 운용경험의 부족으로 인하여 DC 배전망의 전기적 특성을 고려한 안전성 평가방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전망의 안전성을 확보하기 위하여, 전기적 위해요인 중의 하나인 서지 및 CMV에 대한 발생 메커니즘을 제시하고, 배전계통부, 메인컨버터부, 모의선로부, 모의부하 장치부, 서지 및 CMV 측정장치부 등으로 구성된 10kW, 400V급 DC 배전계통의 서지 및 CMV 평가시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로, 서지 및 CMV에 대한 특성을 분석한 결과, 메인컨버터의 기동, AC 및 DC측 보호기기의 차단 동작 등에 의한 서지는 부하의 운용조건에 따라 약 30% 정도 발생함을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 정부는 차세대 성장 동력 산업 중 하나로서 녹색 성장 정책을 추진하고 있으며, 그 일환으로 재생에너지 3020 이행계획에 따라 2030년까지 신재생에너지 전원의 비중을 20%로 확대하는 보급사업을 적극적으로 수행하고 있다. 이에 따라, 급격하게 도입되고 있는 신재생에너지의 수용성을 향상시키기 위한 방안으로, 국내에서는 기존의 AC 배전망에 DC 배전기술을 적용하여 신재생에너지원을 수용하는 실증연구가 활발하게 진행되고 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 전력 인프라의 투자를 지연시킬 수 있다 [1]. 하지만, 기존에 운용되던 AC 배전망과 달리, DC 배전망은 전기설비기술기준과 안전운용 절차 및 운용경험의 부족으로, DC 배전망의 절연내력 및 전기적 특성을 고려한 안전성 평가방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전망의 안전성을 평가하기 위해, 주요한 전기적 위해요인 중 서지 및 CMV에 대한 발생 메커니즘을 제시하고, 이에 따른

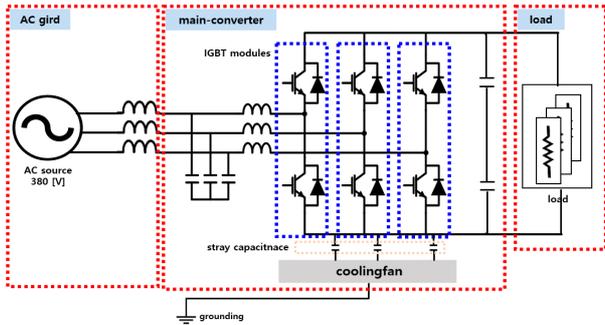
평가시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 DC 배전망의 전기적 위해요인 중 서지와 CMV의 전기적특성을 분석한 결과, IGBT의 스위칭, 보호기기의 동작, 메인컨버터의 탈락 등에 의한 서지 및 CMV는 과도한 전압으로 인해 DC 설비의 절연내력을 초과하여 DC 설비에 악영향을 미칠 수 있으며, 이는 노이즈를 유발하여 다양한 계기류의 오작동을 일으킬 수 있어 작업자의 안전을 위협할 수 있음을 알 수 있다.

2. DC 배전계통의 서지 및 CMV 발생 메커니즘

2.1 IGBT 스위칭에 의한 CMV

계통과 연계된 메인컨버터는 그림 1과 같이 AC 전원부(grid section), 메인컨버터부(main converter section), 수용가부(load section)로 구성된다. 여기서, AC 전원부는 메인 변압기(M.Tr)와 보호장치(차단기, fuse), 메인컨버터부는 필터(LC-filter), IGBT, DC 커패시터(DC capacitor), 수용가부는 보호장치(fuse, DCCB) 등을 포함한다. 여기서, DC 배전계통에서 메인컨버터

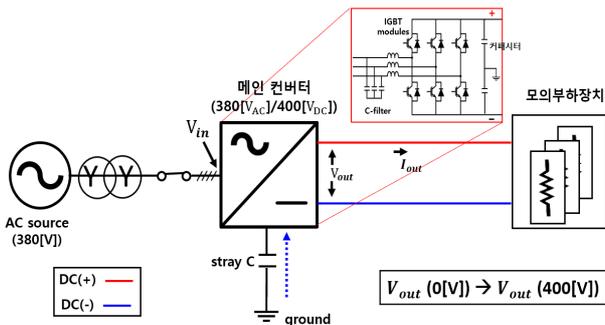
의 IGBT는 전력변환을 목적으로 5 ~ 10[kHz]의 고주파수 스위칭 동작을 수행하는데, 이때 IGBT 스위칭에 의하여 CMV(공통 모드전압, common mode voltage)가 발생된다[2].



[그림 1] IGBT 스위칭에 의한 CMV

2.2 메인컨버터의 기동에 의한 서지

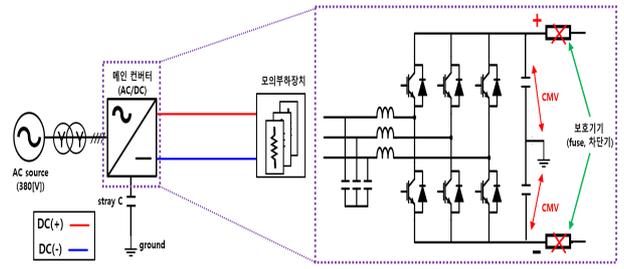
메인컨버터는 그림 2와 같이 IGBT 모듈(IGBT module), 필터(c-filter), 커패시터(capacitor) 등으로 구성되며, IGBT 고주파 스위칭 기술을 통해 전력을 변환하고, 필터와 커패시터를 통해 안정된 전압을 출력시킨다. 여기서, 메인컨버터는 전원을 인가하거나 기동할 때 초기에 전압 및 전류의 급격한 변화가 발생할 수 있으며, 이러한 초기 변화로 인해 회로 내부에서 일시적인 불안정성이 발생할 수 있다. 또한, 메인컨버터는 일반적으로 커패시터를 사용하여 출력을 안정화시키는데, 초기에 커패시터를 빠르게 충전시키거나, 제어를 위해 커패시터가 방전되면서 정격 전압을 초과하는 서지가 발생할 수 있다.



[그림 2] 메인컨버터의 기동에 의한 서지

2.3 DC측 보호기기의 차단동작에 의한 서지

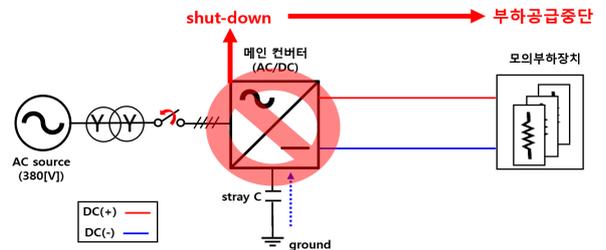
DC 배전계통에 설치된 보호기기(fuse, 차단기 등)는 운용 중 발생한 단락 및 지락 사고로부터 설비를 보호한다[2]. 그러나, 차단기 동작시 발생한 시간에 따른 전류의 변화량(di/dt)은 설비와 DC 전로의 기생 인덕턴스와 결합되어 과도서지를 발생시키게 된다. 즉, 이러한 과도서지는 그림 3과 같이 기생 커패시턴스에 의해 약 1/2로 분배되어, (+)극과 접지 및 (-)극과 접지간 CMV를 발생시킬 수 있다[3].



[그림 3] DC측 보호기기의 차단동작에 의한 서지

2.4 AC측 보호기기의 차단동작에 의한 서지

과부하 상태 혹은 사고상태가 발생한 경우, 그림 4와 같이 메인컨버터는 과부하내량을 초과하는 사고전류에 의하여 급격하게 탈락하여, 수용가에게 부하공급 중단현상이 발생할 가능성이 있다. 즉, 메인컨버터에 내장된 보호기능(H/W, S/W)은 반도체 소자들을 보호하기 위해, 센서로부터 측정된 파라메타가 보호 범위를 벗어나면 수 ms이내에 순시적으로 동작하기 때문이다. 따라서, AC측 보호기기의 차단동작 시 발생한 전류 변화율(di/dt)로 인해, 정격 전압의 수배 이상을 초과하는 서지가 발생할 수 있다.

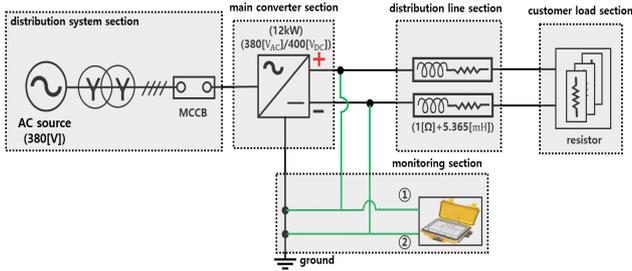


[그림 4] AC측 보호기기의 차단동작에 의한 서지

3. 10kW, 400V급 DC 배전계통의 서지 및 CMV 평가시험장치 구현

DC 배전계통의 서지 및 CMV의 발생특성을 분석하기 위하여, 그림 5와 같이 10kW, 400V급 DC 배전계통의 구성을 제시한다. 여기서, 이 장치는 배전계통부, 메인컨버터부, 모의선로부, 모의부하 장치부, CMV 측정장치부 등으로 구성되어 서지 및 CMV 평가시험장치를 구현한다. 먼저, 모의 배전계통부는 22.9[kV]의 배전선로를 lab-scale로 비례적으로 축소하여 380[V], 3상 4선식 전원과 Y-Y결선 방식의 절연변압기로 구상하고, 메인컨버터부는 정격전압으로 AC 380[V]를 입력받아 DC 400[V]를 출력하는 12[kW]급 컨버터로 구상한다. 또한, 모의선로부는 전압강하를 고려하여 최소 15%에서 최대 30%정도 발생하도록 구상하며, 모의 부하장치부는 메인컨버터의 정격용량인 12[kW]를 바탕으로 상정하며, 용량성 및 유도성 임피던스를 제외한 저항 성분만으로 구성한다. 한

편, CMV 측정장치부는 DC 배전계통의 주요부인 메인컨버터의 CMV를 측정하며, CMV 측정지점은 메인컨버터의 (+)단자와 접지, (-)단자와 접지사이의 전압을 측정하도록 구성한다.



[그림 5] 전체구성

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

본 논문에서 설계한 10kW, 400V급 DC 배전계통의 서지 및 CMV의 발생특성을 분석하기 위하여, IGBT 스위칭, 보호기기, 메인컨버터의 탈락 등의 시험 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 메인 컨버터는 380[V_{AC}]의 입력전압에서 400[V_{DC}]의 출력전압인 12[kW]급 컨버터로 상정한다. 또한, DC 배전계통에서 선로 임피던스에 따른 전압변동을 고려하기 위하여, 모의 선로는 전압강하율 약 15%를 고려하여 2[Ω] + 10.61[mH]로 산정한다. 한편, 부하용량에 따른 서지 및 CMV의 발생특성을 분석하기 위하여, 모의부하의 용량은 부하용량에 따른 서지 및 CMV의 특성을 확인하기 위하여, 각각 0[W], 1[W], 5[W], 10[W]의 부하로 산정한다. 단, CMV는 DC 배전계통에서의 메인컨버터에 발생하는 서지 및 CMV를 측정하며, 측정지점은 메인컨버터의 (+)단자와 접지, (-)단자와 접지사이의 전압을 측정한다.

[표 1] 시험조건

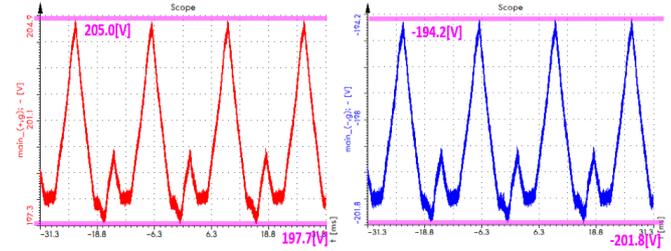
항 목	내 역	
메인 컨버터	정격 용량	12[kW]
	입력 전압	380[V _{AC}]
	출력 전압	400[V _{DC}]
모의 선로 (임피던스)	저항[Ω]	2
	인덕턴스[mH]	10.61
모의 부하 (부하용량)	case 1	1[kW]
	case 2	5[kW]
	case 3	10[kW]

4.2 부하용량에 따른 서지 및 CMV 발생특성

4.2.1 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성

상기의 경제성평가 조건과 측정 방법을 바탕으로, 10kW 부하용량의 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성은 그림 6과 같이

나타낼 수 있다. 여기서, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 그림 6(a)와 같이 메인컨버터의 (+)단자와 접지사이에서 최대 205.0[V]에서 최소 197.7[V], 그림 6(b)와 같이 메인컨버터의 (-)단자와 접지사이에서 최대 -201.8[V]에서 최소 -194.2[V]임을 알 수 있다. 따라서, 부하용량에 따른 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성을 종합하면 표 2와 같은데, CMV 크기는 부하용량에 관계없이 거의 동일함을 알 수 있다.



(a) (+)단자와 접지사이의 전압 (b) (-)단자와 접지사이의 전압

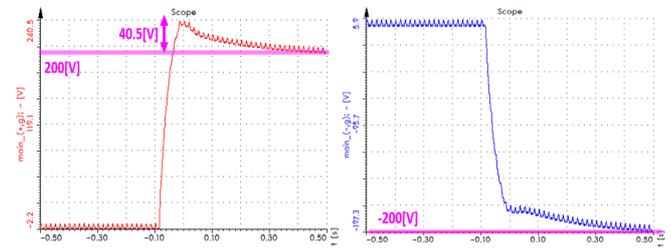
[그림 6] 10[kW] 부하용량의 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성

[표 2] IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성

항 목	내 역	
(+)단자 [V]	case 1	205.0~197.7
	case 2	205.0~197.5
	case 3	204.9~197.3
(-)단자 [V]	case 1	-201.7~-194.3
	case 2	-201.9~-194.2
	case 3	-201.8~-194.2

4.2.2 메인컨버터의 기동에 의한 서지 특성

10kW 부하용량의 메인컨버터의 기동에 의한 서지 특성은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 서지는 그림 8(a)와 같이 메인컨버터의 (+)단자와 접지사이에서 순간적으로 최대 240.5[V]까지 증가함을 알 수 있고, 그림 8(b)와 같이 메인컨버터의 (-)단자와 접지사이에서 정격전압 이하로 발생되지 않음을 알 수 있다. 따라서, 부하용량에 따른 메인컨버터의 기동에 의한 서지의 특성을 종합하면 표 3과 같은데, 메인컨버터의 기동에 의한 서지는 부하용량의 증가에 따라 정격전압의 크기를 초과하고, 감소함을 알 수 있다.



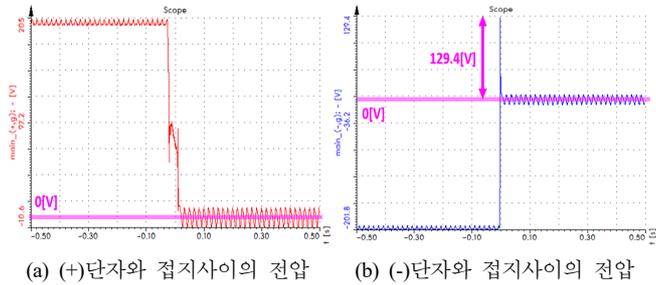
(a) (+)단자와 접지사이의 전압 (b) (-)단자와 접지사이의 전압

[그림 7] 10[kW] 부하용량의 메인컨버터의 기동에 의한 서지 특성

[표 3] 부하용량에 따른 메인컨버터의 기동에 의한 서지 특성

항 목		내 역
(+)단자 [V]	case 1	244.1
	case 2	243.6
	case 3	240.5
(-)단자 [V]	case 1	X
	case 2	X
	case 3	X

4.2.3 DC측 보호기기의 차단동작에 의한 서지 특성
 10kW 부하용량의 DC측 보호기기의 차단동작에 의한 서지 특성은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 8(a)와 같이 서지는 메인컨버터의 (+)단자와 접지사이에서 정격전압 이하로 발생되지 않음을 알 수 있다. 한편, 그림 8(b)와 같이 서지는 메인컨버터의 (-)단자와 접지사이에서 순간적으로 최대 129.4[V]까지 증가함을 알 수 있다. 따라서, 부하용량에 따른 DC측 보호기기 차단동작에 의한 서지의 특성을 종합하면 표 4와 같은데, DC측 보호기기의 차단동작에 의한 서지는 부하용량의 증가에 따라 정격전압의 크기를 초과하고, 증가함을 알 수 있다.



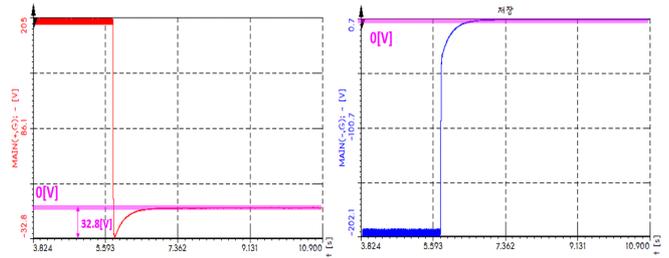
[그림 8] 10[kW] 부하용량의 DC측 보호기기 차단동작에 의한 서지 특성

[표 4] 부하용량에 따른 DC측 보호기기 차단동작에 의한 서지 특성

항 목		내 역
(+)단자 [V]	case 1	X
	case 2	X
	case 3	X
(-)단자 [V]	case 1	96.0
	case 2	101.2
	case 3	129.4

4.2.4 AC측 보호기기의 차단동작에 의한 서지 특성
 10kW 부하용량의 AC측 보호기기 차단동작에 의한 서지 특성은 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 서지는 그림 9(a)와 같이 메인컨버터의 (+)단자와 접지사이에서 순간적으로 -32.8[V]까지 발생됨을 알 수 있고, 그림 9(b)와 같이 메인 컨버터의 (+)단자와 접지사이에서 발생되지 않음을 알 수 있다. 따라서, 부하용량에 따른 AC측 보호기기의 차단동작에

의한 서지 특성을 종합하면 표 5와 같은데, AC측 보호기기 차단동작에 의한 서지는 부하용량의 증가에 따라 정격전압의 크기를 초과하고, 증가함을 알 수 있다.



(a) (+)단자와 접지사이의 전압 (b) (-)단자와 접지사이의 전압

[그림 9] 10[kW] 부하용량의 AC측 보호기기 동작에 의한 서지 특성

[표 5] 부하용량에 따른 AC측 보호기기 동작에 의한 서지 특성

항 목		내 역
(+)단자와 접지	case 2	-16.8
	case 3	-28.2
	case 4	-32.8
(-)단자와 접지	case 2	X
	case 3	X
	case 4	X

5. 결 론

본 논문에서는 DC 배전망의 안전성을 확보하기 위하여, 전기적 위협요인 중의 하나인 서지 및 CMV의 발생 메커니즘을 제시하고, 이에 따른 평가시험장치를 구현하여 부하용량에 따른 서지 및 CMV의 특성평가를 수행한다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 메인컨버터의 기동, AC 및 DC측 보호기기의 차단동작 등에 의한 서지는 부하의 운용조건에 따라 약 30%정도 발생함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 이민행, 김지명, 김경화, 이에빈, 김윤호, 노대석, “태양광 전원의 연계용량에 따른 ±35kV급 MVDC 실증배전망의 경제성평가 모델링”, 한국산학기술학회논문지, vol. 25, No. 2, pp. 504-513, 2024
- [2] 최성문, 김승호, 김미영, 노대석, “ESS용 변압기의 접지방식에 의한 CMV 모델링 및 특성에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 22, No. 4, pp. 587-593, 2021
- [3] 조성덕, 신건, 최성문, 한병길, 노대석, “Sharing용 ESS의 CMV 발생 메커니즘 및 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 24, No. 4, pp. 616-625, 2023