

400V급 10kW LVDC 모의 시험장치의 정상상태 운용특성에 관한 연구

김경화*, 김윤호*, 이민행*, 김세진*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: kyunghwa316@koreatech.ac.kr

A Study on Normal Operation Characteristics in 400V, 10kW LVDC Test Device

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

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 요구 등으로 DC 배전계통에 대한 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전계통에서의 다양한 특성 시험을 수행할 수 있는 400V급 10kW LVDC 모의 시험장치를 구현한다. 이 장치는 메인 컨버터부(AC 380V/ DC 400V), 구간 컨버터부(DC 400V/DC 200V), 모의 선로부($2[\Omega]+10[\text{mH}]$, $2[\Omega]+10[\text{mH}]$), 모의 부하장치부(10kW) 등으로 구성된다. 또한, 구현한 장치를 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의 시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 시험장치 및 모델링을 바탕으로 400V급 10kW LVDC 배전계통의 정상상태 운용특성을 분석한 결과, 시험장치 및 모델링에 의한 전압 변동특성이 유사하여 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 요구 등으로, DC 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다[1, 2]. 또한, 기존 AC 배전계통을 DC 배전계통으로 대체하여 전력을 공급할 경우, 에너지 손실 감소, 분산 전원의 수용성 향상 등의 장점이 있어, DC 배전계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전계통에서의 특성 시험을 위한 400V급 10kW LVDC 배전계통을 설계한다. 이 장치는 메인 컨버터부, 구간 컨버터부, 모의 선로 임피던스부, 모의 부하장치부 등으로 구성된다. 여기서, 메인 컨버터부는 정격은 AC 380V를 입력받아 DC 400V를 출력하는 10kW급 컨버터로 상정하며, 구간 컨버터는 400V를 입력받아 200V를 출력하는 5kW급 컨버터로 각각 상정한다. 한편, 선로 임피던스는 전압강하를 고려하여 Case I부터 Case II로 나누고, 모의 부하장치부는 저항성분만을 고려하여, 각 구간마다 4kW의 용량을 지니도록 상정한다. 이를 바탕으로, 메인 컨버터부(AC 380V/ DC 400V), 구간 컨버터부(DC 400V/DC 200V), 모의 선로부($4\Omega+20\text{mH}$), 모의 부하장치부(10kW) 등으로 구성된다. 또한, 구현한 시험장치를 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인

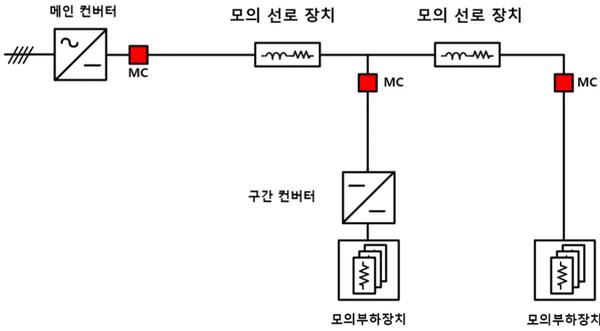
PSCAD/EMTDC를 이용하여 400V급 LVDC 모의 시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링 및 시험장치를 바탕으로 전압 변동특성을 분석한 결과, 설계한 전압 변동특성과 모델링 및 시험장치에 의한 전압 변동특성이 유사하여 구현한 시험장치의 유효성을 알 수 있었다.

2. 400V급 10kW LVDC 모의 시험장치의 설계 및 구현

2.1 400V급 LVDC 모의 시험장치의 설계

본 논문에서는 그림 1과 같이 DC 배전계통에서의 특성 시험을 위한 400V급 모의 배전계통의 구성을 제시한다. 여기서, 이 장치는 메인 컨버터, 구간 컨버터, 모의 선로 임피던스, 모의 부하장치 등으로 구성한다. 또한, 전체 DC 배전계통은 2개의 선로 임피던스와 1개의 구간 컨버터, 2개의 모의 부하장치부로 이루어진다. 여기서, 메인 컨버터의 정격은 AC 380V를 입력받아 DC 400V를 출력하는 12kW급 컨버터로 상정하며, 구간 컨버터는 400V를 입력받아 200V를 출력하는 5kW급 컨버터로 각각 설계한다. 또한, 모의 부하장치는 각 구간마다 4kW의 용량을 갖도록 상정하며, 용량성 및 유도성 임피던스

를 제외한 저항 성분만으로 구성한다.



[그림 1] 400V급 LVDC 모의 시험장치의 구성

또한, 본 논문에서는 식 (1)을 바탕으로, DC 배전계통의 전압 레벨을 고려하여 각 구간마다 5kW의 모의 부하를 산정한다. 즉, 모의 부하장치에 공급되는 전압과 구간 컨버터의 정격 용량을 고려하여 모의 부하의 저항 성분을 산정할 수 있다. 한편, 모의 선로 임피던스를 고려한 전압 강하는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 전압 강하는 부하용량과 고압 측 전압을 고려한 전류에 선로 임피던스를 곱하여 산정할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 상기와 같은 식을 바탕으로 최소 7.63[%]에서 최대 15.55[%]의 전압 강하가 발생하도록 모의 선로부를 구성한다.

$$R_{load} = \frac{V_{second}^2}{P_{rated}} [\Omega] \quad (1)$$

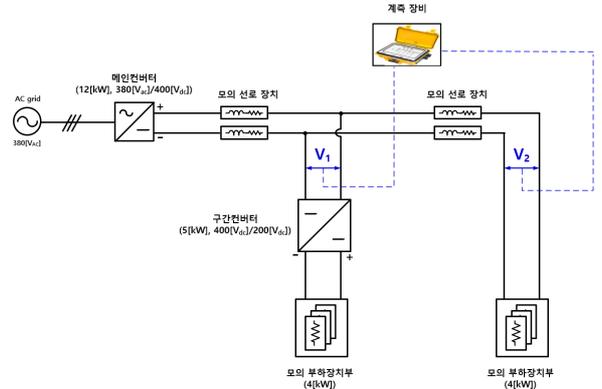
$$\Delta V_{line} = I_{pri} \cdot R_{line} [V] \quad (2)$$

여기서, R_{load} : 모의 부하장치의 저항[Ω], V_{second} : 구간 컨버터의 2차측 전압[V], P_{rated} : 구간 컨버터의 정격용량[W], ΔV_{line} : 모의 선로 임피던스의 전압 강하분[V], I_{pri} : 구간 컨버터 1차측에 흐르는 전류[A], R_{line} : 모의 선로 임피던스[Ω]

2.2 400V급 LVDC 모의 시험장치의 구현

본 논문에서 제시한 400V급 10kW LVDC 모의 시험장치의 전체 구성을 나타내면 그림 2와 같다. 여기서, 전체 시험장치는 메인 컨버터, 구간 컨버터, 모의 부하장치, 모의 선로 임피던스 및 계측 장비 등으로 이루어진다. 메인 컨버터는 380Vac를 입력받아 400Vdc를 출력하는 12kW급 컨버터로 구성하고, 구간 컨버터는 400Vdc를 입력받아 200Vdc를 출력하는 5kW급 컨버터로 상정한다. 또한, 모의 선로부는 저항 성분과 리액턴스 성분으로 구성하고, 모의 부하장치는 용량성 및 유도성 임피던스를 제외한 저항 성분만으로, 각 구간의 부하용량은

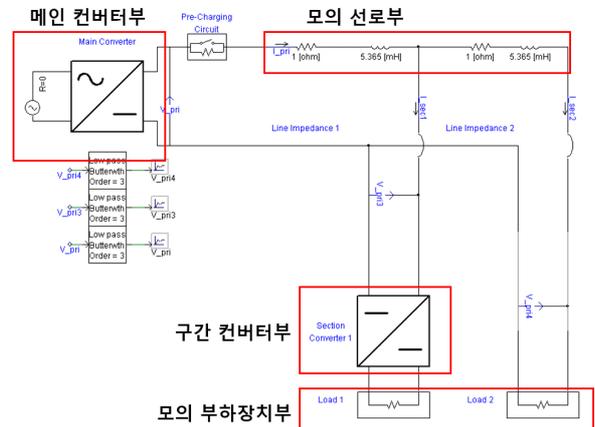
4kW를 지니도록 구성한다. 한편, 계측 장치는 구간 컨버터의 각 선로 임피던스에 의한 전압 변동특성을 확인하기 위하여 그림 3의 V_1 과 V_2 지점을 측정하도록 구성한다.



[그림 2] 전체 시스템 구성

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 400V급 10kW LVDC 모의 시험장치의 모델링

상기에서 제시한 시험장치를 바탕으로 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용한 400V급 10kW LVDC 모의 시험장치의 모델링은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 전체 시스템 모델링은 메인 컨버터, 모의 선로, 구간 컨버터, 모의 부하장치 등으로 구성된다. 여기서, 메인 컨버터의 입력은 정전압 입력장치를 통해 AC 380V 전원을 모의하며, 메인 컨버터의 1차측 입력 전압은 380[Vac], 2차측 출력 전압은 400[Vdc]를 갖도록 구성한다. 한편, 구간 컨버터의 입력 전압은 400[Vdc], 2차측의 출력 전압은 200[Vdc]인 단방향 DC/DC 컨버터를 적용한다. 모의 부하장치는 리액턴스 값을 무시한 저항값으로만 구성하고, 각 구간의 부하용량은 4kW를 지니도록 모델링을 수행한다.



[그림 3] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

4.1 시뮬레이션 및 시험 조건

400V급 LVDC 모의 시험장치의 정상상태 운용특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 및 시험 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 메인 컨버터의 정격용량은 12kW, 구간 컨버터의 정격용량은 5kW로 상정한다. 또한, 1번 구간과 2번 구간의 부하장치는 각각 4[kW]급의 저항으로 상정한다. 한편, 본 논문에서는 400V급 DC 배전계통에서 선로 임피던스에 따른 전압 변동특성을 확인하기 위하여, 표 2와 같이 모의 선로 임피던스에 따른 상정 시나리오를 제시한다.

[표 1] 시뮬레이션 및 시험 조건

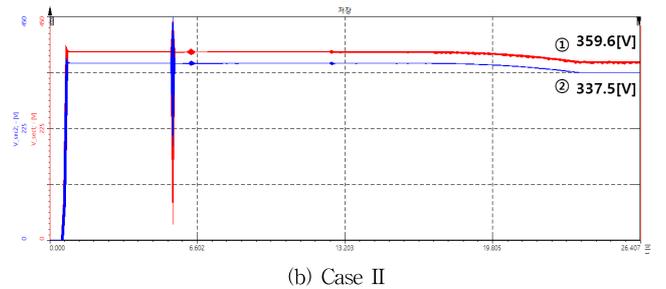
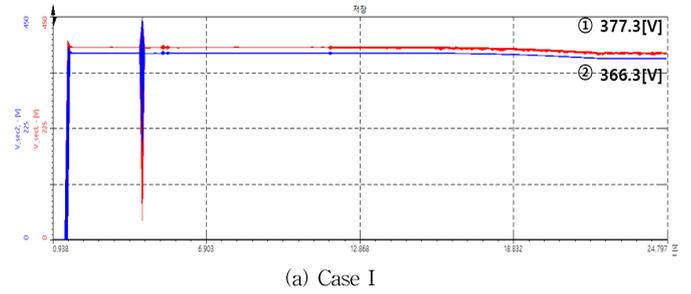
항 목		내 역
메인 컨버터	정격 용량	12[kW]
	입력 전압	380[V _{ac}]
	출력 전압	400[V _{dc}]
구간 컨버터	정격 용량	5[kW]
	입력 전압	400[V _{ac}]
	출력 전압	200[V _{dc}]
모의 부하	1번 구간	4[kW]
	2번 구간	

[표 2] 모의 선로 임피던스에 따른 상정 시나리오

상정 시나리오	모의 선로 임피던스		전압 강하율[%]
	1번 구간	2번 구간	
Case I	1[Ω]+5[mH]	1[Ω]+5[mH]	7.63
Case II	2[Ω]+10[mH]	2[Ω]+10[mH]	15.55

4.2 시험장치에 의한 정상상태 운용특성

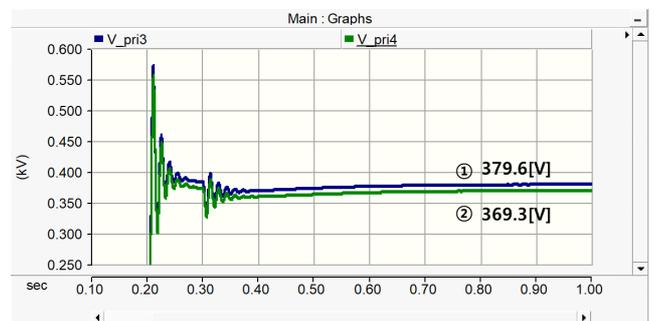
상기에서 제시한 시험 조건에 따라, 400V급 LVDC 모의 시험장치에 의한 정상상태 운용특성은 그림 4와 같다. 여기서, 그림 4(a)와 (b)는 각각 Case I과 Case II의 선로 임피던스 조건에 대한 전압 변동특성을 나타낸다. 또한, 각 그림의 ①번 곡선과 ②번 곡선은 그림 3의 각 구간을 측정된 전압을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, Case I의 V1 지점과 V2 지점의 전압은 각각 377.3[V], 366.3[V]로 산정되어 약 8.43[%]의 전압 강하가 발생함을 알 수 있다. 한편, Case II의 각 구간 전압은 각각 359.6[V], 337.5[V]로 산정되어 약 15.73[%]의 전압 강하가 발생함을 알 수 있다. 또한, 시험장치를 통해 확인한 전압 강하율이 상기에서 설계한 전압강하율과 유사하여 본 논문의 유효성을 알 수 있다.



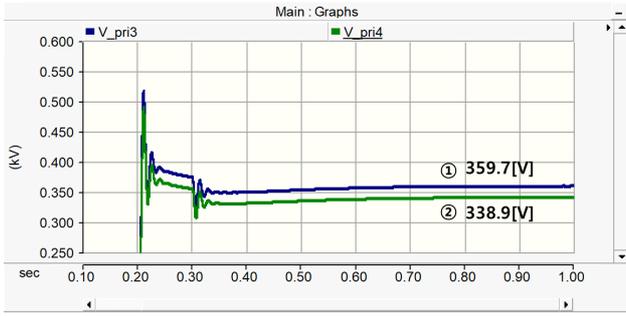
[그림 4] 시험 장치에 의한 정상상태 운용특성

4.3 모델링에 의한 정상상태 운용특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건에 따라, 400V급 LVDC 모의 시험장치의 모델링에 의한 정상상태 운용특성은 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5(a)와 (b)는 각각 Case I과 Case II의 선로 임피던스 조건에 대한 전압 변동특성을 나타낸다. 또한, 각 그림의 ①번 곡선과 ②번 곡선은 그림 3의 V1과 V2 지점을 측정된 전압을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, Case I의 V1 지점과 V2 지점의 전압은 각각 379.6[V], 369.3[V]로 산정되어 약 7.68[%]의 전압 강하가 발생함을 알 수 있다. 또한, Case II의 각 구간 전압은 각각 359.7[V], 338.9[V]로 산정되어 약 15.28[%]의 전압 강하가 발생함을 알 수 있다. 또한, 모델링을 통해 확인한 전압 강하율이 상기에서 설계한 전압 강하율과 유사하여 본 논문의 유효성을 알 수 있다.



(a) Case I



(b) Case II

[그림 5] 모델링에 의한 전압 변동특성

4.4 종합 분석

상기에서 제시한 시뮬레이션 및 시험 조건에 따라, 400V 급 10kW LVDC 모의 시험장치의 산정결과, 모델링 및 시험장치에 의한 전압 변동특성을 종합적으로 나타내면 표 3과 같다. 여기서, Case I의 전압 변동특성을 산정한 결과는 380[V], 369.47[V]으로 나타남을 알 수 있다. 또한, Case I의 모델링과 시험장치에 의한 전압 변동특성은 각각 379.6[V], 369.3[V]와 377.3[V], 366.3[V]로 측정되어, 산정한 전압 변동특성과 모델링 및 시험장치에 의한 전압 변동특성이 유사함을 알 수 있다. 한편, Case II의 전압 변동특성을 산정한 결과는 360[V], 337.77[V]으로 나타남을 알 수 있다. 또한, Case II의 모델링과 시험장치에 의한 전압 변동특성은 각각 359.7[V], 338.9[V]와 359.6[V], 337.5[V]로 측정되어, 산정한 전압 변동특성과 모델링 및 시험장치에 의한 전압 변동특성이 유사함을 알 수 있다. 따라서, 설계한 전압 변동특성과 모델링 및 시험장치에 의한 전압 변동특성을 비교한 결과, 유사한 전압 강하율이 산정되어 본 논문에서 제시한 400V급 10kW LVDC 모의 시험장치의 유효성을 알 수 있다.

[표 3] 종합 분석

상징 시나리오	분류	전압 변동특성[V]		전압 강하율[%]
		1번 구간	2번 구간	
Case I	산정 결과	380	369.47	7.63
	모델링	379.6	369.3	7.68
	시험 장치	377.3	366.3	8.43
Case II	산정 결과	360	337.77	15.55
	모델링	359.7	338.9	15.28
	시험 장치	359.6	337.5	15.73

5. 결 론

본 논문에서는 DC 배전계통에서의 다양한 특성 시험을 수행할 수 있는 400V급 10kW LVDC 모의 시험장치를 구현한다. 이 장치는 메인 컨버터부(AC 380V/ DC 400V), 구간 컨버

터부(DC 400V/DC 200V), 모의 선로부(2[Ω]+10[mH], 2 [Ω]+10[mH]), 모의 부하장치부(10kW) 등으로 구성된다. 또한, 구현한 장치를 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의 시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 시험장치 및 모델링을 바탕으로 400V급 10kW LVDC 배전계통의 정상상태 운용특성을 분석한 결과, 시험장치 및 모델링에 의한 전압 변동특성이 유사하여 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 이후동 외 3명, “PSCAD/EMTDC를 이용한 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 사고해석에 관한 연구”, 대한전기학회, Vol.70, pp.1117-1128, 2021.
- [2] 김지명 외 3명, “5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 보호협조 운용방안에 관한 연구”, 대한전기학회, Vol. 71, pp.45-54, 2022.