

400V급 LVDC 모의 배전계통의 구현에 관한 연구

김경화, 최성문, 김지명, 왕종용, 노대석
한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail: wang0115@koreatech.ac.kr

A Study on the Implementation of 400V-scaled DC Distribution System

Kyung-Hwa Kim, Sung-Moon Choi, Ji-Myung Kim, Jong-Yong Wang, 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 연구의 필요성이 증가하고 있다. 또한, 기존 AC 배전계통을 DC 배전계통으로 대체하여 전력을 공급할 경우, 에너지 손실 감소, 분산 전원의 수용성 향상 등의 장점이 있어, AC/DC 하이브리드 배전계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전계통에서의 다양한 특성 시험을 수행할 수 있는 400V급 모의 배전계통을 제시한다. 이 장치는 메인 컨버터부, 구간 컨버터부, 모의 선로 임피던스부, 모의 부하장치부 등으로 구성된다. 또한, 본 논문에서는 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제시한 400V급 DC 모의 배전계통의 모델링을 수행한다. 이 모델링을 바탕으로 400V급 DC 모의 배전계통의 전압 변동특성을 분석한 결과, 선로 임피던스에 따른 다양한 시나리오에 대하여 전압 변동특성을 확인할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있었다.

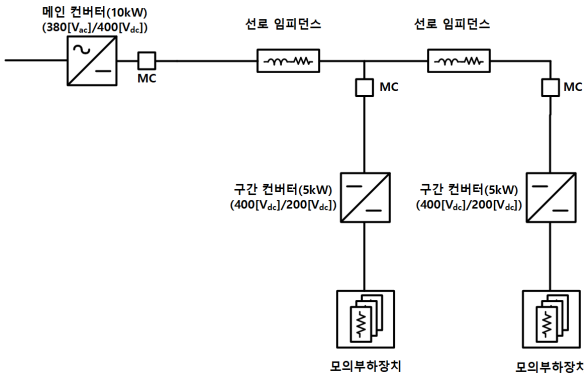
1. 서 론

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 모의장치의 설계를 수행한다. 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 IV로 나누어 상정한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 설계한 400V급 DC 모의 배전계통의 모델링을 수행한다. 이 모델링을 바탕으로 전압 강하 특성을 분석한 결과, 선로 임피던스에 따른 다양한 시나리오에 대하여 전압 변동특성을 확

인할 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

2. 400V급 DC 모의 배전계통의 구현

본 논문에서는 그림 1과 같이 DC 배전계통에서의 특성 시험을 위한 400V급 모의 배전계통의 구성을 제시한다. 여기서, 이 장치는 메인 컨버터부, 구간 컨버터부, 모의 선로 임피던스부, 모의 부하장치부 등으로 구성한다. 또한, 전체 DC 배전계통은 2개의 선로 임피던스와 2개의 구간 컨버터, 2개의 모의 부하장치부로 이루어진다. 여기서, 메인 컨버터부의 정격은 AC 380V를 입력받아 DC 400V를 출력하는 10kW급 컨버터로 상정하며, 구간 컨버터는 400V를 입력받아 200V를 출력하는 5kW급 컨버터로 각각 설계한다. 한편, 선로 임피던스는 전압강하를 고려하여 최소 15%에서 최대 30% 정도 발생하도록 구성한다. 또한, 모의 부하장치부는 각 구간 컨버터의 정격용량인 5kW를 바탕으로 상정하며, 용량성 및 유도성 임피던스를 제외한 저항 성분만으로 구성한다.



[그림 1] 400V급 DC 모의 배전계통의 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 정격용량을 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 고압측 전압을 고려한 전류에 모의 선로 임피던스를 곱하여 산정할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 상기와 같은 식을 바탕으로 최소 15.6[%]에서 최대 31.3[%]의 전압 강하가 발생하도록 모의 선로 임피던스를 산정한다.

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

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

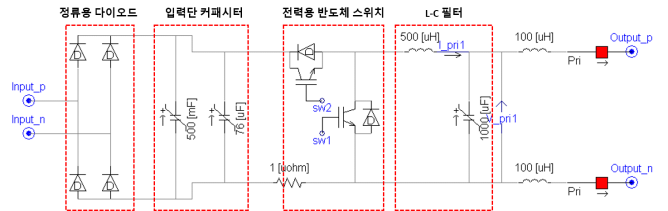
여기서, R_{load} : 모의 부하장치의 저항[Ω], V_{second} : 구간 컨버터의 2차측 전압[V], P_{rated} : 구간 컨버터의 정격용량[W], ΔV_{line} : 모의 선로 임피던스의 전압 강하분[V], I_{pri} : 구간 컨버터 1차측에 흐르는 전류[A], R_{line} : 모의 선로 임피던스[Ω]

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 400V급 DC 배전계통의 모델링

3.1 메인 컨버터부

메인 컨버터로 사용되는 400V급 AC/DC 컨버터는 그림 2와 같이 정류용 다이오드, 입력단 커패시터, 전력용 반도체 스위치, 역병렬 다이오드, L-C필터 등으로 구성된다. 여기서, 정류용 다이오드는 전파정류회로 방식으로 구성되어 단상 AC전력을 DC로 변환하며, 입력단 커패시터는 입력단의 직류 전압을 안정적으로 유지하는 역할을 한다. 또한, 전력용 반도

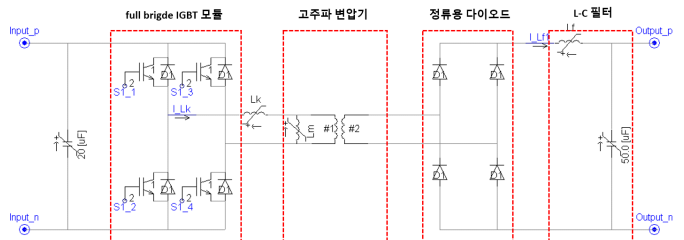
체 스위치는 스위칭 동작을 통해 출력전압의 크기를 제어하고, 역병렬 다이오드는 환류 기능을 수행하며, L-C필터는 정류된 DC측 출력의 리플을 저감시키는 역할을 수행한다. 한편, AC/DC 컨버터의 1차측 입력 전압은 380[Vac], 2차측 출력 전압은 400[Vdc]를 갖도록 구성한다.



[그림 2] 메인 컨버터부 모델링

3.2 구간 컨버터부

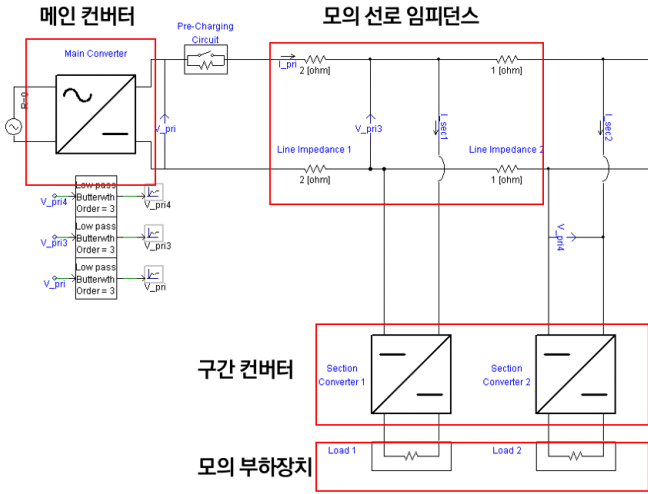
LVDC 배전계통으로 분기선으로 전력을 공급하는 구간 컨버터는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 구간 컨버터는 full-bridge 형태의 IGBT 소자와 전기적 절연과 강압을 위한 고주파 변압기, L-C필터 등으로 구성된다. 또한, 1차측의 입력 전압은 400[Vdc], 2차측의 출력 전압은 200[Vdc]인 단방향 DC/DC 컨버터를 적용한다.



[그림 3] 구간 컨버터부 모델링

3.3 전체 시스템 모델링

배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 설계한 400V급 DC 배전계통 모의 배전계통의 모델링을 수행하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 전체 시스템 모델링은 메인 컨버터, 모의 선로 임피던스, 구간 컨버터, 모의 부하장치 등으로 구성된다. 또한, 메인 컨버터의 입력은 정전압 입력장치를 통해 AC 380V 전원을 모의하며, 선로 임피던스 및 모의 부하장치는 리액턴스 값을 무시한 저항값으로만 구성한다. 한편, 모의 부하장치는 구간 컨버터의 정격 용량인 5kW를 지니도록 모델링을 수행한다.



[그림 4] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 설계한 400V급 DC 모의 배전계통의 전압 변동특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 메인 컨버터의 정격용량은 10kW, 구간 컨버터의 정격용량은 5kW로 각각 상정한다. 또한, 1번 구간과 2번 구간의 선로 임피던스는 전압강하를 고려하여 각각 2 ~ 4[Ω], 1 ~ 2[Ω]로 상정한다. 한편, 본 논문에서는 400V급 DC 배전계통에서 선로 임피던스에 따른 전압 변동특성을 확인하기 위하여, 표 2와 같이 Case I부터 Case IV로 나누어 시뮬레이션을 수행한다. 여기서, Case I은 전압 강하가 가장 낮은 조건으로 1번 구간과 2번 구간의 선로 임피던스를 각각 2 [Ω]과 1[Ω]으로 상정한다. 또한, Case IV는 전압강하가 가장 높은 조건으로 1번 구간과 2번 구간의 선로 임피던스를 각각 4[Ω]과 2[Ω]으로 설정한다. 즉, Case I의 전압강하율은 15.6[%]이며, Case IV의 전압강하율은 31.3[%]로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

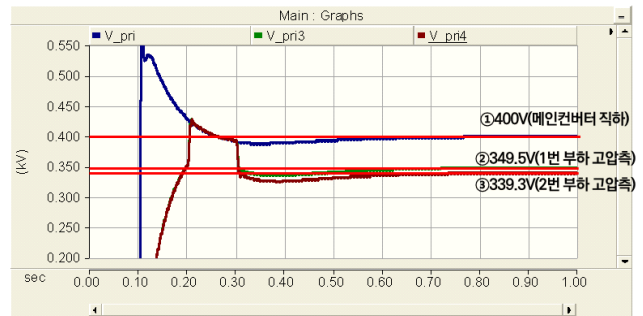
항 목		내 역
메인 컨버터	정격 용량	10[kW]
	입력 전압	380[V _{ac}]
	출력 전압	400[V _{dc}]
구간 컨버터	정격 용량	5[kW]
	입력 전압	400[V _{ac}]
	출력 전압	200[V _{dc}]
모의 선로 임피던스	1번 구간	2 ~ 4[Ω]
	2번 구간	1 ~ 2[Ω]
모의 부하	저항/용량	8[Ω]/5[kW]

[표 2] 모의 선로 임피던스에 따른 상정 시나리오

상정 시나리오	모의 선로 임피던스[Ω]		전압 강하율[%]
	1번 구간	2번 구간	
Case I	2	1	15.6
Case II	2	2	18.8
Case III	4	1	28.1
Case IV	4	2	31.3

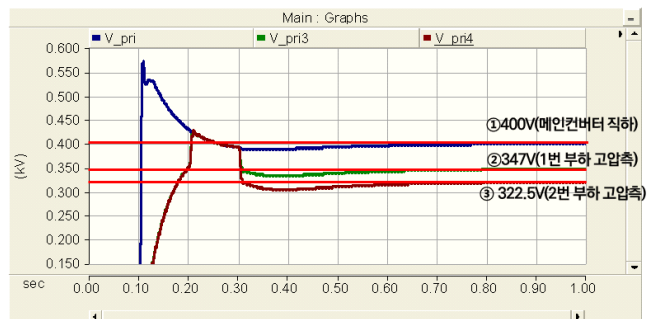
4.2 모델링에 의한 전압 변동특성

400V급 DC 모의 배전계통에서 Case I의 선로 임피던스에 대하여 전압 변동특성은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ①번 그래프는 메인 컨버터의 직하의 전압특성, ②번과 ③번 그래프는 각각 1번 구간 컨버터와 2번 구간 컨버터의 고압측 전압특성을 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 1번 구간 컨버터의 고압측 전압은 약 349.5V로 나타나며, 2번 구간 컨버터의 고압측 전압은 약 339.9V로 나타나는 것을 알 수 있다.



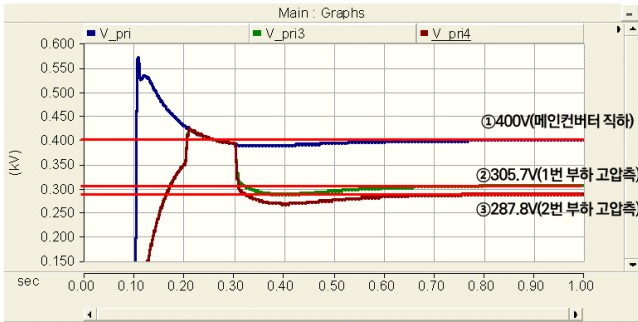
[그림 6] Case I에 대한 전압 변동특성

한편, 400V급 DC 모의 배전계통에서 Case II의 선로 임피던스에 대한 전압 변동특성은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ①번 그래프는 메인 컨버터의 직하의 전압특성, ②번과 ③번 그래프는 각각 1번 구간 컨버터와 2번 구간 컨버터의 고압측 전압특성을 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 1번 구간 컨버터의 고압측 전압은 약 347V로 나타나며, 2번 구간 컨버터의 고압측 전압은 약 322.5V로 나타나는 것을 알 수 있다.



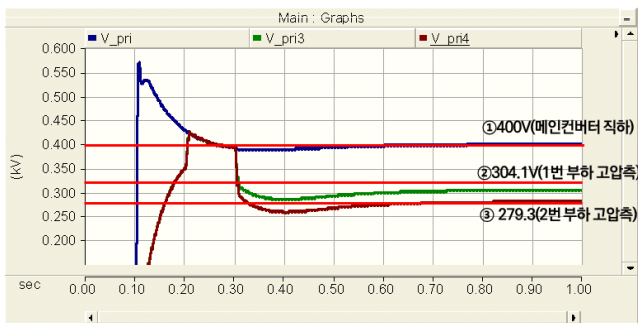
[그림 6] Case IV에 대한 전압 변동특성

또한, 400V급 DC 모의 배전계통에서 Case III의 선로 임피던스에 대한 전압 변동특성은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ① 번 그래프는 메인 컨버터의 직하의 전압특성, ②번과 ③번 그래프는 각각 1번 구간 컨버터와 2번 구간 컨버터의 고압측 전압특성을 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 1번 구간 컨버터의 고압측 전압은 약 349.5V로 나타나며, 2번 구간 컨버터의 고압측 전압은 약 339.9V로 나타나는 것을 알 수 있다.



[그림 7] Case III에 대한 전압 변동특성

또한, 400V급 DC 모의 배전계통에서 Case IV의 선로 임피던스에 대한 전압 변동특성은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ① 번 그래프는 메인 컨버터의 직하의 전압특성, ②번과 ③번 그래프는 각각 1번 구간 컨버터와 2번 구간 컨버터의 고압측 전압특성을 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 1번 구간 컨버터의 고압측 전압은 약 304.1V로 나타나며, 2번 구간 컨버터의 고압측 전압은 약 279.3V로 나타나는 것을 알 수 있다.



[그림 8] Case IV에 대한 전압 변동특성

4.3 시험 장치에 의한 전압 변동특성

시험 장치에 의한 DC 모의 배전계통의 전압 변동특성을 나타내면 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Case I의 경우, 2번 구간 컨버터의 고압측 전압 특성은 약 341.2V로, 전압 강하와 전압 강하율은 각각 58.8V, 14.7%인 것을 알 수 있다. 또한, Case IV의 경우, 2번 구간 컨버터의 고압측 전압 특성은 약 275.2V로, 전압강하와 전압 강하율은 각각 124.8V, 31.2%인 것을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제시한 400V급 DC

배전계통의 전압 변동특성이 모델링과 시험 장치에서 유사한 값을 나타내어 본 논문의 유효성을 알 수 있었다.

[표 3] 400V급 DC 배전계통의 전압 변동특성

상정 시나리오	전압 변동특성[V]		전압 강하율[%]
	1번 구간	2번 구간	
Case I	347	341.2	14.7
Case II	346.6	321.8	19.6
Case III	300.7	288.2	28.0
Case IV	299.5	275.2	31.2

5. 결 론

본 논문에서는 DC 배전계통에서의 다양한 특성 시험을 수행할 수 있는 400V급 모의 배전계통을 제시한다. 이 장치는 메인 컨버터부, 구간 컨버터부, 모의 선로 임피던스부, 모의 부하장치부 등으로 구성된다. 여기서, 모의 선로 임피던스는 약 15 ~ 30[%] 정도의 전압 강하를 고려하여 4개의 Case로 상정한다. 또한, 본 논문에서는 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제시한 400V급 DC 모의 배전계통의 모델링을 수행한다. 이 모델링을 바탕으로 400V급 DC 모의 배전계통의 전압 변동특성을 분석한 결과, 선로 임피던스에 따른 다양한 시나리오에 대하여 전압 변동특성을 확인할 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 이후동 외3, “PSCAD/EMTDC를 이용한 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 사고해석에 관한 연구”, 대한전기학회, 70권, 1117-1128, 2021.
- [2] 곽충근 외4, “배전계통에서 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회, Vol. 23, 1-9, 2022.