

400V급 10kW LVDC 배전계통에서 변압기의 철공진 발생 메커니즘에 관한 연구

김세진*, 김경화*, 김윤호*, 이민행*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:tpwls1578@koreatech.ac.kr

A Mechanism of Ferro-resonance for Transformer in 400V, 10kW LVDC Distribution System

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

*Korea University of Technology and Education

요약

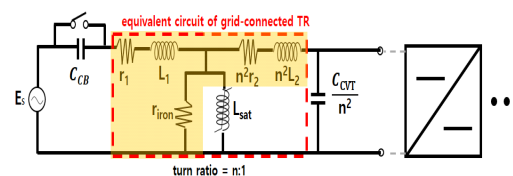
최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가 등에 의하여 DC 배전계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지만, DC의 전기적 특성을 고려한 전기적 위해요인에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히, 이상전압에 의한 철공진은 순간적인 전압상승을 발생시켜 DC 배전계통에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 L-C 직·병렬 회로의 철공진 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 400V급 10kW LVDC 배전계통의 모델링을 수행한다. 상기의 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 변압기의 철공진 특성을 분석한 결과, L-C 직·병렬 회로의 커패시턴스 값에 따라 철공진 전압이 상승하여, DC 전기설비에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

2. 변압기의 철공진 발생 메커니즘

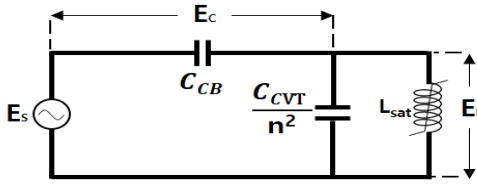
1. 서론

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 요구 등의 이유로 DC 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 기존에 운용되던 AC 배전계통과 달리, DC 배전계통은 계통연계 및 사용전 검사를 위한 기술 기준이 미흡하고 안전운용 절차 및 운용 경험이 부족하므로, DC의 전기적 특성을 고려한 안전성 평가방안이 필요한 실정이다[1]. 또한, DC 배전계통이 기존 AC 배전계통에 연계될 경우, DC 설비의 연계에 따른 DC 접지전위 상승이 자화전류에 영향을 미쳐, 의도치 않게 변압기의 철심이 포화되고 철공진 발생 가능성을 증가시켜 DC 설비에 악영향을 줄 수 있기 때문에 이에 대한 상세한 메커니즘 분석이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 L-C 직·병렬 회로 및 DC 접지전위 상승을 고려한 철공진 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 400V급 LVDC 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 철공진 특성을 분석한 결과, DC 전기설비의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

일반적으로 비선형 L-C 직·병렬 철공진 회로는 변압기의 인덕턴스와 병렬 커패시턴스 성분 사이의 공진현상도 함께 고려되므로, L-C 직렬 철공진 회로에 비해 철공진의 발생 가능성이 증가한다[2]. 이러한 L-C 직·병렬 철공진 현상은 DC 배전계통이 연계된 경우에도 나타날 수 있으며, 그림 1과 같이 계통전원부(E_S)와 차단시 동작 시 극간 커패시터(C_{CB}), 변압기(L_{sat}), 컨버터 LC 필터의 커패시터 성분(C_{CVT}) 등으로 구성된다. 여기서, 그림 1(a)는 변압기의 2차측을 1차측으로 등가화하여 나타낸 것으로, r_1 과 L_1 , r_2 와 L_2 는 각각 1차측 및 2차측의 권선저항과 누설 인덕턴스를 의미하며, r_{iron} 은 철손전류를 나타내는데, 상기 요소들은 철공진 발생에 큰 영향을 미치지 않기 때문에, 이를 생략하여 간략화 하면 그림 1(b)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) 비선형 L-C 직·병렬 철공진 회로



(b) 간략화된 등가회로
 [그림 1] DC 배전계통에서 L-C 직·병렬 철공진 등가회로

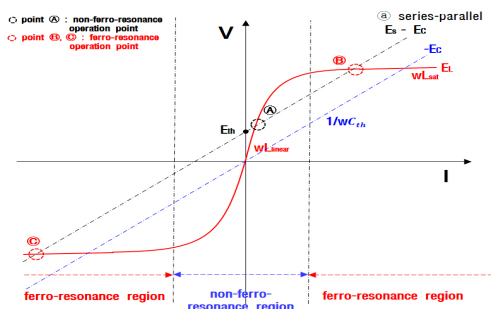
한편, 그림 1(b)의 철공진 회로의 테브난 등가 커패시턴스
 와 등가전압을 나타내면 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$C_{th} = C_{CB} + \frac{C_{PCS}}{n^2} \quad (1)$$

$$E_{th} = E_s \times \frac{n^2 C_{CB}}{n^2 C_{CB} + C_{CVT}} \quad (2)$$

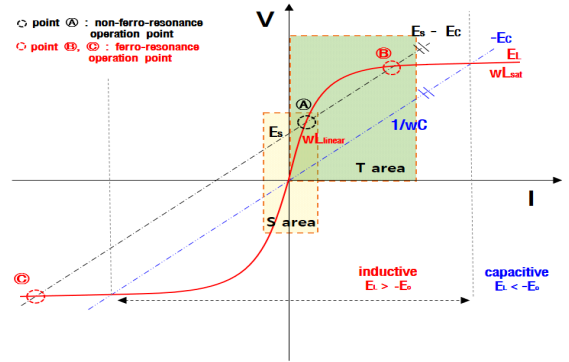
여기서, C_{th} : DC 배전계통에서 테브난 등가 커패시턴스
 [F], C_{CB} : 차단기의 직렬 커패시턴스[F], C_{CVT} : 컨버터 LC
 필터의 병렬 커패시턴스[F], n : 변압기의 권수비, E_{th} : DC
 배전계통에서 테브난 등가 전압[V]

본 논문에서 제시한 L-C 직·병렬 철공진 회로에서 전류와
 전압을 도식적 해석수법에 의하여 나타내면 그림 2와 같다.
 여기서, 그림 2의 ㉠직선과 같이, 변압기의 인덕터 양단전압
 (E_L)과 $E_S - E_C$ 의 교차점은 3개까지 발생할 수 있으며, 철공진
 에 의해 하나의 교차점에서 다른 교차점으로 순간적인 전압
 상승이 발생할 가능성이 있다.



[그림 2] L-C 직·병렬 회로에 대한 철공진의 도식적인 해석

또한, 상기에서 제시한 DC 접지전위 상승을 도식적인 해석
 수법으로 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 변압기는 정상상
 태에서 무류점 미만인 S영역에서 안정적으로 운용되지만,
 DC 접지전위 상승에 의해 변압기가 포화되면 T영역에서 운
 용되어, 변압기의 인덕터 양단전압(E_L)과 $E_S - E_C$ 의 교차점이
 추가적으로 발생하여 철공진을 일으킬 수 있다.

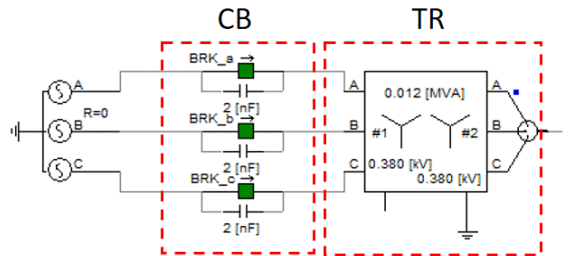


[그림 4] DC 접지전위 상승에 따른 철공진의 도식적인 해석

3. PSCAD/EMTDC에 의한 LVDC 배전계통의 모델링

3.1 AC 전원부 모델링

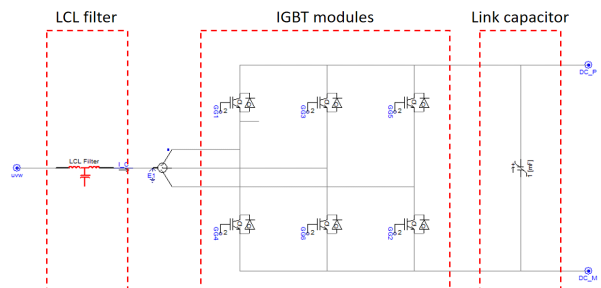
AC 전원부는 그림 5와 같이, 3상 차단기, 변압기로 구성된
 다. 여기서, 3상 차단기는 2[nF]의 극간 커패시터를 적용하며,
 변압기는 3각철심 구조에 Y-Yg 결선방식이며, 12[kVA]의
 용량을 가진다.



[그림 5] AC 전원부 모델링

3.2 메인 컨버터 모델링

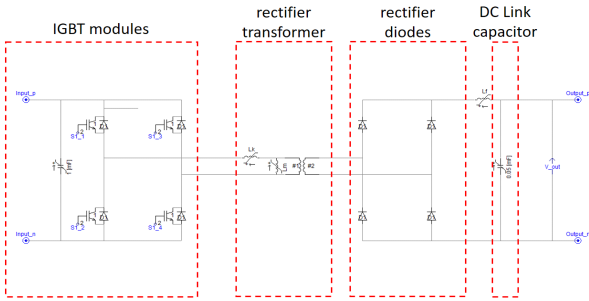
메인 컨버터는 그림 6과 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC
 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, LCL 필터는 고주파
 스위칭 노이즈를 저감 시키기 위해 사용되고, IGBT 모듈은
 3상 AC 전력을 DC로 변환하며, DC 링크 커패시터는 출력단
 의 직류 전압을 안정적으로 유지하는 역할을 수행한다.



[그림 6] 메인 컨버터 모델링

3.3 구간 컨버터 모델링

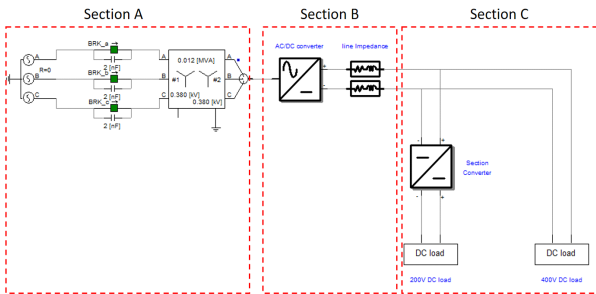
구간 컨버터는 그림 7과 같이, full-bridge 형태의 IGBT 모듈과 정류기용 변압기, 정류용 다이오드 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다.



[그림 7] 구간 컨버터 모델링

3.4 전체 시스템 모델링

L-C 직·병렬 회로에 의한 철공진 특성을 분석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용하여 400V급 LVDC 배전계통의 모델링을 수행하면, 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Section A는 3상 차단기와 변압기로 구성되고, Section B는 메인 컨버터와 DC 모의선로를 나타내며, Section C는 구간 컨버터와 DC 부하 등으로 구성된다.



[그림 8] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

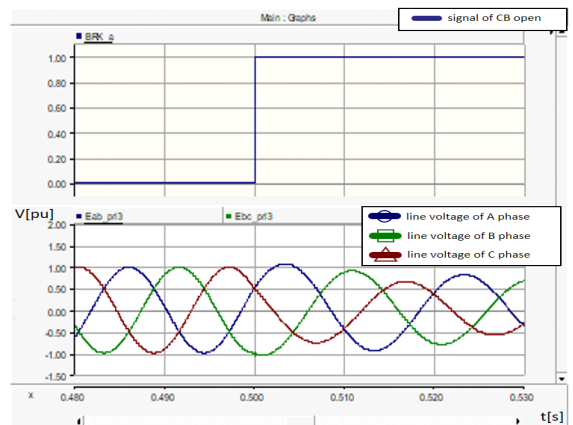
철공진 특성을 분석하기 위한 400V급 DC 배전계통의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 3상 차단기의 커패시턴스는 2[nF]을 적용하며, 변압기는 Y-Yg 결선 방식이며, 12[kVA]의 용량을 가진다. 또한, 메인 컨버터는 12[kW]의 용량을 가지고 3상 380[V]의 AC 전압을 400[V]의 DC 전압으로 변환하며, 필터의 커패시턴스는 260[uF] 또는 100[uF]으로 산정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

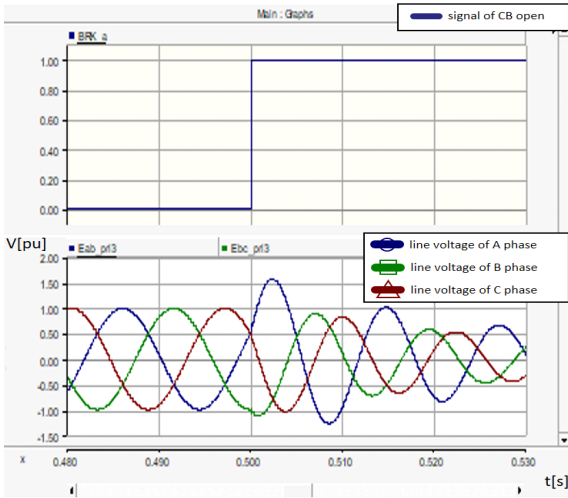
항 목	파라메타	내 역
3상 차단기	극간 커패시턴스 [nF]	2
	연계방식	Y-Yg
변압기	철심구조	3각 철심
	정격용량 [kVA]	12
	변압비 [V]	380/380
메인 컨버터	정격용량 [kW]	12
	변압비 [V]	380/400
	필터 커패시터 [uF]	260, 100
	링크 커패시터 [uF]	1,000
구간 컨버터	정격용량 [kW]	5
	변압비 [V]	400/200
	링크 커패시터 [uF]	50

4.2 400V LVDC 배전계통에서 철공진 특성

표 1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 철공진 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9(a)는 메인 컨버터의 필터 커패시터가 260[uF]인 경우의 철공진 특성으로, 차단기 동작 신호와 변압기 2차측 전압 특성을 나타낸 것이다. 따라서, 1[pu]의 계통전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 개방되는 경우, 변압기 2차측 전압이 거의 상승하지 않아 철공진이 발생하지 않음을 알 수 있다. 즉, 변압기와 차단기의 극간 커패시턴스, 메인 컨버터의 필터 커패시터로 구성된 L-C 직병렬 회로의 용량성 리액턴스가 변압기 선형영역의 유도성 리액턴스보다 크기 때문에, 철공진 발생 영역을 회피함을 알 수 있다. 한편, 그림 9(b)는 메인 컨버터의 필터 커패시터가 100[uF]인 경우의 철공진 특성으로, 차단기 동작 신호와 변압기 2차측 전압 특성을 나타낸 것이다. 따라서, 1[pu]의 계통전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 개방되는 경우, 변압기 2차측 전압이 1.6[pu] 정도 상승하여 철공진이 발생함을 알 수 있다. 즉, 변압기와 차단기의 극간 커패시턴스, 메인 컨버터의 필터 커패시터로 구성된 L-C 직병렬 회로의 용량성 리액턴스가 변압기 선형영역의 유도성 리액턴스보다 작고, 포화 영역의 유도성 리액턴스보다 크기 때문에 철공진 발생 영역에 존재하는 것을 알 수 있다.



(a) 필터 커패시터가 260[uF]인 경우



(b) 필터 커패시터가 100[uF]인 경우
 [그림 9] 400V LVDC 배전계통의 철공진 특성

5. 결 론

본 논문에서는 DC 배전계통이 기존 AC 배전계통에 연계될 경우, L-C 직·병렬 회로에 의하여 발생할 수 있는 철공진 특성을 분석하기 위하여, 도식적인 해석수법을 이용하여 DC 접지전위 상승을 고려한 변압기의 철공진 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 상기의 해석수법을 바탕으로 전력계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 400V급 DC 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 철공진 특성을 분석한 결과, L-C 직·병렬 회로의 커패시턴스 값에 따라 철공진 전압이 크게 증가하여 DC 전기설비의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 이후동 외4, “±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 보호 협조 운용방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 24권 제3호, pp.533-542, 2023.
- [2] 태동현 외4, “불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승을 고려한 ESS용 연계변압기의 철공진 특성에 관한 연구”. 한국산학기술학회 논문지, 24권 제10호, pp.836-847, 2023.