불평형 부하전류를 고려한 LVDC용 변압기의 철공진 모델링 및 운용특성에 관한 연구

김세진*, 이민행*, 김경화*, 이나경*, 노대석*
*한국기술교육대학교
e-mail:tpwls1578@koreatech.ac.kr

Modeling and Operation Characteristics of Ferro-resonance in LVDC Transformer Considering Unbalanced Load Current

Se-Jin Kim*, Min-Haeng Lee*, Kyung-Hwa Kim*, Na-Kyung Lee*, Dae-Seok Rho*
*Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 신재생에너지 전원의 증가 및 DC 부하의 도입으로 인해 DC 배전계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 DC 배전계통은 기존 AC 배전계통과 달리 다수의 전력변환기기가 연계되어, L-C 필터, DC 링크 커패시터 등에 의해 계통의 등가 커패시턴스가 상승하여, 비교적 낮은 전압 레벨에서도 변압기의 철심 포화에 따른 철공진이 발생할 가능성이 있다. 또한, 부하 불평형에 의한 순환전류는 LVDC용 변압기에 유입되어 철심을 포화시키고, 철공진을 발생시켜 DC 전기설비에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 불평형 부하전류에 의한 LVDC용 변압기의 철공진 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 LVDC용 변압기의 철공진 모델링을 수행한다. 상기의 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 LVDC용 변압기의 철공진 특성을 분석한 결과, 부하 불평형률에 따라 철공진 전압이 상승하여 DC 전기설비에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

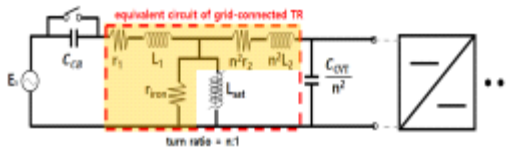
1. 서 론

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가에 의하여 전력변환 손실 저감, 전송용량 증대 등의 장점이 있는 DC 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 기존에 운용되던 AC 배전계통과 달리, DC 배전계통은 계통연계 및 사용전 검사를 위한 기술기준이 미흡하고 안전운용 절차 및 운용 경험이 부족하므로, DC의 전기적 특성을 고려한 안전성 평가방안이 필요한 실정이다[1]. 또한, 부하 불평형에 의해 발생한 순환전류가 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 불평형 부하전류를 고려한 철공진 발생 메커니즘을 제시한다[2]. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 LVDC용 변압기의 철공진 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 LVDC용 변압기의 철공진 특성을 분석한 결과, 부하 불평형률에 따라 철공진 전압이 상승하는 것을 알 수 있다.

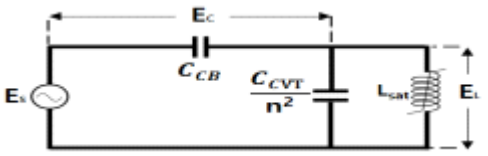
2. LVDC용 변압기의 철공진 발생 메커니즘

2.1 L-C 직·병렬 회로의 철공진 발생 메커니즘

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. 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}), 메인 컨버터 LCL 필터의 커패시터 성분(C_{CVT}) 등으로 구성된다. 여기서, 그림 1(a)는 변압기의 2차측을 1차측으로 등가화하여 나타낸 것으로, r_1과 L_1, r_2와 L_2는 각각 1차측 및 2차측의 권선저항과 누설 인덕턴스를 의미하며, riron은 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

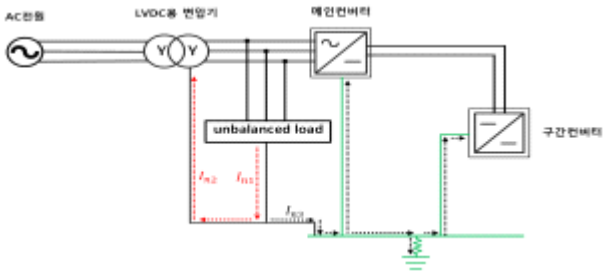


(b) 간략화된 등가회로

[그림 1] DC 배전계통에서 L-C 직·병렬 철공진 등가회로

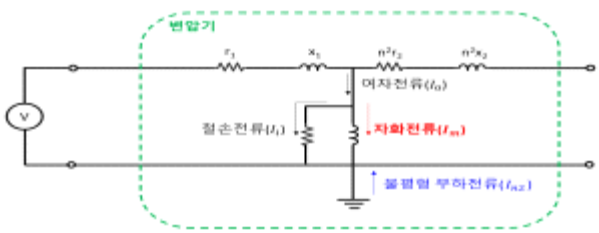
2.2 불평형 부하전류에 의한 철공진 발생 메커니즘

불평형 부하에 의한 순환전류(I_{n1})는 그림 2와 같이, AC 부하측 중성선에 흐르고, 대부분의 전류(I_{n2})가 변압기의 중성선을 통하여 순환하게 되고, 일부 전류(I_{n3})는 DC 측의 메인 컨버터 및 구간컨버터의 외함으로 유입된다. 이때, 변압기에 유입된 불평형 부하전류가 정상상태의 여자전류에 영향을 미쳐 변압기를 포화시킬 가능성이 있으며, 이로 인해 LVDC 변압기 2차측의 전압 파형이 왜곡되거나 서지가 발생할 수 있다.



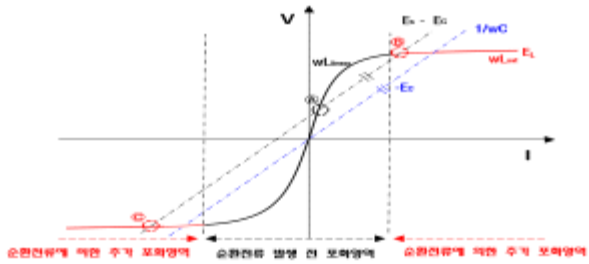
[그림 2] 불평형 부하에 의한 순환전류 발생 메커니즘

즉, 그림 2에서 LVDC용 변압기측 불평형 부하전류(I_{n2})가 정상상태의 변압기 자화전류(I_m)에 영향을 미쳐서, 철심포화를 증대시킬 수 있다. 한편, 그림 3과 같이 중성선을 따라 유입되는 불평형 부하전류의 위상이 자화전류의 위상과 동일하면, 자화 리액터에 정상상태보다 더 큰 전류가 흘러 변압기의 철심포화가 심화되어, 변압기의 철공진 발생 가능성이 증가할 수 있다.



[그림 3] 불평형 부하전류에 의한 변압기 철심포화 개념도

또한, 그림 3과 같이 불평형 부하전류에 의한 변압기 철심포화가 발생한 경우에 대하여 도식적인 해석수법을 적용하여 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, LVDC용 변압기는 정상상태 시 자화곡선의 무릎점 미만인 Ⓐ점에서 운용되지만, 불평형 부하전류의 유입에 의하여 변압기가 포화되는 경우, 무릎점을 초과한 Ⓑ, Ⓒ점에서 운용된다. 따라서, 변압기 인덕터 양단전압(E_L)과 $E_S - E_C$의 교차점은 3개까지 발생할 수 있으며, 철공진에 의해 하나의 교차점에서 다른 교차점으로 순간적으로 전압이 상승할 가능성이 있다.

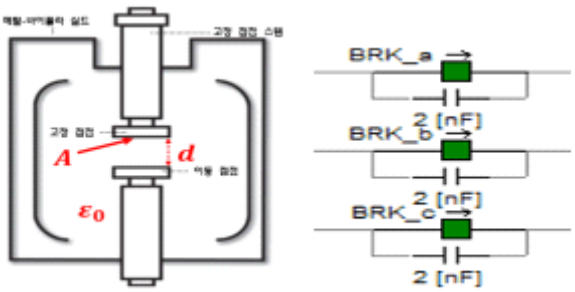


[그림 4] 불평형 부하전류에 의한 철공진의 도식적인 해석

3. PSCAD/EMTDC에 의한 LVDC용 변압기의 철공진 모델링

3.1 차단기 극간 커패시턴스

차단기 극간 커패시턴스의 모델링은 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 5의 (a)는 3상 차단기의 구조를 나타내는데, 차단기 극간 커패시턴스(C_{CB})는 식 (1)에 의하여, 진공의 유전율(ε_0), 극판의 넓이(A), 차단기 극간 거리(d)를 고려하여 2[nF]으로 산정한다. 이를 바탕으로 차단기의 모델링을 수행하면 그림 5 (b)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) 3상 차단기의 구조 (b) 차단기 모델링

[그림 5] 차단기 극간 커패시턴스 모델링

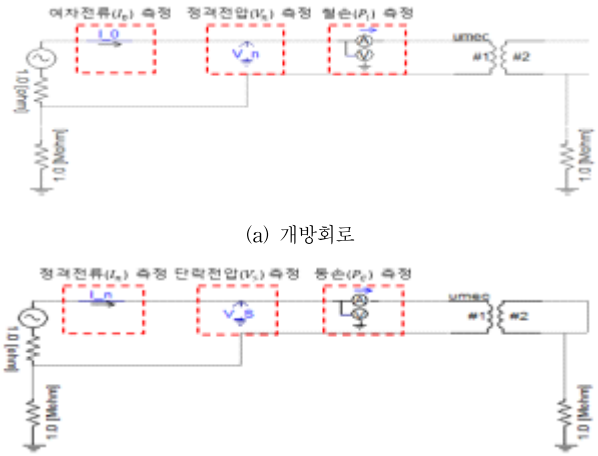
$$C_{CB} = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

여기서, C_{CB} : 차단기 극간 커패시턴스, ε_0 : 진공의 유전

율, A : 극판의 넓이, d : 차단기 극간 거리

3.2 LVDC용 변압기

PSCAD 내 변압기 라이브러리는 자화전류와 철손전류의 합인 여자전류만 확인할 수 있기 때문에, 철심 포화에 직접적으로 영향을 미치는 자화전류의 포화곡선을 정확하게 출력할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 그림 6과 같이 개방 및 단락회로 모델링을 통해 변압기의 등가회로 모델링을 수행한다. 먼저, 그림 6의 (a)와 같이 개방회로 모델링을 통해 철손(P_i), 정격전압(V_n), 여자전류(I_0)를 측정하고, 식 (2) ~ 식 (5)에 의하여 철손저항(r_i)과 자화 리액턴스(X_m)를 산정한다. 또한, 그림 6의 (b)와 같이 단락회로 모델링을 통해 동손(P_C), 단락전압(V_S), 정격전류(I_n)를 측정하고, 식 (6) ~ 식 (8)에 의하여 1차측과 2차측의 합성 권선 저항(r_{eq}) 및 누설 리액턴스(X_{eq})를 산정한다. 이를 바탕으로 수행한 변압기의 등가회로 모델링을 나타내면 그림 7과 같다.



(a) 개방회로

(b) 단락회로

[그림 6] 개방 및 단락회로 모델링

$$I_i = \frac{P_i}{V_n} \tag{2}$$

$$I_m = \sqrt{(I_0)^2 - (I_i)^2} \tag{3}$$

$$r_i = \frac{V_n}{I_i} \tag{4}$$

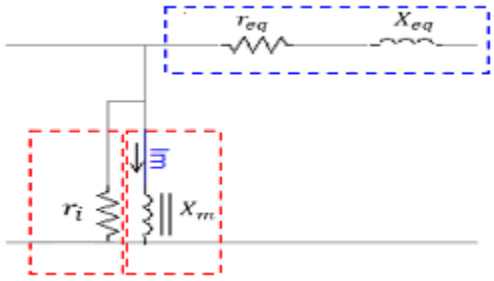
$$X_m = \frac{V_n}{I_m} \tag{5}$$

$$Z_S = \frac{V_S}{I_n} \tag{6}$$

$$r_{eq} = \frac{P_C}{I_n^2} \tag{7}$$

$$X_{eq} = \sqrt{(Z_S)^2 - (r_{eq})^2} \tag{8}$$

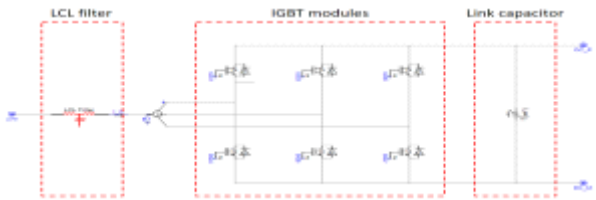
여기서, I_i : 철손전류, P_i : 철손, V_n : 정격전압, I_m : 자화전류, I_0 : 여자전류, r_i : 철손저항, X_m : 자화 리액턴스, Z_S : 내부 임피던스, V_S : 단락전압, I_n : 정격전류, r_{eq} : 1차측과 2차측의 합성 권선저항, P_C : 동손, X_{eq} : 1차측과 2차측의 합성 누설 리액턴스



[그림 7] 변압기 등가회로 모델링

3.3 메인 컨버터

메인 컨버터는 그림 8과 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, LCL 필터는 고주파 스위칭 노이즈를 저감 시키기 위해 사용되고, 이 필터의 커패시턴스에 의하여 L-C 직·병렬 회로가 형성되어 변압기의 철공진을 발생시킬 수 있다.



[그림 8] 메인 컨버터 모델링

3.4 불평형 부하

불평형 부하의 모델링을 수행하면 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 9의 (a)는 AC 불평형 부하의 모델링이며, 그림 9의 (b)는 3상에 대한 정전력 부하를 나타낸다.

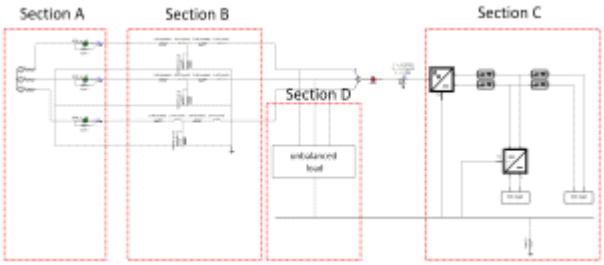
(a) 불평형 부하

(b) 정전력 부하

[그림 9] 불평형 부하에 의한 순환전류 모델링

3.5 전체 시스템

불평형 부하전류에 의한 LVDC용 변압기의 철공진 특성을 분석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용하여 400V급 LVDC 배전계통의 모델링을 수행하면, 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Section A는 3상 차단기와 차단기 극간 커패시터로 구성되고, Section B는 LVDC용 변압기 모델링을 나타내며, Section C는 메인 컨버터를 포함한 DC 배전계통이고, Section D는 불평형 부하전류 모델링을 나타낸다.



[그림 10] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

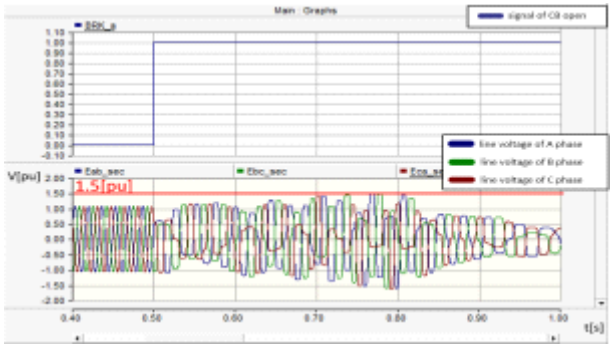
철공진 특성을 분석하기 위한 400V급 DC 배전계통의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 3상 차단기의 커패시턴스는 2[nF]을 적용하며, 변압기는 Y-Yg 결선 방식이며, 12[kVA]의 용량을 가진다. 또한, 메인 컨버터는 12[kW]의 용량을 가지고 3상 380[V]의 AC 전압을 400[V]의 DC 전압으로 변환하며, 필터의 커패시턴스는 260[uF]으로 산정한다. 한편, 불평형 부하전류를 발생시키기 위하여 5[kW]의 부하용량과 10[%], 30[%]의 불평형률을 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목	파라메타	내 역
3상 차단기	극간 커패시턴스[nF]	2
변압기	연계방식	Y-Yg
	철심구조	3각 철심
	정격용량[kVA]	12
	변압비[V]	380/380
메인 컨버터	정격용량[kW]	12
	변압비[V]	380/400
	필터 커패시터[uF]	260
	링크 커패시터[uF]	1,000
불평형 부하	부하용량[kW]	5
	불평형률[%]	10, 30

4.2 불평형 부하에 의한 철공진 특성

표 1의 불평형 부하전류 발생 조건에서, 불평형률이 30[%]인 경우, 철공진 특성을 나타내면 그림 11과 같다. 여기서, 1[pu]의 계통전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 개방되는 경우, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압 파형이 왜곡되며 순간적으로 약 1.5[pu]까지 상승함을 알 수 있어, 변압기 2차측에 연계된 DC 설비의 안전성에 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



[그림 11] LVDC용 변압기의 불평형 부하전류에 의한 철공진 특성

상기의 과정과 동일하게, 표 1의 조건에 따라 부하 불평형률에 따른 철공진 전압을 산정하면 표 2와 같다. 이 표에서와 같이, 10[%]의 불평형률을 고려한 경우, 철공진이 거의 발생하지 않으나, 30[%]의 불평형률을 고려한 경우, 철공진이 발생하여 전압이 순간적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 불평형 부하전류가 변압기의 철심을 더욱 포화시키고, 철공진 발생 가능성을 증가시키는 것을 알 수 있다.

[표 2] 불평형 부하전류를 고려한 철공진 특성

부하용량[kW]	부하 불평형률[%]	최대 철공진 전압[pu]
5	10	1.1
	30	1.5

5. 결 론

본 논문에서는 불평형 부하전류에 의하여 발생할 수 있는 철공진 특성을 분석하기 위하여, 도식적인 해석수법을 이용하여 불평형 부하전류를 고려한 LVDC용 변압기의 철공진 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 상기의 해석수법을 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 400V급 DC 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 철공진 특성을 분석한 결과, 부하 불평형률에 따라 철공진 전압이 증가하여 DC 전기설비의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 이민행 외 5, “LVDC 배전계통의 CMV 및 서지 운용특성에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 25권 제9호, pp.491-503, 2024.

[2] 태동현 외 4, “불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승을 고려한 ESS용 연계변압기의 철공진 특성에 관한 연구”. 한국산학기술학회 논문지, 24권 제10호, pp.836-847, 2023.