

UPS용 변압기의 철공진 모델링 및 운용특성에 관한 연구

김세진, 장형안, 김윤희, 이민행, 노대석*

한국기술교육대학교

e-mail:tpwls1578@koreatech.ac.kr

Modeling and Operation Characteristics of Ferro-resonance in UPS Transformer

Se-Jin Kim*, Hyeong-An Jang*, Yun-Ho Kim*, Min-Haeng Lee*, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 대용량 DC 데이터 센터와 같이 안정적인 전력 공급을 요구하는 설비가 증가함에 따라, 신뢰성 확보와 품질 개선 등의 장점이 있는 무정전 전원 공급장치(uninterruptible power supply, UPS)가 도입되고 있다. 여기서, UPS는 배터리와 전력변환기기가 적용되는데, 이러한 기기는 계통의 등가 커패시턴스를 증가시켜 차단기 동작 등의 과도 상태 시, 변압기 비선형회로에 의한 철공진 현상을 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 UPS용 변압기의 비선형회로에 의한 철공진 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, 변압기부, UPS부 등으로 구성된 UPS용 변압기의 철공진 모델링을 수행한다. 상기에서 제안한 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 철공진 현상을 분석한 결과, AC/DC 컨버터 필터의 커패시턴스에 따라 비선형회로가 형성되어 철공진 현상이 발생하고, 이로 인해 UPS용 변압기 2차측의 전압이 1.6[pu] 정도로 상승하여 UPS 설비에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

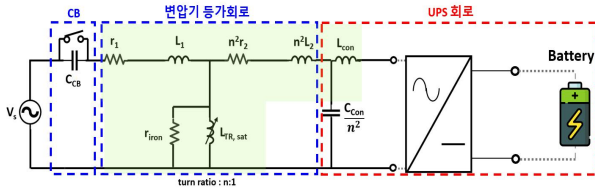
2. UPS용 변압기의 철공진

발생 메커니즘

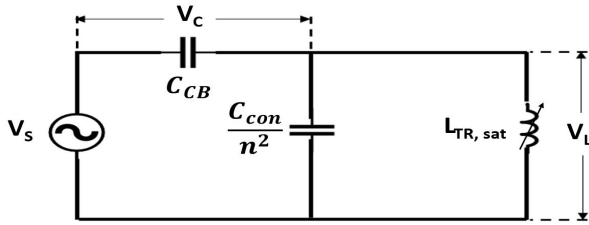
1. 서 론

최근, 사물인터넷(IoT), AI 기술의 발전에 따라 데이터 센터의 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 전력 공급의 신뢰성 확보, 품질 개선 등의 장점이 있는 무정전 전원 공급장치(uninterruptible power supply, UPS)가 도입되고 있다[1]. 하지만, UPS의 전기적 특성을 고려한 전기적 위해요인에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히, 차단기 동작 등에 의한 UPS용 변압기의 철공진 현상이 순간적인 전압 상승을 발생시켜 UPS 설비에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 변압기 비선형회로에 의한 UPS용 변압기의 철공진 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, 비선형회로부, UPS부 등으로 구성된 UPS용 변압기의 철공진 모델링을 수행한다. 상기에서 제안한 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 철공진 현상을 분석한 결과, AC/DC 컨버터 필터의 커패시턴스에 따라 철공진 현상이 발생하고, 이에 따라 UPS용 변압기 2차측의 전압이 1.6[pu] 정도로 상승하여 UPS 설비에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

UPS용 변압기의 1차측과 2차측은 철심을 통해 자기적으로 연결되어 있는데, 제한된 철심의 투자율로 인하여 전류가 증가하더라도 자속은 포화된다. 이러한 포화특성을 변압기의 비선형 특성이라고 하며, 차단기가 동작하거나 서지 등의 과전압이 발생하는 경우, 변압기는 비선형 특성에 의해 순간적으로 포화영역에 도달하여 인덕턴스가 매우 작아지게 되어, 철공진 현상을 일으킬 가능성이 있다[1]. 즉, UPS에서 철공진은 그림 1과 같이 변압기의 비선형회로에 의하여 발생할 수 있다. 여기서, UPS용 변압기의 비선형회로는 그림 1 (a)와 같이 AC 전원부(V_s)와 차단기의 극간 커패시턴스(C_{CB}), 변압기의 인덕턴스($L_{TR,sat}$), AC/DC 컨버터 LC 필터의 인덕턴스(L_{con})와 커패시턴스(C_{con}) 등으로 구성된다. 또한, 그림 1 (a)의 r_1 과 L_1 , r_2 와 L_2 는 각각 1차측 및 2차측의 권선저항과 누설 인덕턴스, r_{iron} 은 철손 저항을 의미하고, L_{con} 은 AC/DC 컨버터 LC 필터의 인덕턴스를 나타내는데, 상기 요소들은 ferro-resonance 발생에 큰 영향을 미치지 않기 때문에, 이를 생략하여 등가회로로 나타내면 그림 1 (b)와 같다.



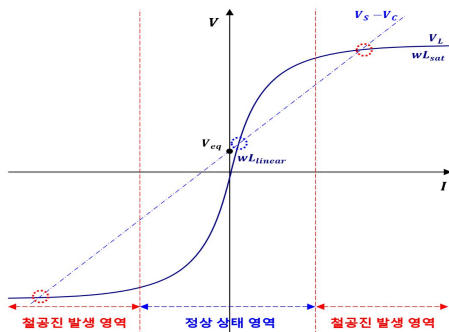
(a) 변압기의 비선형회로



(b) 간략화된 등가회로

[그림 1] UPS용 변압기의 비선형회로도

본 논문에서는 철공진 현상을 해석하기 위하여, 도식적인 해석수법(graphical solution)을 채용하는데, 이 방법은 직렬회로의 전압원, 커패시터, 인덕터 특성을 바탕으로 시스템의 해를 도식적으로 구하는 것이다[2]. 즉, 전류와 전압에 대한 철공진 특성을 나타내면, 변압기의 선형회로는 하나의 교차점에서 해가 결정되지만, 비선형회로는 다수의 해가 존재할 가능성이 있다. 여기서, 그림 2는 변압기의 비선형회로의 특성을 나타내는데, V_L 과 $V_s - V_C$ 의 교차점은 정상 상태 영역에서 1개, 철공진 발생 영역에서 2개가 존재함을 알 수 있다. 이에 따라, 차단기 동작 등에 의하여 변압기의 철심이 포화되는 경우, 철공진 현상이 발생하여 하나의 교차점에서 다른 교차점으로 순간적인 전압 상승이 발생할 수 있다. 특히, UPS는 배터리와 AC/DC 컨버터의 높은 커패시턴스 성분에 의하여 비선형회로로 등가화되기 때문에, 철공진의 발생 가능성이 증가하게 된다.

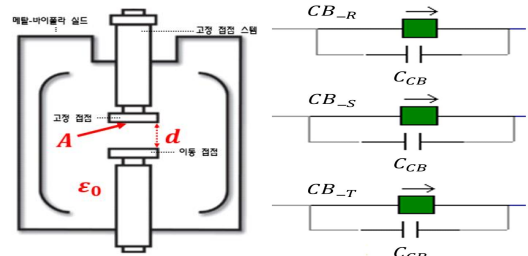


[그림 2] 변압기 비선형회로에 대한 철공진의 도식적인 해석

3. PSCAD/EMTDC에 의한 UPS용 변압기의 철공진 모델링

UPS용 변압기의 비선형회로는 차단기부, 변압기부, UPS부 등으로 구성된다. 먼저, 차단기의 극간 커패시턴스의 모델링은 그

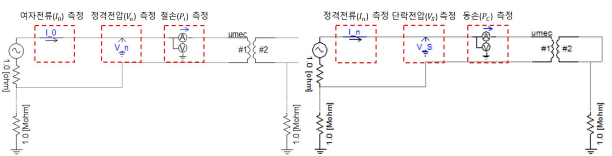
림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 3 (a)는 3상 차단기의 구조이며, 차단기의 극간 커패시턴스(C_{CB})는 진공의 유전율(ϵ_0), 극판의 넓이(A), 차단기 극간 거리(d)를 고려하여 산정하며, 이를 바탕으로 그림 3 (b)와 같이 차단기와 병렬구조로 나타낸다.



(a) 3상 차단기의 구조 (b) 차단기 극간 회로도

[그림 3] 차단기 극간 커패시턴스 모델링

또한, UPS용 변압기의 등가회로 모델링을 수행하기 위하여, 자화 리액터의 포화곡선을 바탕으로 변압기 2차측의 개방 및 단락회로를 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 그림 4 (a)는 개방회로 모델링으로, 철손(P_i), 정격전압(V_n), 여자전류(I_0) 등에 의하여 철손저항(r_i)과 자화 리액턴스(X_m)는 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 그림 4 (b)는 단락회로 모델링으로, 동손(P_C), 단락전압(V_S), 정격전류(I_n) 등에 의하여 1차측과 2차측의 합성 권선저항(r_{eq}) 및 누설 리액턴스(X_{eq})는 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로 UPS용 변압기의 등가회로를 나타내면 그림 5와 같고, 각 상의 포화곡선을 분석하기 위하여 단상 변압기 3대를 등가화하여 Yg- Δ 결선방식을 적용한다.



(a) 개방 회로

(b) 단락 회로

[그림 4] 개방 및 단락회로 모델링

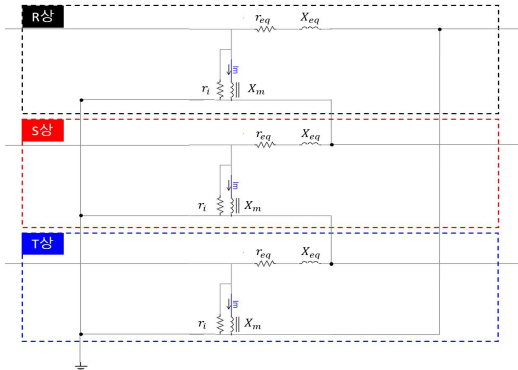
$$r_i = \frac{V_n^2}{P_i} \quad (1)$$

$$X_m = \frac{V_n}{\sqrt{(I_0)^2 - \left(\frac{P_i}{V_n}\right)^2}} \quad (2)$$

$$r_{eq} = \frac{P_C}{I_n^2} \quad (3)$$

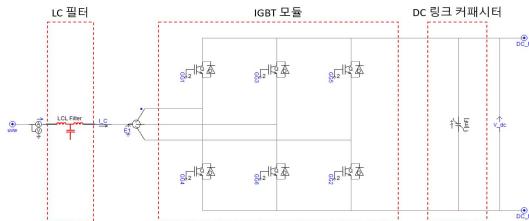
$$X_{eq} = \sqrt{\left(\frac{V_S}{I_n}\right)^2 - \left(\frac{P_C}{I_n^2}\right)^2} \quad (4)$$

여기서, r_i : 철손 저항, V_n : 정격전압, P_i : 철손, X_m : 자화 리액턴스, I_0 : 여자전류, r_{eq} : 1차측과 2차측의 합성 권선저항, P_C : 동손, I_n : 정격전류, X_{eq} : 1차측과 2차측의 합성 누설 리액턴스, V_S : 단락전압



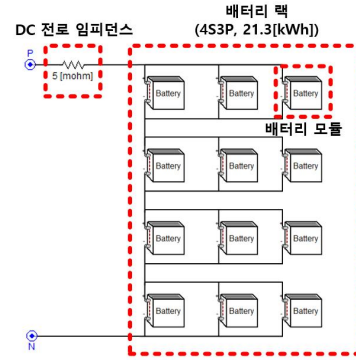
[그림 5] UPS용 변압기 등가회로 모델링

한편, UPS부는 AC/DC 컨버터, 배터리, 인버터로 구성되는데, AC/DC 컨버터는 그림 6과 같이 LC 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, LC 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고조파와 노이즈를 저감시키지만, 변압기 비선형회로를 형성하여 철공진 현상을 발생시킬 수 있다. 또한, IGBT 모듈은 3상 AC 230[V]를 DC 125[V]로 변환하고, DC 링크 커패시터는 출력단의 DC 전압을 안정적으로 유지하는 역할을 수행한다.



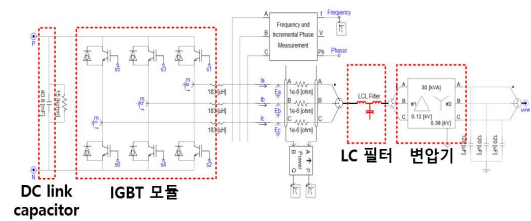
[그림 6] AC/DC 컨버터의 모델링

또한, PSCAD/EMTDC에서 제공하는 배터리 라이브러리를 바탕으로 배터리 랙, DC 전로로 구성된 UPS용 배터리의 모델링을 수행하면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리 랙은 32[V]의 배터리 모듈을 4S3P로 연결하여, 125[V]의 정격전압과 21.3[kWh]의 정격용량으로 구성한다. 한편, DC 전로는 부스바, MC 등을 고려하여 5[mΩ]의 임피던스를 적용한다.



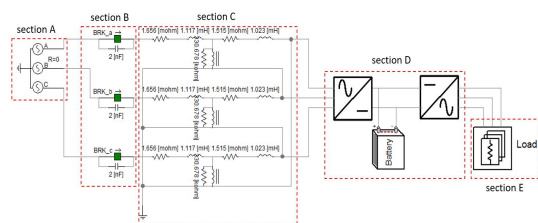
[그림 7] 배터리의 모델링

한편, UPS의 인버터 모델링은 그림 8과 같이 DC 링크 커패시터, IGBT 모듈, LC 필터, 변압기 등으로 나타낼 수 있다. 여기서, DC 링크 커패시터는 입력단의 직류 전압을 안정적으로 유지하고, IGBT 모듈은 DC 125[V]의 전압을 3상 AC 120[V]의 전압으로 변환한다. 또한, LC 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감하기 위해 사용하며, 변압기는 Δ -Yg 결선 방식으로 120[V]/380[V]의 변압비를 적용한다.



[그림 8] 인버터의 모델링

상기의 내용을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, section A는 AC 380[V], 3상 4선식의 AC 전원부, section B는 차단기 극간 커패시턴스이고, section C는 변압기 등가회로를 나타낸다. 또한, section D는 AC/DC 컨버터, 배터리, 인버터 등으로 구성된 UPS부이고, section E는 10[kW]의 용량을 가진 수용가 부하 등을 나타낸다.



[그림 9] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

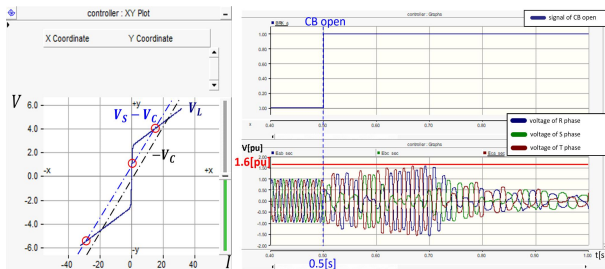
상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 UPS용 변압기의 철공진 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 3상 차단기의 커패시턴스는 2[nF]으로 산정하고, UPS용 변압기는 3각 철심구조의 Yg- Δ 결선방식으로 10[kVA]의 용량을 가지며, 380[V]/230[V]의 변압비를 적용한다. 또한, UPS용 변압기의 인덕턴스는 선형영역에서 2,526[mH], 비선형영역에서 105[mH]로 상정한다. 한편, AC/DC 컨버터의 링크 커패시터는 1,000[μ F]를 적용하고, 필터 커패시턴스는 제조사에서 제시한 260[μ F]와 가혹한 조건을 모의하기 위한 150[μ F]를 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목		내역
UPS용 변압기	3상 차단기	극간 커패시턴스[nF]
		2
		결선방식
		Yg- Δ
		철심구조
		3각 철심
UPS용 변압기	정격용량[kVA]	10
	변압비[V]	380/230
	선형영역의 인덕턴스[mH]	2,526
	비선형영역의 인덕턴스[mH]	105
	링크 커패시터[μ F]	1,000
AC/DC 컨버터	필터의 커패시턴스[μ F]	260, 150

4.2 비선형회로의 철공진 특성

표 1의 AC/DC 컨버터 조건에서, 필터의 커패시턴스가 150[μ F]인 경우, 철공진 특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10 (a)는 도식적인 해석수법에 따른 변압기의 I-V 곡선을 나타내는데, V_L 과 $V_S - V_C$ 가 3개의 교차점을 가지므로 ferro-resonance가 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 10 (b)는 차단기 동작신호와 변압기 2차측의 전압 특성을 나타내는데, 차단기가 0.5초에 개방되면 철공진에 의하여 변압기 2차측의 전압이 1.6[pu] 정도로 상승함을 알 수 있다.



(a) I-V 곡선 (a) 변압기 2차측의 전압 특성

[그림 10] 변압기 비선형회로의 철공진 특성

상기의 과정과 동일하게, 표 1의 조건에 따라 AC/DC 컨버터 필터의 커패시턴스에 따른 철공진 특성을 분석하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 260[μ F]의 필터 커패시턴스를 적용한 경우, 철공진이 거의 발생하지 않으나, 150[μ F]의 필터 커패시턴스를 적용한 경우, 철공진에 의하여 전압이 순간적으로 증가하는

것을 알 수 있다. 즉, AC/DC 컨버터의 커패시턴스에 따라 비선형회로가 형성되고, 이에 따라 철공진 현상이 발생하여 변압기 2차측에 연계된 UPS 설비의 안전성에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

[표 2] AC/DC 컨버터 필터의 커패시턴스에 따른 철공진 특성

AC/DC 컨버터 필터의 커패시턴스[μ F]	UPS용 변압기 2차측 전압[pu]
260	1.0
150	1.6

5. 결 론

본 논문에서는 변압기 비선형회로에 의하여 발생할 수 있는 철공진 특성을 분석하기 위하여, 도식적인 해석수법을 이용하여 UPS용 변압기의 철공진 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 상기의 해석수법을 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 UPS용 변압기의 철공진 모델링을 수행한다. 본 논문에서 제안한 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 철공진 현상을 분석한 결과, AC/DC 컨버터 필터의 커패시턴스에 따라 비선형회로가 형성되어 철공진 현상이 발생하고, 이로 인해 UPS용 변압기 2차측의 전압이 1.6[pu] 정도로 상승하여 UPS 설비에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00409639, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

참고문헌

- [1] 김지연 외 5, “LiB 기반 무정전전원장치의 안전기술 개발”, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp.126-127, 2023. 10.
- [2] 태동현 외 3, “ESS용 연계변압기의 포화에 따른 철공진 특성 모델링에 관한 연구”. 전기학회논문지, 70권 제1호, pp.051-060, 2021.