

PSCAD/EMTDC를 이용한 UPS용 변압기의 철공진 모델링 및 운용특성에 관한 연구

김세진*, 장형안*, 김혜원*, 최형석*, 노대석*

한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:tpwls1578@koreatech.ac.kr

Modeling and Operation Characteristics of Ferro-resonance in UPS Transformer Using PSCAD/EMTDC

Se-Jin Kim*, Hyeong-An Jang*, Hye-Won Kim*, Hyoung-Seok Choi*, Dae-Seok Rho*

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

요 약

최근, 대용량 DC 데이터 센터와 같이 안정적인 전력 공급을 요구하는 설비가 증가함에 따라, 신뢰성 확보와 품질 개선에 필수적인 무정전 전원 공급장치(uninterruptible power supply, UPS)가 도입되고 있다. 여기서, UPS의 전력변환장치는 계통의 등가 커패시턴스를 증가시켜 차단기 동작 등의 과도 상태 시, 변압기 비선형회로에 의한 철공진 현상을 발생시킬 수 있다. 특히, UPS의 배터리와 전력변환장치에 의한 접지 전위 상승과 UPS용 변압기 축의 불평형 부하전류 유입이 변압기 철심의 포화 현상을 가속화시키고, 철공진 현상을 발생시켜 변압기 및 UPS 전기설비에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 UPS용 변압기의 비선형회로에 의한 철공진 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, 변압기 비선형회로, 접지 전위 상승 모의장치, 불평형 부하전류 모의장치 등으로 구성된 UPS용 변압기의 철공진 모델링을 수행한다. 본 논문에서 제안한 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 철공진 현상을 분석한 결과, UPS용 변압기의 2차측 전압이 철공진 현상에 의하여 3.1[p.u.] 정도로 상승하여, UPS 전기설비에 심각한 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

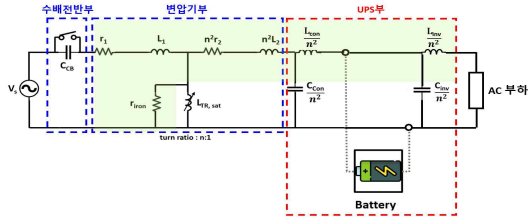
향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

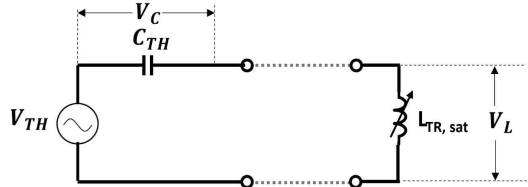
최근, 사물인터넷(IoT), AI 기술의 발전에 따라 데이터 센터의 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 전력 공급의 신뢰성 확보, 품질 개선 등의 장점이 있는 무정전 전원 공급장치(uninterruptible power supply, UPS)가 도입되고 있다[1]. 하지만, UPS의 전기적 특성을 고려한 전기적 위해요인에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히, 차단기 동작 등에 의한 UPS용 변압기의 철공진 현상이 순간적인 전압 상승을 발생시켜 UPS 설비에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 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, UPS용 변압기 2차측의 전압이 철공진 현상에 의하여 1.6[p.u.] 정도로 상승하여, 변압기 및 UPS 설비에 악영

2. UPS용 변압기의 철공진 발생 메커니즘

본 논문에서는 UPS용 변압기의 철공진 발생 메커니즘을 분석하기 위하여, 그림 1과 같이 수배전반부, 변압기부, UPS부 등으로 구성된 배전계통의 비선형회로를 상정한다. 여기서, 수배전반부는 차단기와 차단기 극간 커패시턴스(C_{CB}) 등으로 구성되고, 변압기부는 1차 및 2차 축의 권선 저항(r_1, r_2)과 1차 및 2차 축의 누설 리액턴스(L_1, L_2), 철손 저항(r_{iron}), 변압기의 인덕턴스($L_{TR, sat}$) 등으로 나타낼 수 있다. 또한, UPS부는 컨버터 및 인버터의 등가 인덕턴스(L_{con}, L_{inv})와 커패시턴스(C_{con}, C_{inv}) 등으로 구성된다. 여기서, 변압기부의 L_1, L_2 와 UPS부의 L_{con}, L_{inv} 는 상대적으로 매우 작은 값을 가지고, r_1, r_2 와 r_{iron} 과 같은 저항 성분은 철공진 발생에 거의 영향을 미치지 않으므로, 변압기 인덕터에 대하여 테브난 등가화하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

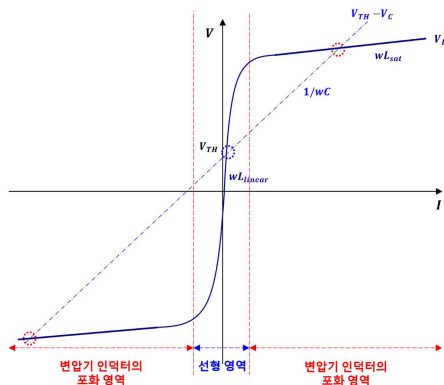


[그림 1] UPS를 포함한 배전계통의 비선형회로



[그림 2] UPS를 포함한 배전계통의 테브난 등가회로

그림 2의 테브난 등가회로의 전류와 전압에 대하여, 도식적인 해석수법으로 나타내면 그림 3과 같다[2]. 여기서, V_C 는 V_{TH} 의 절편과 $1/\omega C$ 의 기울기를 가진 직선으로 나타낼 수 있지만, V_L 은 포화현상에 의하여 일정 값 이상의 전류에서 비선형으로 변화하는 형태를 가진다. 즉, V_L 은 낮은 전류 영역에서 ωL_{linear} 의 높은 기울기 값을 가지지만, 일정 값 이상의 전류 영역에서 ωL_{sat} 의 매우 낮은 기울기 값을 가지므로, V_L 과 $V_{TH} - V_C$ 가 다수의 교차점을 가질 가능성이 있음을 알 수 있다. 이에 따라, 차단기 동작 시 변압기의 철심이 포화되면, 순간적으로 다수의 교차점이 발생하여 철공진 현상이 일어날 수 있다.



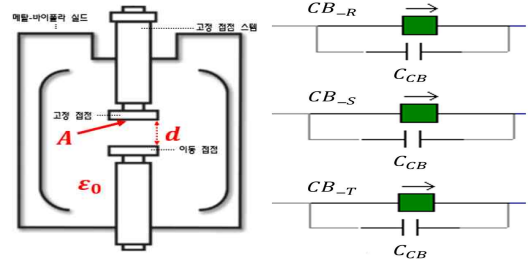
[그림 3] 변압기 비선형회로에 대한 철공진의 도식적인 해석

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 UPS용 변압기의 철공진 모델링

3.1 비선형회로

UPS용 변압기의 비선형회로는 차단기부, 변압기부, UPS부 등으로 구성된다. 먼저, 차단기의 극간 커패시턴스의 모델링은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 4 (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 4 (b)와 같이 차단기와 병렬구조로 나타낸다.



(a) 3상 차단기의 구조 (b) 차단기 극간 회로도

[그림 4] 차단기 극간 커패시턴스 모델링

또한, UPS용 변압기부는 각 상의 포화곡선을 분석하기 위하여, 단상 변압기 3대를 등가화하여 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 철손 저항(r_i)과 자화 리액턴스(X_m)는 변압기 2차 측의 개방을 통해 산정되는 철손(r_i), 정격전압(V_n), 여자 전류(I_0) 등에 의하여, 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 1차 및 2차 측의 합성 권선저항(r_{eq})과 누설 리액턴스(X_{eq})는 변압기 2차 측의 단락을 통해 산정되는 동손(P_C), 단락전압(V_S), 정격전류(I_n) 등을 고려하여, 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

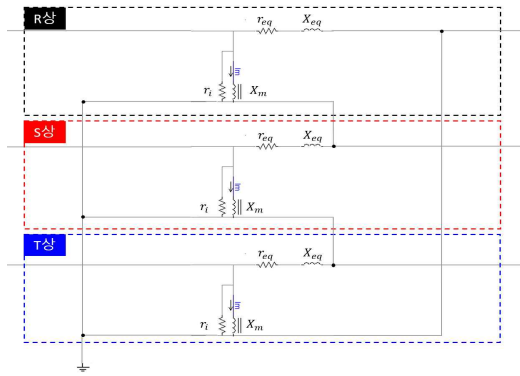
$$r_i = \frac{V_n^2}{P_i} \quad (1)$$

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

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

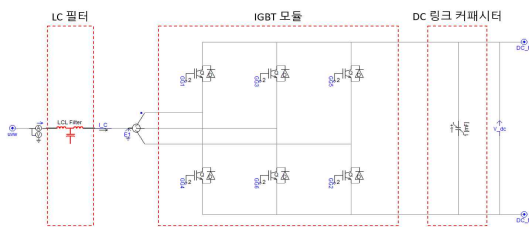
$$X_{eq} = \sqrt{(\frac{V_S}{I_n})^2 - (\frac{P_C}{I_n^2})^2} \quad (4)$$

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



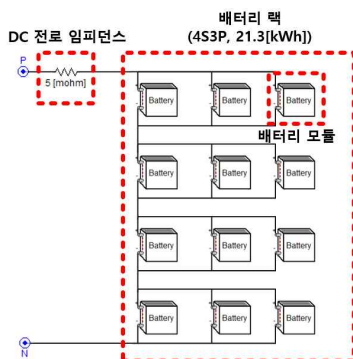
[그림 5] UPS용 변압기 등가회로 모델링

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.



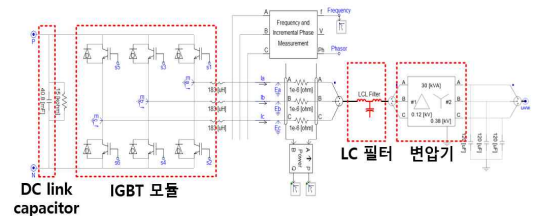
[그림 6] AC/DC 컨버터의 모델링

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

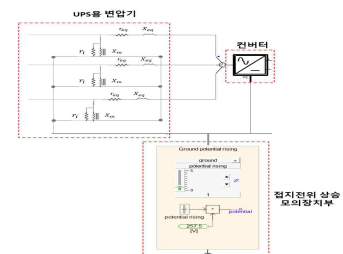
한편, UPS의 인버터 모델링은 그림 8과 같이 DC 링크 커패시터, IGBT 모듈, LC 필터, 변압기 등으로 나타낼 수 있다. 여기서, DC 링크 커패시터는 입력단의 직류 전압을 안정적으로 유지하고, IGBT 모듈은 DC 125[V]의 전압을 3상 AC 120[V]의 전압으로 변환한다. 또한, LC 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감하기 위해 사용하며, 변압기는 Δ-Yg 결선 방식으로 120[V]/380[V]의 변압비를 적용한다.



[그림 8] 인버터의 모델링

3.2 접지 전위 상승 모의장치

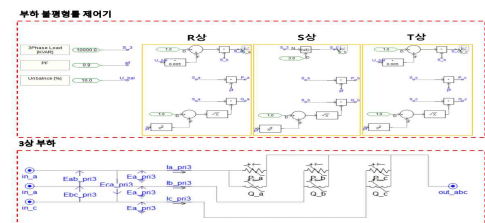
접지 전위 상승 모의장치는 그림 9와 같이 접지 전위 상승을 제어기와 DC 전압원으로 구성된다. 여기서, 접지 전위 상승을 제어기는 배터리의 정격전압을 입력받아, 변압기의 접지측에 설치된 DC 전압원을 제어하여 0[%]~5[%] 범위의 접지 전위 상승을 일으킨다.



[그림 9] 접지 전위 상승 모의장치의 모델링

3.3 불평형 부하전류 모의장치

불평형 부하전류 모의장치는 그림 10과 같이 부하 불평형을 제어기와 3상 부하로 구성된다. 여기서, 부하 불평형을 제어기는 임의의 불평형률을 바탕으로, 가변 임피던스로 구성된 3상 부하를 독립적으로 제어하여 불평형 부하전류를 발생시킨다.

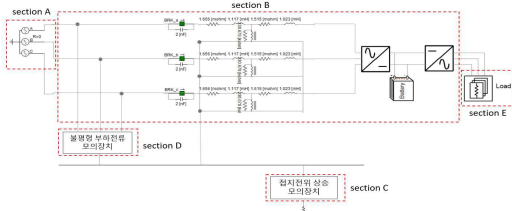


[그림 10] 불평형 부하전류 모의장치부의 모델링

3.4 전체 시스템

상기의 모델링을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 그림 11과

같다. 여기서, section A는 AC 전원이고, section B는 비선형회로를 나타내며, section C는 접지 전위 상승 모의장치, section D는 불평형 부하전류 모의장치, section E는 AC 부하를 나타낸다.



[그림 11] 전체 시스템의 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

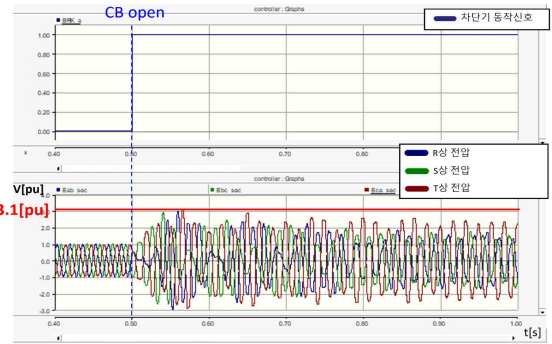
상기의 모델링을 바탕으로 UPS용 변압기의 철공진 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, UPS용 변압기의 인덕턴스는 선형영역에서 2,526[mH], 비선형영역에서 105[mH]로 상정한다. 한편, 접지 전위 상승률은 5[%], 부하 불평형률은 30[%]를 적용한다. 그리고, 컨버터의 링크 커패시터는 1,000[μF]를 적용하고, 필터 커패시터는 제조사에서 제시한 300[μF]를 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목		내역	
3상 차단기	극간 커패시턴스[nF]	2	
UPS용 변압기	선형영역의 인덕턴스[mH]	2,526	
	비선형영역의 인덕턴스[mH]	105	
변압기 철심	접지전위 상승률[%]	5	
포화 모의	부하 불평형률[%]	30	
UPS	컨버터	링크 커패시터[μF]	1,000
		필터의 커패시턴스[μF]	150
		구성	5S1P
	배터리	정격전압[V]	51.5
		정격용량[kWh]	16.5
	인버터	필터의 커패시턴스[μF]	300

4.2 UPS용 변압기의 철공진 특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, UPS용 변압기의 철공진 특성을 나타내면 그림 12와 같다. 여기서, 그림 12는 차단기 동작신호와 변압기 2차측의 전압 특성을 나타내는데, 차단기가 0.5초에 개방되면 철공진에 의하여 변압기 2차측의 전압이 3.1[pu] 정도로 상승함을 알 수 있다.



[그림 12] 변압기 비선형회로의 철공진 특성

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, UPS용 변압기 2차측의 전압이 철공진 현상에 의하여 3.1[pu] 정도로 상승하여, 변압기 및 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.