ESS의 연계용변압기의 포화에 따른 철공진 특성의 모델링에 관한 연구

태동현*, 이후동*, 김지명*, 전진택* 노대석*
*한국기술교육대학교
e-mail:tdh2002@koreatec.ac.kr

A Study on Modeling of Ferro-resonance Characteristics with Saturation of Grid-connected Transformer in Energy Storage System

Dong-Hyun Tae*, Hu-Dong Lee*, Ji-Myung Kim*, Jin-Taek Jeon*, Dae-Seok Rho*
*Korean University of Technology and Education

요 약

최근, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있는 실정이다. 이러한 화재사고의 원인으로, 계통측 불평형 및 차단기의 개폐서지 등에 의한 변압기의 포화현상도 고려되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 차단기의 동작 시, 연계용변압기의 인덕턴스와 전력변환장치(Power Condition System, PCS)용 필터의 커패시턴스에 의한 철공진 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부, 연계용변압기 및 ESS로 구성된 시스템의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 차단기 동작 시 연계용변압기 및 PCS 필터에 의해 철공진 현상이 발생하고, ESS에 전기적인 위해요인이 될 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

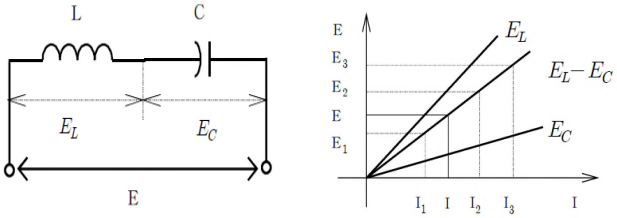
1. 서 론

최근 신재생에너지의 효율적인 운용을 위하여, ESS가 설치 및 운용되고 있으며, 이에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히, 전기요금 할인특례 등 다양한 ESS 보급 지원정책에 힘입어, 국내의 ESS 시장 규모는 16년도 418[MWh]에서 18년도에 4,773[MWh]로 급격히 확대되고 있다[1]. 그러나, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있는 실정이다[2]. 이에 대한 원인은 아직 정확하게 규명되지 않았으나, 계통측 불평형 및 차단기의 개폐서지에 의한 변압기의 포화 문제도 하나의 원인으로 고려되어야 할 것으로 보인다. 특히, 차단기의 개폐서지로 인해, 의도치 않게 변압기의 철심이 포화되고 철공진이 발생하여 ESS에 영향을 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 차단기의 동작 시, 연계용변압기의 인덕턴스와 PCS용 필터의 커패시턴스에 의한 철공진 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부, 연계용변압기 및 ESS로 구성된 시스템의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 연계용변압기 및 PCS 필터에 의해 철공진 현상이 발생하고, ESS에 전기적인 위해 요인이 될 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

2. 연계용변압기의 철공진 메커니즘

2.1 L-C 공진에 의한 철공진 메커니즘

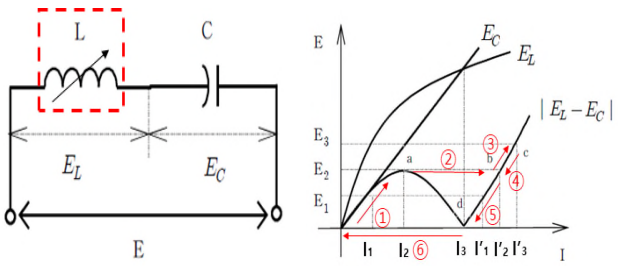
철공진은 개폐서지, 과전압과 과전류의 발진 등에 의해 철심을 가진 인덕터가 포화되어, 정전용량의 커패시터 성분과 전기적인 상호작용에 의해 발생되는 비선형성의 진동현상이다[3-4]. 여기서는 인덕터의 철심 유무에 따른 공진 메커니즘을 비교하기 위하여, 먼저 그림 1 (a)와 같이 철심이 없는 인덕터와 커패시터의 직렬회로를 구성한다. 이 때, 정현파 전압 E를 가하면, 인덕턴스와 커패시턴스의 비율에 따라, 그림 1 (b)와 같이 인덕터와 커패시터의 역기전력(EL, EC)이 결정되며, 이때, 전류는 E = EL - EC 의 교점에 해당하는 값이 된다. 여기서, 인덕턴스와 커패시턴스가 변하여 EL과 EC의 기울기가 같아지면, 직선의 교점은 무한대의 전류를 나타내는데, 이 상태를 직렬공진이라고 한다.



(a) L-C 직렬회로 (b) 전류 및 전압 곡선

[그림 1] 선형 인덕턴스의 직렬공진

한편, 그림 2 (a)와 같이 철심을 가진 인덕터의 경우, 일정 이상의 전류에서는 전류가 증가하여도 전압이 비례하여 증가하지 않는 포화현상에 의해 그림 2 (b)와 같은 특성이 나타난다. 즉, 한 주기 내에서 전압 및 전류의 변화는 먼저, ①구간에서 전압이 증가함에 따라 전류도 증가하게 되지만, 전압이 E_2로 되어 a에 도달하면, ②구간과 같이 전류는 I_2에서 I_2'로 도약하고 동작점이 b로 이동한다. 또한, ③구간에서는 전압을 E_2에서 피크치인 E_3까지 증가할 때, 전류는 I_2'에서 I_3'로 증가하며 c점에 도달하고, ④구간과 같이 전압이 감소하면 다시 b점으로 이동한다. 그리고, ⑤구간에서 전압이 E_2에서부터 감소하면 전류가 I_1'을 거쳐 I_3까지 감소하다가, d점에 도달하면 전류가 I_3에서 0으로 도약하고 동작점은 o로 이동한다[5]. 즉, 철심을 가진 인덕터는 상기 메커니즘에 따라 철공진이 발생하여, 전압 및 전류가 왜곡될 수 있다.

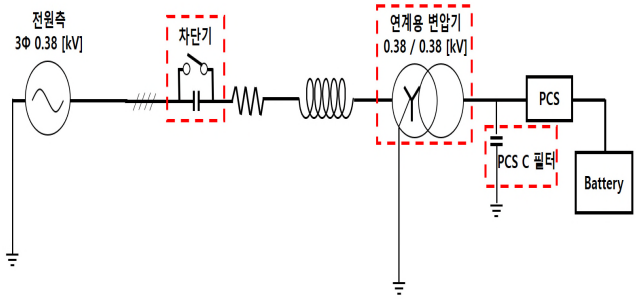


(a) L_{sat}-C 직렬회로 (b) 전류 및 전압 곡선

[그림 2] 비선형 인덕턴스의 직렬 공진

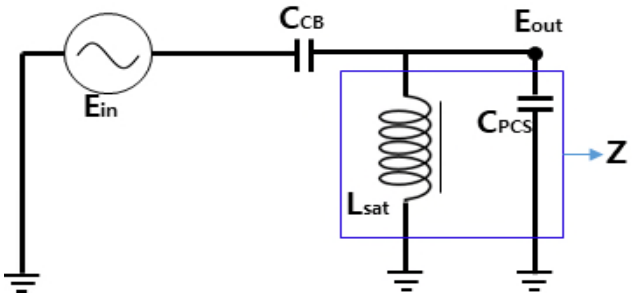
2.2 차단기 동작에 의한 철공진 메커니즘

일반적으로, 철공진은 송전선로에서 모선과 대지간의 정전용량에 의해 발생하지만, ESS 시스템에서는 PCS 필터의 커패시턴스가 이와 유사한 역할을 하여 철공진의 원인으로 작용할 수 있다. 즉, 그림 3과 같은 ESS 시스템의 구성에서 3상 차단기의 동작에 의해 연계용변압기의 인덕터가 PCS 필터의 커패시터와 공진회로를 구성할 가능성이 있다. 또한, 정상상태에서는 공진 조건이 이루어지지 않지만, 차단기 동작 시 개폐서지에 의하여, 순간적으로 높은 서지전압에 의해 변압기가 포화되므로, 변압기 인덕턴스가 매우 낮아지고 PCS 필터와 공진 조건에 도달하여 철공진의 원인이 될 수 있다.



[그림 3] ESS 시스템의 구성도

그림 3의 ESS 시스템에서 3상 전원, 차단기의 커패시터, 연계용변압기의 리액터, PCS 필터의 커패시터를 고려하여 간략화하면 그림 4와 같다. 여기서, 차단기가 동작하였을 때, 차단기의 커패시터와, PCS 필터의 커패시터가 변압기의 리액터와 직병렬 공진을 현상을 모의한다.



[그림 4] 차단기 동작시 등가화 된 철공진 회로

그림 4에서, 입력대비 출력전압은 식 (1) ~ 식 (2)와 같이, 각 소자의 임피던스 특성에 따라 산정된다. 여기서, 식 (1)은 입력대비 출력전압의 비이며, 식 (2)는 등가화된 변압기와 PCS 필터의 병렬 임피던스 Z를 나타낸다. 즉, 식 (1)의 전압비가 1보다 크게 되는 경우, 철공진에 의해 전압이 상승하여 변압기 2차측에 영향을 주는 현상이 발생할 가능성이 있다.

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{Z}{Z - jX_{CB}} \quad (1)$$

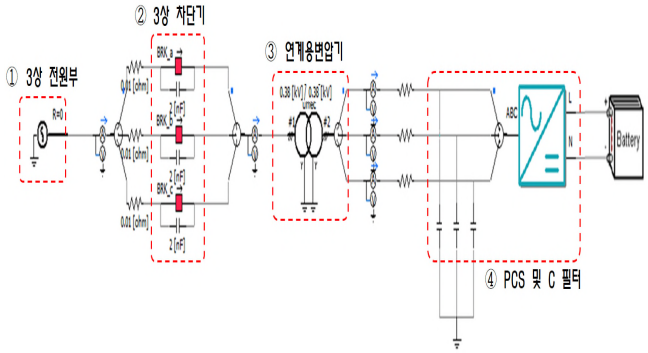
$$Z = \frac{X_L \times X_{PCS}}{j(X_L - X_{PCS})} \quad (2)$$

여기서, E_{in} : 입력전압, E_{out} : 출력전압, Z : 변압기와 PCS 필터의 등가 임피던스, X_{CB} : 차단기의 리액턴스, X_L : 변압기의 리액턴스, X_{PCS} : PCS 필터의 리액턴스

3. PSCAD/EMTDC에 의한 변압기의 철공진 특성 모델링

차단기 동작에 의해 ESS 연계용변압기가 포화되어, 변압기 인덕턴스가 PCS 필터 및 차단기의 커패시터와 철공진하는 현상을 분석하기 위하여, 상기의 내용을 바탕으로 3상 전원부, 3

상 차단기, 연계용변압기, ESS로 구성된 전체 시스템의 모델링을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 실제 ESS 화재사고가 발생한 사이트의 구성 및 용량을 반영하여, 3상 전원부는 3상 4선식 380[V]이고, 차단기의 커패시턴스는 2[nF], 연계용변압기는 Yg-Yg 결선, 380/380[V], 용량은 300[kVA]로 상정한다.



[그림 5] PSCAD를 이용한 ESS 연계용변압기의 철공진 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

시스템에서 3상 차단기의 동작이, 철공진에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 3상 전원부는 380[V], 차단기의 커패시턴스는 2[nF]로 적용하고, 연계용변압기의 연계방식은 Yg-Yg 결선, 3각 철심구조, 전압비는 380/380[V], 용량은 300[kVA]를 상정한다. 또한, PCS 필터의 커패시터 용량은 각 상당 380[uF]을 상정한다.

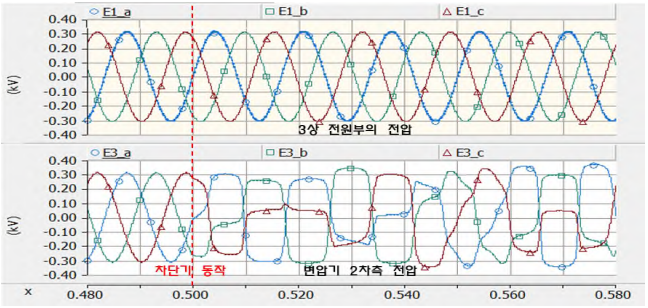
[표 1] 시뮬레이션 조건

3상 전원부	선간 전압	380 [V]
차단기	커패시턴스	2 [nF]
	동작 시점	0.5 [s]
연계용변압기	연계방식	Yg - Yg
	철심구조	3각 철심
	용량	300 [kVA]
	전압비	380/380 [V]
	%임피던스	4 [%]
	동손	1 [%]
PCS 필터	용량	380 [uF]

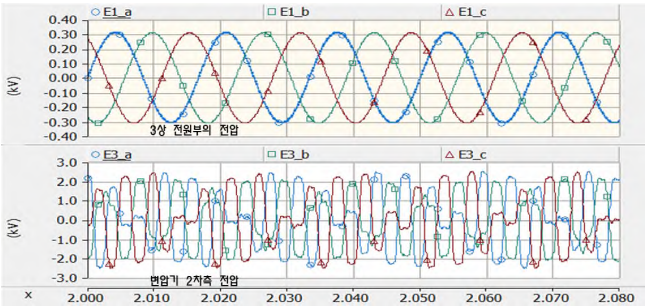
4.2 3상 차단기 동작에 의한 철공진 특성 분석

(1) 전압 및 전력 특성 분석

표 1의 시뮬레이션 조건에 따라, 3상 차단기가 0.5초에 동작한 경우, 차단기 동작 후 경과 시간에 따른 3상 전원부 및 변압기 2차측 상전압을 나타내면 그림 6과 같다. 먼저, 그림 6 (a)는 차단기 동작 직후의 전압을 나타내며, 3상 차단기가 0.5초에 동시에 동작함에 따라 철공진이 발생하여, 변압기 2차측의 전압이 왜곡됨을 알 수 있다. 또한, 그림 6 (b)는 차단기 동작 이후 약 1.5초가 지났을 때의 전압을 나타내며, 변압기 2차측의 전압이 3조파의 형태로 왜곡되고 약 6.4[pu]까지 증가함을 알 수 있어, 연계용변압기 2차측의 ESS에 전기적인 위해요인이 될 수 있음을 확인하였다.



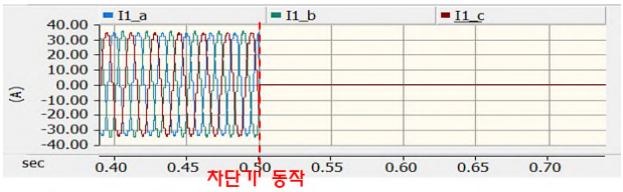
(a) 차단기 동작 직후 전압



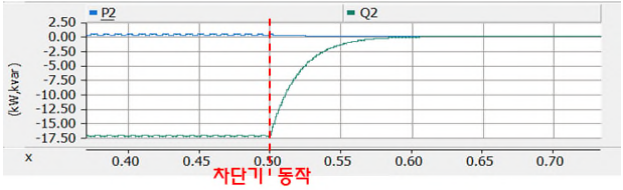
(b) 차단기 동작 이후 전압

[그림 6] 철공진에 의한 전압 특성

또한, 차단기 동작 전/후의 차단기를 통과하는 전류 및 전력을 나타내면 그림 7과 같다. 먼저, 그림 7 (a)는 차단기를 통과하는 전류를 나타내며, 3상 차단기가 0.5초에 동시에 동작함에 따라, 전류가 0으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고, 그림 7 (b)는 차단기를 통과하는 전력을 나타내며, 무효전력이 공급되고 3상 차단기가 0.5초에 동작함에 따라, 무효전력이 0으로 감소됨을 확인할 수 있다.



(a) 차단기 통과 전류

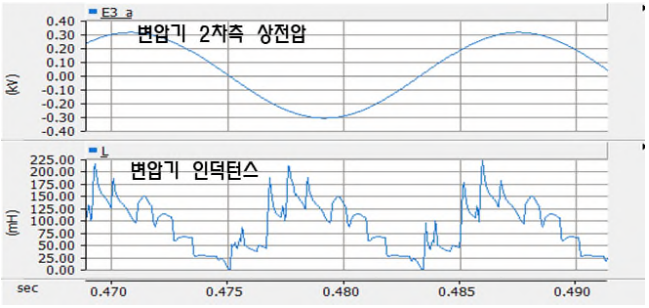


(b) 차단기 통과 전력

[그림 7] 차단기 동작에 따른 전류 및 전력 특성

(2) 변압기 인덕턴스 특성 분석

변압기의 인덕터는 철심성분이 포함되어, 포화특성을 가지므로, 그림 8과 같이 전압의 한 주기 내에서도 인덕턴스가 계속해서 변하게 된다. 그림 8 (a)는 차단기 동작 전 한 주기 동안의 변압기 2차측 상전압 및 변압기의 인덕턴스를 나타낸 것으로, 전압은 정현파이고 변압기 인덕턴스는 약 230[mH]이하의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 한편, 차단기의 동작 후, 철공진에 의해 전압이 왜곡되며, 그림 8 (b)와 같이 변압기 인덕턴스는 약 50[mH]이하의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 차단기의 동작으로 인해, 변압기의 인덕턴스가 380[uF]의 PCS 필터와의 공진점인 18.5[mH] 수준까지 낮아져, 철공진이 발생하였음을 확인하였다.



(a) 차단기 동작 전 변압기 인덕턴스

(b) 차단기 동작 후 변압기 인덕턴스

[그림 8] 차단기 동작에 의한 변압기 인덕턴스 특성

5. 결 론

본 논문에서는 철공진 메커니즘을 분석하고, 차단기의 동작 시 연계용변압기의 유도성 리액턴스 성분과, PCS 및 차단기의 용량성 리액턴스에 의한 철공진 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부, 연계용변압기 및 ESS로 구성된 시스템의 모델링을 수행하였다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 연계용변압기 및 PCS 필터에 의해 철공진 현상이 발생하고, ESS에 전기적인 위해 요인이 될 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20182410105070, No.20191210301940)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 산업통상자원부, “ESS 사고원인 조사결과 및 안전강화 대책 발표”, 보도자료, 2019.06.

[2] 산업통상자원부, “ESS 화재사고 대응 정부대책 수립”, 보도 참고자료, 2018.11.

[3] G.Morkyani, M.-R.Haghifam, “Analysis of ferroresonance in a 20kV distribution network”, International conference on power electronics and intelligent transportation system, p.p 31-35, 2009.

[4] Madhab Roy, Chinmay Kanti Roy, “A study on ferroresonance and its depedence on instant of switching angle of the source voltage”, Third international conference on power systems, Kharagpur, p.p 1-6, India December 27-29, 2009

[5] 김용원, “GIS변전소 유도성 전압변성기 철공진 방지에 관한 연구”, 한양대학교 학위논문, 2003