

ESS용 연계변압기의 포화에 따른 철공진 방지 방안에 관한 연구

태동현*, 김지명*, 정민철*, 조성덕*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:tdh2002@koreatech.ac.kr

A Study on Prevention Method of Ferroresonance Characteristics with Saturation of Grid-connected Transformer in Energy Storage System

Dong-Hyun Tae*, Ji-Myung Kim*, Min-Chul Jung*, Sung-Duck Cho*, Dae-Seok Rho*

*Korean University of Technology and Education

요약

최근, 대용량으로 설치되어 운용되는 리튬이온배터리 기반의 ESS(energy storage system)에서 의도치 않은 연계용 변압기의 포화로 인해 철공진이 발생하여 배터리부에 영향을 줄 가능성성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 전기적 위해요인 중의 하나인 철공진의 특성을 확인하기 위하여, L-C 직렬 및 직·병렬회로의 철공진 메커니즘을 정의하고 도식적인 해석수법 및 등가회로를 통하여 발생 조건을 분석한다. 또한, ESS가 연계된 배전계통에서의 철공진 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부, 차단기, 연계용변압기, PCS(power control system)부 및 배터리부로 구성된 시스템의 모델링을 수행한다. 그리고, 정전용량에 따른 철공진 특성을 이용하여, PCS 필터의 적정 용량을 산정해 철공진을 방지할 수 있는 ESS의 철공진 방지 방안을 제안한다. 제시한 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, L-C 직렬 및 직·병렬회로에서 철공진이 발생하여, 연계용변압기 2차측의 전압이 기준값을 초과함을 알 수 있었고, 이로 인해 배터리부에 전기적인 위해 요인이 될 수 있음을 확인하였다. 또한, 제안한 철공진 방지 방안을 바탕으로 PCS측 필터를 적정한 용량으로 설계할 경우, ESS가 철공진의 발생 가능성에서 벗어남을 알 수 있어 본 논문의 유효성을 확인하였다.

1. 서 론

일반적으로 송·배전 계통에서 변압기는 자화곡선의 선형영역에서 운용되지만, 차단기가 개방되면 과전압, 개폐서지 및 커페시턴스 성분에 의하여 자속이 증가하고 철심의 인덕턴스는 자화곡선의 포화영역에 도달할 수 있다. 또한, 2003년 7월, Ireland에서 400kV 변전소의 시운전을 위해 수행된 스위칭 동작으로 인해 철공진 사고가 발생한 예가 있다. 또한, 대용량으로 설치되어 운용되는 리튬이온배터리 기반의 ESS에서 의도치 않은 연계용변압기의 포화로 인해 철공진이 발생하여 변압기 2차측에 정상전압보다 수 배 높은 전압이 발생할 경우, 배터리의 과충전으로 심각한 영향을 미칠 가능성이 있다.

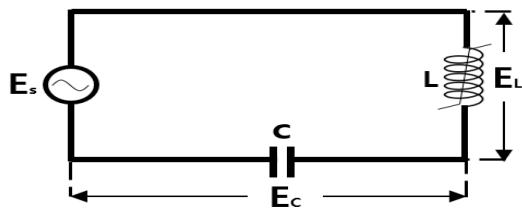
따라서, 본 논문에서는 ESS의 전기적 위해요인 중 하나인 철공진의 특성을 확인하기 위하여, L-C 직렬 및 직·병렬회로에 의한 철공진 메커니즘을 정의하고 도식적인 해석수법 및 등가회로를 통하여 분석한다. 또한, ESS가 연계된 배전계통에서의 철공진 현상을 해석하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부, 차단기, 연계용변압기, PCS부 및 배터리부로 구성된 시스템의 모델링을

수행한다. 그리고, 정전용량에 따른 철공진 특성을 이용하여, PCS 필터의 적정 용량을 산정하는 연계용변압기의 철공진 방지 방안을 제안한다. 제시한 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, L-C 직렬 및 직·병렬회로에 의해 철공진이 발생하여, 변압기 2차측의 전압이 기준값을 초과함을 알 수 있었고, 이로 인해 연계용변압기 2차측의 배터리부에 전기적인 위해 요인이 될 수 있음을 확인하였다.

2. 변압기 철심포화 및 철공진 메커니즘

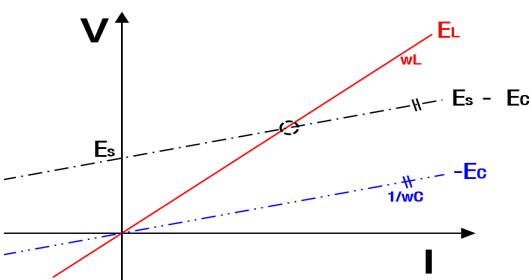
2.1 L-C 직렬회로의 철공진 메커니즘

철공진은 상위 계통의 1선 지락사고에 의한 순간적인 전압 상승과 같은 이상전압에 의하여 철심을 가진 인덕터가 포화되어, 계통의 정전용량과 상호작용을 통해 발생되는 비선형적인 진동현상이다. 본 논문에서는 비선형 L-C 철공진의 메커니즘을 분석하기 위해, 그림 1과 같이 AC 전압원과 변압기의 인덕턴스, 차단기 양단의 커페시턴스 성분으로 구성된 직렬회로를 상정한다.

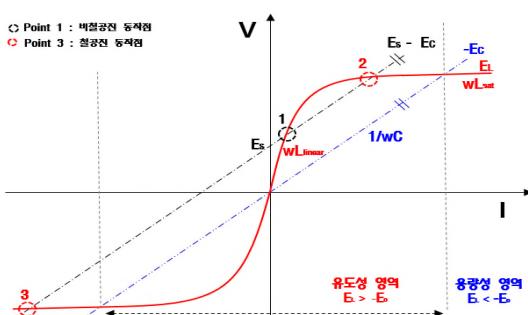


[그림 1] 비선형 L-C 직렬 철공진 회로

L-C 정상상태 회로와 그림 1의 철공진 회로에서 전류와 전압을 도식적인 해석수법(Graphical solution)을 이용하여 나타내면 그림 2와 그림 3과 같다. 먼저, 그림 2의 정상상태 회로에서 인덕터의 양단 전압(E_L)과 커패시터 양단 전압(E_C)은 각각 wL 과 $1/wC$ 의 기울기를 가진 직선의 형태를 가진다. 즉, E_L 과 $E_s - E_C$ 의 교차점은 1개만 존재하며, 이 교차점에서 정상상태의 전류와 E_L , E_C 가 구해진다. 한편, 그림 3의 철공진 회로에서 E_L 은 낮은 전류 영역에서 wL_{sat} 의 높은 기울기 값을 가지고, 일정 값 이상의 전류 영역에서는 wL_{sat} 의 매우 낮은 기울기 값을 가지므로, 계통 정수에 따라 E_L 과 $E_s - E_C$ 의 교차점은 1개에서 3개까지 발생할 수 있다. 따라서, 변압기의 포화에 의한 철공진 특성에 의하여, 동일한 인가전압(E_s)에서 변압기의 인덕터 양단 전압은 3개의 해를 가질 수 있으며, 하나의 교차점에서 다른 교차점으로 순간적인 전압상승이 발생할 가능성이 있다.



[그림 2] 정상상태 회로의 도식적인 해석

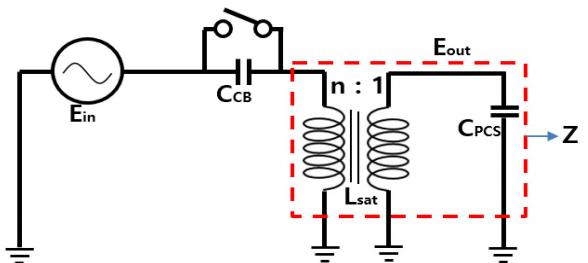


[그림 3] 철공진 회로의 도식적인 해석

2.2 L-C 직·병렬회로의 철공진 메커니즘

비선형 L-C 직·병렬 철공진 회로의 경우, 변압기의 인덕턴스와 병렬 커패시턴스 성분 사이의 공진현상도 함께 고려되므로, L-C 직렬 철공진 회로에 비해 철공진의 발생 가능성이

증가한다[1]. 이러한 L-C 직·병렬 철공진 회로는 계통전원부, 연계용변압기, PCS 및 배터리부로 구성된 ESS에서도 나타날 수 있는데, 여기서 PCS의 출력안정화를 위한 C필터가 병렬 커패시턴스 성분이 되고 연계용변압기가 L성분이 된다. 따라서, ESS의 L-C 직·병렬회로는 그림 4와 같이 계통전원부(E_{in})와 차단기(C_{CB}), 연계용변압기(L_{sat}), PCS의 커패시턴스 성분(C_{PCS})으로 회로를 나타낼 수 있다.



[그림 4] ESS의 비선형 L-C 직·병렬 철공진 등가회로

한편, L-C 직·병렬회로의 경우, 상기와 같이 도식적인 해석수법은 고려해야 할 요소가 많아 한계점이 있으므로, 본 논문에서는 직·병렬 등가회로에 대한 수식으로 모델링한다. 먼저, 그림 4에서 차단기가 동작하는 경우, 입력전압(E_{in})과 출력전압(E_{out})의 관계식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있는데, 이 식과 같이 등가 임피던스(Z)와 차단기의 C성분(X_{CB})에 따라 산정된다. 여기서, 등가 임피던스는 식 (2)와 같이, 변압기의 L성분(X_L)과 PCS의 C성분(X_{PCS})으로 나타낼 수 있으며, X_L 은 포화현상에 의해 감소할 수 있다. 따라서, 차단기가 동작하는 경우 변압기가 포화되고, 이로 인하여 직·병렬로 구성된 C성분사이에서 철공진 현상이 발생하면 식 (1)의 전압비는 1보다 높아지게 되고, 변압기 2차측은 정상전압보다 수 배 높은 전압이 발생할 가능성이 있으므로, 배터리의 과충전으로 심각한 영향을 미칠 가능성이 있다.

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

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

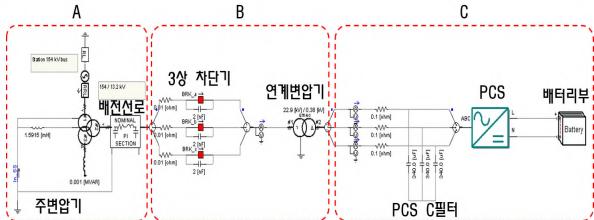
여기서, E_{in} : 입력전압[V], E_{out} : 출력전압[V], n : 권수비, Z : 변압기와 PCS 필터의 병렬 등가 임피던스[Ω], X_{CB} : 차단기의 리액턴스[Ω], X_L : 변압기의 리액턴스[Ω], X_{PCS} : PCS 필터의 리액턴스[Ω]

3. ESS용 연계변압기의 철공진 모델링 및 방지 방안

3.1 ESS용 연계변압기의 철공진 모델링

L-C 직·병렬회로의 철공진 메커니즘에 따라, 전력계통해

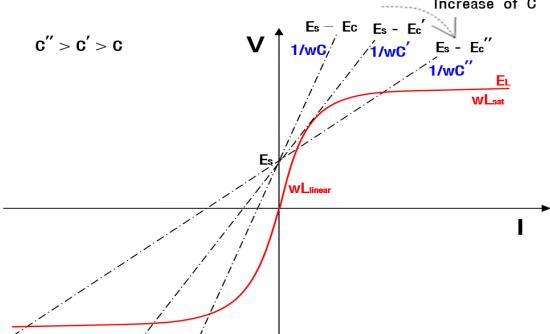
석 상용 소프트웨어인 PSCAD/TMTDC를 이용하여 주변압기, 고압 배전선로, ESS용 연계변압기, PCS 및 배터리부로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면, 그림 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 5의 A부분은 주변압기와 고압 배전선로, B부분은 3상 차단기와 ESS용 연계변압기, 그리고 C부분은 PCS부와 배터리부로 구성된다.



[그림 5] 계통전체 모델링

3.2 ESS용 연계변압기의 철공진 방지 방안

철공진 메커니즘을 바탕으로, L-C 직렬 철공진 회로의 커패시턴스에 따른 도식적인 해석수법은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 커패시턴스가 증가함에 따라 용량성 리액턴스($1/wC$)의 기울기가 감소하므로, 직선 E_s-E_c 는 y 축 절편 E_s 를 중심으로 회전하게 된다. 따라서, 정전용량에 따라 교차점의 개수가 변경되므로, 철공진 특성은 정전용량에 의해 결정됨을 알 수 있다.

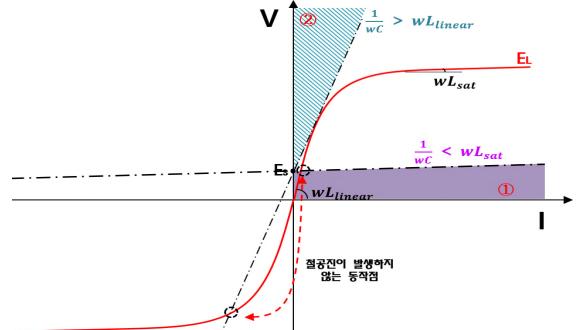


[그림 6] 커패시턴스의 증가에 따른 철공진의 도식적인 해석수법

그림 6에서 철공진이 발생할 가능성이 있는 용량성 리액턴스의 범위를 나타내면 식 (3)과 같으며, 해당 범위를 회피하여 커패시턴스를 산정하면 철공진 현상을 방지할 수 있음을 알 수 있다. 이를 도식적 해석방법을 이용하여 나타내면 그림 7과 같고, 용량성 리액턴스($1/wC$)를 포화영역의 유도성 리액턴스(wL_{sat})보다 작거나(①영역), 선형영역의 유도성 리액턴스(wL_{linear})보다 큰 경우(②영역)로 산정하면, 정상상태의 교차점(③영역)에서 운용되므로 철공진을 방지할 수 있다. 즉, ①영역에서는 E_c 의 기울기가 포화영역에서 E_s 의 기울기보다 작으므로 1사분면에서 교차점이 1개 발생하고, ②영역에서는 3사분면에서 교차점이 1개 발생하며, 상대적으로 낮은 전류값을 가지므로 안정적인 상태를 유지하게 된다.

$$wL_{sat} < \frac{1}{wC} \leq wL_{linear} \quad (3)$$

여기서, w : 각속도[rad/s], L_{linear} : 선형영역에서 인덕턴스[H], L_{sat} : 포화영역에서 인덕턴스[H], C : 커패시턴스[F]



[그림 7] 도식적인 해석수법을 이용한 철공진 회피 영역 산정

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

ESS의 L-C 직·병렬회로의 철공진 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 설정한다. 여기서, 45/60[MVA]용 주변압기는 154/22.9[kV]의 전압비를 가지며, ACSR 160mm²의 선로공장은 10[km]를 고려한다. 또한, 3상 차단기는 차단 극간 거리 12[mm], 극판 넓이 0.25[mm²]을 설정하고, 3.2절에서 제시한 산정식을 통해 2[nF]의 커패시턴스를 적용한다. 그리고, 3각 철심구조의 Yg-△ 결선방식의 연계용 변압기는 22.9[kV]의 고압을 380[V]로 변환하며, PCS의 용량은 1[MVA]이고, 필터용 커패시턴스는 380[uF]으로 설정한다.

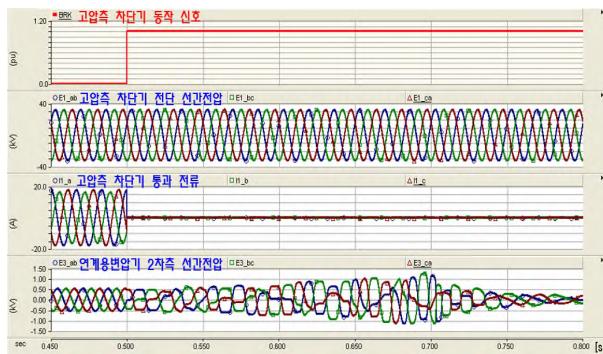
[표 1] L-C 직·병렬회로의 철공진 시뮬레이션 조건

구분	파라메타	크기
주변압기	전압비[kV]	154/22.9
선로	공장[km]	10
3상 차단기	개방 시 커패시턴스[nF]	2
	개방 동작 시점[s]	0.5
ESS용 연계변압기	연계방식	Yg-△
	철심구조	3각 철심
	전압비[kV]	22.9/0.38
	용량[MVA]	1
	%임피던스[%]	4
	동순[%]	1
PCS	용량[MVA]	1
	필터의 커패시턴스[uF]	380

4.2 L-C 직·병렬회로의 철공진 특성 분석

표 2의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, L-C 직·병렬회로에서 차단기 동작에 의해 철공진이 발생하는 경우의 전압 및 전류 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 먼저, 3상 차단기가 동작하기 전에는 고압측 차단기 전압과 전류, 그리고 변압기 2차측 전압

은 모두 정현파로 출력됨을 알 수 있다. 한편, 3상 차단기가 0.5초에 동시 개방됨에 따라 차단기의 통과전류는 0이 되지만, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압파형은 왜곡되며 순간적으로 약 2.4[pu]까지 증가하여, 연계용변압기 2차측의 배터리의 과충전으로 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



[그림 8] 차단기 동작 시, 철공진에 의한 전압특성

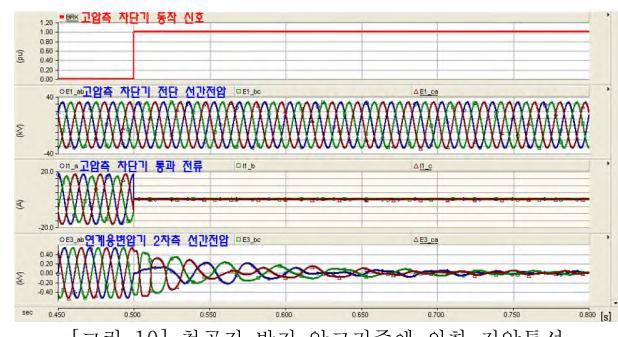
상기와 같이, 연계용변압기 2차측 선간전압과 인덕턴스 값을 구하면 그림 9와 같다. 여기서, 차단기의 동작 전 연계용변압기 2차측 전압은 정현파이고, 인덕턴스는 약 800[mH]이하의 주기적인 값을 갖는 것을 알 수 있다. 반면, 차단기의 동작 이후에는 철공진에 의해 전압이 왜곡되며, 변압기의 인덕턴스는 상대적으로 낮은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 즉, 차단기의 동작으로 인해, 변압기의 인덕턴스가 380[uF]의 PCS 필터와의 공진점인 18.5[mH] 수준에 도달하여, 철공진이 발생하였음을 알 수 있다.



[그림 9] 차단기 동작 시, 철공진에 의한 변압기 인덕턴스 특성

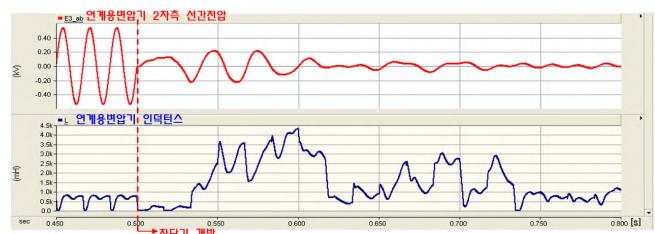
4.3 철공진 방지 방안에 의한 특성분석

L-C 직·병렬회로에서 차단기 동작에 의한 철공진을 방지하기 위해, 4장에서 제안한 철공진 방지 알고리즘에 따라 PCS측 필터의 커패시턴스를 450[uF]으로 증가시킨 경우, 고압측 차단기 전단 및 연계용변압기 2차측 전압의 값을 구하면 그림 10과 같다. 여기서, 3상 차단기가 0.5초에 동시 개방되었지만, 증가된 커패시턴스로 인해 철공진 발생 영역에서 벗어나, 철공진이 발생하지 않고 연계용변압기 2차측 전압이 정상적으로 감소됨을 확인하였다. 따라서, PCS측 필터의 커패시턴스를 적정용량으로 산정할 경우, 연계용변압기 2차측의 배터리의 과충전 현상을 방지할 수 있어, ESS의 안정적인 운용에 기여할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 10] 철공진 방지 알고리즘에 의한 전압특성

상기와 같이, PCS측 필터의 커패시턴스를 450[uF]으로 증가시킨 경우, 연계용변압기 2차측 전압과 인덕턴스 값을 구하면 그림 11과 같다. 여기서, 3상 차단기가 동작하더라도 증가된 커패시턴스로 인해 변압기의 인덕턴스가 PCS 필터와의 공진점에 도달하지 못해 철공진이 발생하지 않았으며, 차단기 동작 이후 선형영역의 높은 인덕턴스 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서, PCS측 필터의 커패시턴스를 적정용량으로 산정할 경우, 철공진이 발생하지 않아 ESS가 철공진에 의한 위해 가능성에서 벗어남을 확인하였다.



[그림 11] 철공진 방지 알고리즘에 의한 변압기 인덕턴스 특성

5. 결 론

본 논문에서는 ESS용 연계변압기의 철공진 특성을 분석한 결과, 3상 차단기 동작 시 철공진에 의해 연계변압기 2차측의 전압이 기준값을 초과하여 배터리부에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 제안한 철공진 방지 방안을 바탕으로 PCS측 필터의 커패시턴스를 변경한 경우, 변압기의 인덕턴스가 PCS 필터용 커패시턴스와의 공진점에도 달하지 못해, 철공진이 억제됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.2018241010 5070)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Swee Peng Ang, "Ferroresonance Simulation Studies of Transmission Systems", University of Manchester, University of Manchester. School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, 2010