

# DC 접지전위 상승과 불평형 부하전류를 고려한 ESS 연계용 변압기의 철공진 방지 방안

태동현<sup>\*,\*\*</sup>, 이진식<sup>\*</sup>, 홍성준<sup>\*</sup>, 방선배<sup>\*</sup>, 노대석<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>한국전기안전공사 전기안전연구원, <sup>\*\*</sup>한국기술교육대학교  
 e-mail:tdh2002@kesco.or.kr

## Prevention Method for Ferro-resonance of Grid-connected Transformer in ESS Considering DC Grounding Potential Rising and Unbalanced Load Current

Dong-Hyun Tae<sup>\*,\*\*</sup>, Sin-Sik Lee<sup>\*</sup>, Seong-Jun Hong<sup>\*</sup>, Sun-Bae Bang<sup>\*</sup>, Dae-Seok Rho<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>Department Electrical Safety Research Institute, <sup>\*\*</sup>Korea University of Technology

### 요 약

본 논문에서는 ESS의 PCS 필터가 철공진에 미치는 영향을 분석하고, 도식적인 해석수법을 이용하여 불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승을 고려한 철공진 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 도식적인 해석수법을 바탕으로 적정용량의 PCS 필터를 설치하여 철공진 발생 영역을 회피할 수 있는 철공진 방지 방안을 제안한다. 그리고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광전원부 및 배터리부로 구성된 철공진 발생 메커니즘에 대한 모델링을 수행한다. 상기의 메커니즘과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승이 ESS용 연계변압기의 철심을 더욱 포화시키고, 차단기 동작 시 높은 철공진 전압이 발생하여, 연계용변압기 2차측의 배터리에 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다. 한편, 본 연구에서 제안한 철공진 방지 방안의 의의, 적정용량의 PCS측 필터를 설치하면, 효과적으로 철공진 현상을 방지하여 ESS의 안전성에 기여함을 알 수 있어 본 논문의 유효성을 확인하였다.

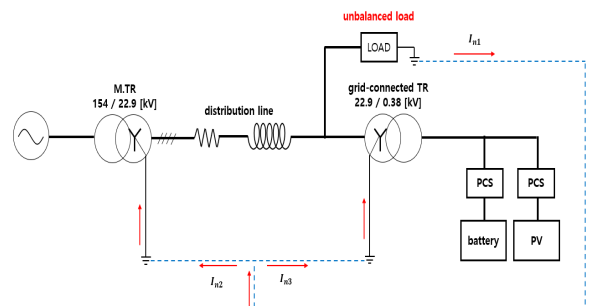
### 1. 서 론

최근 신재생에너지의 효율적인 운용을 위하여, ESS가 설치 및 운용되고 있으며, 이에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히, 전기요금 할 인특례 등 다양한 ESS 보급 지원정책에 힘입어, 국내의 ESS 시장 규모는 17년도 1[GWh]에서 22년도에 10[GWh]로 급격히 확대되고 있다. 그러나, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있는 실정이다. 이러한 화재사고의 원인으로, 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승과 부하불평형에 의한 불평형 부하전류가 연계용변압기의 포화에 미치는 영향도 고려되어야 한다[1]. 따라서, 본 논문에서는 계통불평형에 의한 불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승에 의한 변압기 포화 메커니즘을 제시하고, PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광전원부 및 ESS부의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승이 변압기 포화에 영향을 미치고, 연계용변압기와 ESS간의 철공진 가능성을 증가시킴을 알 수 있었고, 철공진 발생 시 연계용변압기 2차측의 전압이 급격하게 증가하여 배터리부에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 한편, 본 연구에서 제안한 철공진 방지 알고리즘을 바탕으로 PCS측 필터의 커패시턴스를 적절하게 산정할 경우, 공진점이 회피되어 철공진 현상이 개선됨을 알 수 있다.

### 2. ESS 연계용 변압기의 철공진 메커니즘

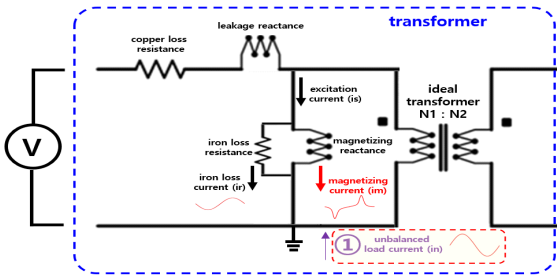
#### 2.1 불평형 부하전류에 의한 철공진 메커니즘

불평형 상태는 상전압 및 상전류의 크기가 동일하지 않거나, 위상차가 120°가 아닌 경우를 말하는데, 불평형 고장 또는 부하불평형시, 중성선에 영상전류가 흐르게 된다. 이러한 3상 부하불평형시, 그림 1과 같이 불평형전류( $I_{n1}$ )가 부하측 중성선에 흐르고, 이는 배전용변전소측( $I_{n2}$ )과 ESS 연계용변압기측( $I_{n3}$ )의 중성선을 통하여 순환하게 된다. 이때, 불평형 부하전류가 정상상태의 자화전류에 영향을 미쳐 변압기가 포화될 가능성이 있으며, 이로 인하여 연계용변압기 2차측의 전압 파형이 왜곡되거나 서지가 발생될 수 있다.



[그림 1] 불평형 부하전류 발생 개념도

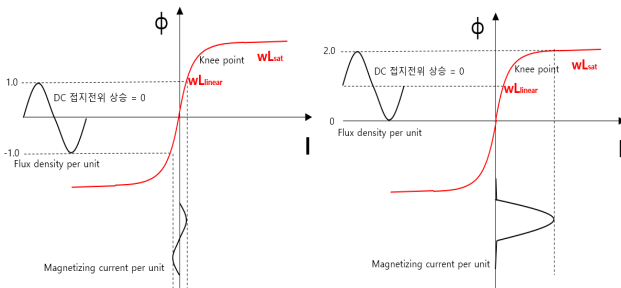
상기 그림에서 ESS 연계용변압기측 불평형 부하전류( $I_{n3}$ )가 정상상태의 자화전류( $I_m$ )에 영향을 미쳐서 연계용변압기의 철심 포화 현상을 증대시킬 수 있다. 즉, 그림 2와 같이 불평형 부하전류(①)의 위상이 변압기 증가회로에서 자화 리액턴스에 흐르는 자화전류의 위상과 동일한 위상을 가지는 경우, 자화 리액턴스에 는 정상상태보다 더 큰 전류가 흘러 변압기의 철심포화가 심해져서, 철공진의 가능성이 증가하게 된다.



[그림 2] 불평형 부하전류에 의한 변압기 철공진 개념도

2.2 DC 접지 전위상승에 의한 철공진 메커니즘

대규모 태양광전원 발전단지의 경우, 접지가 되어있더라도 에너지밀도가 높기 때문에 DC 접지 전위상승이 발생할 가능성이 있다. 이러한 DC 접지 전위상승이 연계용변압기의 포화에 미치는 영향을 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3의 (a)는 DC 접지 전위상승이 없는 경우의 I-φ 곡선이며, 변압기의 자화전류가 무릎점 미만에서 발생하는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 3의 (b)는 DC 접지 전위상승이 있는 경우의 I-φ 곡선이며, DC 접지 전위상승에 의해 반주기동안 무릎점을 초과하여 자화전류가 매우 높게 발생하고, 변압기의 포화에 영향을 미치게 된다.

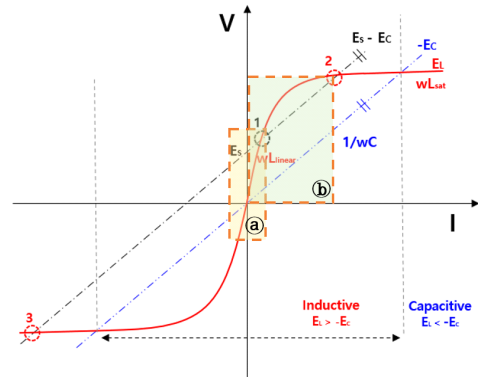


(a) DC 접지 전위상승이 없는 경우 I-φ curve (b) DC 접지 전위상승이 있는 경우 I-φ curve

[그림 3] DC 접지 전위상승에 따른 I-φ curve

그림 3의 (b)와 같이 DC 접지 전위상승이 발생된 경우 도식적인 해석수법을 이용하여 나타내면 그림 4와 같다. 즉, DC 접지 전위상승에 의해 매우 높은 자화전류가 발생하고, 이는 변압기 2차측에 큰 서지를 유도할 수 있다. 특히, 연계용변압기의 자화곡선의 운용범위는 무릎점 미만인 ④영역이지만, DC 접지 전위상승에 의해 양의 주기에서 무릎점 이상으로 변압기가 포화되어 ⑥영역에서 운용되게 되면,  $E_L$ 과  $E_s - E_c$ 의 교차점이 추가

적으로 발생하므로 철공진이 발생할 가능성이 있다[2].

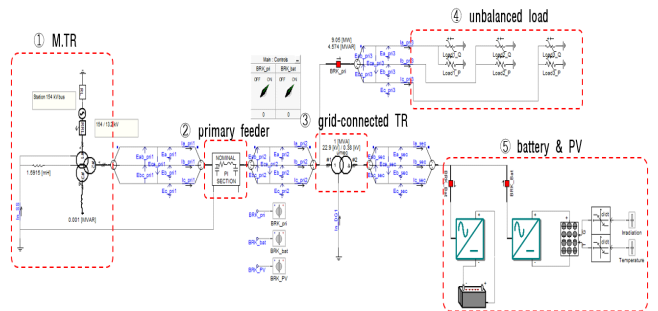


[그림 4] DC 접지 전위상승에 따른 철공진의 도식적인 해석

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS 연계용 변압기의 철공진 모델링

3.1 불평형 부하전류에 의한 철공진 모델링

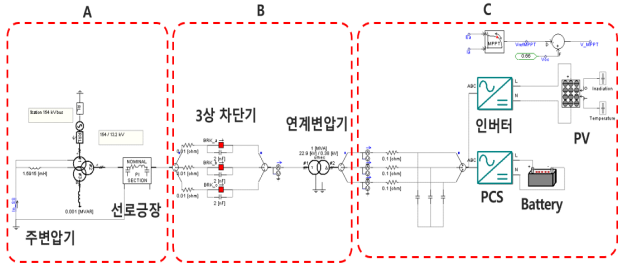
부하불평형에 의해 ESS 연계용변압기 1차측에 불평형 부하전류가 유입되고, 변압기 철심이 포화되는 현상을 분석하기 위하여, 배전용변전소, 배전선로, 연계용변압기, 불평형부하, 배터리 및 태양광전원으로 구성된 전체 배전시스템의 모델링을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 배전용변전소 3권선 주 변압기는 Yg-Yg-Δ 결선방식이며, 배전선로는 ACSR 160 [mm<sup>2</sup>], 연계용변압기 용량은 1[MVA]를 상정한다.



[그림 5] PSCAD를 이용한 불평형 부하전류에 의한 철심포화 모델링

3.2 DC 접지 전위상승에 의한 철공진 모델링

태양광전원으로 인한 DC 접지전위 상승이 ESS 연계용변압기의 포화에 영향을 미쳐, 철공진 발생 가능성을 증가시키는 현상을 분석하기 위하여, 전력계통해석 상용 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용해 주변압기, 고압 배전선로, ESS 연계용변압기, 인버터, PCS, 태양광전원 및 배터리로 구성된 전체 배전시스템을 모델링하면, 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 6의 A부분은 주변압기와 고압 배전선로, B부분은 3상 차단기와 ESS 연계용변압기, 그리고 C부분은 MPPT 제어를 수행하는 인버터와 태양광전원, 충방전 제어용 PCS와 배터리로 구성된다.



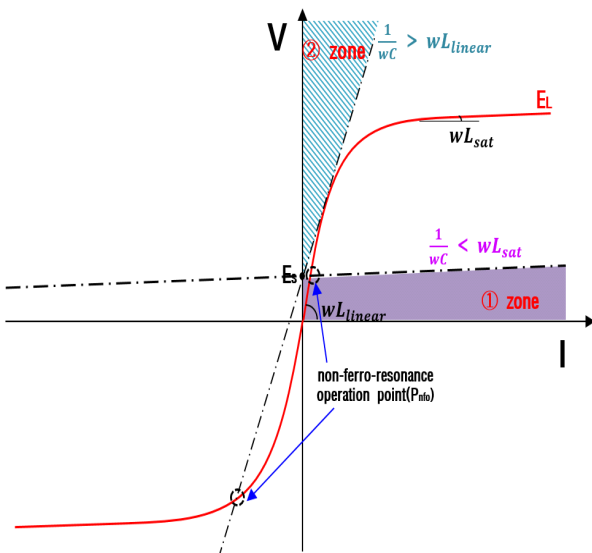
[그림 6] PSCAD를 이용한 ESS 연계용변압기의 철공진 모델링

#### 4. ESS용 연계용변압기의 철공진 방지 방안

철공진이 발생할 가능성이 있는 용량성 리액턴스의 범위를 나타내면 식 (1)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( $1/wC$ )가 포화영역의 유도성 리액턴스( $wL_{sat}$ )보다 작거나(①영역), 용량성 리액턴스( $1/wC$ )가 선형영역의 유도성 리액턴스( $wL_{linear}$ )보다 큰 경우(②영역)로 상정하면, 정상상태의 교차점( $P_{nto}$ )에서 운용되므로 철공진을 방지할 수 있다. 즉, ①영역에서는  $E_C$ 의 기울기가 포화영역에서  $E_L$ 의 기울기보다 작으므로 1사분면에서 교차점이 1개 발생하고, ② 영역에서는 3사분면에서 교차점이 1개 발생하며, 상대적으로 낮은 전류값을 가지므로 안정적인 상태를 유지하게 된다.

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

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



[그림 7] 도식적인 해석수법을 이용한 철공진 방지 방안

### 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

#### 5.1 시뮬레이션 조건

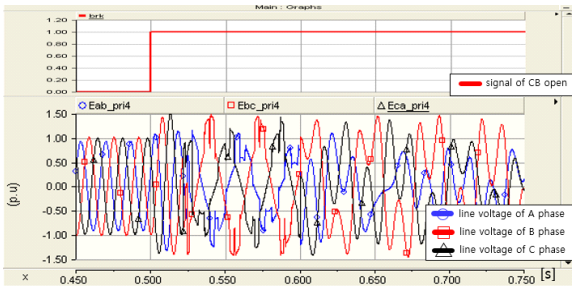
계통불평형에 의한 불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승에 의한 변압기 포화 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 주변압기는 154/22.9[kV]의 45/60[MVA] 정격용량을 가지며, 고압배전선로의 선종은 ACSR 160mm<sup>2</sup>이고, 공장은 10, 20, 30[km]로 나누어 상정한다. 또한, 3상 차단기의 커패시턴스는 2[nF]을 적용하며, ESS 연계용변압기(22.9[kV]/380[V])는 5각 철심구조의 Yg-△ 결선방식이다. 그리고, PCS의 용량은 1[MVA]이고, 필터용 커패시턴스는 380[μF]으로 상정한다. 또한, 부하불평형에 의한 불평형 부하전류를 모의하기 위하여, 3상 부하 10[MW]의 불평형률을 15%로 모의하고, DC 접지전위 상승에 의한 영향을 확인하기 위하여 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승률은 태양광전원 전압의 5%로 상정하여 시뮬레이션을 수행한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

구분	파라메타	크기
주변압기	전압비[kV]	154/22.9
선로	공정[km]	10, 20, 30
3상 차단기	개방 시 커패시턴스[nF]	2
	개방 동작 시점[s]	0.5
ESS 연계용변압기	연계방식	Yg-△
	철심구조	5각 철심
	전압비[kV]	0.38/22.9
PCS	용량[MVA]	1
	용량[MVA]	1
태양광전원	필터의 커패시턴스[μF]	380
	전압[V]	700
3상 부하	DC 접지 전위상승[%]	5
	용량[MW]	10
	역률	0.9
	불평형률[%]	15

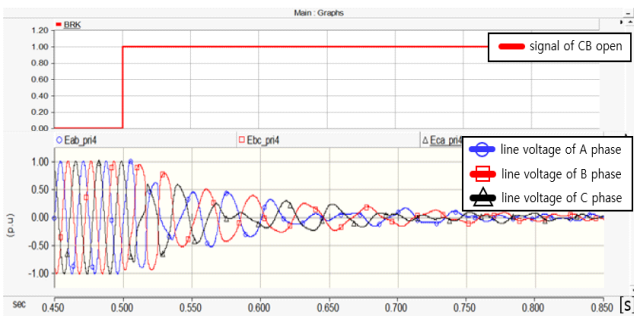
#### 5.2 불평형 부하전류에 의한 철공진 특성 분석

표 1의 불평형 부하전류 발생 조건에서, 10[MVA]의 피크부하를 대상으로 부하 불평형률이 15%이고, 선로공장이 30[km]인 경우, 고압선로 부하측( $I_{n1}$ )에서 발생한 80.42[A]의 불평형 부하전류가 배전용변전소( $I_{n2}$ )측으로 44.91[A], 연계변압기( $I_{n3}$ )측으로 36.04[A]만큼 분류된다. 이 때, 불평형 부하전류에 의한 철공진 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 1[pu]의 계통전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 개방되는 경우, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압파형이 왜곡되고 순간적으로 약 1.5[pu]까지 상승하는 것을 알 수 있다.



[그림 8] 불평형 부하전류에 의한 철공진 특성

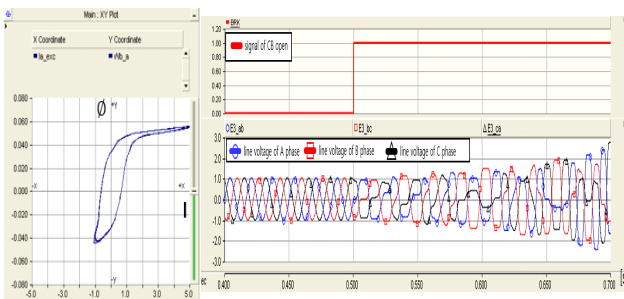
상기의 불평형 부하전류에 의해 1.5[pu]의 철공진 전압이 발생한 사례에 대하여, 제안한 알고리즘에 따라 PCS측 필터의 커패시턴스를 380[uF]에서 450[uF]으로 증가시킨 경우, 차단기 동작에 따른 전압특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 커패시턴스의 영향에 따라 철공진 발생 영역에서 벗어나, 연계변압기 2차측 전압이 정상적으로 회복됨을 알 수 있다.



[그림 9] 제안한 철공진 방지 방안에 의한 특성(불평형 부하전류)

### 5.3 DC 접지전위 상승에 의한 철공진 특성 분석

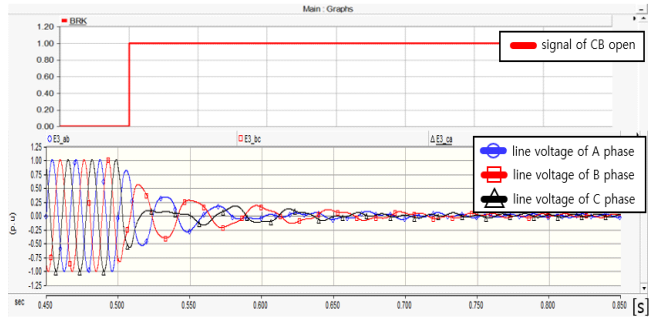
DC 접지 전위상승 5%를 고려하는 경우, 차단기 동작에 따른 전압 및 전류 특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10의 (a)는 연계용변압기의 I- $\theta$  곡선이며, 5%의 DC 접지전위상승으로 인해 자화전류가 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 그림 10의 (b)는 전압 및 전류 특성이며, 1[pu]의 정현파 인가전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 동시 개방 시, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압파형은 왜곡되며 순간적으로 약 2.9[pu]까지 증가하여, 연계용변압기 2차측의 배터리의 과충전으로 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



(a) I- $\theta$  curve (b) 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성

[그림 10] DC 접지전위 상승에 의한 철공진 특성

그림 10과 같이 DC 접지전위 상승에 의해 2.9[pu]의 철공진 전압이 발생한 사례에 대하여, 제안한 알고리즘에 따라 PCS측 필터의 커패시턴스를 380[uF]에서 520[uF]으로 증가시킨 경우, 차단기 동작에 따른 전압특성을 나타내면 그림 11과 같다. 여기서, 커패시턴스의 영향에 따라 철공진 발생 영역에서 벗어나, 연계변압기 2차측 전압이 정상적으로 회복됨을 알 수 있다. 따라서, 배터리의 순간적인 과전압현상을 효과적으로 방지할 수 있으므로, 본 연구에서 제시한 철공진 방지 알고리즘이 ESS의 안정적인 운용에 기여할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 11] 제안한 철공진 방지 방안에 의한 특성(DC 접지전위 상승)

## 6. 결 론

본 논문에서는 불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승에 의한 연계용변압기의 철심포화 및 철공진 메커니즘을 분석하고, 이로 인한 변압기의 철심포화와 철공진 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광 전원부 및 ESS부로 구성된 시스템의 모델링을 수행하였다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승이 변압기 포화 및 철공진 가능성을 증가시킴을 알 수 있었고, 제안한 철공진 방지 방안을 바탕으로 PCS측 필터의 커패시턴스를 적절하게 산정한 경우, 공진점이 회피되어 철공진 현상이 개선됨을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] D.H Tae, "Modeling of Ferro-Resonance Phenomenon with Saturation of Grid-Connected Transformer in ESS" JEET 17(4), 2187-2194, 2022
- [2] Dugan R.C, "Examples of ferroresonance in distribution", Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, vol.2, pp.1215, 13-17 July 2003.