

# ESS 연계용변압기의 철공진 방지 알고리즘에 관한 연구

태동현\*\*\*, 김지명\*\*, 최성문\*\*, 김윤호\*\*, 노대석\*\*  
 \*전기안전공사 전기안전연구원, \*\*한국기술교육대학교  
 e-mail:tdh2002@kesco.or.kr

## A Study on the Prevention Algorithm of Ferro-resonance in Grid-connected Transformer for ESS

Dong-Hyun Tae\*\*\*, Ji-Myung Kim\*\*, Sung-Moon Choi\*\*, Yun-Ho Kim\*\*, Dae-Seok Rho\*\*  
 \*Deptatment Electrical Safety Research Institute, \*\*Korea University of Technology

### 요 약

철공진은 과전압, 개폐서지와 같은 이상전압에 의해 철심을 가진 인덕터가 포화되어, 계통의 정전용량과 상호작용을 통해 발생하는 비형적인 진동현상이며, 최근 대용량으로 설치되어 운용되는 리튬이온배터리 기반의 ESS(energy storage system)에서 의도치 않은 철공진 현상이 발생하여 배터리에 심각한 악영향을 줄 가능성이 제기되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 ESS 연계용변압기의 철심포화와 철공진 메커니즘을 제시하고, 적정용량의 PCS 필터를 제시하는 철공진 방지 알고리즘과 열화 및 운용환경을 고려한 MOV 운용 알고리즘을 제안한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광전원부 및 배터리부로 구성된 철공진 발생 메커니즘에 대한 모델링을 수행한다. 상기의 메커니즘과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 연계용변압기의 철심이 포화되고 보호 기기가 동작하면 최대 1.8[p.u]의 철공진이 발생하여 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 한편, 본 연구에서 제안한 철공진 방지 알고리즘에 의하여, 적정용량의 PCS측 필터와 MOV를 설치하면, 효과적으로 철공진 현상을 방지하여 ESS의 안전성에 기여함을 알 수 있어 본 논문의 유효성을 확인하였다.

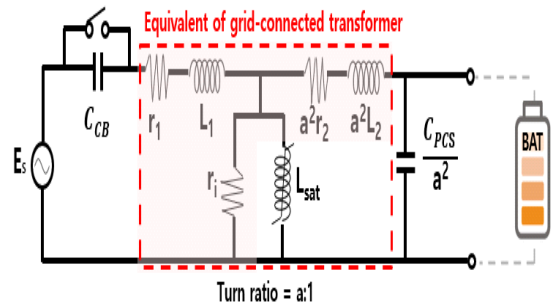
### 1. 서 론

최근 신재생에너지의 효율적인 운용을 위하여, ESS가 설치 및 운용되고 있으며, 이에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히, 전기요금 할인특례 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, 연계용변압기의 철심포화가 철공진에 미치는 영향도 고려되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 이용하여 ESS 연계용변압기의 철심포화와 철공진 메커니즘을 제시하고, 적정용량의 PCS 필터를 제시하는 철공진 방지 알고리즘과 열화 및 운용환경을 고려한 MOV 운용 알고리즘을 제안한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광전원부 및 배터리부로 구성된 철공진 발생 메커니즘에 대한 모델링을 수행한다. 상기의 메커니즘과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 연계용변압기의 철심이 포화되고 차단기가 동작하면 최대 1.8[p.u]의 철공진이 발생하여 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 한편, 본 연구에서 제안한 철공진 방지 알고리즘에 의하여, 적정용량의 PCS측 필터와 MOV를 설치하면, 효과적으로 철공진 현상을 방지하여 ESS의 안전성에 기여함을 알 수 있어 본 논문의 유효성을 확인하였다.

### 2. ESS 연계용변압기의 철공진 메커니즘

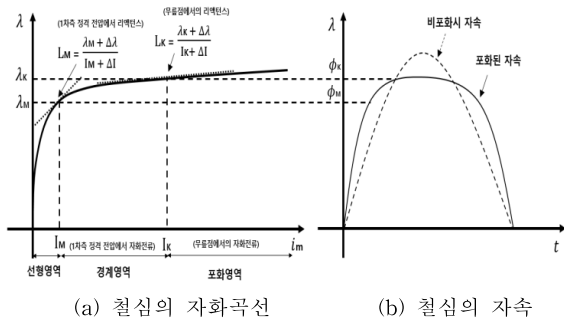
#### 2.1 ESS 연계용변압기의 철심포화 메커니즘

ESS의 비선형 L-C 직·병렬 철공진 회로에서 PCS의 출력안정화를 위한 C필터는 병렬 커패시턴스 성분이 되고 연계용변압기가 리액턴스 성분이 된다. 따라서, ESS의 L-C 직·병렬회로는 계통전원부(Es)와 차단기(C<sub>CB</sub>), 연계용변압기(L<sub>sat</sub>), PCS의 커패시턴스 성분(C<sub>PCS</sub>) 등으로 나타낼 수 있다. 여기서, 변압기의 비선형특성을 고려하기 위하여, 변압기의 등가회로를 이용하고 2차측을 1차측으로 환산하면 그림 1과 같다. 또한, r<sub>1</sub>과 L<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>와 L<sub>2</sub>는 각각 1차측 및 2차측의 권선저항과 누설 리액턴스를 나타내며, n<sub>1</sub>는 철손전류를 나타낸다.



[그림 1] ESS의 L-C 직·병렬 철공진 회로

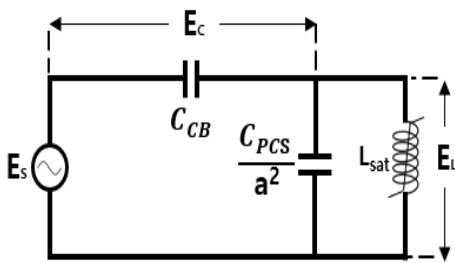
상기에서 ESS 연계용변압기 철심의 자화특성곡선은 그림 2(a)와 같이 나타낼 수 있으며, 자화전류 값을 특성곡선에 대입하면, 철심 내 쇄교자속의 크기를 산정할 수 있다. 여기서, 포화영역 이후에는 자화전류에 따른 쇄교자속이 매우 낮은 기울기(리액턴스)로 증가함을 알 수 있다. 따라서, 선형영역( $0 \sim I_M$ )에서는 변압기가 높은 리액턴스를 가지고, 포화영역( $I_K$  이상)에서는 리액턴스가 극단적으로 낮아지므로, 변압기가 포화되면 ESS의 C성분에 의하여 철공진 현상이 발생할 가능성이 있다. 또한, 자화전류가 포화영역의 개시점인 무릎점( $I_K$ )에 가까워지면, 그림 2(b)와 같이 철심이 포화되어 자속의 형태가 왜곡됨을 알 수 있다.



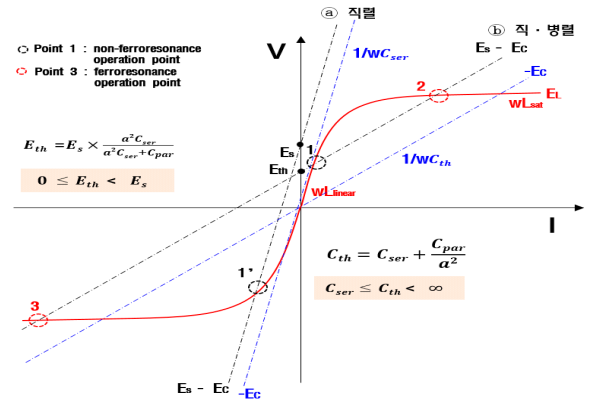
[그림 2] 변압기 철심의 포화특성

### 2.2 ESS 연계용 변압기의 철공진 메커니즘

그림 1의 L-C 직렬 및 직·병렬 철공진 회로를 간략화하면 그림 3과 같고, 이 회로에서 전류와 전압을 도식적인 해석수법을 이용해 비교하면 그림 4와 같다. 그림 4에서 a직선은 L-C 직렬 철공진 회로의 특성이며,  $E_L$ 과  $E_s - E_c$ 의 교차점은 1개만 존재하므로 철공진이 발생되지 않음을 알 수 있다. 반면, b직선은 L-C 직·병렬 철공진 회로의 특성이며, 테브난 등가전압( $E_{th}$ )은  $E_s$ 보다 작아지고, 직선 기울기( $1/wC_{th}$ )는 직렬 철공진 회로의 기울기보다 감소하게 된다. 여기서,  $E_L$ 과  $E_s - E_c$ 의 교차점은 3개까지 발생할 수 있으며, 동일한 인가전압( $E_{th}$ )에서 변압기의 인덕터 양단전압은 3개의 해를 가질 수 있으며, 철공진에 의해 하나의 교차점에서 다른 교차점으로 순간적인 전압상승이 발생할 가능성이 있다. 따라서, L-C 직·병렬 철공진 회로는 직렬 철공진 회로에 비해 철공진의 가능성이 증가하게 된다.



[그림 3] ESS의 L-C 직·병렬 철공진 테브난 등가회로



[그림 3] 도식적 해석을 이용한 ESS 연계용변압기의 철공진 특성분석

### 3. ESS 연계용 변압기의 철공진 방지 알고리즘

2장에서 제시한 커패시턴스에 따른 철공진 특성을 바탕으로 적정용량의 PCS 필터를 제시하고, 보완적으로 MOV를 이용하는 철공진 방지 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

[Step 1] 선로정수, 절연내력(U), 기준전압(Un), 분산전원 등의 배전계통 데이터와 ESS 연계용변압기의 선형 및 포화 시 인덕턴스, 차단기 극간 커패시턴스 및 PCS의 필터 용량 등의 파라미터를 상정한다.

[Step 2] ESS 연계점에서의 불평형 부하전류, DC 접지전위 상승 크기를 산정하여, 변압기의 I-V 곡선을 도식화한다. 또한, 철공진 방지용 커패시턴스( $C_{pre}$ )의 용량을 0으로 초기화한다.

[Step 3] 철공진 발생 가능성을 판별하기 위해, 운용점의 개수를 확인한다. 운용점의 개수가 2개 이상인 경우에는 철공진 발생영역에 포함되므로 [Step 4]로 진행하고, 그렇지 않으면 [Step 5]로 이동한다.

[Step 4] 연계용변압기가 철공진 발생 가능성이 있는 경우, 이를 방지하기 위해 적절한 철공진 방지용 커패시턴스( $C_{pre}$ )의 용량을 증가시키고, [Step 3]으로 이동한다.

[Step 5] 연계용변압기가 철공진 발생 영역에서 벗어나면, 상기에서 산정된  $C_{pre}$ 를 PCS AC측에 적용하고 [Step 6]으로 이동한다.

[Step 6] 적절한 커패시터 용량이 적용되더라도, 운용환경과 열화 등에 의해 발생가능한 철공진 현상을 방지하기 위하여, 적절한 MOV의 용량을 산정한다. 즉, MOV의 기준전압( $U_n$ )과 여기에 여유율을 고려한 최대연속 사용전압( $U_c$ )를 결정한다.

[Step 7] MOV 제조사별 가중계수(Wf), 여유율( $R_s$ ) 등을 고려하여, MOV의 제한전압( $U_p$ )을 식 (1)과 같이 산정한다.

$$U_p = W_f \times R_s \times U_c \quad (1)$$

여기서,  $W_f$  : MOV 제조사별 가중계수  
 $R_s$  : 제한전압의 여유율

[Step 8]  $U_p$ 가 식 (2)를 만족하지 못하는 경우, 너무 높은 값으로 설정되어 철공진 전압으로부터 배터리를 충분히 보호하지 못하므로  $U_p$  값을 감소시켜, 해당 과정을 반복한다.

$$U_p \leq U_w \quad (2)$$

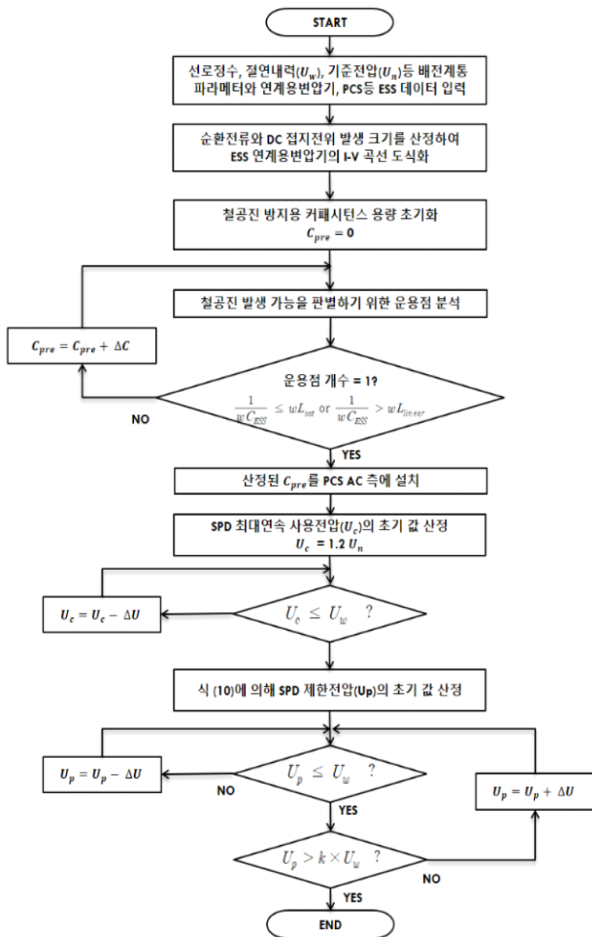
여기서,  $U_w$  : 절연내력

[Step 9]  $U_p$ 가 식 (3)을 만족하지 못하는 경우, 낮은 값으로 설정되어 MOV가 자주 탈락될 가능성이 있으므로  $U_p$  값을 일정량만큼 증가시킨 후, [Step 8]로 이동한다. 한편,  $U_p$ 가 식 (3)을 만족하는 경우, 해당 값을 MOV의 제한전압으로 선정하고, 알고리즘을 종료한다.

$$U_p \leq k \times U_w \quad (3)$$

여기서,  $k$  : 여유율

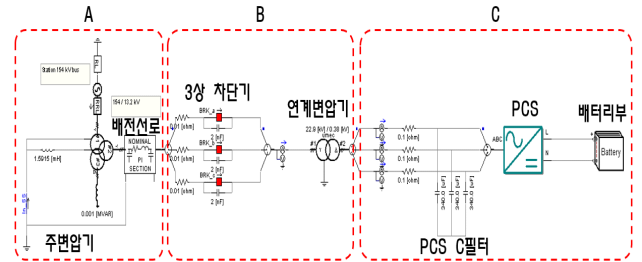
따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면, 그림 5와 같다.



[그림 5] ESS 연계용변압기의 철공진 방지 알고리즘

#### 4. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS 연계용 변압기의 철공진 모델링

2장에서 제시한 철공진 메커니즘에 따라 3상 전원부(차단기, 연계용 변압기), PCS부 및 배터리부로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면, 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 6의 A부분은 주변압기와 고압 배전선로, B부분은 3상 차단기와 ESS 연계용 변압기, 그리고 C부분은 PCS부와 배터리부로 구성된다. 또한, 사고유형별(①DC 전로 단락, ②배터리 랙 단락, ③PCS 압 단락) 사고전류의 특성을 확인할 수 있도록 회로를 구성한다.



[그림 6] ESS 연계용 변압기의 철공진 모델링

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

##### 5.1 시뮬레이션 조건

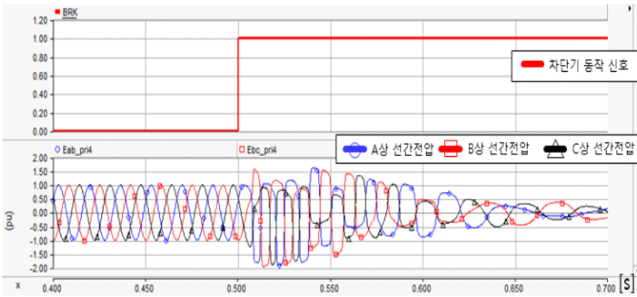
ESS 연계용 변압기의 철공진 특성을 분석하기 위하여, 표 6-8과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 주변압기는 154/22.9[kV]의 45/60[MVA] 정격용량을 가지며, 고압배전선로의 선종은 ACSR 160mm<sup>2</sup>이고, 공장은 10[km]로 상정한다. 그리고, ESS 연계용 변압기(22.9[kV]/380[V])는 3각 철심구조의 Yg-Δ 결선방식을 사용하며, PCS의 용량은 1[MVA]이고, 필터용 커패시턴스는 380[μF]으로 상정한다. 또한, MOV의 최대연속사용전압( $U_c$ )은 26[kV]이며, 제한전압( $U_p$ )은 40[kV]이고, PCS 필터용 커패시턴스는 기존 방식에서 380[μF], 제안한 방식에서 450[μF]으로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

구분	파라메타	크기
주변압기	전압비[kV]	154/22.9
	선로	공장[km]
3상 차단기	개방 시 커패시턴스[nF]	2
	개방 동작 시점[s]	0.5
MOV	최대연속사용전압[kV]	26
	제한전압[kV]	40
ESS 연계용 변압기	연계방식	Yg-Δ
	철심구조	3각 철심
	전압비[kV]	22.9/0.38
	용량[MVA]	1.25
PCS	용량[MVA]	1
	기존 커패시턴스[μF]	380
	제안한 방식에 의한 커패시턴스[μF]	450

### 5.2 ESS 연계용변압기의 철공진 특성 분석

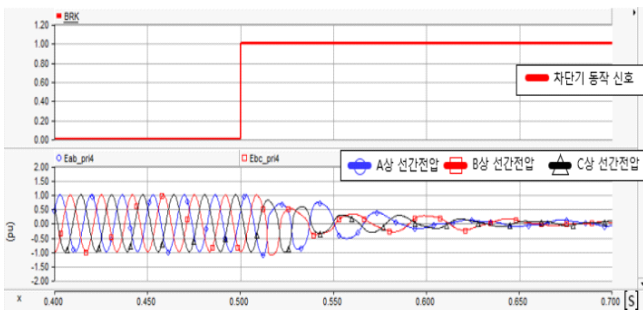
표 1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, ESS 연계용변압기에 서 차단기의 동작에 의해 철공진이 발생하는 경우, 차단기 동작신호와 연계용변압기 2차측 전압특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 1[pu]의 3상 정현파 인가전압에 대하여 변압기 2차측 전압은 철공진 현상에 의하여, 순간적으로 약 1.8[pu]까지 증가함을 알 수 있다. 따라서, 철공진 현상이 발생하면 변압기 2차측에 위치한 배터리에 순간적인 과전압에 의하여 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



[그림 7] 차단기 동작 시, 철공진에 의한 전압특성

### 5.3 철공진 방지 알고리즘에 의한 특성분석

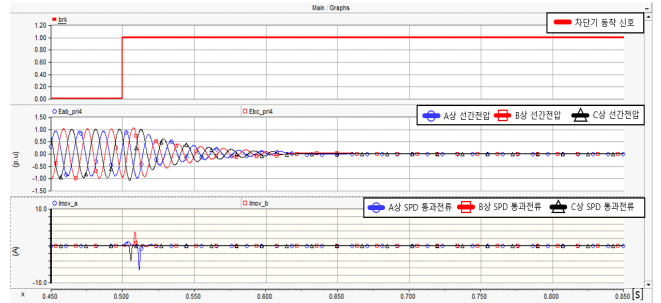
그림 7과 같이 ESS 연계용변압기의 L-C 직·병렬회로에서 보호기기 동작에 의하여 1.8[pu]의 철공진 전압이 발생한 사례에 대하여, 제안한 알고리즘에 따라 PCS측 필터의 커패시턴스를 380[μF]에서 450[μF]으로 증가시킨 경우, 차단기 동작에 따른 전압특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 1[pu]의 3상 정현파 인가전압에 대하여 3상 차단기가 동작 시, 감소된 커패시턴스로 인해 철공진 발생 영역에서 벗어나, 철공진이 발생되지 않고 연계용변압기 2차측 전압이 정상적으로 유지됨을 알 수 있다. 따라서, PCS측 필터의 커패시턴스를 적절한 값으로 설치할 경우, 연계용변압기 2차측에 위치한 배터리의 순간적인 과전압현상을 방지할 수 있으므로, 본 연구에서 제시한 방지 알고리즘이 ESS의 안정적인 운용에 기여할 수 있음을 확인할 수 있었다.



[그림 8] 철공진 방지 알고리즘에 의한 전압특성

또한, 제안한 알고리즘에 따라 철공진을 방지하기 위해 커패시턴스를 변경하더라도, 운용환경이 달라지거나 열화 등에 의해 파라메타가 변동될 수 있다. 이를 보완하기 위하여 표 1의

시뮬레이션 조건에 따라, 연계용변압기 1차측에 설치된 MOV에 대하여 철공진 방지 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 즉, 380[μF]의 커패시턴스에 대하여, 고압측 차단기 동작 이후 변압기 코일과 커패시터에 저장된 잔류 에너지가 MOV를 통해 방출되어, 철공진 전압이 약 1.03[pu] 이내로 감소됨을 알 수 있다.



[그림 9] MOV에 의한 철공진 보호 특성

한편, AC측 필터용 커패시턴스에 따른 사고특성을 나타내면 표 2와 같다. 여기서, 철공진 현상을 방지하기 위해 커패시턴스를 450[μF]으로 증가시키더라도, 모든 사고유형(①DC 전로 단락, ②배터리 랙 단락, ③PCS 암 단락)에서 사고전류의 크기는 기존보다 1[%] 이내로 증가한 것을 알 수 있다. 따라서, 제안한 철공진 방지 알고리즘에 의해 커패시턴스의 크기를 변경하더라도, 사고전류에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있어 제안한 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

[표 2] AC측 필터용 커패시턴스에 따른 사고전류 특성

커패시턴스	사고 유형	사고전류[kA]			사고전류 증가율[%]
		DC측	AC측	전체	
380[μF]	DC 전로 단락	69.6	1.09	70.69	-
	배터리 랙 단락	41.98	1.08	43.06	-
	PCS 암 단락	55.6	1.1	56.7	-
450[μF]	DC 전로 단락	69.6	1.16	70.76	0.1
	배터리 랙 단락	41.98	1.13	43.11	0.12
	PCS 암 단락	55.6	1.15	56.75	0.09

## 6. 결 론

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