

# DC 접지 전위상승을 고려한 ESS 연계용변압기의 철공진 모델링에 관한 연구

태동현, 이후동, 원종홍, 이명근, 노대석  
한국기술교육대학교  
e-mail:tdh2002@koreatec.ac.kr

## A Modelling of Ferro-resonance in Grid-connected Transformer for ESS Considering on DC Ground Potential Rising

Dong-Hyun Tae, Hu-Dong Lee, Jong-Heung Won, Myung-geun Lee, Dae-Seok Rho  
Korean University of Technology and Education

### 요약

최근, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있는 실정이다. 이러한 ESS는 태양광전원과 연계되어 운용되는 경우가 대다수인데, 태양광전원이 대규모로 설치된 사이트는 DC 접지전위 상승의 영향을 받을 가능성이 있다. 따라서, 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승과 ESS 연계용변압기의 포화에 관한 상관관계의 분석이 요구되고 있다. 본 논문에서는 도식적인 해석수법을 통하여 DC 접지전위 상승에 의한 연계용변압기 포화 및 철공진 메커니즘을 정의하고, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부, 차단기 및 연계용변압기부, 태양광전원부 및 배터리부로 구성된 ESS의 모델링을 제시한다. 상기의 메커니즘과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, DC 접지전위 상승이 변압기 포화 및 철공진에 영향을 미치고, 이에 따라 연계용변압기 2차측의 전압이 급격하게 증가하여, 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

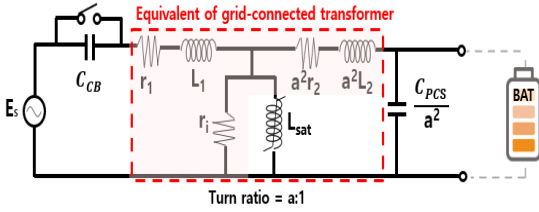
## 1. 서론

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 18년도 4,773[MWh]에서 20년도에 8,583[MWh]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 상승이 연계용변압기의 포화에 미치는 영향도 고려되어야 한다[1-2]. 따라서, 본 논문에서는 DC 접지전위 상승에 의한 연계용변압기 포화 및 철공진 메커니즘을 정의하고, 도식적인 해석수법 및 등가회로를 통하여 철공진 특성을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부(차단기, 연계용변압기), PCS부, 태양광전원부 및 배터리부로 구성된 시스템의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, DC 접지전위 상승이 변압기 포화 및 철공진 가능성을 증가시킴을 알 수 있었고, 철공진 발생 시 연계용변압기 2차측의 전압이 급격하게 증가하여 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

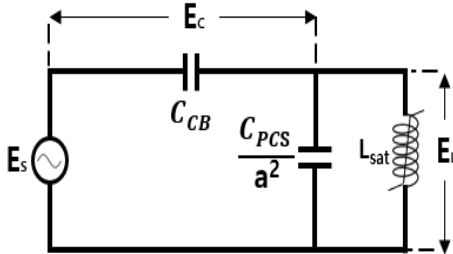
## 2. DC 접지 전위상승에 따른 ESS 연계용변압기의 철공진 메커니즘

### 2.1 ESS 연계용변압기의 직·병렬 철공진 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( $E_s$ )와 차단기( $C_{CB}$ ), 연계용변압기( $L_{sat}$ ), PCS의 커패시턴스 성분( $C_{PCS}$ ) 등으로 나타낼 수 있다. 여기서, 변압기의 비선형특성을 고려하기 위하여, 변압기의 등가회로를 이용하고 2차측을 1차측으로 환산하면 그림 1(a)와 같다. 또한,  $r_1$ 과  $L_1$ ,  $r_2$ 와  $L_2$ 는 각각 1차측 및 2차측의 권선저항과 누설 리액턴스를 나타내며,  $r_1$ 는 철손전류를 나타내는데, 상기 요소들은 철공진 발생 유·무에는 영향이 거의 없기 때문에, 이를 생략하여 간략화하면 그림 1(b)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) ESS의 L-C 직·병렬 철공진 회로



(b) 간략화된 ESS의 L-C 직·병렬 철공진 등가회로  
[그림 1] ESS의 L-C 직·병렬 철공진 테브난 등가회로

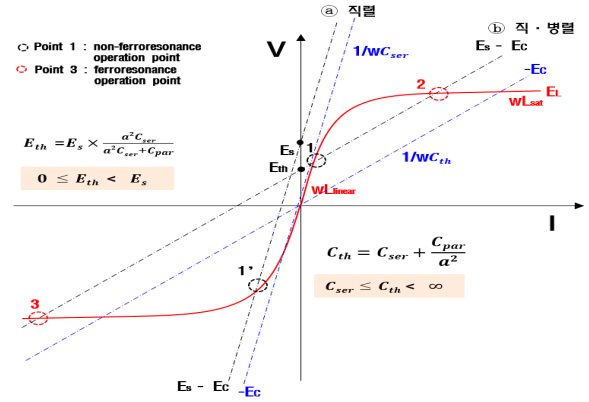
상기 그림 1(b)의 L-C 직·병렬 철공진 회로를 테브난 등가회로로, ESS의 테브난 등가 커패시턴스는 식 (1)과 같고, ESS의 테브난 등가 전압은 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$C_{th\_ESS} = C_{CB} + \frac{C_{PCS}}{a^2} \quad (1)$$

$$E_{th\_ESS} = E_s \times \frac{a^2 C_{CB}}{a^2 C_{CB} + C_{PCS}} \quad (2)$$

여기서,  $C_{th\_ESS}$  : ESS의 테브난 등가 커패시턴스 [F],  $C_{CB}$  : 차단기의 직렬 커패시턴스[F],  $C_{PCS}$  : PCS용 필터의 병렬 커패시턴스[F],  $a$  : 변압기의 권수비,  $E_{th\_ESS}$  : ESS의 테브난 등가 전압[V]

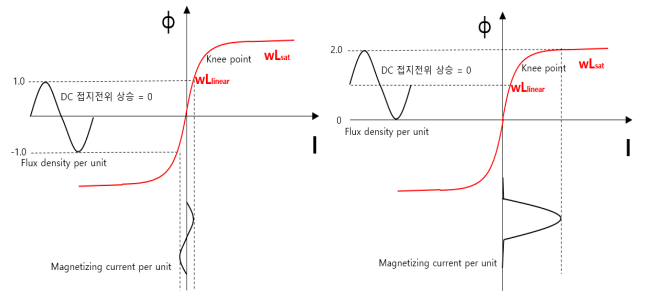
한편, L-C 직렬 및 직·병렬 철공진 회로에서 전류와 전압을 도식적인 해석수법을 이용해 비교하면 그림 2와 같다. 먼저, a직선은 L-C 직렬 철공진 회로의 특성이며,  $E_L$ 과  $E_s - E_C$ 의 교차점은 1개만 존재하므로 철공진이 발생되지 않음을 알 수 있다. 반면, b직선은 L-C 직·병렬 철공진 회로의 특성이며, 테브난 등가전압( $E_{th}$ )은  $E_s$ 보다 작아지고, 직선 기울기 ( $1/wC_{th}$ )는 직렬 철공진 회로의 기울기보다 감소하게 된다. 여기서,  $E_L$ 과  $E_s - E_C$ 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 2] 도식적 해석을 이용한 직렬 및 직·병렬 철공진의 비교

## 2.2 DC 접지 전위상승에 따른 ESS 연계용변압기의 포화 메커니즘

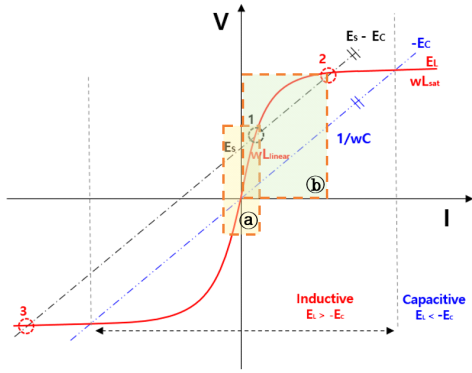
대규모 태양광전원 발전단지의 경우, 접지가 되어있더라도 에너지밀도가 높기 때문에 DC 접지 전위상승이 발생할 가능성이 있다. 이러한 DC 접지 전위상승이 연계용변압기의 포화에 미치는 영향을 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3의 (a)는 DC 접지 전위상승이 없는 경우의  $I-\Phi$  곡선이며, 변압기의 자화전류가 무릎점 미만에서 발생하는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 3의 (b)는 DC 접지 전위상승이 있는 경우의  $I-\Phi$  곡선이며, DC 접지 전위상승에 의해 반주기동안 무릎점을 초과하여 자화전류가 매우 높게 발생하고,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



(a) DC 접지 전위상승이 없는 경우  $I-\Phi$  curve  
(b) DC 접지 전위상승이 있는 경우  $I-\Phi$  curve

[그림 3] DC 접지 전위상승에 따른  $I-\Phi$  curve

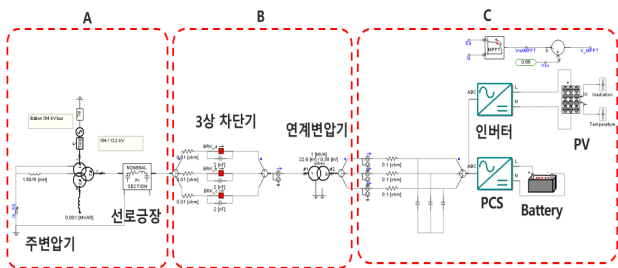
따라서, 그림 3의 (b)와 같이 DC 접지 전위상승이 발생된 경우 도식적인 해석수법을 이용하여 나타내면 그림 4와 같다. 즉, DC 접지 전위상승에 의해 매우 높은 자화전류가 발생하고, 이는 변압기 2차측에 큰 서지를 유도할 수 있다. 특히, 연계용변압기의 자화곡선의 운용범위는 무릎점 미만인 ①영역이지만, DC 접지 전위상승에 의해 양의 주기에서 무릎점 이상으로 변압기가 포화되어 ②영역에서 운용되게 되면,  $E_L$ 과  $E_s - E_C$ 의 교차점이 추가적으로 발생하므로 철공진이 발생할 가능성이 있다.



[그림 4] DC 접지 전위상승에 따른 철공진의 도식적인 해석

### 3. PSCAD/EMTDC에 의한 연계용 변압기의 철공진 모델링

태양광전원으로 인한 DC 접지전위 상승이 ESS 연계용 변압기의 포화에 영향을 미쳐, 철공진 발생 가능성을 증가시키는 현상을 분석하기 위하여, 전력계통해석 상용 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용해 주변압기, 고압 배전선로, ESS 연계용 변압기, 인버터, PCS, 태양광전원 및 배터리로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면, 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 5의 A부분은 주변압기와 고압 배전선로, B부분은 3상 차단기와 ESS 연계용 변압기, 그리고 C부분은 MPPT 제어를 수행하는 인버터와 태양광전원, 충방전 제어용 PCS와 배터리로 구성된다.



[그림 5] PSCAD를 이용한 ESS 연계용 변압기의 철공진 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

L-C 직·병렬회로에서 발생하는 철공진의 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 전원부는 380[V], 60[Hz]의 단상 전압원이고, 비선형 인덕터는 선형영역에서 2,653[mH], 포화영역에서 최소 265[mH]의 인덕턴스로 상정한다. 또한, 선로저항은 0.01[Ω]이고, L-C 직렬 회로에서는 정상상태이지만, 병렬 커패시터가 추가된 경우 철공진이 발생하는 현상을 모의하기 위한 직렬 및 병렬 커패시턴스는 각각 0.8, 2.5[uF]으로 고려한다.

[표 1] 직·병렬 철공진 시뮬레이션 조건

구분	파라메타	크기
전원부	인가전압[V]	380
	주파수[Hz]	60
비선형 인덕터	기준전압[V]	380
	기준전류[A]	1
	초기 인덕턴스[mH]	2,653
	포화 시 인덕턴스[mH]	265
선로	저항[Ω]	0.01
직렬 커패시터	커패시턴스[uF]	0.8
병렬 커패시터	커패시턴스[uF]	2.5

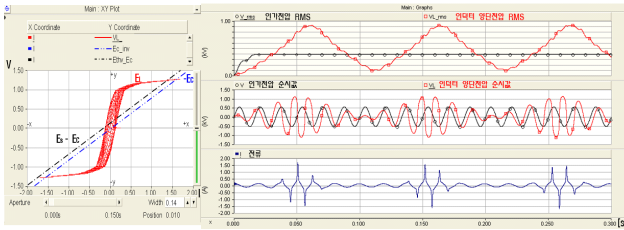
한편, DC 접지전위 상승에 따른 ESS 연계용 변압기의 철공진 특성을 분석하기 위하여, 표 2와 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 주변압기는 154/22.9[kV]의 45/60[MVA] 정격용량을 가지며, 고압배전선로의 선종은 ACSR 160mm<sup>2</sup>이고, 구간은 10[km]로 상정한다. 또한, 3상 차단기의 커패시턴스는 2[nF]을 적용하며, ESS 연계용 변압기(22.9[kV]/380[V])는 3각 철심구조의 Yg-Δ 결선방식이다. 한편 태양광전원의 DC 전압은 700V이고, 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승률은 태양광전원 전압의 0%, 3%, 5%로 나누어 시뮬레이션을 수행한다.

[표 2] ESS 연계용 변압기의 철공진 시뮬레이션 조건

구분	파라메타	크기
ESS 연계용 변압기	연계방식	Yg-Δ
	철심구조	3각 철심
	전압비[kV]	22.9/0.38
	용량[MVA]	1.25
	%임피던스[%]	4
	동손[%]	1
PCS	용량[MVA]	1
	필터의 커패시턴스[uF]	400
태양광전원	전압[V]	700
	DC 접지 전위상승[%]	0
		3
		5

### 4.2 L-C 직·병렬 철공진 특성 분석

표 1의 시뮬레이션 조건에서 0.8[uF]의 직렬 커패시터와 2.5[uF]의 병렬 커패시터가 동시에 고려되었을 때, L-C 직렬 회로에서 전압 및 전류의 값을 구하면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6(a)는 전류와 전압에 대한 도식적인 해석수법을 나타내며, E<sub>s</sub>-E<sub>c</sub>와 E<sub>L</sub>이 3개의 교차점을 가지므로 철공진이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 6(b)는 인가전압, 인덕터 양단전압과 전류의 값을 나타내며, 1[pu]의 정현파 인가 전압에 대하여 인덕터 전압은 철공진 현상에 의하여, 순간적으로 약 2.3[pu]까지 증가함을 알 수 있다.

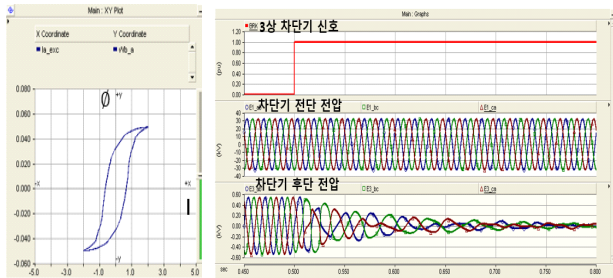


(a) I-V curve (b) 전압 및 전류 특성  
[그림 6] L-C 직·병렬회로의 철공진 전압 및 전류 특성

### 4.3 DC 접지전위 상승에 따른 철공진 특성 분석

#### 4.3.1 DC 접지전위 상승을 고려하지 않은 경우

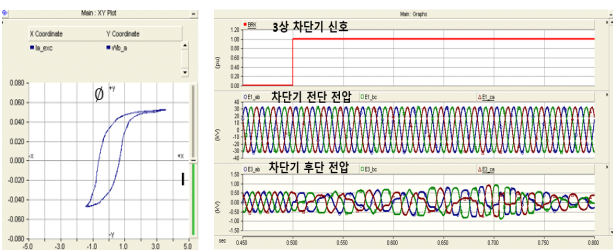
표 2의 시뮬레이션 조건에 따라 DC 접지 전위상승을 고려하지 않은 경우, 차단기 동작에 따른 전압 및 전류 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7의 (a)는 연계용변압기의 I- $\phi$  곡선이며, 그림 7의 (b)는 전압 및 전류 특성이다. 1[pu]의 정현파 인가전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 동시 개방 시, 철공진이 발생되지 않고 연계용변압기 2차측 전압이 정상적으로 유지됨을 알 수 있다.



(a) I- $\phi$  curve (b) 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성  
[그림 7] 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성(DC 접지 전위상승 0%)

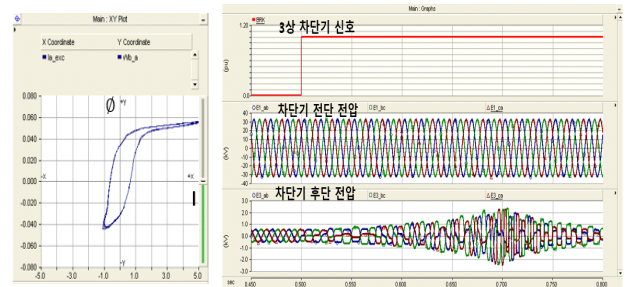
#### 4.3.2 DC 접지전위 상승을 고려한 경우

한편, DC 접지 전위상승 3%를 고려하는 경우, 차단기 동작에 따른 전압 및 전류 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8의 (a)는 연계용변압기의 I- $\phi$  곡선이며, 3%의 DC 접지 전위상승으로 인해 자화전류가 크게 증가함을 알 수 있다. 그림 8의 (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 1.8[pu]까지 증가하여, 연계용변압기 2차측의 배터리의 과충전으로 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



(a) I- $\phi$  curve (b) 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성  
[그림 8] 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성(DC 접지 전위상승 3%)

또한, DC 접지 전위상승 5%를 고려하는 경우, 차단기 동작에 따른 전압 및 전류 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9의 (a)는 연계용변압기의 I- $\phi$  곡선이며, 5%의 DC 접지 전위상승으로 인해 자화전류가 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 그림 9의 (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- $\phi$  curve (b) 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성  
[그림 9] 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성(DC 접지 전위상승 5%)

## 5. 결 론

본 논문에서는 DC 접지전위 상승에 의한 연계용변압기 포화 및 철공진 메커니즘을 분석하고, PSCAD/EMTDC를 이용해 철공진 모델링을 수행하였다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 병렬 커패시터가 추가적으로 고려될 경우 철공진의 가능성이 증가함을 알 수 있었다. 또한, DC 접지전위 상승이 변압기 포화 및 철공진 가능성을 증가시키고, 철공진 발생 시 연계용변압기 2차측의 전압이 급격하게 상승하여 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090, 20214910100010)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] T. Halbedl, H. Renner, M. Sakulin and G. Achleitner, "Measurement and analysis of neutral point currents in a 400-kV-network," 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), pp. 65-68, 2014.
- [2] Ang, Swee Peng, "Ferroresonance Simulation Studies of Transmission Systems", The University of Manchester, 25th November, 2010