

# DC 접지전위 상승과 순환전류를 고려한 ESS 연계용변압기의 포화특성에 관한 연구

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

## Characteristics of Saturation in Grid-connected Transformer for ESS Depending on the 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>Depratment Electrical Safety Research Institute, <sup>\*\*</sup>Korea University of Technology

### 요 약

ESS는 전력저장을 통해 발전소 건설비, 송전선 설치비 등 투자비를 절감할 수 있고, 재생에너지 변동성 대응 등이 가능하여 전력시스템에서 중요성이 높아지고 있다. 하지만, 현재까지 총 42건의 ESS 화재가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다. 특히, 동일한 ESS 설비를 적용하더라도 설치위치에 따라 계통측면의 위해도가 상이하지만, 계통의 영향을 고려한 화재 원인규명은 미흡한 실정이다. 즉, ESS 화재사고의 원인으로 전기적 위해요인이 중요한 항목으로 평가되고 있는데, 그 중에서 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승과 순환전류에 의한 연계용변압기의 포화에 대한 특성 분석이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 계통불평형에 의한 순환전류와 DC 접지전위 상승에 의한 변압기 포화 메커니즘을 제시하고, PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광전원부 및 ESS부의 모델링을 수행한다. 상기의 메커니즘과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 순환전류와 DC 접지전위 상승이 변압기 포화에 영향을 미치고, 연계용변압기와 ESS간의 철공진 가능성이 증가하여, 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

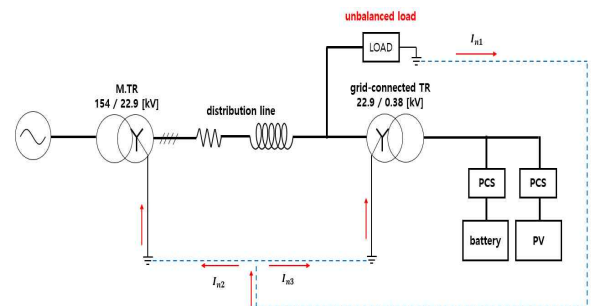
### 1. 서 론

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, 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승과 부하불평형에 의한 순환전류가 연계용변압기의 포화에 미치는 영향도 고려되어야 한다[1]. 따라서, 본 논문에서는 계통불평형에 의한 순환전류와 DC 접지전위 상승에 의한 변압기 포화 메커니즘을 제시하고, PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광전원부 및 ESS부의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 순환전류와 DC 접지전위 상승이 변압기 포화에 영향을 미치고, 연계용변압기와 ESS간의 철공진 가능성을 증가시킴을 알 수 있었고, 철공진 발생 시 연계용변압기 2차측의 전압이 급격하게 증가하여 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

### 2. 순환전류에 의한 변압기 철심포화 메커니즘

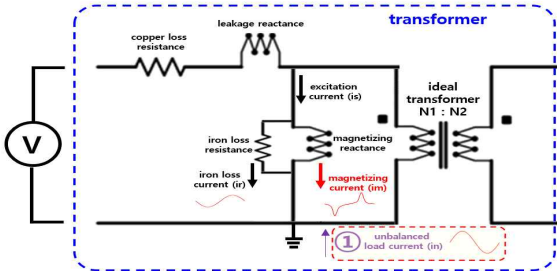
#### 2.1 변압기 철심포화 메커니즘

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, 순환전류가 정상상태의 자화전류에 영향을 미쳐 변압기가 포화될 가능성이 있으며, 이로 인하여 연계용변압기 2차측의 전압 파형이 왜곡되거나 서지가 발생될 수 있다.



[그림 1] 순환전류 발생 개념도

상기 그림에서 ESS 연계용변압기측 순환전류( $I_{n3}$ )가 정상상태의 자화전류( $I_m$ )에 영향을 미쳐서 연계용변압기의 철심포화 현상을 증대시킬 수 있다. 즉, 그림 2와 같이 순환전류(①)의 위상이 변압기 등가회로에서 자화 리액턴스에 흐르는 자화전류의 위상과 동일한 위상을 가지는 경우, 자화 리액턴스에는 정상상태보다 더 큰 전류가 흘러 변압기의 철심포화 현상이 심해지게 된다.



[그림 2] 순환전류에 의한 변압기 철심포화 개념도

그림 2에서, 자화전류는 변압기의 포화특성( $\lambda_M, \lambda_K, L_A$ )에 따라, 식 (1) ~ 식 (3)에 의하여 산정된다. 여기서, 식 (1)의 1, 2항은 변압기의 포화특성에 따라 계산되는 자화전류의 크기이며, 3항은 자화 리액턴스로 유입되는 순환전류의 크기를 나타낸다. 한편, 식 (2)는 1차측 정격 전압에서 쇄교되는 자속의 크기를 나타낸다.

$$i_m = \frac{\sqrt{(\lambda_M - \lambda_K)^2 + 4DL_A} + \lambda_M - \lambda_K}{2L_A} - \frac{D}{\lambda_K} + \frac{r}{\sqrt{r + X_m}} i_n \quad (1)$$

$$\lambda_M = \frac{V_M}{2\pi f} \quad (2)$$

$$A = \frac{L_A}{\lambda_K^2} \quad (3)$$

$$B = \frac{L_A I_M - \lambda_M}{\lambda_K} \quad (3)$$

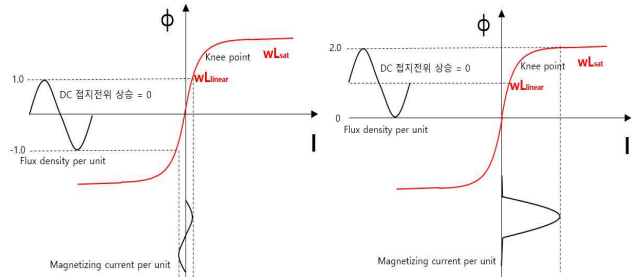
$$C = I_M(L_A I_M - \lambda_M + \lambda_K)$$

$$D = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

여기서,  $i_m$  : 자화전류[A],  $\lambda_M$  : 1차측 정격 전압에서 쇄교되는 자속[Wb·turn],  $\lambda_K$  : 쇄교자속의 무릎점[Wb·turn],  $r$  : 철손저항[Ω],  $X_m$  : 자화 리액턴스[Ω],  $i_n$  : ESS 연계용변압기측 순환전류[A],  $L_A$  : 포화 시 변압기 등가 리액턴스[H],  $V_M$  : 1차측 정격 전압의 RMS값[V],  $I_M$  : 1차측 정격 전압에서 자화전류[A]

## 2.2 DC 접지 전위상승에 따른 포화 메커니즘

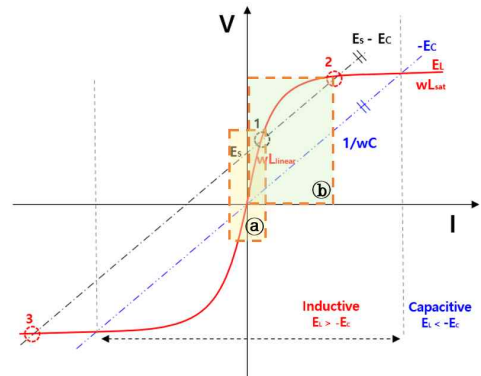
대규모 태양광전원 발전단지의 경우, 접지가 되어있더라도 에너지밀도가 높기 때문에 DC 접지 전위상승이 발생할 가능성이 있다. 이러한 DC 접지 전위상승이 연계용변압기의 포화에 미치는 영향을 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3의 (a)는 DC 접지 전위상승이 없는 경우의  $I-\phi$  곡선이며, 변압기의 자화전류가 무릎점 미만에서 발생하는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 3의 (b)는 DC 접지 전위상승이 있는 경우의  $I-\phi$  곡선이며, DC 접지 전위상승에 의해 반주기동안 무릎점을 초과하여 자화전류가 매우 높게 발생하고, 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[2].

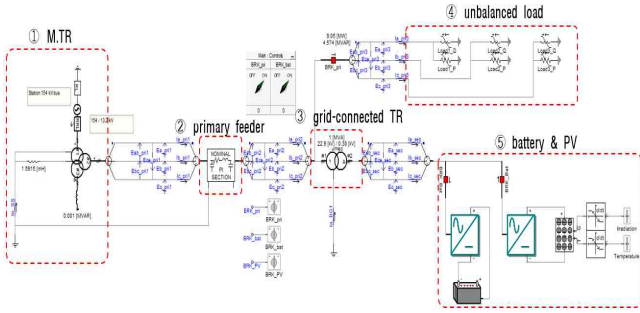


[그림 4] DC 접지 전위상승에 따른 철공진의 도식적인 해석

## 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 변압기 철심포화 모델링

### 3.1 순환전류에 의한 철심포화 모델링

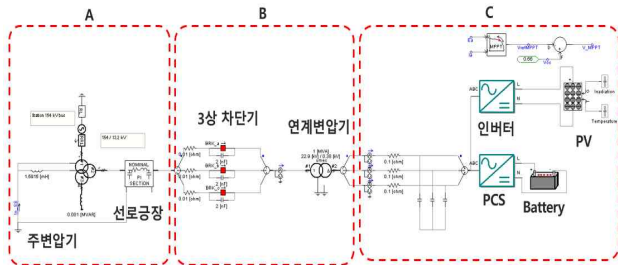
부하불평형에 의해 ESS 연계용변압기 1차측에 순환전류가 유입되고, 변압기 철심이 포화되는 현상을 분석하기 위하여, 배전용변전소, 배전선로, 연계용변압기, 불평형부하, 배터리 및 태양광전원으로 구성된 전체 배전시스템의 모델링을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 배전용변전소 3권선 주변압기는 Yg-Yg-Δ 결선방식이며, 배전선로는 ACSR 160[mm<sup>2</sup>], 연계용변압기 용량은 1[MVA]를 상정한다.



[그림 5] PSCAD를 이용한 순환전류에 의한 철심포화 모델링

### 3.2 DC 접지 전위상승에 의한 철심포화 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 배전계통을 모델링하면, 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 6의 A부분은 주변압기와 고압 배전선로, B부분은 3상 차단기와 ESS 연계용변압기, 그리고 C 부분은 MPPT 제어를 수행하는 인버터와 태양광전원, 충방전 제어용 PCS와 배터리로 구성된다.



[그림 6] PSCAD를 이용한 ESS 연계용변압기의 철공진 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

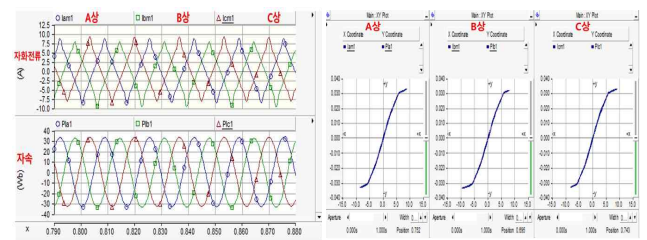
계통불평형에 의한 순환전류와 DC 접지전위 상승에 의한 변압기 포화 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 주변압기는 154/22.9[kV]의 45/60[MVA] 정격용량을 가지며, 고압배전선로의 선종은 ACSR 160mm<sup>2</sup>이고, 공장은 20[km]로 상정한다. 또한, 3상 차단기의 커패시턴스는 2[nF]를 적용하며, ESS 연계용변압기 (22.9[kV]/380[V])는 5각 철심구조의 Yg-Δ 결선방식이다. 그리고, PCS의 용량은 1[MVA]이고, 필터용 커패시턴스는 400[μF]으로 상정한다. 또한, 부하불평형에 의한 순환전류를 모의하기 위하여, 3상 부하 10[MW]의 불평형률을 0, 10[%]로 나누어 모의하고, DC 접지전위 상승에 의한 영향을 확인하기 위하여 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승률은 태양광전원 전압의 0%, 3%, 5%로 나누어 시뮬레이션을 수행한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

| 구분         | 파라메타           | 크기        |
|------------|----------------|-----------|
| 주변압기       | 전압비[kV]        | 154/22.9  |
| 선로         | 공장[km]         | 20        |
| 3상 차단기     | 개방 시 커패시턴스[nF] | 2         |
|            | 개방 동작 시점[s]    | 0.5       |
| ESS 연계용변압기 | 연계방식           | Yg-Δ      |
|            | 철심구조           | 5각 철심     |
|            | 전압비[kV]        | 0.38/22.9 |
| PCS        | 용량[MVA]        | 1         |
|            | 필터의 커패시턴스[μF]  | 400       |
| 태양광전원      | 전압[V]          | 700       |
|            | DC 접지 전위상승[%]  | 0         |
|            |                | 3         |
| 3상 부하      | 용량[MW]         | 10        |
|            | 역률             | 0.9       |
|            | 불평형률[%]        | 0         |
|            |                | 10        |

### 4.2 순환전류에 의한 철심포화 특성 분석

표 1의 시뮬레이션 조건에서 3상 부하가 평형인 상태에서, 연계용변압기 1차측 중성선에는 1.15[A]의 낮은 크기의 순환전류가 흐르게 된다. 이때, ESS 연계용변압기의 자화전류와 자속 특성을 나타내면 그림 7 (a)와 같다. 3상 부하가 평형이므로, 3상 자화전류와 자속은 모두 유사한 RMS 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 또한, 그림 7(b)는 자화전류에 따른 자속의 크기인 I-Φ 곡선을 나타내며, 3상 모두 유사한 포화곡선을 나타냄을 알 수 있다.

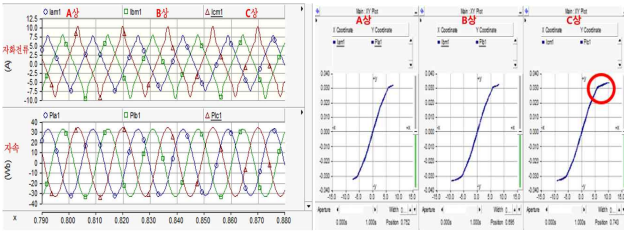


(a) 자화전류 및 자속 특성

(b) I-Φ curve

[그림 7] 3상 부하 평형상태에서 자화전류 및 자속 특성

한편, 표 1의 시뮬레이션 조건에서 부하 불평형률이 10% 고려되었을 때, 연계용변압기 1차측 중성선에는 11.36[A]의 높은 크기의 순환전류가 흐르게 된다. 여기서, ESS 연계용변압기의 자화전류와 자속 특성을 나타내면 그림 8 (a)와 같다. 3상 부하가 불평형이므로, 가장 낮은 부하(c상)에 높은 자화전류가 발생함을 확인할 수 있다. 또한, 그림 8 (b)는 자화전류에 따른 자속의 크기인 I-Φ 곡선을 나타내며, 순환전류가 c상의 자화전류에 영향을 미쳐, 철심을 더욱 포화시킴을 알 수 있다. 따라서, 철심의 포화 정도가 심해지므로 시스템의 철공진 가능성이 증가하게 된다.



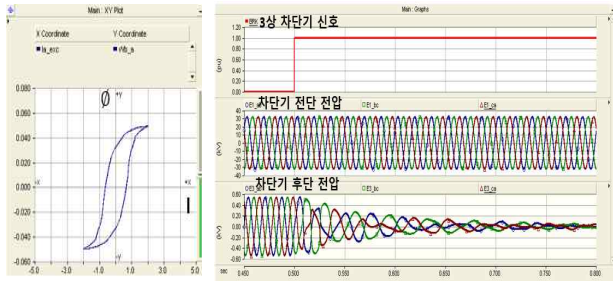
(a) 자화전류 및 자속 특성 (b) I-φ curve

[그림 8] 3상 부하 평형상태에서 자화전류 및 자속 특성

### 4.3 DC 접지 전위 상승에 의한 철심포화 특성

#### 4.3.1 DC 접지전위 상승을 고려하지 않은 경우

표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 DC 접지 전위상승을 고려하지 않은 경우, 차단기 동작에 따른 전압 및 전류 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9의 (a)는 연계용변압기의 I-φ 곡선이며, 그림 9의 (b)는 전압 및 전류 특성이다. 1[pu]의 정현과 인가전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 동시 개방 시, 철공진이 발생되지 않고 연계용변압기 2차측 전압이 정상적으로 유지됨을 알 수 있다.

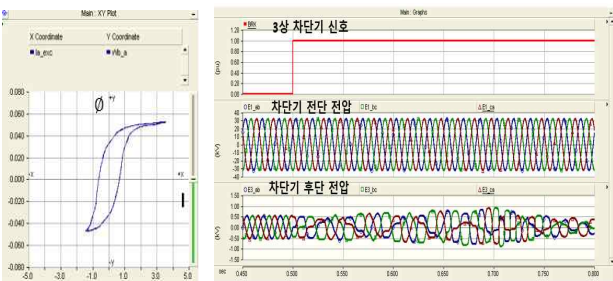


(a) I-φ curve (b) 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성

[그림 9] 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성(DC 접지 전위상승 0%)

#### 4.3.2 DC 접지전위 상승을 고려한 경우

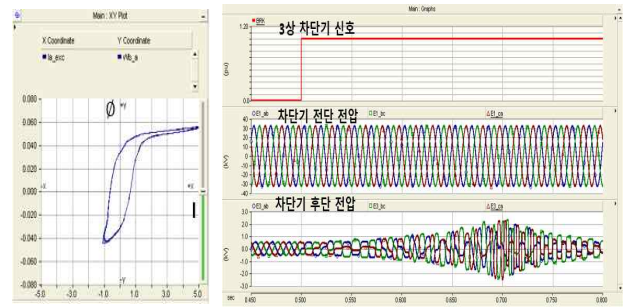
한편, DC 접지 전위상승 3%를 고려하는 경우, 차단기 동작에 따른 전압 및 전류 특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10의 (a)는 연계용변압기의 I-φ 곡선이며, 3%의 DC 접지 전위상승으로 인해 자화전류가 크게 증가함을 알 수 있다. 그림 10의 (b)는 전압 및 전류 특성이며, 1[pu]의 정현과 인가전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 동시 개방 시, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압파형은 왜곡되며 순간적으로 약 1.8[pu]까지 증가하여, 연계용변압기 2차측의 배터리의 과충전으로 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



(a) I-φ curve (b) 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성

[그림 10] 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 11과 같다. 여기서, 그림 11의 (a)는 연계용변압기의 I-φ 곡선이며, 5%의 DC 접지 전위상승으로 인해 자화전류가 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 그림 11의 (b)는 전압 및 전류 특성이며, 1[pu]의 정현과 인가전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 동시 개방 시, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압파형은 왜곡되며 순간적으로 약 4.2[pu]까지 증가하여, 연계용변압기 2차측의 배터리의 과충전으로 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



(a) I-φ curve (b) 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성

[그림 11] 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성(DC 접지 전위상승 5%)

## 5. 결 론

본 논문에서는 순환전류와 DC 접지전위 상승에 의한 의한 연계용변압기의 철심포화 및 철공진 메커니즘을 분석하고, 이로 인한 변압기의 철심포화와 철공진 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광전원부 및 ESS부로 구성된 시스템의 모델링을 수행하였다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 부하불평형으로 인한 순환전류가 자화전류에 영향을 미쳐, 연계용변압기의 철심을 더욱 포화시킴을 확인하였다. 또한, 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 확인하여, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20183010014260)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 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.