

불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승을 고려한 ESS용 연계변압기의 철공진 특성에 관한 연구

태동현^{1,2}, 김지명¹, 곽충근¹, 이민행¹, 이예빈¹, 노대석^{1*}
¹한국기술교육대학교 전기공학과, ²한국전기안전공사 전기안전연구원

Characteristics of Ferro-resonance in Grid-connected Transformer for ESS Considering Unbalanced load current and DC Ground Potential Rising

Dong-Hyun Tae^{1,2}, Ji-Myung Kim¹, Chung-Guen Kwak¹,
Min-Haeng Lee¹, Ye-Bin Lee¹, Dae-Seok Rho^{1*}

¹Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education
²Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation

요약 최근, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있는 실정이다. 이러한 화재사고의 원인으로 계통측 불평형과 접지전위 상승 문제가 하나의 요인으로 추정되고 있다. 특히, 연계변압기측의 불평형 부하전류와 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승이 자화전류에 영향을 미쳐, 의도치 않게 변압기의 철심이 포화되고 철공진 가능성을 증가시켜 ESS에 악영향을 줄 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 PCS 필터가 철공진에 미치는 영향을 분석하고, 도식적인 해석수법을 이용하여 불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승을 고려한 철공진 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 상기의 해석수법을 바탕으로 적정용량의 PCS 필터를 제시하는 철공진 방지 알고리즘과 열화 및 운용환경을 고려한 MOV 운용 알고리즘을 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 철공진 전압이 최대 2.9[pu]까지 증가하여, 연계용변압기 2차측의 배터리에 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다. 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.

Abstract Recently, fires in a large scale ESS (energy storage system) based on lithium-ion batteries have occurred frequently, and much property damage has been reported. Unbalanced load current on the grid side and rising ground potential in a PV system are estimated to be major causes of fires in an ESS. The unbalanced load current on the grid-connected transformer side and rising DC ground potential caused by a large-scale PV system can influence the magnetizing current in the transformer, and the ESS can be adversely affected by unintentional saturation of the iron core, which may increase the possibility of a ferro-resonance phenomenon. Therefore, this paper presents a mechanism of a ferro-resonance phenomenon by using graphical solutions based on the analysis of ferro-resonance effects by the capacitance of a PCS (power conditioning system) filter. We propose an operation algorithm to prevent a ferro-resonance phenomenon by using an appropriate PCS filter and MOV (metal oxide varistor) based on the graphical solutions and the deterioration and environment conditions. Furthermore, we performed modeling of a ferro-resonance mechanism using PSCAD/EMTDC, which is composed of a distribution system, PV system, and ESS. From the simulation results based on the proposed ferro-resonance mechanism and modeling, it was confirmed that high ferro-resonance voltage up to 2.9 pu can seriously influence the battery system due to saturation of the iron core in the transformer caused by unbalanced load current and rising DC ground potential. The proposed operation algorithm to prevent ferro-resonance could contribute to stable operation of an ESS by installing optimal capacity of a PCS filter and MOV.

Keywords : DC Ground Potential Rising, ESS, Ferro-resonance, Iron Core Saturation, Unbalanced Load Current

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원(20213030160080, (에너지 소비대체율 50% 달성을 위한 신재생에너지기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선형 융합연구사업(No. CPS22131-120)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received September 13, 2023

Revised October 5, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

최근, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 에너지저장장치(Energy Storage System, 이하 ESS)의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있다[1-3]. 이에 따라, 정부는 민관합동 ESS 화재사고 조사위원회를 구성하여 ESS의 화재요인을 4차례에 걸쳐 조사하고 있으며, 그 결과로 6대 안전기준(CMV, 절연저항, 충전율 등)이 제시하고, 또한 누설전류, 서지, 접지 등에 대한 전기적 위해요인도 추가적으로 고려하고 있다 [4,5]. 그러나 배터리, PCS, 연계변압기 등으로 구성된 ESS는 동일 사양을 가지더라도, 방사형으로 구성된 배전 계통에 접속될 경우 연계지점 및 사용용도(재생에너지 연계용, 피크저감용 등)에 따라 계통으로부터의 영향이 다르게 나타날 수 있다[6]. 특히, 연계변압기측의 불평형 부하전류와 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승이 자화전류에 영향을 미쳐, 의도치 않게 변압기의 철심이 포화되고 철공진 가능성을 증가시켜 ESS에 악영향을 줄 수 있기 때문에 이에 대한 상세한 메커니즘 분석이 필요한 실정이다[7].

따라서, 본 논문에서는 테브난 등가회로와 도식적인 해석수법을 적용하여, 비선형 L-C 직·병렬 회로의 철공진 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 계통불평형에 의한 불평형 부하전류 발생과 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승이 자화전류에 영향을 미쳐, 변압기의 철심이 포화되는 현상을 분석하고, 차단기 동작에 따른 철공진 발생 메커니즘을 제안한다. 그리고, PSCAD/EMTDC를 이용해 배전계통부, 태양광전원부 및 배터리부로 구성된 철공진 발생 메커니즘에 대한 모델링을 수행한다. 즉, 불평형 부하전류가 ESS용 연계변압기 1차측에 유입되어 발생하는 철공진과 태양광전원의 DC 접지전위 상승에 따른 철공진 현상을 모델링한다. 또한, 커패시턴스에 의해 결정되는 철공진 특성을 제시하고 이를 바탕으로 적정용량의 PCS 필터를 산정하는 철공진 방지 알고리즘과 열화 및 운용환경을 고려한 MOV 운용 알고리즘을 제안한다.

상기의 철공진 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 부하불평형 조건에서 ESS가 배전용변전소에서 먼 위치에 연계될수록 불평형 부하전류와 여자전류가 상승하여, 차단기 동작 시 불평형 부하전류에 의해 철공진 전압이 1.5[pu] 정도로 발생하고, 또한 DC 접지전위 상승분을 고려하면, ESS용 연계변압기의 포화가 가속되어 철공진 전압이 2.9[pu]까지 증가하여,

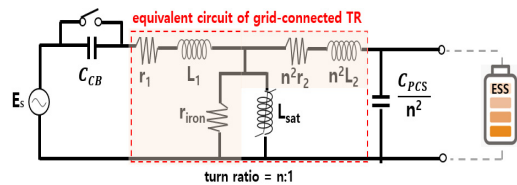
연계변압기 2차측 배터리에 심각한 영향을 미칠 가능성이 있다. 한편, 본 연구에서 제안한 철공진 방지 알고리즘을 바탕으로 PCS측 필터의 커패시턴스를 적절하게 산정한 경우, 공진점이 회피되어 철공진 현상이 개선됨을 알 수 있다.

2. ESS용 연계변압기의 철공진 발생 메커니즘

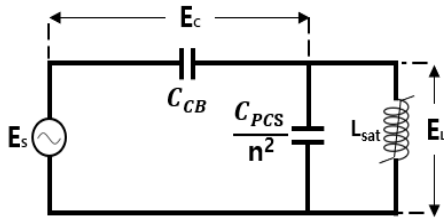
2.1 L-C 회로에 대한 철공진 발생 메커니즘

변압기의 1차측과 2차측은 철심을 통해 자기적으로 연결되어 있는데, 철심의 투자율이 제한되기 때문에 전류가 증가하더라도 자속은 포화된다. 이러한 포화특성을 변압기의 비선형특성이라고 하며, 차단기가 동작하거나 서지 등의 과전압이 발생하는 경우, 변압기는 비선형특성에 의해 순간적으로 포화영역에 도달하여 인덕턴스가 매우 작아지게 되어, 철공진 현상을 일으킬 가능성이 있다.

한편, 비선형 L-C 직·병렬 철공진 회로는 변압기의 인덕턴스와 병렬 커패시턴스 성분 사이의 공진현상도 함께 고려되므로, L-C 직렬 철공진 회로에 비해 철공진의 발생 가능성이 증가한다. 이러한 L-C 직·병렬 철공진 현상은 ESS 사이트에서도 나타날 수 있으며, Fig. 1과 같이 계통전원부(ES)와 차단기 동작 시 극간 커패시터(C_{CB}), 연계변압기(L_{sat}), PCS 필터의 커패시터 성분(C_{PCS}) 등으로 구성된다. 여기서, Fig. 1(a)는 변압기의 비선형특성을 고려하기 위하여, 변압기의 2차측을 1차측으로 등가화하여 나타낸 것이다. 또한, r_1 과 L_1 , r_2 와 L_2 는 각각 1차측 및 2차측의 권선저항과 누설 인덕턴스를 의미하며, r_{iron} 는 철손전류를 나타내는데, 상기 요소들은 철공진 발생에 큰 영향을 미치지 않기 때문에, 이를 생략하여 간략화하면 Fig. 1(b)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) Non-linear L-C series-parallel ferro-resonance circuit



(b) simplified L-C series-parallel ferro-resonance equivalent circuit of ESS

Fig. 1. Equivalent circuit of L-C series-parallel ferro-resonance in ESS

한편, Fig. 1(b)의 L-C 직·병렬 철공진 회로를 테브난 등가회로로 나타내면, Eq. (1), Eq. (2)와 같다. 여기서, Eq. (1)은 ESS의 테브난 등가 커패시턴스이고, Eq. (2)는 ESS의 테브난 등가 전압을 나타낸다.

$$C_{th_ESS} = C_{CB} + \frac{C_{PCS}}{n^2} \quad (1)$$

$$E_{th_ESS} = E_s \times \frac{n^2 C_{CB}}{n^2 C_{CB} + C_{PCS}} \quad (2)$$

여기서, C_{th_ESS} : ESS의 테브난 등가 커패시턴스[F], C_{CB} : 차단기의 직렬 커패시턴스[F], C_{PCS} : PCS용 필터의 병렬 커패시턴스[F], n : 변압기의 권수비, E_{th_ESS} : ESS의 테브난 등가 전압[V]

본 논문에서는 도식적인 해석수법(Graphical solution)을 이용해 철공진 현상을 해석하는데, 이 방법은 직렬회로의 전압원, 커패시터, 인덕터 특성을 바탕으로 시스템의 해를 계산하는 것이다[8]. 즉, 인가전압에 대해 I-V 곡선으로 나타낼 때, 선형회로는 하나의 교차점에서 해가 결정되는 반면, 변압기의 비선형회로에서는 다수의 해가 존재할 수 있다.

즉, L-C 직렬 및 직·병렬 철공진 회로에서 전류와 전압을 도식적 해석수법에 의하여 나타내면 Fig. 2와 같다. 먼저, Fig. 2의 ㉠직선은 L-C 직렬 철공진 회로의 특성인데, E_L 과 $E_s - E_c$ 의 교차점은 비철공진 영역에서 1개만 존재하므로 철공진이 발생되지 않는다. 반면, Fig. 2의 ㉡직선은 L-C 직·병렬 철공진 회로의 특성인데, 테브난 등가전압(E_{th})은 E_s 보다 작아지고, 직선 기울기($1/wC_{th}$)는 직렬 철공진 회로의 기울기보다 감소하게 된다. 따라서, E_L 과 $E_s - E_c$ 의 교차점은 3개까지 발생할 수 있

며, 동일한 인가전압(E_{th})에서 변압기의 인덕터 양단전압은 3개의 해를 가질 수 있고, 철공진에 의해 하나의 교차점에서 다른 교차점으로 순간적인 전압상승이 발생할 가능성이 있다. 특히, ESS는 PCS 필터를 포함한 L-C 직·병렬 회로로 등가화되기 때문에, L-C 직렬 회로보다 철공진의 가능성이 크게 된다.

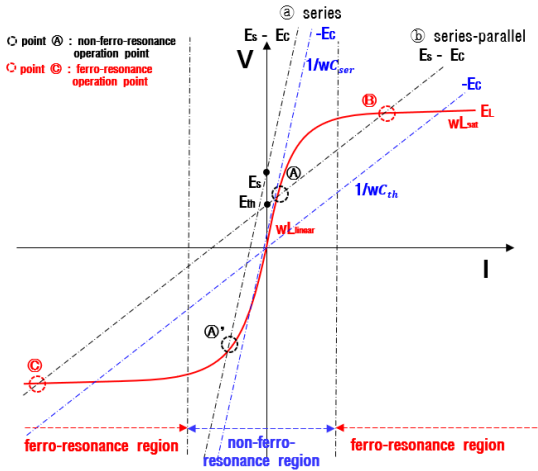


Fig. 2. Comparison of series and series-parallel ferro-resonance using graphical solution

2.2 불평형 부하전류에 의한 철공진 발생 메커니즘
3상 부하불평형시, Fig. 3과 같이 불평형전류(I_{n1})가 부하측 중성선에 흐르고, 이는 ESS용 연계변압기측(I_{n2})과 배전용변전소측(I_{n3})의 중성선을 통하여 순환하게 된다. 이때, 불평형 부하전류가 정상상태의 여자전류에 영향을 미쳐 변압기가 포화될 가능성이 있으며, 이로 인하여 연계변압기 2차측의 전압 파형이 왜곡되거나 서지가 발생될 수 있다.

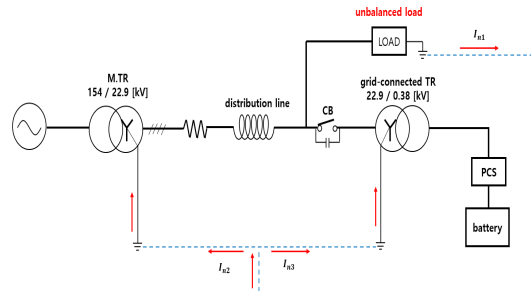


Fig. 3. Concept of unbalanced load current

즉, Fig. 3에서 ESS용 연계변압기측 불평형 부하전류 (I_{n3})가 정상상태의 변압기 자화전류(I_m)와 여자전류(I_e)에 영향을 미쳐서, 철심포화를 증대시킬 수 있다. 한편, Fig. 4와 같이 중성선을 따라 유입되는 불평형 부하전류의 위상이 자화전류의 위상과 동일하면, 자화 리액터에는 정상상태보다 더 큰 전류가 흘러 변압기의 철심포화가 심화되어, 변압기의 철공진의 발생 가능성이 증가할 수 있다.

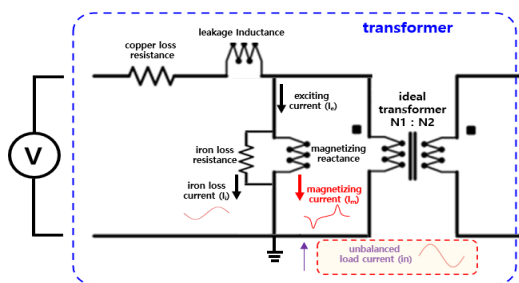


Fig. 4. Concept of iron core saturation intranformer by unbalanced load current

또한, Fig. 4와 같이 불평형 부하전류에 의한 변압기 철심포화가 발생한 경우에 대하여 도식적인 해석수법을 이용하여 나타내면 Fig. 5와 같다. 즉, 정상상태의 자화전류에 불평형 부하전류가 유입되어 높은 자화전류가 흐르고, 이는 변압기 2차측에 큰 서지를 유도할 수 있다. 특히, 연계변압기 자화곡선의 일반적인 운용범위는 무릎점 미만인 Fig. 5의 ㉠점이지만, 불평형 부하전류가 더해지고 변압기가 포화되어 Fig. 5의 ㉡, ㉢점에서 운용되게 되면, E_L 과 $E_s - E_C$ 의 교차점이 증가하여 철공진이 발생할 가능성이 있다.

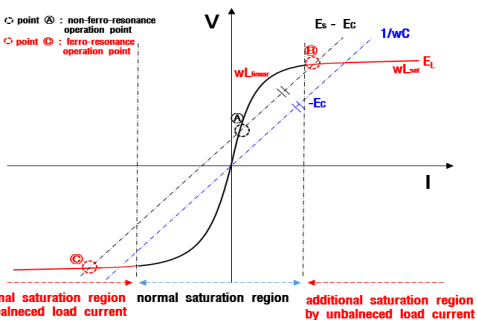
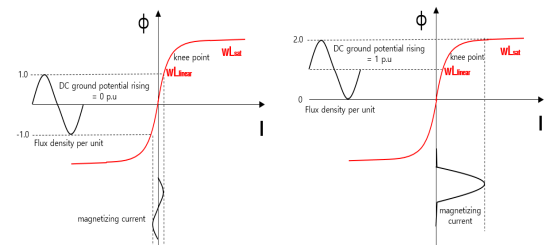


Fig. 5. Concept of ferro-resonance induced by unbalanced load current

2.3 DC 접지전위 상승에 따른 철공진 발생 메커니즘

대규모 태양광전원 발전단지에 ESS가 설치되는 경우, 태양광전원에 의하여 DC 접지전위 상승이 발생할 가능성이 있다[9]. 이러한 접지 전위상승이 ESS용 연계변압기의 포화에 미치는 영향을 나타내면 Fig. 6과 같다. 여기서, Fig. 6(a)는 DC 접지전위 상승을 고려하지 않은 경우의 $I-\phi$ 곡선이며, 변압기의 자화전류가 무릎점 미만에서 발생하는 것을 알 수 있다. 반면, Fig. 6(b)는 DC 접지전위 상승을 고려한 경우의 $I-\phi$ 곡선으로, 일정시간 동안 무릎점을 초과하여 높은 자화전류가 발생하고, 이로 인하여 변압기의 포화에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.



(a) without DC ground potential rising (b) with DC ground potential rising

Fig. 6. $I-\phi$ curve with DC ground potential rising

또한, 상기에서 제시한 DC 접지전위 상승을 도식적인 해석수법으로 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기서, ESS용 연계변압기는 정상상태에서 무릎점 미만인 S영역에서 안정적으로 운용되지만, DC 접지전위 상승에 의해 변압기가 포화되어 T영역에서 운용되면, E_L 과 $E_s - E_C$ 의 교차점이 추가적으로 발생하여 철공진이 일어날 가능성이 있다.

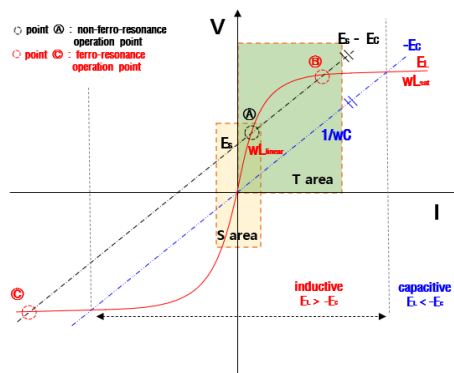


Fig. 7. Graphical solution of ferro-resonance depending on DC ground potential rising

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS용 연계변압기의 철공진 모델링

3.1 불평형 부하전류에 대한 철공진 모델링

3.1.1 배전용변전소 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면, Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg-Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제 3고조파를 제거하기 위하여 델타 결선방식을 채용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측은 배전계통의 지락전류를 제한하기 위하여, 0.6[Ω]의 NGR을 설치하는 것으로 가정한다.

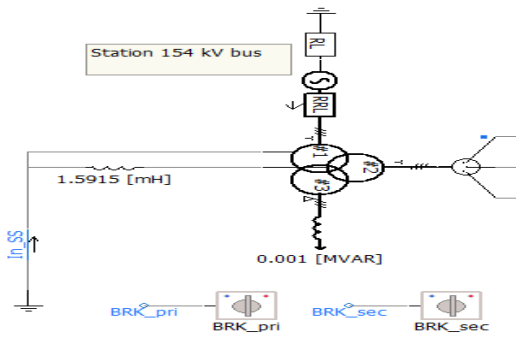


Fig. 8. Modeling of main transformer

3.1.2 불평형 부하전류 모델링

불평형 부하전류를 모델링하기 위하여, 3상 부하용량과 불평형 조건을 나타내면 Fig. 9와 같다. 여기서, 정전력부하의 제어를 위하여 부하의 순시 값과 목표로 하는 부하의 편차에 대해, PI제어를 통해 목표 값을 추종할 수 있다.

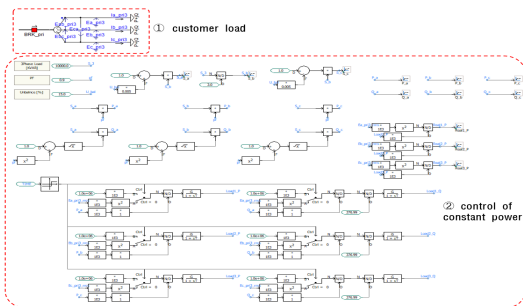


Fig. 9. Modeling of unbalanced load current

3.1.3 전체 배전계통 모델링

ESS용 연계변압기 1차측에 불평형 부하전류가 유입되는 현상과 철공진 현상을 분석하기 위하여, 상기의 내용을 바탕으로 배전용변전소, 배전선로, 차단기, 연계변압기, 수용가로 구성된 전체 배전계통의 모델링을 나타내면 Fig. 10과 같다. 여기서, 배전용변전소 3권선 주변압기는 Yg-Yg-Δ 결선방식이며, 배전선로는 ACSR 160 [mm²], 연계변압기는 3각철심 구조에 1[MVA] 용량으로 상정한다.

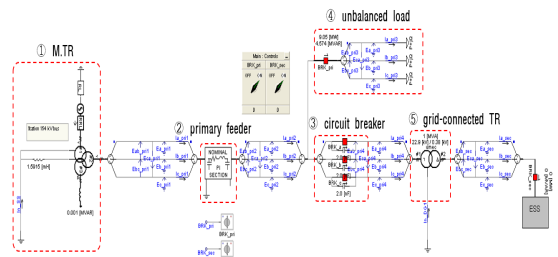


Fig. 10. ferro-resonance modeling by unbalanced load current

3.2 DC 접지전위 상승에 따른 철공진 모델링

3.2.1 전기저장장치 모델링

목표로 하는 전기저장장치의 유효분과 무효분의 출력을 얻기 위하여, 전기저장장치의 출력을 결정하는 d-q축의 기준전류(I_{ref-d} , I_{ref-q})를 산정해야한다. 즉, 전기저장장치의 기준 DC 링크전압과 목표전력에 의한 DC 링크전압을 비교하여 전압차를 구한 후, 이 전압차를 비례적분하면 목표로 하는 d-q축의 기준전류(I_{ref-dq})를 Eq. (3)과 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ref-d} = (Kp + \frac{Kl}{s})(V_{DC-d}^* - V_{DC-d}) \quad (3)$$

$$I_{ref-q} = (Kp + \frac{Kl}{s})(V_{DC-q}^* - V_{DC-q}) \quad (4)$$

여기서, I_{ref-d} : d축 기준전류, I_{ref-q} : q축 기준전류, V_{DC-d}^* : 기준 DC 링크전압, V_{DC-d} : 목표 DC 링크전압

또한, 기준전류가 음의 값을 가질 때 전기저장장치를 충전시키고, 양의 값을 가질 때 전기저장장치를 방전시키기 위하여, 전류제어 알고리즘에 적용하여 인버터 출력을 위한 d-q축 전압을 구하면, Eq. (5)와 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d)(K_p + \frac{K_i}{s}) - I_d \times \omega L + V_{sq} \quad (5)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q)(K_p + \frac{K_i}{s}) - I_d \times \omega L \quad (6)$$

여기서, V_d, V_q : d-q축 전압, I_{ref-dq} : 인버터 출력의 기준전류, I_d, I_q : 계통전류의 d-q축 전류, V_{sq} : 계통의 순시전압

따라서, 상기의 Eq. (5), Eq. (6)에 의하여 정전류원으로 충-방전을 수행할 수 있는 전기저장장치를 모델링하면 Fig. 11과 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다. 그리고 양방향인버터의 출력전압은 역좌표변환과정에서 위상고정회로(Phase Locked Loop: PLL) 방식을 적용하여 계통전압과 위상을 동기화시킨다.

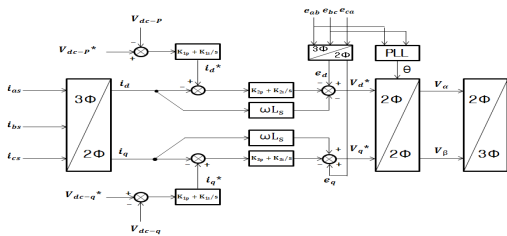


Fig. 11. Modeling of ESS

3.2.2 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승과 철공진 모델링

대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승이 철공진에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 주변압기, 고압 배전선로, 3상 차단기, ESS용 연계변압기, 태양광전원 및 전기저장장치로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면, Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 12의 section A는 주변압기와 고압 배전선로, section B는 3상 차단기와 ESS용 연계변압기, 그리고 section C는 태양광전원과 ESS로 구성된다.

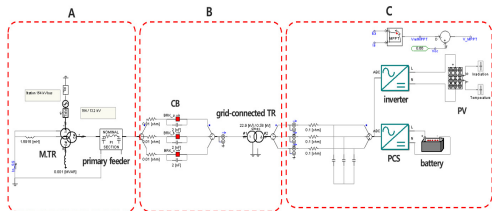


Fig. 12. Ferro-resonance modeling of grid-connected transformer by DC ground potential rising

4. ESS용 연계변압기의 철공진 방지 알고리즘

일반적으로 철공진을 방지할 수 있는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, Butterworth 등의 L-C 필터나 가포화 리액터 등을 추가하여 철공진 현상을 방지하는 방법과, 전체 시스템이 철공진 회로를 형성할 수 없도록 적절한 파라메타로 구성하는 방법으로 분류된다. 여기서, 필터나 가포화 리액터를 추가하는 방법은 철공진 현상을 억제하더라도 추가된 소자가 계통의 다른 요소들과 상호작용할 가능성이 있을 뿐만 아니라, 지속적인 손실 등의 문제점을 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 최적의 커패시턴스를 제시하여 철공진 현상을 방지하는 알고리즘과 MOV를 통해 변압기의 포화를 억제하는 철공진 방지 알고리즘을 제안한다.

4.1 커패시턴스에 따른 철공진 방지 알고리즘

2장에서 제시한 철공진 메커니즘을 바탕으로, 철공진 회로의 커패시턴스에 따른 도식적인 해석수법은 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 커패시턴스가 증가함에 따라 용량성 리액턴스($1/\omega C$)의 기울기가 감소하므로, 직선 $E_s - E_c$ 는 y축 절편 E_s 를 중심으로 회전하게 된다. 따라서, 커패시턴스에 따라 교차점의 개수가 변경되므로, 철공진 특성은 커패시턴스에 의해 결정됨을 알 수 있다 [10].

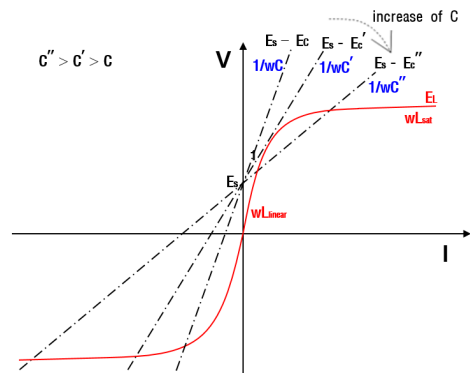


Fig. 13. Graphical solution of ferro-resonance depending on capacitance

Fig. 13에서 철공진이 발생할 가능성이 있는 용량성 리액턴스의 범위를 나타내면 Eq. (7)과 같으며, 해당 범위를 회피하여 커패시턴스를 산정하면 철공진 현상을 방

지할 수 있음을 알 수 있다. 이를 도식적 해석방법을 이용하여 나타내면 Fig. 14와 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_{info})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.

$$wL_{sat} < \frac{1}{wC} \leq wL_{linear} \quad (7)$$

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

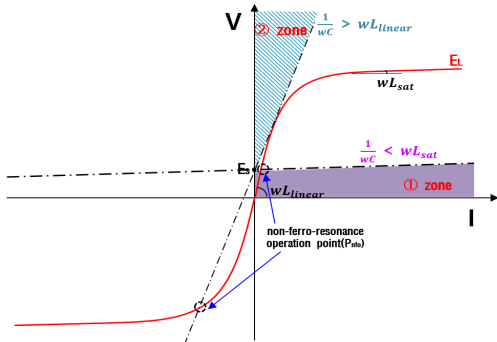


Fig. 14. Prevention methods of ferro-resonance using graphical solution

4.2 MOV에 의한 철공진 방지 알고리즘

커패시턴스에 의하여 철공진을 방지하는 알고리즘에 의하여 ESS가 설치되더라도, 운용환경이 달라지거나 열화 등에 의해 파라메타가 변경될 경우 철공진에 노출될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 Fig. 15와 같이 MOV를 통해 접지로 철공진 에너지를 방출하여 배터리를 보호하는 보완적인 방안을 제시한다. 즉, MOV는 정상상태에서 매우 큰 임피던스를 가지며, 철공진을 유발시키는 계통의 서지가 인가되면 MOV의 임피던스가 급격히 낮아지면서 서지를 PCS가 아닌 대지로 흘려보내 철공진 현상을 미연에 방지시킬 수 있다.

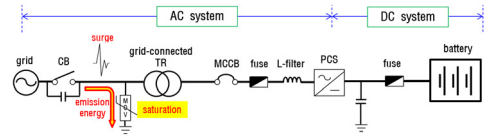


Fig. 15. Prevention concept of ferro-resonance with MOV

4.3 MOV에 의한 철공진 방지 알고리즘

4.1절의 커패시턴스에 따른 철공진 특성을 바탕으로 적정용량의 PCS 필터를 제시하고, 4.2절의 보완적으로 MOV를 운용하는 철공진 방지 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

- [Step 1] 선로정수, 절연내력(U_w), 기준전압(U_n), 분산전원 등의 배전계통 데이터와 ESS용 연계변압기의 선형 및 포화 시 인덕턴스, 차단기 극간 커패시턴스 및 PCS의 필터 용량 등의 파라메타를 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. Eq. (7)의 범위에 해당되어 운용점의 개수가 2개 이상인 경우에는 철공진 발생영역에 포함되므로 [Step 4]로 진행하고, 그렇지 않으면 [Step 5]로 이동한다.
- [Step 4] 연계변압기가 철공진 발생 가능성이 있는 경우, 이를 방지하기 위해 적절한 철공진 방지용 커패시턴스(C_{pre})의 용량을 증가시키고, [Step 3]으로 이동한다.
- [Step 5] 연계변압기가 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(W_f), 여유율(R_s) 등을 고려하여, MOV의 제한전압(U_p)을 Eq. (8)과 같이 산정한다[11].

$$U_p = W_f \times R_s \times U_c \quad (8)$$

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

[Step 8] U_p 가 Eq. (9)를 만족하지 못하는 경우, 너무 높은 값으로 설정되어 철공진 전압으로부터 배터리를 충분히 보호하지 못하므로 U_p 값을 감소시켜, 해당 과정을 반복한다.

$$U_p \leq U_w \quad (9)$$

여기서, U_w : 절연내력

[Step 9] U_p 가 Eq. (10)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 Eq. (10)을 만족하는 경우, 해당 값을 MOV의 제한전압으로 선정하고, 알고리즘을 종료한다.

$$U_p \leq k \times U_w \quad (10)$$

여기서, k : 여유율

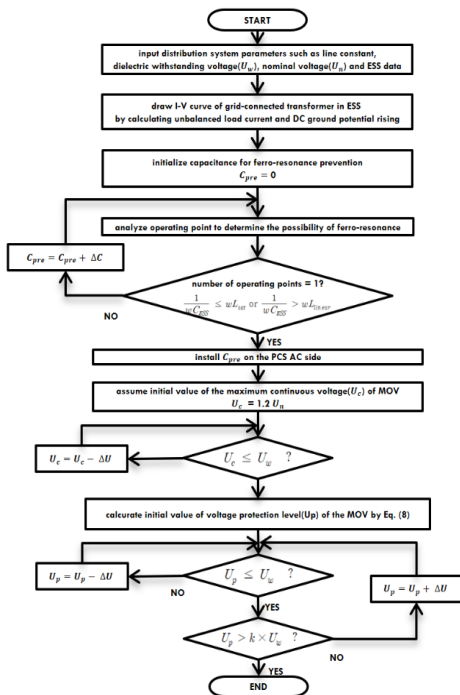


Fig. 16. Ferro-resonance prevention algorithm of grid-connected transformer in ESS

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면, Fig. 16과 같다.

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

불평형 부하전류와 DC 접지전위 상승에 따른 ESS용 연계변압기의 철공진 특성을 분석하기 위하여, Table 1 과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 주변압기는 154/22.9[kV]의 45/60[MVA] 정격용량을 가지며, 고압배전선로의 선종은 ACSR 160mm²이고, 공장은 10, 20, 30[km]로 상정한다. 또한, 3상 차단기의 커패시턴스는 2[nF]을 적용하며, ESS용 연계변압기는 3각 철심 구조의 Yg-Δ 결선방식을 채용한다. 그리고, ESS용 PCS의 용량은 1[MVA]이고, 필터용 커패시턴스는 380[uF]으로 상정한다. 한편, 불평형 부하전류를 발생시키기 위하여 5, 10[MVA]의 피크부하와 10, 15[%]의 불평형률을 상정하고, 접지전위 상승을 고려하기 위하여 태양광 모듈의 DC 정격전압은 700[V], DC 접지전위 상승률은 태양광모듈 정격전압의 1, 3, 5[%]로 상정한다.

Table 1. Simulation conditions of ferro-resonance depending on unbalanced load current and DC ground potential rising

content	parameters	value	
M.Tr	voltage ratio[kV]	154/22.9	
feeder	length[km]	10, 20, 30	
3-phase CB	series capacitance[nF]	2	
	operation time[s]	0.5	
grid-connected TR for ESS	winding type	Yg-Δ	
	iron core	3-limb	
	voltage ratio[kV]	22.9/0.38	
	capacity[MVA]	1.25	
	%impedance[%]	4	
	copper loss[%]	1	
PCS	capacity[MVA]	1	
	capacitance of filter[uF]	380	
unbalenced load current occurred	load	peak load[MVA]	5, 10
		unblanced rate[%]	10, 15
		power factor	0.9
DC ground potential rising	PVsystem	DC nominal voltage[V]	700
		DC ground potential rising rate[%]	1
			3
		5	

5.2 불평형 부하전류에 의한 철공진 특성분석

Table 1의 불평형 부하전류 발생 조건에서, 10[MVA]의 피크부하를 대상으로 부하 불평형률이 15[%]이고, 선로공장이 30[km]인 경우 불평형 부하전류의 크기와 방향을 나타내면 Fig. 17과 같다. 여기서, 고압선로 부하측(I_{n1})에서 발생한 80.42[A]의 불평형 부하전류가 배전용 변전소(I_{n2})측으로 44.91[A], 연계변압기(I_{n3})측으로 36.04[A]만큼 분류되어 흘러감을 알 수 있다. 이때, 불평형 부하전류에 의한 연계변압기의 여자전류와 자속 특성을 나타내면 Fig. 18과 같고, 불평형 부하전류가 변압기의 중성점으로 흘러들어가, Fig. 18(a)와 같이 높은 여자전류가 발생함을 알 수 있다. 또한, Fig. 18(b)는 여자전류에 따른 자속의 크기인 $I-\phi$ 곡선을 나타내며, 불평형 부하전류가 여자전류에 영향을 미치고, 철심의 포화를 가속시켜 철공진의 가능성이 증가함을 알 수 있다.

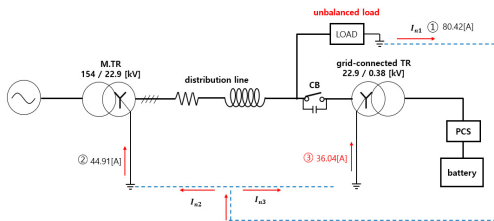
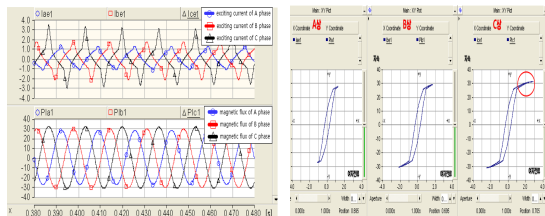


Fig. 17. Characteristics of unbalanced load current (unbalance rate: 15[%], feeder: 30[km])



(a) Characteristics of exciting current and magnetic flux

(b) $I-\phi$ curve

Fig. 18. Characteristics of iron core saturation by unbalanced load current (unbalance rate 15[%], feeder 30[km])

한편, 불평형 부하전류에 의한 철공진 특성을 나타내면 Fig. 21과 같다. 여기서, 1[pu]의 계통전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 개방되는 경우, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압파형이 왜곡되며 순간적으로 약 1.5[pu]까지 상승하는 것을 알 수 있다.

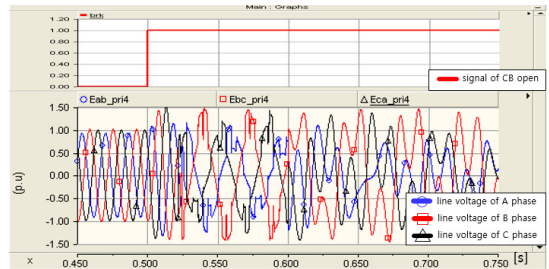


Fig. 19. Characteristics of ferro-resonance by unbalanced load current (unbalance rate 15[%], feeder 30[km])

상기의 과정과 동일하게, Table 1의 조건에 따라 불평형 부하전류와 여자전류를 산정하면 Table 2와 같다. 즉, ESS가 배전용변전소에서 먼 위치에 연계될수록, 불평형 부하전류와 여자전류가 상승하여, 연계변압기 철공진 현상이 발생할 가능성이 증가함을 알 수 있다.

Table 2. Characteristics of unbalanced load current and exciting current

simulation conditions		neutral current			maximum exciting current [A]	
peak load [MVA]	unbalanced rate[%]	line length [km]	M.T.R side [A]	grid-connected TR side [A]		load side [A]
10	10	10	20.29	5.43	25.60	2.27
		20	21.24	11.36	32.41	2.39
		30	29.86	23.96	53.48	2.65
	15	10	30.45	8.15	38.43	2.45
		20	31.95	17.09	48.74	2.75
		30	44.91	36.04	80.42	3.02

5.3 DC 접지전위 상승에 의한 철공진 특성분석

Table 1의 DC 접지 전위발생 조건에서, 전위상승률이 5[%]이고 선로공장이 10[km]인 경우, 변압기 포화와 철공진 특성을 나타내면 Fig. 20와 같다. 여기서, Fig. 20(a)는 연계변압기의 $I-\phi$ 곡선이며, 5[%]의 DC 접지 전위 상승으로 인해 자화전류가 크게 증가함을 알 수 있다.

한편, Fig. 20(b)의 상단 그래프는 차단기 동작신호이고, 하단 그래프가 철공진 전압 특성을 나타낸 것이다. 여기서, 1[pu]의 계통전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 개방되는 경우, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압파형이 왜곡되며 순간적으로 약 2.9[pu]까지 상승함을 알 수 있다. 따라서 연계변압기 2차측에 설치된 ESS용 배터리에 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.

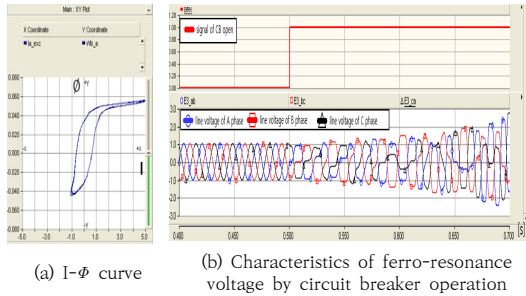


Fig. 20. Characteristics of ferro-resonance by DC ground potential rising (5%)

상기의 과정과 동일하게, Table 1의 조건에 따라 DC 접지전위 상승에 따른 자속 증가율과 철공진 전압을 산정하면 Table 3과 같다. 이 표에서와 같이, 1[%]의 DC 접지전위 상승을 고려한 경우에는 철공진이 거의 발생하지 않으나, 3[%] 이상의 DC 접지전위 상승이 고려된 경우, 자속이 크게 증가하여 철공진이 발생함을 알 수 있다. 즉, DC 접지전위 상승이 크게 고려될수록, 자속의 증가율과 철공진 전압이 크게 상승함을 알 수 있다.

Table 3. Characteristics of Magnetic flux and ferro-resonance voltage depending on DC ground potential rising

DC ground potential rising[%]	increase rate of magnetic flux [%]	maximumferro-resonance voltage[p.u]
1	8	1.0
3	26	1.8
5	46	2.9

5.4 제안한 알고리즘에 의한 철공진 특성

5.4.1 불평형 부하전류 발생 시 철공진 특성

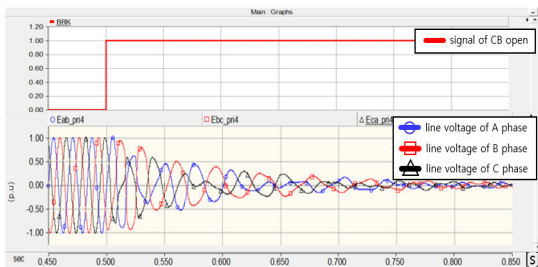


Fig. 21. Characteristics of ferro-resonance improvement with proposed algorithm (unbalanced load current)

Fig. 19과 같이 불평형 부하전류에 의해 1.5[p.u]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 Fig. 21과 같다. 여기서, 커패시턴스의 영향에 따라 철공진 발생 영역에서 벗어나, 연계변압기 2차측 전압이 정상적으로 회복됨을 알 수 있다.

5.4.2 DC 접지전위 상승 시, 철공진 특성

Fig. 20와 같이 DC 접지전위 상승에 의해 2.9[p.u]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 Fig. 22와 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.

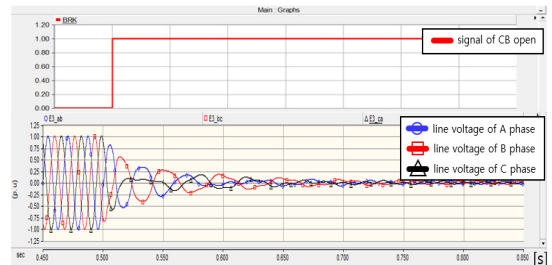


Fig. 22. Characteristics of ferro-resonance improvement with proposed algorithm (DC ground potential rising)

6. 결론

본 논문에서는 ESS의 전기적 위해요인 중의 하나인 철공진 현상을 분석하기 위하여, 불평형 부하전류 및 DC 접지전위 상승을 고려한 철공진 발생 메커니즘을 제시하고, PSCAD/EMTDC를 이용해 철공진 회로의 모델링을 수행하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) L-C 직·병렬회로의 테브난 등가화를 수행하고, 도식적인 해석수법을 이용하여 직렬 커패시터 회

로보다 직·병렬 커패시터 회로에서 철공진의 가능성이 증가함을 알 수 있었다.

- (2) 부하불평형 조건에서 ESS가 배전용변전소에서 먼 위치에 연계될수록, 불평형 부하전류와 여자전류의 크기가 상승하여, 연계변압기의 철공진 현상이 증가함을 알 수 있었다.
- (3) DC 접지전위 상승을 고려한 경우, ESS용 연계변압기의 포화가 가속되어, 차단기 동작 시 철공진 전압이 최대 2.9[pu]까지 증가하여, 연계변압기 2차측의 배터리에 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있었다.
- (4) 제한한 철공진 방지 알고리즘을 바탕으로 PCS측 필터의 커패시터를 적절하게 산정한 경우, 공진 점이 회피되어 철공진 현상이 개선됨을 알 수 있었다. 따라서, PCS측 필터의 커패시터를 적정 용량으로 설치할 경우, 연계변압기 2차측 배터리의 순간적인 과전압 현상을 방지할 수 있어, ESS의 안정적인 운용에 기여할 수 있음을 알 수 있었다.

References

- [1] "ESS Causes Investigation and Safety Reinforcement Measures Announcement", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.06.
http://www.kats.go.kr/cwsboard/board.do?mode=dwnload&bid=128&cid=20839&filename=20839_20190611437588581.pdf
- [2] Sung-Duck Cho, "A Study on Mechanism and Modeling of CMV in Sharing Energy Storage System", Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.24, no.4, pp. 616-625, 2023.04.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.4.616>
- [3] Sung-Moon Choi, "A Study on Characteristics and Modeling of CMV by Grounding Methods of Transformer for ESS", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.22, no.4, pp. 587-593, 2023.04.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.4.616>
- [4] Hong-Je Jang, "Study on Analysis of Fire Factor and Development Direction of Standard/safety Requirement to Keep Safety for Energy Storage System (ESS)", Journal of Standards, Certification and Safety, 9(3), 25-49, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.34139/JSCS.2019.9.3.25>
- [5] Ji-Myung Kim, "A Study on Modeling of Leakage Current in ESS Using PSCAD/EMTDC", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 22(2), 810-818, 2021.02.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.2.810>
- [6] Dong-Hyun Tae, "Characteristics of Saturation and Circulating Current Based on Winding and Iron Core Structure of Grid-connected Transformer in Energy Storage System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 21(4), 39-48, 2020.04.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.4.39>
- [7] Moses, Anthony & Marketos, Filippos & Zurek, Stan. "Effect of DC Voltage on AC Magnetisation of Transformer Core Steel". Journal of Electrical Engineering, 61, 2007.
https://www.researchgate.net/publication/235706811_Effect_of_DC_Voltage_on_AC_Magnetisation_of_Transformer_Core_Steel
- [8] R. H. Hopkinson, "Ferroresonant During Single-Phase Switching of 3-Phase Distribution Transformer Banks", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-84, No. 4, pp. 289-293, April, 1965.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1965.4766193>
- [9] Madhab Roy, Chinmay Kanti Roy, "A study on ferroresonance and its dependence on instant of switching angle of the source voltage", Third international conference on power systems, Kharagpur, pp. 1-6, India December 27-29, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPWS.2009.5442704>
- [10] Paul S. Moses, Mohammad A.S.Masoum, Hamid A. Toliyat, "Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers", IEEE Transactions on energy conversion, vol.26, no.2, pp. 581-592, June 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2088400>
- [11] JSeung-Wook Hwang, "A Study on the Evaluation Algorithm for Optimal Operation of Surge Protection Device in ESS", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 71(6), 844-855, 2022.06.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.6.844>

태 동 현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중
- 2022년 12월 ~ 현재 : 전기안전연구원 재직 중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 민 행(Min-Haeng Lee)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전기저장장치, 마이크로그리드, 신재생에너지

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



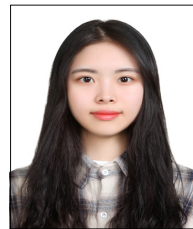
- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 보호협조, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 예 빈(Ye-Bin Lee)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 전기저장장치, 신재생에너지

곽 충 근(Chung-Guen Kwak)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한양대학교 공학대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석