

DC 접지 전위상승에 따른 ESS용 연계변압기의 포화 및 철공진 모델링에 관한 연구

태동현, 이수용, 신건, 김경화 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:tdh2002@koreatec.ac.kr

Modeling of Saturation and Ferro-resonance in Grid-connected Transformer for ESS Depending on DC Ground Potential Rising

Dong-Hyun Tae, Su-Yong Lee, Jian Shen, Kyung-Hwa Kim, Dae-Seok Rho
Korean University of Technology and Education

요약

2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터를 시작으로, 현재까지 총 36건의 ESS 화재가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다. 특히 태양광연계용 ESS는 전체 화재사고 중 24건(67%)을 차지해, 국내 설치된 ESS 중 약 48.6%가 태양광연계 용도임을 감안하더라도, 설치비율에 비해 화재사고의 빈도가 유독 높은 실정이다. 따라서, 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승과 ESS용 연계변압기의 포화에 관한 상관관계의 분석이 요구되고 있다. 본 논문에서는 도식적인 해석 수법을 통하여 DC 접지전위 상승에 의한 연계변압기 포화 및 철공진 메커니즘을 정의하고, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부, 차단기 및 연계변압기부, 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 연계변압기 2차측의 전압이 급격하게 증가하여, 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

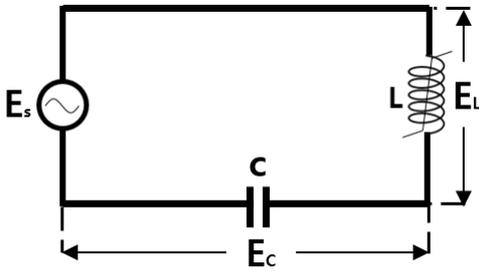
최근 신재생에너지의 효율적인 운용을 위하여, ESS가 설치 및 운용되고 있으며, 이에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히, 전기요금 할인특례 등 다양한 ESS 보급 지원정책에 힘입어, 국내의 ESS 시장 규모는 18년도 4,773[MWh]에서 20년도에 8,583[MWh]로 급격히 확대되고 있다. 그러나, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있는 실정이다. 특히 태양광연계용 ESS는 전체 화재사고 중 24건(67%)을 차지해, 국내 설치된 ESS 중 약 48.6%가 태양광연계 용도임을 감안하더라도, 설치비율에 비해 화재사고의 빈도가 유독 높은 실정이다. 이러한 화재사고의 원인으로, 대규모 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승이 연계변압기의 포화에 미치는 영향도 고려되어야 한다[1-2]. 따라서, 본 논문에서는 DC 접지전위 상승에 의한 연계변압기 포화 및 철공진 메커니즘을 정의하고, 도식적인 해석수법 및 등가회로를 통하여 철공진 특성을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부(차단기, 연계변압기), PCS부, 태양광전원부 및 배터리부로 구성된 시스템의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, DC 접지전위 상승이 변압기 포화

및 철공진 가능성을 증가시킬 수 있었고, 철공진 발생 시 연계변압기 2차측의 전압이 급격하게 증가하여 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

2. DC 접지 전위상승에 따른 ESS용 연계변압기의 철공진 메커니즘

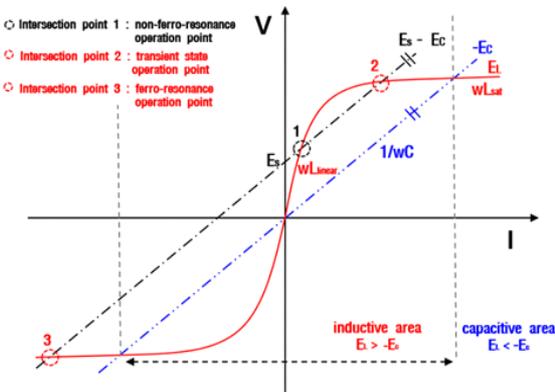
2.1 ESS용 연계변압기의 철공진 메커니즘

철공진은 상위 계통의 1선 지락사고에 의한 순간적인 전압상승과 같은 이상전압에 의하여 철심을 가진 인덕터가 포화되어, 계통의 정전용량과 상호작용을 통해 발생하는 비선형적인 진동현상이다. 또한, 철공진은 계통에서 차단기가 동작하는 경우, 변압기의 인덕턴스 성분과 차단기 양단의 커패시턴스 성분이 직렬로 구성되어 발생한다. 본 논문에서는 ESS용 연계변압기의 철공진의 메커니즘을 분석하기 위해, 그림 1과 같이 AC 전압원과 변압기의 인덕턴스, 차단기 양단의 커패시턴스 성분으로 구성된 간단한 구조의 철공진 회로를 상정한다.



[그림 1] 비선형 L-C 철공진 회로

그림 1의 철공진 회로에서 전류와 전압을 도식적인 해석수법(Graphical solution)을 이용하여 나타내면 그림 2와 같다. 여기서, 인덕터의 양단전압(E_L)은 $1/wC$ 의 기울기를 가진 직선으로 전류에 비례하지만, 인덕터의 양단전압(E_L)은 포화현상에 의해 일정 값 이상의 전류에서 비례적으로 변하지 않는 곡선의 형태를 가진다. 즉, E_L 은 낮은 전류 영역에서 wL_{linear} 의 높은 기울기 값을 가지고, 일정 값 이상의 전류 영역에서는 wL_{sat} 의 매우 낮은 기울기 값을 가지므로, 계통 정수에 따라 E_L 과 $E_s - E_C$ 의 교차점은 1개에서 3개까지 발생할 수 있다. 여기서, E_L 과 E_C 의 크기에 따라 유도성 영역과 용량성 영역으로 나타낼 수 있는데, 1번 교차점은 유도성 영역의 비철공진 상태이고, 2번 교차점은 유도성 영역의 과도상태이며, 3번 교차점은 용량성 영역의 철공진 상태를 나타낸 것이다. 따라서, 변압기의 포화에 의한 철공진 특성에 의하여, 동일한 인가전압(E_s)에서 변압기의 인덕터 양단전압은 3개의 해를 가질 수 있으며, 하나의 교차점에서 다른 교차점으로 순간적인 전압 상승이 발생할 가능성이 있다.

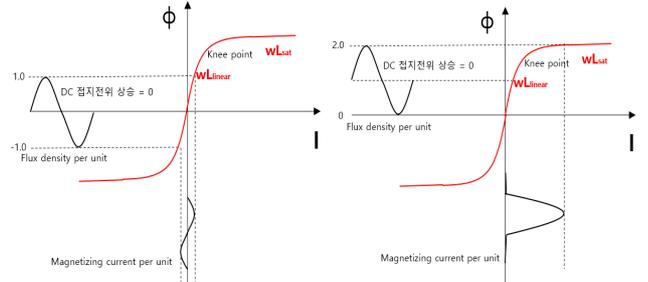


[그림 2] 커패시턴스와 비선형 인덕턴스에 의한 철공진 특성

2.2 DC 접지 전위상승에 따른 ESS용 연계변압기의 포화 메커니즘

대규모 태양광전원 발전단지의 경우, 접지가 되어있더라도 에너지밀도가 높기 때문에 DC 접지 전위상승이 발생할 가능성이 있다[3]. 이러한 DC 접지 전위상승이 연계변압기의 포화에 미치는 영향을 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3의 (a)는

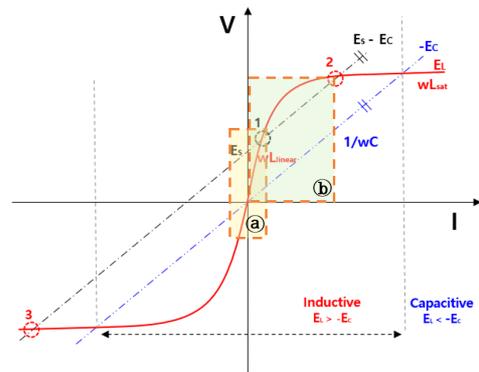
DC 접지 전위상승이 없는 경우의 $I-\phi$ 곡선이며, 변압기의 자화전류가 무릎점 미만에서 발생하는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 3의 (b)는 DC 접지 전위상승이 있는 경우의 $I-\phi$ 곡선이며, DC 접지 전위상승에 의해 반주기동안 무릎점을 초과하여 자화전류가 매우 높게 발생하고, 변압기의 포화에 영향을 미치게 된다.



(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, 연계변압기의 자화곡선의 운용범위는 무릎점 미만인 ㉠영역이지만, DC 접지 전위상승에 의해 양의 주기에서 무릎점 이상으로 변압기가 포화되어 ㉡영역에서 운용되게 되면, E_L 과 $E_s - E_C$ 의 교차점이 추가적으로 발생하므로 철공진이 발생할 가능성이 있다.

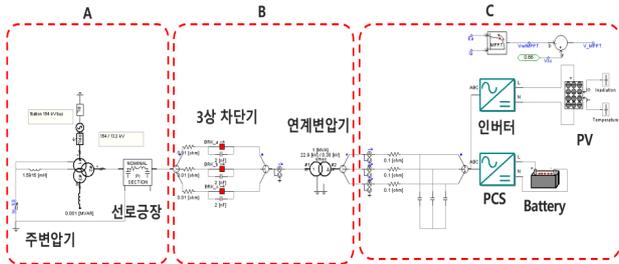


[그림 4] DC 접지 전위상승에 따른 철공진의 도식적인 해석

3. PSCAD/EMTDC에 의한 연계변압기의 철공진 모델링

태양광전원으로 인한 DC 접지전위 상승이 ESS 연계변압기의 포화에 영향을 미쳐, 철공진 발생 가능성을 증가시키는

현상을 분석하기 위하여, 전력계통해석 상용 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용해 주변압기, 고압 배전선로, ESS용 연계변압기, 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 ESS용 연계변압기, 그리고 C부분은 MPPT 제어 수행하는 인버터와 태양광전원, 충방전 제어용 PCS와 배터리로 구성된다.



[그림 5] PSCAD를 이용한 ESS 연계변압기의 철공진 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

DC 접지전위 상승에 따른 ESS용 연계변압기의 철공진 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 주변압기는 154/22.9[kV]의 45/60[MVA] 정격 용량을 가지며, 고압배전선로의 선종은 ACSR 160mm²이고, 공장은 10[km]로 상정한다. 또한, 3상 차단기의 커패시턴스는 2[nF]을 적용하며, ESS용 연계변압기(22.9[kV]/380[V])는 3각 철심구조의 Yg- Δ 결선방식이다. 그리고, PCS의 용량은 1[MVA]이고, 필터용 커패시턴스는 400[μ F]으로 상정한다. 한편 태양광전원의 DC 전압은 700V이고, 태양광전원에 의한 DC 접지전위 상승률은 태양광전원 전압의 0%, 3%, 5%로 나누어 시뮬레이션을 수행한다.

[표 1] 철공진 시뮬레이션 조건

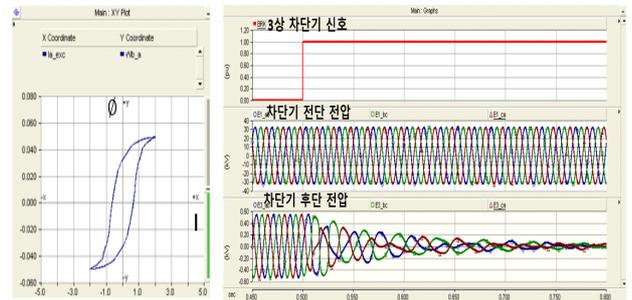
구분	파라메타	크기
주변압기	전압비[kV]	154/22.9
선로	공장[km]	10
3상 차단기	개방 시 커패시턴스[nF]	2
	개방 동작 시점[s]	0.5
ESS용 연계변압기	연계방식	Yg- Δ
	철심구조	3각 철심
	전압비[kV]	22.9/0.38
	용량[MVA]	1.25
	%임피던스[%]	4
	동손[%]	1

PCS	용량[MVA]	1
	필터의 커패시턴스[μ F]	400
태양광전원	전압[V]	700
	DC 접지 전위상승[%]	0
		3
	5	

4.2 DC 접지전위 상승에 따른 철공진 특성 분석

4.2.1 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 6과 같다. 여기서, 그림 6의 (a)는 연계변압기의 I- Φ 곡선이며, 그림 6의 (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.

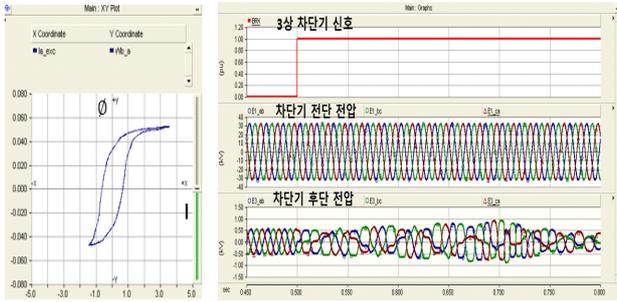


(a) I- Φ curve (b) 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성

[그림 6] 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성(DC 접지 전위상승 0%)

4.2.2 DC 접지전위 상승을 고려한 경우

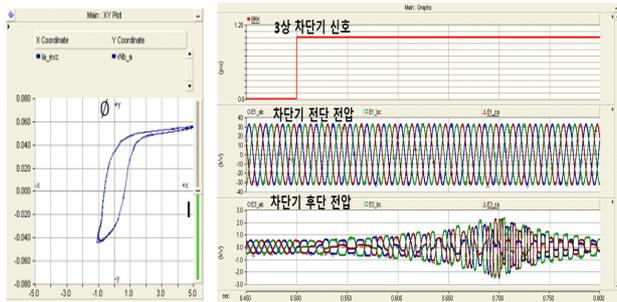
한편, DC 접지 전위상승 3%를 고려하는 경우, 차단기 동작에 따른 전압 및 전류 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7의 (a)는 연계변압기의 I- Φ 곡선이며, 3%의 DC 접지 전위상승으로 인해 자화전류가 크게 증가함을 알 수 있다. 그림 7의 (b)는 전압 및 전류 특성이며, 1[pu]의 정현파 인가전압에 대하여 3상 차단기가 0.5초에 동시 개방 시, 철공진에 의해 변압기 2차측의 전압파형은 왜곡되며 순간적으로 약 1.8[pu]까지 증가하여, 연계용변압기 2차측의 배터리의 과충전으로 심각한 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



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

[그림 7] 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 8과 같다. 여기서, 그림 8의 (a)는 연계변압기의 I- ϕ 곡선이며, 5%의 DC 접지 전위상승으로 인해 자화전류가 매우 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 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 8] 차단기 동작 시, 전류 및 전압 특성(DC 접지 전위상승 5%)

5. 결 론

본 논문에서는 DC 접지전위 상승에 의한 연계변압기 포화 및 철공진 메커니즘을 분석하고, 차단기의 동작 시 연계변압기의 유도성 리액턴스 성분과, PCS 및 차단기의 용량성 리액턴스에 의한 철공진 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용해 3상 전원부, PCS부, 태양광전원부 및 배터리부로 구성된 시스템의 모델링을 수행하였다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, DC 접지전위 상승이 변압기 포화 및 철공진 가능성을 증가시킴을 알 수 있었고, 철공진 발생 시 연계변압기 2차측의 전압이 급격하게 증가하여 배터리에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090)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] Moses, Anthony & Marketos, Filippos & Zurek, Stan. (2007). Effect of DC Voltage on AC Magnetisation of Transformer Core Steel. Journal of Electrical Engineering. 61, Sep 2007.
- [3] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi and D. Sutanto, "Alleviation of Neutral-to-Ground Potential Rise Under Unbalanced Allocation of Rooftop PV Using Distributed Energy Storage," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, no. 3, pp. 889-898, July 2015