

ESS 연계용 변압기의 결선방식 및 철심구조에 따른 순환전류와 포화특성에 관한 연구

태동현, 이후동, 김지명, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

Characteristics of Saturation and Circulating Current Based on Winding and Iron Core Structure of Grid-connected Transformer in Energy Storage System

Dong-Hyun Tae, Hu-Dong Lee, Ji-Myung Kim, Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터를 시작으로, 현재까지 총 29건의 전기저장장치 화재가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다. 이에 대한 원인은 아직 정확하게 규명되지 않았으나, ESS(energy storage system)와 전력 변환장치뿐만 아니라, 계통측 불평형 문제도 하나의 원인으로 고려되어야 할 것으로 보인다. 특히, 연계용변압기측의 순환전류가 자화전류에 영향을 미쳐, 의도치 않게 변압기의 철심이 포화되고 서지전압이 발생하여 ESS에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 부하불평형에 의한 불평형전류 발생시, ESS 연계용변압기로 순환전류의 유입과 변압기 포화로 인한 서지전압 발생 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용한 배전용변전소, 연계용변압기 및 수용가부하로 구성된 배전계통의 모델링을 수행한다. 또한, 이러한 문제를 해결하기 위하여, 중성점 접지 저항기(neutral grounding resistor, NGR)를 통해 순환전류의 크기를 일정 값 이내로 저감시키는 방안을 제시하였다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 연계용변압기의 결선방식 및 철심구조에 따라 일정 값(10[A]) 이상의 순환전류가 발생하여, ESS에 전기적인 위해 요인이 될 수 있음을 알 수 있었고, 변압기 포화로 인해 2차측에 최대 3[pu]의 서지전압이 발생될 수 있음을 확인하였다.

Abstract Since the fire accident of ESS (energy storage system) occurred at Gochang KEPCO Power Testing Center in August 2017, 29 fire cases with significant property losses have occurred in Korea. Although the cause of fire accidents have not been identified precisely, it should be considered battery and PCS (power conditioning system) as well as unbalance issues in the distribution system. In particular, circulating currents in a neutral line of a grid-connected transformer, which can affect a magnetized current, may have a negative effect on the ESS with unintentional core saturation and surge voltages at the secondary side of the transformer. Therefore, this paper proposes the modeling of the distribution system, which was composed of a substation, grid-connected transformer, and customer loads using PSCAD/EMTDC S/W, to analyze the phenomena of circulating current and surge voltages of the transformer with unbalanced currents in the distribution system. This paper presents a countermeasure for a circulating current with the installation of NGR (neutral grounding resistor) in grid-connected transformer. From the simulation results, it is clear that exceeding the circulating current and surge voltage at the secondary side of the transformer can be one of the causes of fire accidents.

Keywords : ESS, Grid-Connected Transformer, Core Saturation, Surge Voltage, Circulating Current, PSCAD/EMTDC

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20191210301940) 그리고 2019년 교육부 대학혁신지원사업 사업비를 지원받아 연구되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received January 30, 2020

Revised February 27, 2020

Accepted April 3, 2020

Published April 30, 2020

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 16년도 418[MWh]에서 18년도에 4,773[MWh]로 급격히 확대되고 있다[1]. 그러나, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있는 실정이다[2]. 이에 대한 원인은 아직 정확하게 규명되지 않았으나, ESS와 전력변환장치뿐만 아니라, 계통측 불평형 문제도 하나의 원인으로 고려되어야 할 것으로 보인다[3-6]. 특히, 연계용변압기 측의 순환전류가 자화전류에 영향을 미쳐, 의도치 않게 변압기의 철심이 포화되고 서지전압이 발생하여 ESS에 영향을 줄 수 있다[7-9]. 따라서, 본 논문에서는 부하불평형에 의한 불평형전류 발생시, ESS 연계용변압기로 순환전류의 유입과 변압기 포화로 인한 서지전압 발생 현상을 해석하기 위하여, PSCAD/ EMTDC를 이용해 배전용변전소, 연계용변압기 및 수용가부하로 구성된 배전계통의 모델링을 수행한다. 또한, 이러한 문제를 해결하기 위하여, 중성점 접지 저항기를 통해 순환전류의 크기를 일정 값 이내로 저감시키는 방안을 제시하였다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 연계용변압기의 결선방식 및 철심구조에 따라 일정 값 이상의 순환전류가 발생하여, ESS에 전기적인 위해 요인이 될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 자속밀도와 공급전원을 변경하며, 철심포화시 자속 및 2차측 전압의 특성분석을 수행한 결과, 변압기 포화로 인해 2차측에 전압 파형이 왜곡되거나 서지가 발생할 수 있음을 확인하였다.

2. 순환전류 및 변압기 철심포화 메커니즘

2.1 부하불평형에 의한 순환전류 발생 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, Fig. 1과 같이 불평형전류(I_{n1})가 부하측 중성선에 흐르고, 이는 ESS 연계용변압기 측(I_{n2})과 배전용변전소측(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 발생할 수 있다.

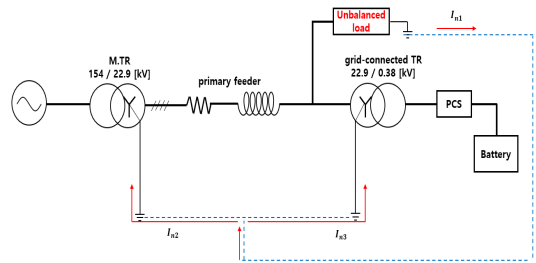


Fig. 1. Concept of circulating current

한편, 변압기의 구조는 크게 철심과 권선으로 구성되어 있으며, 철심의 구조 및 권선의 결선방식은 변압기 특성을 좌우하게 된다. 먼저, 철심구조는 크게 내철형과 외철형으로 구분되는데, 3각 철심을 사용하는 내철형 변압기의 경우, 여자된 권선 밖 요크 사이의 귀환 경로를 통하여 발생하는 잔여 영상분 자속은 Fig. 2(a)와 같이 순환전류를 발생시킬 수 있다. 이에 반해, Fig. 2(b)의 5각 철심을 사용하는 외철형 변압기의 경우, 권선이 감기지 않은 철심(limb1, limb5)으로도 자속이 지나갈 수 있는 경로를 제공하기 때문에, 3각 철심과 달리 순환전류는 발생되지 않는다.

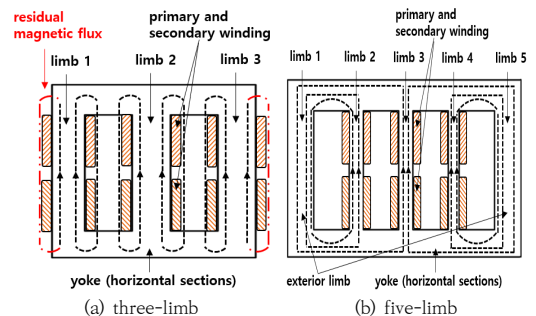


Fig. 2. Iron core structure of 3-phase transformer

또한, 변압기 결선방식의 경우, 특고압을 수전 받는 수용가 변압기는 대부분 Δ -Yg 또는 Δ - Δ 결선방식을 채용하고 있으나, Fig. 3과 같이 분산전원의 연계용변압기의 경우, Yg- Δ 결선방식이 주로 사용되고, 일부에는 Yg-Yg 결선방식도 사용되고 있다. 즉, 대부분의 분산전원의 연계용변압기는 지락사고시, 대지전위 상승을 억제하기 위해 1차측에 Y접지를 함으로써, 이 중성선을 통하여 순환전류의 영향을 받을 수 있다.

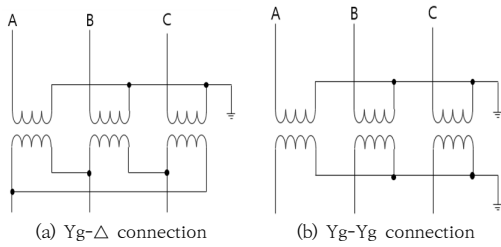


Fig. 3. Wiring connection type of grid-connected transformer

2.2 변압기 철심포화 메커니즘

일반적으로 변압기는 적은 자화전류로 큰 자속을 얻기 위하여 강자성체의 철심을 사용하는데, 특정 영역에서는 자화전류가 증가하더라도 자속이 증가하지 않는 철심의 포화현상이 발생하게 된다. 이러한 포화 메커니즘을 분석하기 위하여, 변압기 회로를 간략하게 등가화하여 나타내면 Fig. 4와 같고, 이 그림과 같이 권선저항과 누설리액턴스, 철손저항, 자화리액턴스, 이상적인 변압기로 구성된다. 먼저, 권선저항과 누설리액턴스는 권선에서 발생하는 발열과 누설자속을 나타내며, 철손저항과 자화 리액턴스는 철손전류(i_r) 및 철심포화에 따른 자화전류(i_m)를 나타낸다. 여기서, 철손전류는 와류손과 히스테리시스손을 포함하며, 자화전류의 합인 여자전류(i_s)는 부하전류와 관계없이 변압기가 정상적으로 동작하기 위해 필요한 최소 전류값을 의미한다.

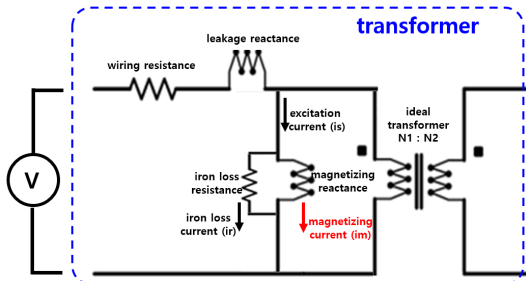


Fig. 4. Equivalent circuit of transformer

Fig. 4에서, 자화전류는 변압기의 포화특성(λ_M , λ_K , L_A)에 따라, 식 (1) ~ 식 (3)에 의하여 산정된다. 여기서, 식 (1)은 변압기의 포화특성에 따라 계산되는 자화전류의 크기이며, (2)는 1차측 정격 전압에서 쇄교되는 자속의 크기를 나타낸다[10,11].

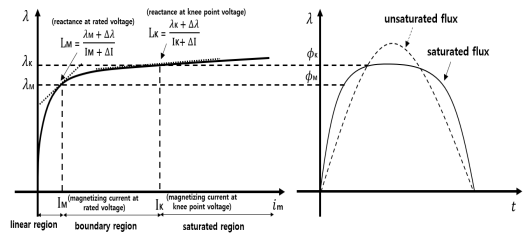
$$i_m = \frac{\sqrt{(\lambda_M - \lambda_K)^2 + 4DL_A} + \lambda_M - \lambda_K}{2L_A} - \frac{D}{\lambda_K} \quad (1)$$

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

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{L_A}{\lambda_K^2} \\ B &= \frac{L_A I_M - \lambda_M}{\lambda_K} \\ C &= I_M (L_A I_M - \lambda_M + \lambda_K) \\ D &= \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서, i_m : 자화전류[A], λ_M : 1차측 정격 전압에서 쇄교되는 자속[Wb·turn], λ_K : 쇄교자속의 무릎점[Wb·turn], L_A : 포화 시 변압기 등가 리액턴스[H], V_M : 1차측 정격 전압의 RMS값[V], I_M : 1차측 정격 전압에서 자화전류[A]

상기 식 (1) ~ 식 (3)에 의하여 산정된 변압기 철심의 자화특성곡선은 Fig. 5(a)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (1)에서 산정된 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[12,13]. 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, Fig. 5(b)와 같이 철심이 포화되어 자속의 형태가 왜곡됨을 알 수 있다.



(a) Magnetization curve of iron core (b) Flux at iron core

Fig. 5. Magnetization curve and flux of transformer iron core

한편, 변압기 2차측 전압은 식 (4)와 같이 철심 내의 자속을 미분하고, 2차측 권수비를 곱하여 산정할 수 있다.

$$V_2 = N_2 \times \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

여기서, V_2 : 2차측 유도전압[V], N_2 : 2차측 턴수 [turn], Φ : 철심 내 자속[Wb]

따라서, Fig. 6과 같이 철심포화로 인해 자속의 형태가 왜곡되는 경우, 2차측에 정현파가 아닌 서지형태의 전압이 유기되어 문제가 발생할 수 있다.

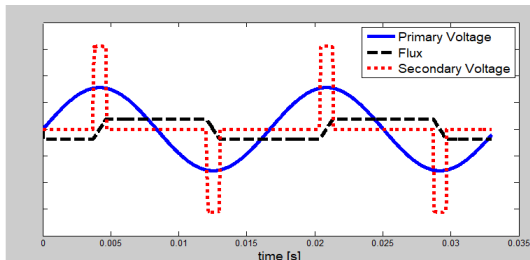


Fig. 6. Magnetic flux and secondary voltage during core saturation of transformer

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 순환전류 및 변압기의 철심포화 모델링

3.1 배전계통의 순환전류 모델링

3.1.1 배전용변전소 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면, Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배

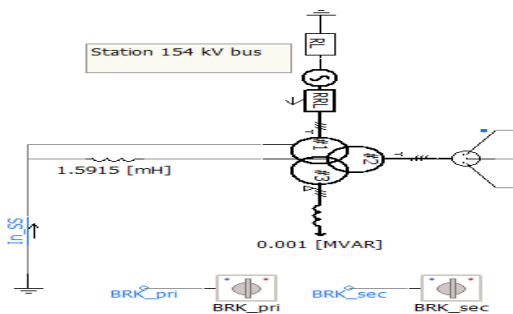


Fig. 7. Modeling of main transformer

전용변전소의 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.

3.1.2 수용가 부하불평형 모델링

고압선로에서 3상 부하용량과 불평형 조건을 모의할 수 있도록 수용가부하를 모델링하면 Fig. 8과 같다. 여기서, 정전력부하의 제어를 위하여 부하의 순시값과 목표로 하는 부하의 편차에 대해, PI제어를 통해 목표값을 추종할 수 있다.

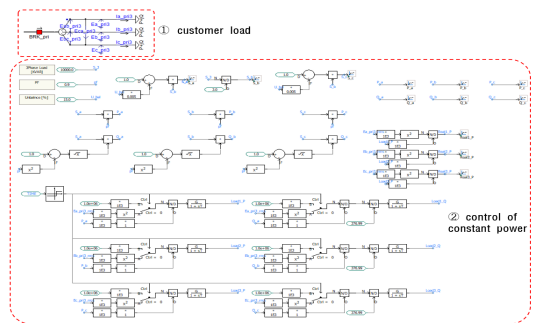


Fig. 8. Modeling of unbalanced customer load

3.1.3 전체 배전계통 모델링

부하불평형에 의해 ESS 연계용변압기 1차측에 순환전류가 유입되는 현상을 분석하기 위하여, 상기의 내용을 바탕으로 배전용변전소, 배전선로, 연계용변압기, 수용가로 구성된 전체 배전계통의 모델링을 나타내면 Fig. 9와 같다. 여기서, 배전용변전소 3권선 주변압기는 Yg-Yg- Δ 결선방식이며, 배전선로는 ACSR 160[mm²], 연계용변압기 용량은 1[MVA]를 상정한다.

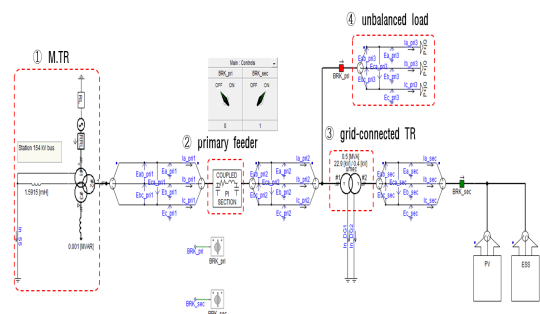


Fig. 9. Modeling of entire distribution system

3.2 연계용변압기의 철심포화 모델링

연계용변압기의 철심포화로 인해 변압기 2차측에 서지형태의 전압이 발생하는 현상을 분석하기 위하여, 권선저항과 누설리액턴스, 철손저항, 자화리액턴스, 이상적인 변압기로 구성된 연계용변압기의 등가회로를 모델링하면 Fig. 10과 같다. 여기서, 연계용변압기는 3상 Yg-Δ 결선방식이고, 1[MVA]급의 용량을 상정한다. PSCAD/EMTDC의 기존 변압기 라이브러리에서는 철심포화시, 자속을 정현파로 유도하기 위하여 매우 큰 자화전류가 비선형적으로 발생시키고 있는데, 본 논문에서는 철심포화시 자속의 왜곡을 분석하기 위하여, 자화전류의 비선형적인 증가를 일부 제한하도록 변압기의 모델링을 제시한다.

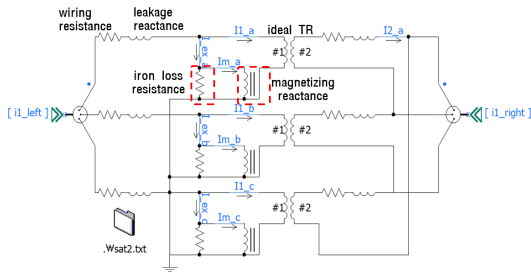


Fig. 10. Modeling of equivalent circuit for 3-phase grid-connected transformer

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

배전계통에서 변압기 결선방식 및 철심구조 등의 파라미터가 순환전류에 미치는 영향을 분석하기 위하여, Table 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 변압기의 결선방식과 철심구조에 따른 순환전류의 발생

Table 1. Simulation conditions of winding and iron core structure

items	contents	
grid-connected transformer	winding type	Yg-Yg, Yg-Yg, Yg-Δ, Δ-Yg, Δ-Yg, Δ-Δ
	iron core	3-bank, 3-limb, 5-limb
	rated capacity	3-phase 1[MVA]
	tap ratio	22,900/380[V]
load	capacity	3-phase 10[MVA]
	unbalanced rate	10, 15[%]
	power factor	0.9

유무를 분석하고, 선로공장(연계용변압기의 설치 위치) 및 불평형률을 변경하며 순환전류의 크기를 비교한다. 또한, 부하불평형률은 계통에서 허용되는 가장 가혹한 조건인 15[%]와 일반적인 조건인 10[%]를 상정하고, 역률은 0.9, 부하는 정전력 부하로 상정한다.

한편, 연계용변압기의 철심포화로 인해 변압기 2차측에 서지형태의 전압이 발생하는 현상을 분석하기 위하여, Table 2와 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 연계용변압기는 Yg-Δ, 3-Bank 구조의 1[MVA]급이며, 변압비는 22,900/380[V]로 모의하고, 자속밀도는 1.3[T]와 1.7[T], 공급전원은 전압원 및 전류원으로 크기는 각각 1[pu], 1.5[pu]로 가정한다.

Table 2. Simulation conditions of iron core saturation at grid-connected transformer

items	contents	
grid-connected transformer	winding type	Yg-Δ
	iron core	3-bank
	rated capacity	3-phase 1[MVA]
	tap ratio	22,900/380[V]
	flux density	1.3[T], 1.7[T]
power source	voltage	1[pu], 1.5[pu]
	current	1[pu], 1.5[pu]

4.2 PSCAD/EMTDC에 의한 순환전류 및 철심포화 특성분석

4.2.1 결선방식 및 철심구조에 따른 순환전류 특성분석

Table 1의 시뮬레이션 조건에 따라, 연계용변압기의 결선방식과 철심구조에 대하여, 부하불평형에 의한 순환전류의 특성을 분석하면 Table 3과 같다. 연계용변압기가 Yg-Δ 인 경우에는 철심구조와 상관없이 순환전류가 발생하며, 3각 철심구조에서는 1차측이 Yg 결선인 경우, 모두 순환전류가 발생함을 알 수 있었다.

Table 3. Circulating current with winding and iron core structure

winding type	circulating current		
	3-bank	3-limb	5-limb
Yg-Yg	X	O	X
Yg-Y	X	O	X
Yg-Δ	O	O	O
Δ-Yg	X	X	X
Δ-Y	X	X	X
Δ-Δ	X	X	X

4.2.2 부하불평형에 의한 순환전류 특성분석

순환전류가 발생하는 조건인 3각 철심구조, Yg-Δ 결선방식의 연계용변압기와 고압선로 불평형 부하를 상정하여, ESS가 연계되는 위치에 따라 순환전류의 크기를 분석하면 Table 4와 같다. 이 표에서와 같이, 배전용변전소에서 20[km] 이상의 위치에 ESS용 연계용변압기가 설치되고, 10[MVA] 부하를 기준으로 부하 불평형률이 10[%]인 경우, 연계용변압기 1차측 중성선에 상당한 크기의 순환전류가 흘러, 철심포화나 2차측 서지 등의 문제를 유발할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 동일한 부하 불평형률에 대하여 ESS 연계 지점이 변전소에서부터 멀수록, 큰 순환전류가 발생함을 확인할 수 있었다.

Table 4. Circulating current with unbalanced load conditions and ESS connection points

simulation conditions			neutral current		
load [MVA]	unbalance d rate[%]	line length [km]	M.TR side [A]	grid-connected TR side [A]	load side [A]
10	10	10	20.29	5.43	25.60
		20	21.24	11.36	32.41
		30	29.86	23.96	53.48
	15	10	30.45	8.15	38.43
		20	31.95	17.09	48.74
		30	44.91	36.04	80.42

한편, Fig. 11은 상기의 조건에 대하여, 고압선로 부하측(I_{n1}) 및 배전용변전소(I_{n2}), 연계용변압기(I_{n3})에 흐르는 순환전류의 내역을 나타낸 것이다.

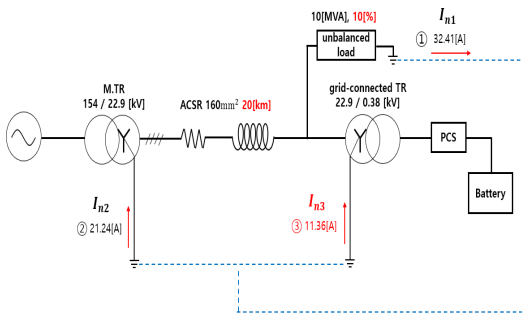


Fig. 11. Characteristics of circulating current with unbalanced load

4.2.3 NGR에 의한 순환전류 저감 특성분석

여기서는 연계용변압기 1차측 중성선에 일정 값 이상의 순환전류가 발생하는 경우, 해당 중성선에 유효접지 이내의 NGR을 설치하여 순환전류를 저감하는 방안을

제시한다. Fig. 12는 Fig. 11의 조건에서 연계용변압기 1차측 중성선에 2.9[Ω]의 NGR을 설치한 경우이며, 연계용변압기에 일정 값(10A 상정) 미만의 전류(9.72[A])로 저감됨을 알 수 있었다.

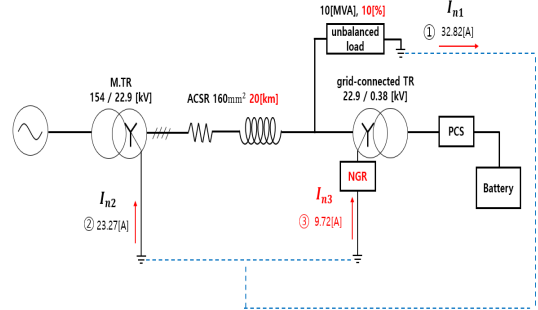


Fig. 12. Characteristics of circulating current unbalanced load with NGR

Table 4를 기준으로, 일정 값(10A) 이상의 순환전류가 발생하는 경우에 대하여, 유효접지범위 이내에서 NGR을 설치하여 순환전류를 저감한 특성을 나타내면 Table 5와 같다. 여기서, NGR을 통해 연계용변압기 1차측 순환전류의 크기가 일정 값 이하로 감소함을 알 수 있었으며, 적정한 NGR의 용량을 산정할 수 있었다. 한편, 가장 가혹한 시뮬레이션 조건인 부하 불평형률 15[%]의 10[MVA] 부하, 선로공장 30[km]의 경우, 약 39[Ω]의 NGR이 요구됨을 알 수 있었다.

Table 5. Characteristics of circulating current with NGR

simulation conditions			neutral current			capacity of NGR[Ω]
load [MVA]	unbalanced rate[%]	line length [km]	M.TR side [A]	grid-connected TR side [A]	load side [A]	
10	10	20	23.27	9.72	32.82	2.9
		30	52.55	9.90	61.99	20.5
	15	20	40.13	9.97	49.78	8.5
		30	90.44	9.94	99.81	39

4.2.4 연계용변압기의 철심포화 특성분석

(1) 전압원에 의한 특성분석

Table 2의 시뮬레이션 조건에 따라 모델링한 3상 Yg-Δ 결선방식의 1[MVA]급 연계용변압기의 등가회로에 대하여, 전압원의 크기 및 자속밀도를 변경하며 철심포화에 대한 특성을 나타내면 Fig. 13과 같다. 여기서,

공급전압이 1[pu]이고, 자속밀도가 1.3[T]인 경우, Fig. 13(a)와 같이 철심이 포화되지 않아서, 자화특성곡선이 선형영역에 해당됨을 알 수 있다. 따라서, Fig. 13(b)와 같이 철심에 정현파의 자속이 유도되어, 2차측에 1[pu]의 정현파 전압이 출력됨을 알 수 있다.

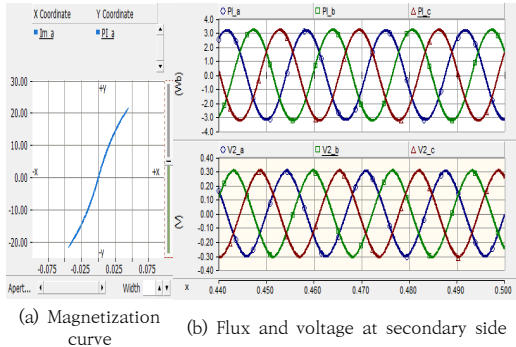


Fig. 13. Characteristics of flux and voltage at secondary side(voltage : 1[pu], flux : 1.3[T])

한편, 공급전압은 1[pu]이고, 자속밀도는 1.7[T]로 증가시킨 경우, 연계용변압기의 포화특성은 Fig. 14와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 자속밀도의 증가에 따라 1[pu]의 전압 인가 시에도 철심이 포화되어, Fig. 14(a)와 같이 자화특성곡선이 비선형영역에 해당됨을 알 수 있다. 따라서 Fig. 14(b)와 같이 철심에 왜곡된 형태의 정현파 자속이 유도되며, 2차측 전압의 피크값은 1[pu]로 동일하지만, 서지형태로 왜곡된 파형이 출력됨을 알 수 있다.

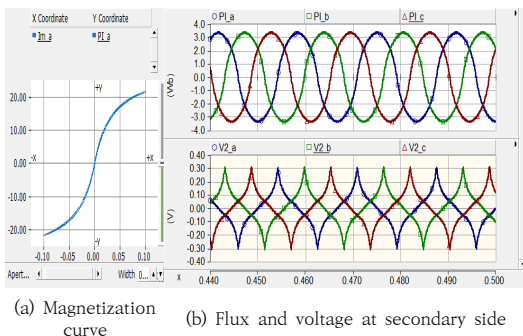


Fig. 14. Characteristics of flux and voltage at secondary side(voltage : 1[pu], flux : 1.7[T])

또한, 공급전압 크기에 따른 포화특성을 분석하기 위하여, 공급전압이 1.5[pu]이고, 자속밀도가 1.3[T]인 경우의 특성을 나타내면 Fig. 15와 같다. 여기서, Fig.

15(a)와 같이 철심이 포화되어 자화특성곡선이 비선형영역에 해당됨을 알 수 있다. 따라서, Fig. 15(b)와 같이 철심에 왜곡된 형태의 높은 정현파 자속이 유도되며, 약 2[pu]의 피크값을 갖는 2차측 서지전압이 출력됨을 알 수 있다. 즉, 개폐서지 및 차단기의 동작에 의해 순간적으로 변압기 1차측 전압이 상승하면 철심이 포화되어, 2차측에 서지전압이 유도될 가능성이 있다.

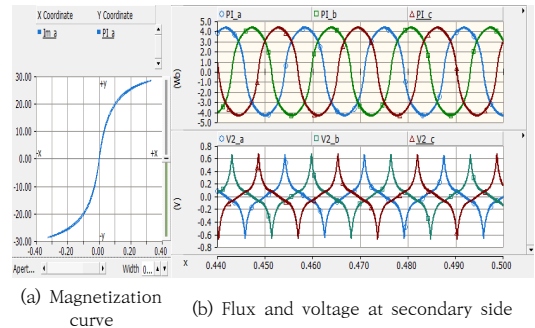
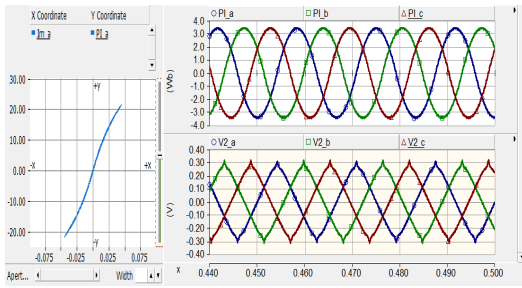


Fig. 15. Characteristics of flux and voltage at secondary side(voltage : 1.5[pu], flux : 1.3[T])

따라서, 공급전원이 전압원인 경우, 자속밀도가 높은 철심을 사용하게 되면 포화영역의 개시점이 낮아질 가능성이 있으므로, 2차측 전압의 피크치는 동일하지만 서지형태의 왜곡된 파형이 출력됨을 알 수 있다. 또한, 개폐서지 등에 의하여 입력전압의 크기가 증가할 경우, 자화특성곡선이 포화영역의 개시점을 초과하게 되어 왜곡된 모양의 정현파 자속이 유도되고, 높은 피크값을 갖는 2차측 서지전압이 출력되어 ESS에 지속적인 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

(2) 전류원에 의한 특성분석

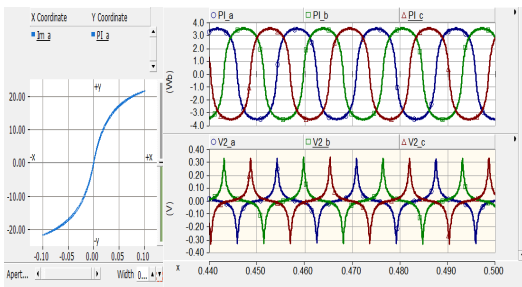
전류제어 기반의 공급전원에 대하여, 연계용변압기의 포화특성을 분석하면 Fig. 16과 같다. 여기서, 공급전압이 1[pu]이고, 자속밀도가 1.3[T]인 경우, Fig. 16(a)와 같이 철심이 포화되지 않아서, 자화특성곡선이 선형영역에 유지되고 있음을 알 수 있다. 하지만, 정현파 전류원에 의해 자화전류는 정현파이고, 자화특성곡선의 기울기가 완전한 선형이 아니므로, 자화특성곡선에 따라 Fig. 16(b)와 같이 왜곡된 형태의 정현파 자속이 유도되어, 1[pu]의 피크값을 가지고 왜곡된 2차측 전압이 출력됨을 알 수 있다.



(a) Magnetization curve (b) Flux and voltage at secondary side

Fig. 16. Characteristics of flux and voltage at secondary side(current : 1[pul], flux : 1.3[T])

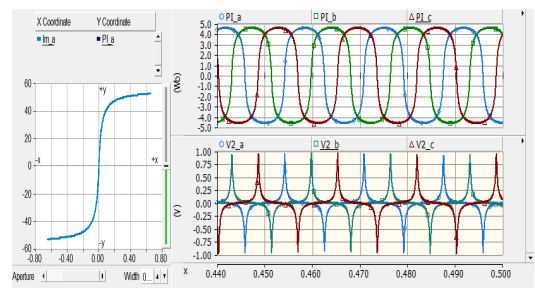
한편, 공급전류는 1[pu]이고, 자속밀도는 1.7[T]로 증가시킨 경우, 연계용변압기의 포화특성은 Fig. 17과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 자속밀도의 증가에 따라 1[pu]의 전류 인가 시에도 철심이 포화되어, Fig. 17(a)와 같이 자화특성곡선이 비선형영역에 해당됨을 알 수 있다. 따라서 Fig. 17(b)와 같이 철심에 왜곡된 형태의 정현파 자속이 유도되며, 2차측 전압의 피크값은 1[pul]로 동일하지만, 서지형태로 왜곡된 파형이 출력됨을 알 수 있다.



(a) Magnetization curve (b) Flux and voltage at secondary side

Fig. 17. Characteristics of flux and voltage at secondary side(current : 1[pul], flux : 1.7[T])

또한, 공급전류 크기에 따른 포화특성을 분석하기 위하여, 공급전류가 1.5[pul]이고, 자속밀도가 1.3[T]인 경우의 특성을 나타내면 Fig. 18과 같다. 여기서, Fig. 18(a)와 같이 철심이 포화되어 자화특성곡선이 비선형영역에 해당됨을 알 수 있다. 따라서 Fig. 18(b)와 같이 구형파의 자속이 유도되고, 이에 따라 약 3[pul]의 피크값을 갖는 2차측 서지전압이 출력되어 ESS에 지속적인 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.



(a) Magnetization curve (b) Flux and voltage at secondary side

Fig. 18. Characteristics of flux and voltage at secondary side(current : 1.5[pul], flux : 1.3[T])

한편, 공급전원이 전류원인 경우와 전압원인 경우에 대하여, 변압기 철심포화 특성을 비교하면, 전류원이 전압원에 비해 자속포화 및 2차측 서지전압이 크게 발생함을 알 수 있다. 이는 전류원의 경우 자화전류가 정현파이므로, 자화특성곡선에 따라 자속이 크게 포화될 가능성이 있기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고 원인을 분석하기 위하여, ESS 연계용변압기의 결선방식 및 철심구조에 따른 순환전류 및 포화 특성에 대한 모델링을 수행하였으며, 자속밀도와 공급전원을 변경하며, 철심포화시 자속 및 2차측 전압의 특성을 분석하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 연계용변압기의 결선방식과 철심구조를 변경하며 순환전류 특성을 분석한 결과, 결선방식이 Yg- Δ 인 경우에는 철심구조와 상관없이 순환전류가 발생하며, 3각 철심구조에서는 1차측이 Yg 결선인 경우, 모든 결선방식에 대하여 순환전류가 발생함을 확인하였다.
- (2) 3각 철심구조의 Yg- Δ 결선방식의 연계용변압기에 대하여, 선로공장이 길수록, 부하불평형률이 높을수록, 연계용변압기 1차측 중성선에 높은 순환전류가 흘러, 철심포화나 2차측 서지 등의 문제를 유발할 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 연계용변압기에 일정 값 이상의 순환전류가 발생하는 경우, 제한한 NGR 설치를 통하여 순환전류를 저감하는 방안을 제시하였고, 유효점지 이내의

NGR을 통해 연계용변압기 1차측 순환전류의 크기가 일정 값 이하로 감소함을 확인하였다.

- (4) 변압기 철심포화 특성을 분석한 결과, 공급전원이 전압원인 경우 자속밀도와 입력전압의 증가에 따라, 2차측에 서지형태의 전압이 출력됨을 확인하였다. 또한, 공급전원이 전류원인 경우, 전압원에 비해 자속포화 및 2차측 서지전압이 크게 발생함을 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=download&bid=128&cid=20839&filename=20839_20190611437588581.pdf
- [2] "Establishing government measures to cope with ESS fire accidents", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.06.
http://kats.go.kr/cwsboard/board.do?mode=download&bid=128&cid=20485&filename=20485_201811281715340631.pdf
- [3] G.Morkyani, M.-R.Haghifam, "Analysis of ferroresonance in a 20kV distribution network", International conference on power electronics and intelligent transportation system, pp. 31-35, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/PEITS.2009.5407008>
- [4] 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>
- [5] S. M. Lee, Y. G. Sun, J. Y. Lee, D. G. Lee, E. I. Cho, D. H. Park, Y. B. Kim, I. S. Sim, J. Y. Kim, "Short-term Power Consumption Forecasting Based on IoT Power Meter with LSTM and GRU Deep Learning", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 19, No. 5, pp. 79-85, Oct. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIIBC.2019.19.5.79>
- [6] 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>
- [7] L. B. Crann, R. B. Flickinger, "Overvoltages on 14.4/24.9-Kv Rural Distribution Systems", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Volume: 73 , Issue: 2 , Jan. 1954
DOI: <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1954.4498949>
- [8] P. A. Abetti, I. B. Johnson, A. J. Schultz, "Surge Phenomena in Large Unit-Connected Steam Turbine Generators", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Volume: 71 , Issue: 5 , Dec. 1952
DOI: <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1952.4498573>
- [9] D. G. Lee, Y. G. Sun, I. S. Sim, Y. M. Hwang, J. Y. Kim, "Comparison of Power Consumption Prediction Scheme Based on Artificial Intelligence", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 19, No. 4, pp. 161-167, Aug. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIIBC.2019.19.4.161>
- [10] 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>
- [11] Jin-Geun Shon, Dong-joon Kim, Min-Gu Kang, Hee-Jong Jeon, "Magnetic Flux Saturation Analysis of Matching Transformer Considering Characteristic of Dynamic Voltage Restorer(DVR)", Trans., KIEE, vol.57P, no.3, pp. 236-243, SEP 2008.
<http://uci.or.kr/G704-001568.2008.57.3.012>
- [12] M. Salimi, A. M. Gole, and R. P. Jayasinghe, "Improvement of Transformer Saturation Modeling for Electromagnetic Transient Programs," in International Conference on Power Systems Transients, 2013, pp. 16.
http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2013/13IPST075
- [13] "EMTDC manual," Winnipeg: Manitoba HVDC Research Center, 2003.

태 동 현(Dong-Hyun Tae)

[준회원]



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

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 후 동(Hu-Dong Lee)

[준회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[준회원]



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

<관심분야>

배전계통 운용, 보호협조, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[정회원]



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

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석