ESS의 연계용변압기의 철심구조 및 결선방식에 의한 순환전류 및 포화특성

이후동*, 태동현*, 정민철*, 전준옥**, 노대석*
*한국기술교육대학교 전기공학과
**한국폴리텍대학교 전기전자제어과
e-mail:lhd714@koreatech.ac.kr

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

Hu-Dong Lee*, Dong-Hyun Tae*, Min-Chul Jung*, Jeon-Jun Ok**, Dae-Seok Rho*
*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education
**Dept. of Electrical and Electronic Control, Korea Polytechnics

요 약

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 전력변환장치뿐만 아니라, 계통측 불평형 문제도 하나의 원인으로 고려되어야 할 것으로 보인다. 특히, 연계용변압기측의 순환전류가 자화전류에 영향을 미쳐, 의도치 않게 변압기의 철심이 포화되고 서지전압이 발생하여 ESS에 지속적으로 영향을 줄 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 연계용변압기의 철심구조와 결선방식에 따른 순환전류의 유입과 변압기 포화로 인한 서지전압 발생 현상을 해석하기 위하여, 연계용변압기의 순환전류 및 철심포화 특성시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 순환전류가 유입된 경우에도 철심포화에 의한 서지가 2차측에 발생하지 않음을 알 수 있었고, 또한, 1차측 대비 2차측의 전압 고조파도 크게 증가하지 않음을 알 수 있었다.

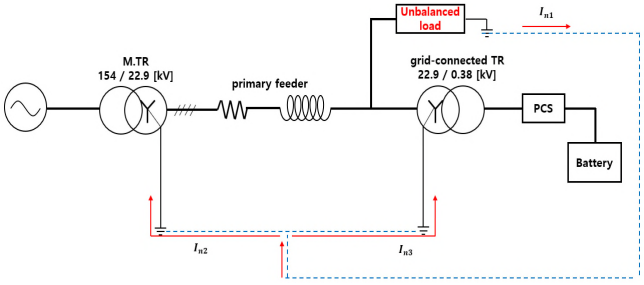
1. 서 론

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 16년도 418[MWh]에서 18년도에 4,773[MWh]로 급격히 확대되고 있다. 그러나, 리튬이온전지를 기반으로 한 대용량 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있는 실정이다. 이에 대한 원인은 아직 정확하게 규명되지 않았으나, ESS와 전력변환장치뿐만 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 ESS용 연계변압기의 철심구조와 결선방식에 따른 순환전류의 유입과 변압기 포화로 인한 서지전압 발생 현상을 해석하기 위하여, 연계용변압기의 순환전류 및 철심포화 특성시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 순환전류가 유입된 경우에도 철심포화에 의한 서지가 2차측에 발생하지 않음을 알 수 있었고, 또한, 1차측 대비 2차측의 전압 고조파도 크게 증가하지 않음을 알 수 있었다.

2. 순환전류 및 ESS용 연계변압기의 포화특성

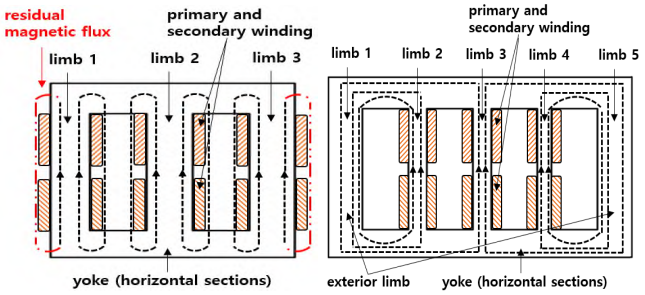
2.1 부하불평형에 의한 순환전류 발생 메커니즘

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, 그림 1과 같이 불평형전류(I_{n1})가 부하측 중성선에 흐르고, 이는 ESS용 연계변압기측(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 발생될 수 있다.



[그림 1] 불평형부하에 의한 순환전류 발생 개념도

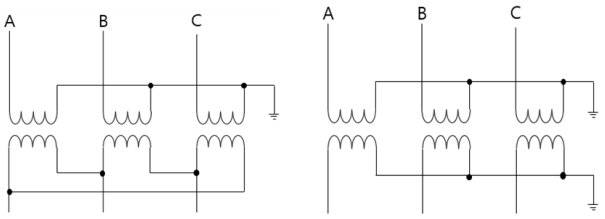
한편, 변압기의 구조는 크게 철심과 권선으로 구성되어 있으며, 철심의 구조 및 권선의 결선방식은 변압기 특성을 좌우하게 된다. 먼저, 철심구조는 크게 내철형과 외철형으로 구분되는데, 3각 철심을 사용하는 내철형 변압기의 경우, 여자된 권선 밖 요크 사이의 귀환 경로를 통하여 발생하는 잔여 영상분 자속은 그림 2(a)와 같이 순환전류를 발생시킬 수 있다. 이에 반해, 그림 2(b)의 5각 철심을 사용하는 외철형 변압기의 경우, 권선이 감기지 않은 철심(limb 1, limb 5)으로도 자속이 지나갈 수 있는 경로를 제공하기 때문에, 3각 철심과 달리 순환전류는 발생되지 않는다.



(a) 3-limb type (b) 5-limb type

[그림 2] 3상 변압기의 철심구조

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

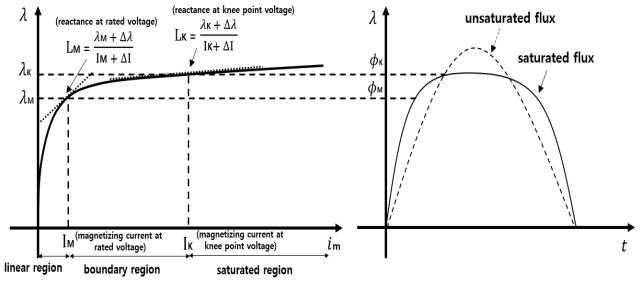


(a) Yg-△ 결선 (b) Yg-Yg 결선

[그림 3] ESS용 연계변압기의 결선방식

2.2 변압기 철심포화 메커니즘

일반적으로 변압기는 적은 자화전류로 큰 자속을 얻기 위하여 강자성체의 철심을 사용하는데, 그림 4와 같이 특정 영역에서는 자화전류가 증가하더라도 자속이 증가하지 않는 철심의 포화현상이 발생하게 된다. 먼저, 그림 4(a)에서와 같이 포화영역 이후에는 자화전류에 따른 쇄교자속이 매우 낮은 기울기(리액턴스)로 증가함을 알 수 있다. 따라서, 선형영역(0 ~ I_M)에서는 변압기가 높은 리액턴스를 가지고, 포화영역(I_K 이상)에서는 리액턴스가 극단적으로 낮아지므로, 변압기가 포화되면 ESS의 C성분에 의하여 철공진 현상이 발생될 가능성이 있다. 또한, 자화전류가 포화영역의 개시점인 무릎점(I_K)에 가까워지면, 그림 4(b)와 같이 철심이 포화되어 자속의 형태가 왜곡됨을 알 수 있다.



(a) 철심의 자화특성곡선 (b) 철심의 자속

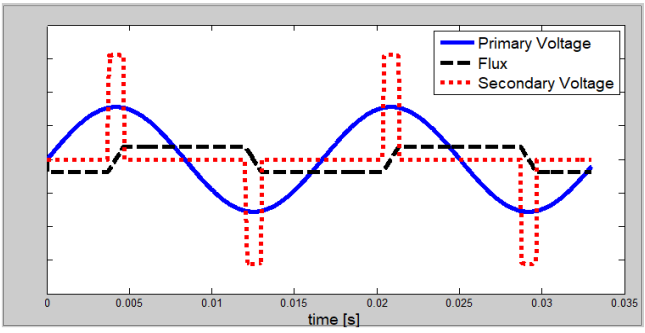
[그림 4] 변압기 철심의 자화특성 곡선

한편, 변압기 2차측 전압은 식 (1)과 같이 철심 내의 자속을 미분하고, 2차측 권수비를 곱하여 산정할 수 있다.

$$V_2 = N_2 \times \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

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

따라서, 그림 5와 같이 철심포화로 인해 자속의 형태가 왜곡되는 경우, 2차측에 정현파가 아닌 서지형태의 전압이 유기되어 문제가 발생할 수 있다.

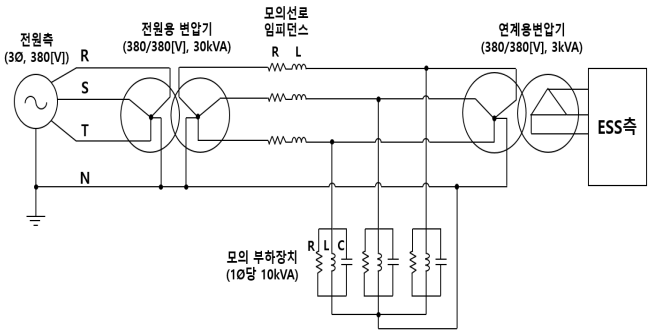


[그림 5] 변압기 철심 포화 시 자속 및 2차측 전압

3. 연계용변압기의 순환전류 및 철심포화 특성시험장치의 구현

실 계통에서 ESS용 연계변압기의 결선방식 및 철심구조에 따라 계통측의 부하불평형에 의해 발생하는 순환전류가 ESS 측에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 연계변압기용 순환전

류 특성시험장치를 구현하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 이 시험장치는 전원측 전압을 가변하기 위한 전원용 변압기, 모의선로, 모의부하장치 그리고 연계용변압기로 구성된다. 여기서, 전원측 변압기는 공급전압의 크기를 조절하기 위한 슬라이닥스형이며, 변압비는 1:1이고, 3상4선식 Yg-Yg 결선방식이다. 또한, 계통측의 부하불평형을 모의하기 위한 선로장치는 저항(R)성분과 리액턴스(X)성분으로 구성되며, 저항과 리액턴스의 크기는 MC에 의하여 0.1~1.6[Ω]까지 조절 가능하며, 모의부하는 정임피던스 특성을 가지고, R(저항), L(리액터), C(콘덴서)부하로 각 상당 10[kVA]의 용량으로 구성된다. 한편, ESS용 연계변압기는 3[kVA]급, 3-limb type과 1[kVA]급, 3-bank type(3x1[kVA])로 구분하고, 결선방식을 다양하게 바꾸어가며 시험을 수행한다. 본 논문에서는 5-limb type의 변압기가 3-bank type과 동일한 특성을 가지므로 고려하지 않으며, ESS측의 PCS 및 배터리는 안전을 위하여 회로를 분리하고 시험을 수행한다.



[그림 6] ESS용 연계변압기의 부하불평형 시험 구성도

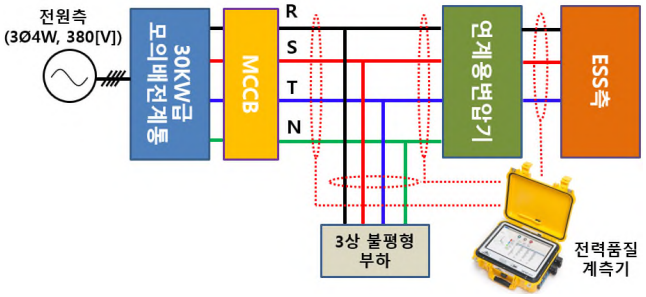
4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

부하불평형에 의해 ESS용 연계변압기 1차측에 순환전류의 유입 및 변압기 포화시 고조파 전압이 전력품질에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 연계변압기의 결선방식과 철심구조에 따라 순환전류 특성을 확인하기 위하여, 결선방식은 1차와 2차측 각각 Yg, Y, Δ 결선을 고려하고, 철심구조는 3-bank type과 3-limb type으로 상정한다. 또한, 순환전류의 크기와 고조파 함유량에 따른 연계변압기의 공급특성을 분석하기 위하여, 부하불평형 시험조건은 3가지로 구분한다. 먼저, Case I은 각 상의 입력전압이 모두 1[pu](220[V])이고, THD는 0[%], 부하불평형률은 54.5[%]인 경우이다. Case II는 R, S상의 전압이 1.2[pu]이고, THD는 0[%], 부하불평형률은 103[%]인 경우이며, Case III는 입력전압이 모두 1[pu](220[V])이고, THD가 20[%], 부하불평형률은 54.5[%]인 경우이다. 상기의 시험조건을 바탕으로 시험을 수행하기 위한 순환전류 특성시험장치의 구성도를 나타내면 그림 7과 같다.

[표 1] ESS용 연계변압기 및 계통 시험 구성도

시험항목		내 용
순환전류 특성시험	결선방식	Yg-Yg, Yg-Yg, Yg-△, △-Yg, △-Yg, △-△
	철심구조	3-bank(5-limb), 3-limb
전압 및 부하불평형 특성시험 (Case I~III)	변압기 용량	3[kVA]
	입력 전압	• R, S, T: 1[pu] • R, S: 1.2[pu], T: 0.8[pu]
	전압 고조파 THD	0[%], 20[%]
	부하 불평형률	• 54.5[%] (R, S: 768[W], T: 414[W]) • 103[%] (R, S: 1141[W], T: 273[W])



[그림 7] ESS용 연계변압기의 부하불평형 시험 구성도

4.2 결선방식 및 철심구조에 따른 순환전류 특성

표 1의 시뮬레이션 조건에 따라, 연계용변압기의 결선방식과 철심구조에 대하여, 부하불평형에 의한 순환전류의 특성을 분석하면 표 2와 같다. 연계용변압기가 Yg-△인 경우에는 철심구조와 상관없이 순환전류가 발생하며, 3각 철심구조에서는 1차측이 Yg 결선인 경우, 모두 순환전류가 발생함을 알 수 있었다.

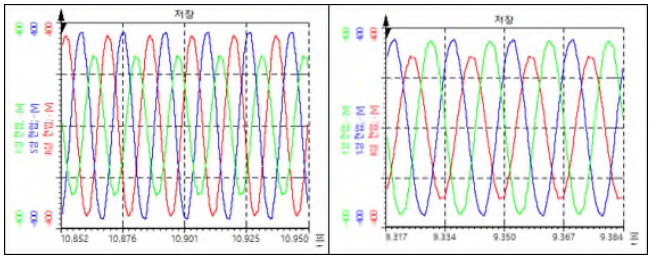
[표 2] 연계변압기의 철심구조 및 결선방식별 순환전류 특성

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

4.3 순환전류에 따른 3상 변압기 공급특성

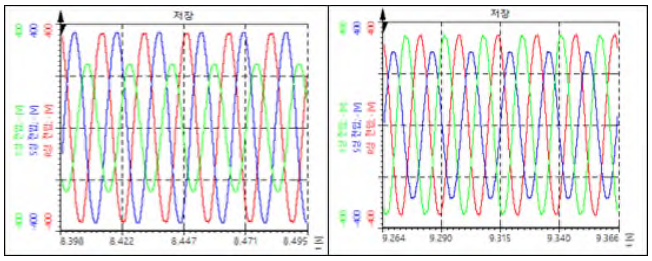
상기의 시험조건 중 가장 순환전류가 크게 발생한 Case II에 대하여, 3-bank 변압기와 3-limb 변압기의 1차 및 2차측 전압특성을 나타내면 각각 그림 8과 그림 9와 같다. 여기서, 그림 8(a)와 그림 8(b)는 3-bank 변압기의 1차 및 2차측의 전압을 나타낸 것으로, Case II의 조건에 따라 부하 및 전압의

불평형으로 인해 1차측에 28.8[A]의 순환전류가 발생하였으나, 그림 8(b)에서와 같이 1차측에 비해 2차측의 전압 고조파가 크게 증가하지 않음을 확인하였다. 또한, 그림 9(a)와 그림 9(b)는 3-limb 변압기의 1차 및 2차측의 전압을 나타낸 것으로, 부하 및 전압의 불평형으로 인해 1차측의 중성선측에 14.5[A]의 순환전류가 발생하였지만, 그림 9(b)에서와 같이 1차측에 비해 2차측의 전압 고조파가 크게 증가하지 않음을 알 수 있었다.



(a) 1차측 전압(Yg결선) (b) 2차측 전압(Δ결선)

[그림 8] 3-bank 변압기의 순환전류 발생 시 전압특성(Case II)



(a) 1차측 전압(Yg결선) (b) 2차측 전압(Δ결선)

[그림 9] 3-limb 변압기의 순환전류 발생 시 전압특성(Case II)

한편, 표 1의 시험조건을 바탕으로 ESS용 연계변압기의 철심구조 및 시험조건별 전압특성을 종합적으로 나타내면 표 3과 같다. 이 표에서와 같이, 순환전류의 크기와 전력품질에 관계없이 3 bank 변압기와 3 limb 변압기의 THD 특성이 동일함을 알 수 있었고, 두 구조 모두 1차측 보다 2차측의 전압 THD가 개선됨을 확인하였다. 따라서, 부하불평형에 의해 큰 순환전류가 변압기 1차측에 유입되어도, 1차측 대비 2차측의 전압 고조파가 크게 증가하지 않아, 2차측 전압 서지에는 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.

[표 3] 연계변압기의 철심구조 및 시험조건별 전압 THD 특성

철심구조	시험조건	1차측 전압 THD[%]			2차측 전압 THD[%]		
		R	S	T	R-S	S-T	R-T
3 bank (5 limb)	Case I	1.94	1.63	1.39	1.63	1.86	1.49
	Case II	1.67	1.73	2.2	1.85	1.43	1.58
	Case III	20.11	20.1	20.12	12.17	12.13	12.13
3 limb	Case I	1.61	1.34	1.41	1.67	1.55	1.73
	Case II	1.72	1.57	1.87	1.35	1.43	1.75
	Case III	20.04	20.12	20.19	12.16	12.17	12.17

5. 결 론

본 논문에서는 ESS용 연계변압기의 철심구조와 결선방식에 따른 순환전류의 유입과 변압기 포화로 인한 서지전압 발생 현상을 해석하기 위하여, 연계변압기용 순환전류 특성시험장치를 구현하였다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 순환전류가 유입된 경우에도 철심포화에 의한 서지가 2차측에 발생하지 않음을 알 수 있었고, 또한, 1차측 대비 2차측의 전압 고조파도 크게 증가하지 않음을 알 수 있었다. 향후, 포화에 따라 비선형 특성을 갖는 변압기 등가 인덕턴스가 ESS용 PCS의 필터와 철공진을 발생시키는 문제에 대해 분석하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20182410105070, No.20191210301940)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

[1] “ESS Causes Investigation and Safety Reinforcement Measures Announcement”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.

[2] “Establishing government measures to cope with ESS fire accidents”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.

[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.

[4] Madhab Roy, Chinmay Kanti Roy, “A study on ferroresonance and its depedence on instant of switching angle of the source voltage”, Third international conference on power systems, Kharagpur, pp. 1-6, India December 27-29, 2009.