The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 10, pp. 1536~1541, 2012
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.10.1536

비대칭 3상 선로에서 변압기의 철심구조별 문제점 분석 및 방지대책

Problem Analysis by Iron Core Structure of the Transformer on Asymmetric three Phase lines and Prevention Measures

신 동 열† · 윤 동 현* · 차 한 주**
(Dong-Yeol Shin · Donghyun Yun · HanJu Cha)

Abstract - The study analyzed problems by iron core structure of the three phased transformer on asymmetric three phase lines, which included line disconnections, ground faults, COS OFF, and unbalanced loads on the power distribution system. In particular, by analyzing PT combustion cases within the MOF, the study was able to analyze the combustion cause of the core-type transformer and its effect on the system, conduct simulations and practice demonstrations on the characteristics for each iron core structure of the three phase transformer using PSCAD/EMTDC, and suggest measures to prevent the combustion of the core-type transformer.

Key Words : Core type transformer, Shell type transformer, Single phase bank type transformer, Iron core structure, Connection method, Power distribution system

1. 서 론

1.1 송, 수전 연계용 변압기 결선 형태

배전계통은 3상4선식 다중직접접지 방식으로 구성 되어 있으며, 최근 분산전원 확대보급으로 배전계통은 부하설비와 발전설비가 혼재된 양방향 형태의 설비로 구성되어지고 있다. 배전계통의 연계방식은 크게 수전용 변압기와 발전용 변압기로 연계된다. 이들 차이점은 변압기의 결선형태에 따라 2가지로 구분한다. 첫째 수전설비인 수전용 변압기는 대부분 △-Y 결선 또는 Y-△ 결선 형태로 변압기 1차 중성점을 비접지 형태로 운영한다. 둘째 발전설비인 송전용 변압기는 Y-△ 결선 또는 Y-Y-△ 결선 형태로 변압기 1차 중성점을 접지하는 방식으로 운영하고 있다. 변압기의 1차 또는 2차를 △ 결선으로 사용하는 이유는 고조파 성분이 계통쪽으로 유입되는 현상을 방지하기 위해서이다[1].

1.2 변압기 철심구조

변압기의 구조는 코일(권선)과 철심으로 구성되어 있으며, 그 특성은 코일의 결선방식과 철심의 구조에 따라 다르게 발생된다. 대부분의 전기기술자들은 변압기의 결선방식 에 따라 1-2차 전압 및 전류의 크기, 접지방식, 위상각은 잘 적용하고 있어 변압기 운용상 큰 문제는 발생하지 않는다. 그러나 변압기의 철심구조는 그림 1과 같이 단상형(Bank), 내철형(3-Limb), 외철형(5-Limb) 3가지 형태로 분류되며, 변압기 선정시 선로특성(접지, 비접지)과 부하특성(△,Y)을 고려해야 한다. 특히, 변압기 운전시 3상 대칭 및 비대칭 입력전압 상태에 따라, 코일과 철심간 상호작용에 따라 여러 가지 문제점이 발생하고 있다.

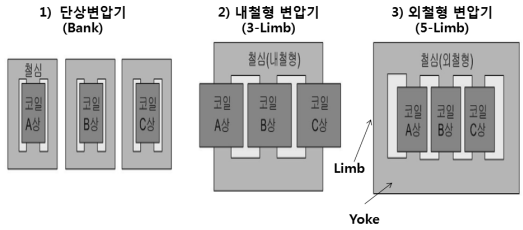

그림 1 변압기의 철심구조별 형태
Fig. 1 The type of the transformer by iron core structure

1.3 내철형 변압기의 문제점 및 소손사례

삼상 내철형 변압기의 1차측(전원측)에 Y결선하여 사용할 경우, 우리나라 배전계통에서 전원측 전선단선 고장이 발생시, 연계용 변압기의 내철형 철심구조는 건전상에서 단선된 상으로 역 기전력을 공급하기 때문에 계통 부하로 변압기 과부하 또는 소손이 발생된다. 또한, 상기 조건에서 전원계통에서 지락 고장시 상간 비대칭 전압이 변압기에 공급되고, 이로 인해 내철형 변압기는 지락된 상으로 역기전력을 공급하게 되고, 이때 변압기에서 정격전류의 수십 배의 고장전류를 역으로 공급함으로 인해 보호계전기가 오동작 되거나, 변압기 보호용 퓨즈가 동작하게 된다. 특히, 계통측 상간 불평형 부하발생시 내철형 철심은 상간 자속의 영향으로 내부순환 전류가 발생되어, 변압기 온도상승, 손실증가, 계량오차 발생 등 공급자와 수요자간에 다양한 문제발생이 발생되고 있다[1,2]. 그림 2는 배전선로에서 전선단선 고장시, 전원측 결상으로 인한 수용가측 MOF(Metering outfit)가 수십대 소손된 사례 이다. MOF 내부 PT(potential transformer)는 내

† 교신저자, 정회원 : 한국전력 전력연구원
E-mail : sdy9199@kepco.co.kr
* 정 회 원 : 충남대학교 전기공학과 박사과정
** 정 회 원 : 충남대학교 전기정보통신공학부 부교수 · 공박
접수일자 : 2012년 7월 18일
최종완료 : 2012년 9월 25일

철형 철심구조, 1-2차 Y-Y결선 형태로, 전원측 전선단선시 과전류에 의해 1차권선이 소손되었다.

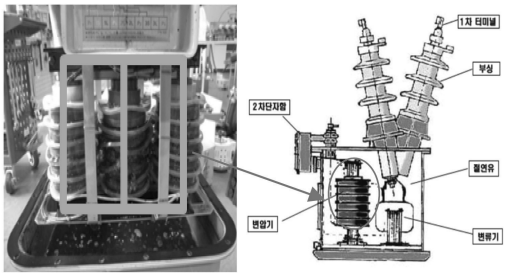

그림 2 MOF 내부 PT(내철형 변압기) 소손
Fig. 2 PT combustion in MOF

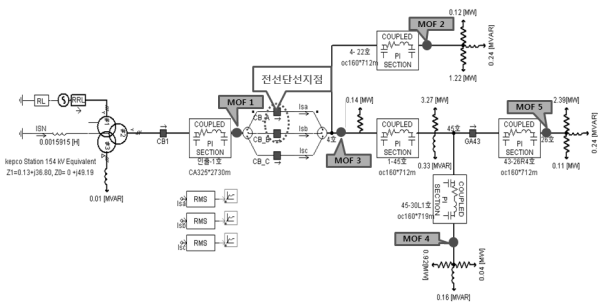

그림 3 전선 단선시 MOF 위치별 선로구성도
Fig. 3 The diagram on the power distribution system by MOF position when the line disconnected

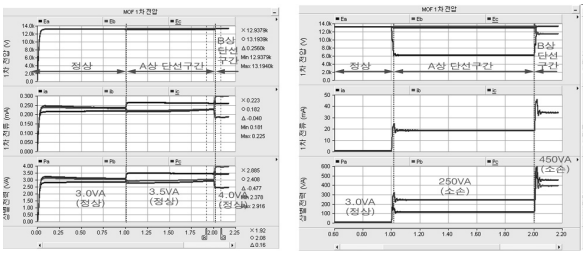

그림 4 #1MOF 정상(좌) 및 #2~5 MOF 소손(우)
Fig. 4 #1 MOF normal (left) and #2~5 MOF combustion (right)

변전소 인출부분에서 개폐기 리드선 불량으로 A상 단선 수 십초 후, B상이 단선되어 2시간 내에 복구를 완료하였다. 그러나 전선단선 지점의 말단측 수용가에 설치된 MOF(18대)가 연쇄적으로 2~3일 동안 PT의 1차측 권선이 소손되었다[3]. 이러한 MOF 소손과 동일한 조건에서 철심구조에 따른 영향을 실험하기 위해서 그림 3과 같이 A상 단선, B상 단선 상태, C상 정상상태로 각각 MOF의 소손여부를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션 하였다[4]. 시뮬레이션 결과 그림 4와 같이 전원측 #1 MOF(정상구간)는 이상이 없었으나, 전선단선 지점 이후 #2~#5 MOF는 과부하로 인하여 소손되는 것으로 나타났다. MOF의 정격용량은 25[VA]로 정상 시에는 전력량계손실 3 [W] 미만이지만, 1선(A상) 단선시 약 250[VA], 2선(A,B상) 단선 시에는 약 450[VA]까지 발생하게 되며, 이는 현장상황과 동일한 것으로 나타났다. 분석결과 MOF 내부 PT는 내철형 철심구조로 전선 단선시 MOF의 철심에 의해 건전상의 전압이 역으로 유기되어 단선된 이후 배전선로 부하를 역으로 공급하기 때문에 1차 권선이 과부하로 소손되는 것으로 분석되었다. 따라서, 본 논문에서는 비대칭 3상 선로에서 변압기의 철심구조별 문제점을 분석하고, 계통 조건별로 적합한 변압기를 선정할 수 있도록 변압기의 소손방지 대책을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 변압기 코일과 철심의 상호작용 관계

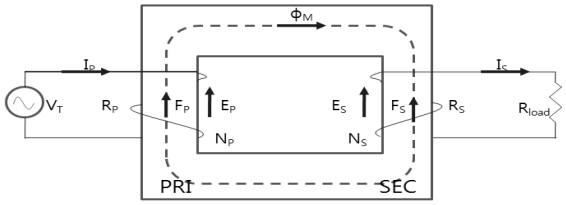

그림 5 교류전원에서의 변압기 동작 원리
Fig. 5 The principle of the transformer in the AC power

일반적으로 변압기에서의 코일의 전기저항은 식(1)과 같으며,

$$R=\frac{l}{\sigma A} \tag{1}$$

σ는 코일의 도전율, A는 코일의 단면적, l은 코일의 길이

변압기에서의 철심의 자기저항은 식(2)와 같다.

$$R_m=\frac{l}{\mu A} \tag{2}$$

μ는 철심의 투자율, A는 철심의 단면적, l 은 철심의 길이

식(1)~(2)를 적용하여 그림 5에서 변압기의 1차측 코일에 전원이 인가되면, 전기저항에 의해,

$$L_P=\frac{N^2}{R_m} \quad \text{(N은 권수, } R_m \text{은 자기저항)} \tag{3}$$

$$V_P=L\frac{di}{dt} \tag{4}$$

1차 인덕턴스 식(3)과 1차 유기되는 전압 식(4)가 발생되어, F_P 1차 기자력과 E_P 1차 역기전력이 발생된다. F_P 1차 기자력과 철심의 자기저항에 의해 Φ_M 상호자속으로,

$$F_S=NI \tag{5}$$

$$V_S=N\frac{d\varnothing}{dt} \tag{6}$$

변압기의 2차측 코일에 2차 기자력 식(5)와 2차 유기되는 전압 식(6)에 의해 2차측 코일에 부하전류가 발생된다. 여기서 식(1)~(6)에 의해,

$$V = IL = F_S = NI = \varnothing R_m \tag{7}$$

식 (7)이 증명되며, 코일과 철심은 변압기의 코일의 전기적 특성과 철심의 자기적 특성이 상호작용하는 것을 알 수 있다. 따라서 1차코일 △결선시 전기적 특성과 내철형 철심의 자기적 특성이 일치해야 하며, 1차코일 Y결선은 외철형 철심과 자기적 특성이 일치해야만 전자기적 충돌을 방지 할 수 있다. 그러나, 아직도 대부분의 변압기는 내철형 철심과 외철형 철심을 구별하여 사용하지 않고 있으며, 이로 인해 변압기가 소손 된다.

2.2 변압기 철심형태별 시뮬레이션 결과

1.3 내철형 변압기 소손 원인에 대한 위험요소 원인을 분석하기 위해, 소손사례에서 적용한 내철형 철심구조, 1-2차 Y-Y 결선 형태에서 1)실험조건 1 : 전선단선(고저항 지락), 2)실험조건 2 : 지락고장, 3)실험조건 3 : 내철형 변압기 1차 COS(1상 또는 2상) 용단, 4)실험조건 4 : 부하 불평형으로 실험조건 4가지로 구분하였다.

2.2.1 실험 1 : 전선단선시 시뮬레이션

실험 1은 실험조건 1을 적용하여 그림 6과 같이 배전용 변압기 Y-Y 결선한 상태에서 철심구조별 각 상의 전압, 전류를 해석하였다. 표 1과 같이 내철형 변압기는 외철형 변압기와 다르게 전원측 단선고장시 1차측 정격전류보다 14배(54A) 큰 과전류가 발생하였으며[5,6], 이로 인해 변압기가 소손될 수 있는 것으로 분석되었다. 즉, 내철형 변압기 2차측 부하에 3상 전력 공급이 가능하나 부하조건에 따라 전압강하 및 과부하를 야기시키며, 전선단선으로 내철형 변압기의 전력이 고압부하로 3상 전력이 공급된다.

2.2.2 실험 2 : 지락고장시 시뮬레이션

실험 2은 실험조건 2을 적용하여 배전계통에서 1선 지락고장발생시 내철형 변압기와 외철형 변압기에 미치는 영향을 분석하였다. 상기 변압기 시험조건(Y-Y 결선, 150 [kVA])에서 10 [km] 지점에서 시험용 변압기를 설치하고, 선로 말단측에서 1선 지락고장이 발생한 경우, 내철형 변압기와 외철형 변압기에서 고장전류를 공급하는지를 분석하였다. 시뮬레이션 결과 내철형 변압기는 그림 7과 같이 1선지락 고장발생시 표 1의 정격전류 4.0 [A] 보다 큰 212 [A](순시 300A)의 고장전류가 ③지점 전원계통으로 공급 되였으며, 동일한 실험 조건에서 외철형 변압기는 그림 8과 같이 고장전류(③지점)를 공급하지 않는 것으로 분석 되었다[6]. 따라서 3상 내철형 변압기를 배전선로에서 사용할 경우, 전원측(③지점) 지락고장시 고장 전류에 의해 소손되거나, 변압기 2차측 부하와 무관하게 퓨즈가 용단되거나, 보호계전기(①지점)가 오동작 현상이 발생된다. 즉, 고장점 기준 부하측에 부설된 내철형 변압기를 거쳐 지락상에 고장전류가 공급된다.

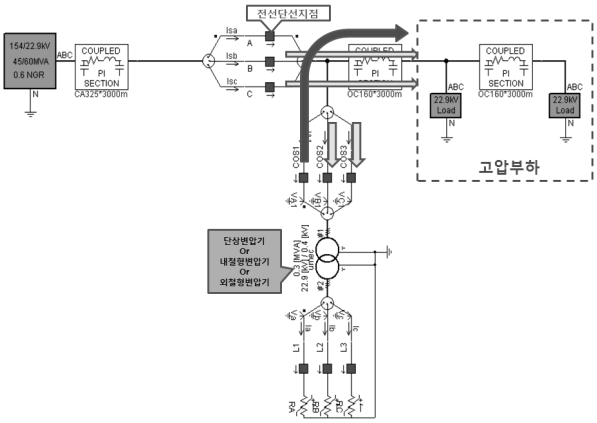

그림 6 A상 전선 단선시 철심구조별 실험 1.

Fig. 6 Simulation 1 by iron core structure when line of A phase disconnected.

표 1 전선단선시, 철심구조별 실험 결과

Table 1 Simulation results by iron core structure when line disconnected

구분		단상 변압기 3대 결선			내철형 변압기			외철형 변압기		
		정상 상태	단상 결상	2상 결상	정상 상태	단상 결상	2상 결상	정상 상태	단상 결상	2상 결상
전압 (V)	A	13317	4413	6588	13317	8826	6004	13317	4411	6588
	B	13318	13376	6578	13318	13219	6043	13318	13376	6578
	C	13318	13277	13349	13318	13277	13238	13316	13277	13349
	a	231	76	114	231	156	106	231	76	114
	b	231	232	114	231	201	106	231	232	114
	c	231	230	231	231	235	218	231	230	231
전류 (A)	A	4	1.3	2	4	48	33	4	1.3	2
	B	4	4	2	4	50	33	4	4	2
	C	4	4	4	4	54	38	4	4	4
	a	230	76	113	230	155	105	230	76	113
	b	230	231	113	230	200	106	230	231	113
	c	230	229	230	230	234	217	230	229	230

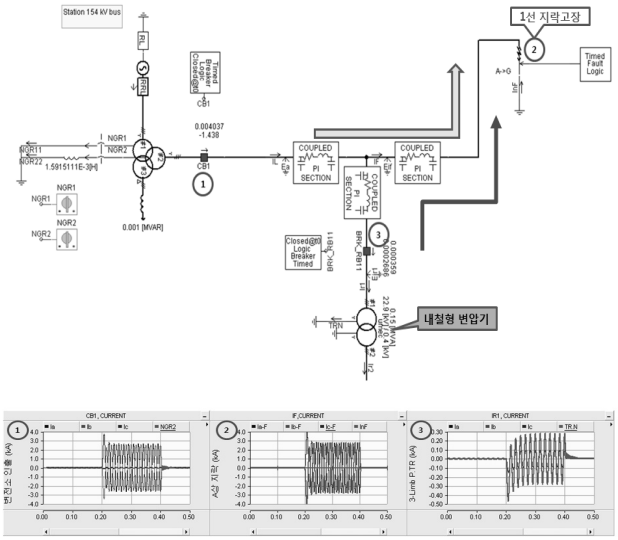

그림 7 1선지락 고장발생시 내철형 변압기 실험 2

Fig. 7 Simulation 2 of the core type transformer when line ground fault.

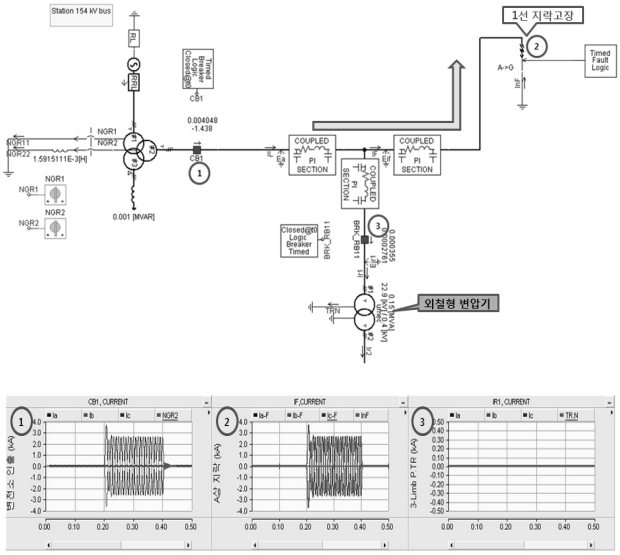

그림 8 1선지락 고장발생시 외철형 변압기 실험 2

Fig. 8 Simulation 3 of the shell type transformer when line ground fault.

2.2.3 실험 3 : 1차 COS 용단시 시뮬레이션

실험 3은 실험조건 3을 적용하여 운전 중 그림 9와 같이 변압기 1차의 A상 또는 A, B상 COS의 OFF시 철심구조별 변압기 2차측 전압과 전류 현상을 해석하였다. 분석결과 표 2와 같이 내철형 변압기는 A상 OFF시 225 [V], AB상 OFF시 114 [V]로 전압이 유기되었다[5,6]. 이로 인해 운용변압기가 부적절한 경우 현장에서 감전사고 또는 설비사고가 발생된다. 즉, COS 1상이 개방될 경우 나머지 2상을 통해 2차측 부하에 3상 전력이 공급되며, COS 2상 용단될 경우 나머지 1개상을 통해 부하 전력 공급가능하나, 상별 유기된 전압으로 감전사고가 우려된다.

2.2.4 실험 4 : 불평형 부하시 시뮬레이션

실험 4는 실험조건 4를 적용하여 배선선로에서 말단 부하를 A상 3,000 [kW], B상 2,000 [kW], C상 2,500 [kW]로 적용하여 계통의 부하불평형율 15%인 경우 내철형 변압기와 외철형 변압기의 순환전류 발생 여부를 분석하였다. 그림 10과 같이 내철형 변압기를 사용할 때, 전원계통의 불평형 전류로 인하여 내철형 변압기 1차측에 상별로 각각 약 2 [A] 동위상의 순환전류(③지점)가 발생되었으며, 이때 중성선의 전류는 상전류 보다 큰 약 6 [A] 전류가 발생되었다. 동일한 조건에서 그림 11과 같이 외철형 변압기를 시뮬레이션 한 결과 외철형 변압기는 1차측에 순환전류가(③지점) 발생하지 않았다. 따라서 내철형 변압기를 배전선로에 사용하면 계통의 불평형 전류에 의해 변압기 내부 순환전류가 발생되어 변압기가 과열되거나 손실이 증가하는 문제점이 발생하게 된다. 즉, 내철형 변압기 연결점에서 계통으로 순환전류가 발생된다.

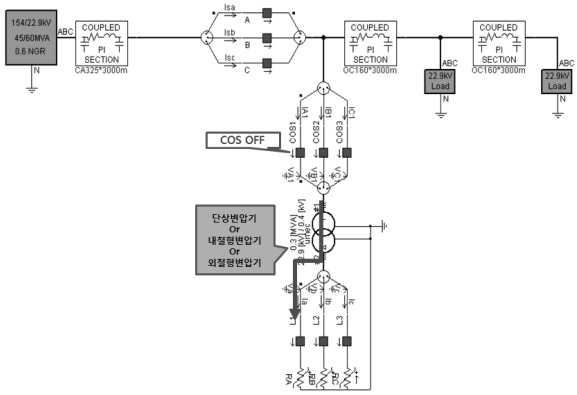

그림 9 A상 COS OFF시 철심구조별 실험 3

Fig. 9 Simulation 3 by iron core structure when COS of A phase turned off.

표 2 COS OFF시, 철심구조별 실험 3 결과

Table 2 Simulation results by iron core structure when COS turned off.

구분		단상 변압기 3대 결선			내철형 변압기			외철형 변압기		
		정상 상태	A상 COS OFF	A·B상 COS OFF	정상 상태	A상 COS OFF	A·B상 COS OFF	정상 상태	A상 COS OFF	A·B상 COS OFF
전압 (V)	A	13226	0	0	13226	13068	6576	13226	0	0
	B	13226	13226	0	13226	13215	6576	13226	13226	0
	C	13226	13226	13226	13226	13233	13224	13226	13226	13226
	a	229	0	0	229	227	114	229	0	0
	b	229	228	0	229	225	114	229	239	0
	c	229	228	228	229	231	229	229	241	228
전류 (A)	A	4	0	0	4	0	0	4	0	0
	B	4	4	0	4	6.7	0	4	4	0
	C	4	4	4	4	7.0	6	4	4	4
	a	228	0	0	228	226	113	228	0	0
	b	228	228	0	228	225	114	228	228	0
	c	228	228	229	228	225	114	228	228	229

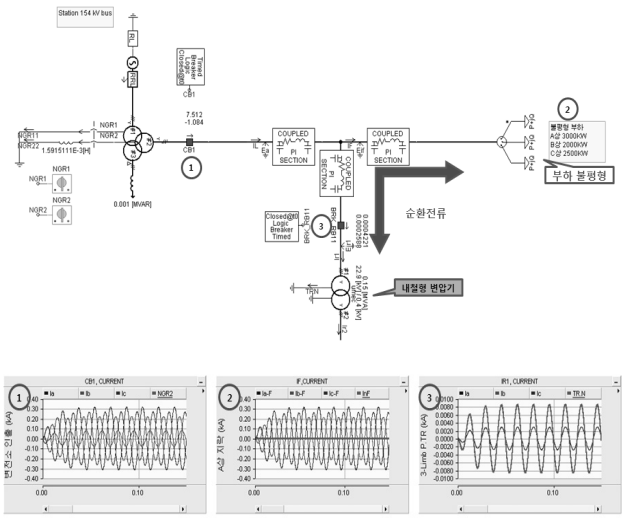

그림 10 불평형 부하 발생시 내철형 변압기 실험 4

Fig. 10 Simulation 4 of the core type transformer when unbalanced load existed.

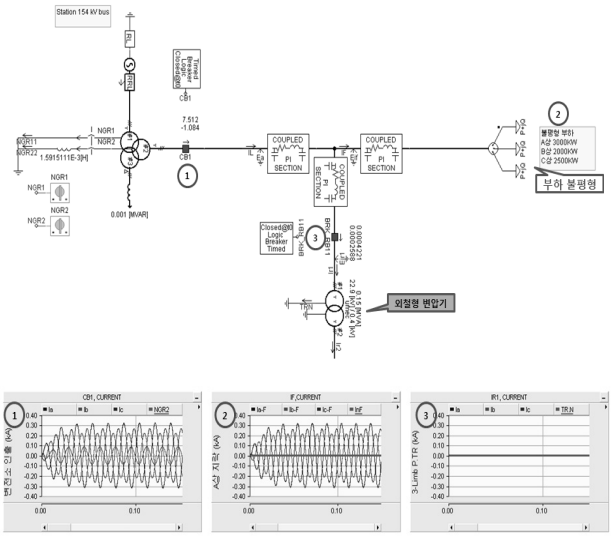

그림 11 불평형 부하발생시 외철형 변압기 실험 4

Fig. 11 Simulation 4 of the shell type transformer when unbalanced load existed.

2.3 실험 검증

2.2 실험조건별로 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션한 실험결과를 검증하기 위해서 그림 12와 같이 실험 선로와 변압기 철심형태별 제작하여 실측한 결과, 실험값과 상기 실험 1~4 시뮬레이션한 값이 모두 일치하는 것으로 검증되었다.

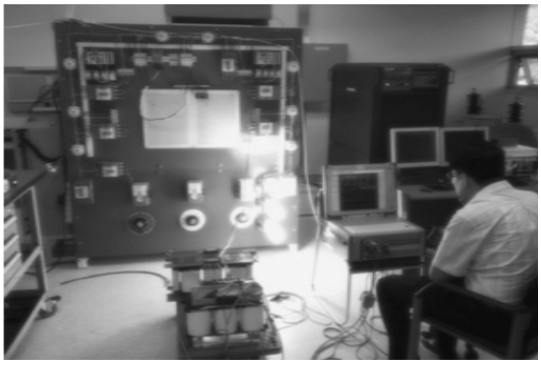

그림 12 모의실증 실험

Fig. 12 The power distribution system for experiment

2.4 내철형 변압기(MOF 포함)의 소손방지대책

상기 MOF 소손원인은 3상 내철형 변압기로, Y결선형태로 사용하기 때문에 전원측 결상 또는 지락고장발생시 소손되는 문제가 발생된다. 따라서 이와 같은 현상은 방지하기 위해서는 PT는 Y-Y결선방식을 사용하기 때문에 철심의 형태를 외철형 형태로 교체해야 변압기 소손을 방지할 수 있다. 그림 13은 상기 소손사례의 PT 소손 원인 분석을 위해 내철형 변압기 MOF를 외철형 변압기 MOF로 교체하여 시뮬레이션 한 결과로 1선 단선시 또는 2선 단선시 MOF가 소손되는 것을 방지할 수 있었다.

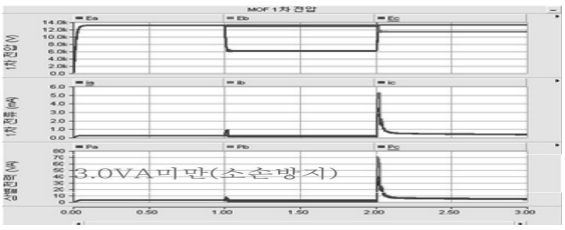

그림 13 외철형 변압기에서 전선단선시 PT 시뮬레이션 결과

Fig. 13 Simulation results of the PT when line disconnected in the shell type transformer

2.5 시뮬레이션 및 실험검증 고찰

그림 14는 고객측 수전설비 점검을 위해 COS OFF시, 상불 불평형 부하로 인해 비대칭 3상 전원이 PT에 공급되면 코일과 철심의 상호작용에 의해 A상 변압기 부하로 역기전력을 공급하기 때문에 PT가 소손되는 것으로 분석되었다. 특히 이와 같은 현상은 그림 6과 같이 내철형 변압기(Y-Y결선)를 사용하면, 상기 MOF 소손과 동일하게 소손되는 것으로 분석되었다. 특히, 그림 7과 같이 지락고장시 3상 비대칭 계통조건에서 내철형 변압기(Y-Y)에서 고장전류를 공급하기 때문에 변압기 고장 또는 2차측 고장과 무관하게 변압기 1차 COS가 용단되거나, 상별 역 조류 현상으로 상별 전류가 증가되거나, 감소되는 현상으로 보호계전기가 오동작하는 문제점이 발생되는 것으로 분석 되었다. 또한 그림 9와 같이 COS 1상(A상) OFF 하였으나 나머지 2상을 통해 2차측에는 3상 전압이 유기되므로 인해 감전사고 우려되며, 그림 10과 같이 배전계통의 불평형 부하로 인해 3상 비대칭 전압이 내철형 변압기에 공급될 때, 표 3과 같이 내철형 변압기와 계통 부하간에 순환전류가 발생되어 변압기 손실증가 또는 온도상승 등 여러 가지 문제점이 발생되는 것으로 분석되었다.

표 3 불평형 전압변동율에 따른 순환전류의 크기

Table 3 The calculated circulating current by voltage in the asymmetric three phase

불평형 전압변동률[1)]	0.5%	1%	2%	3%	4%	5%
순환전류의 크기(%)[2)]	20%	37%	62%	82%	100%	116%

참고 1) 비대칭 3상 전압(불평형 전압변동율)= 변압기 1차 역상분 전압*100/ 정상분 전압
2) 순환전류의 크기(%)= (변압기 1차측 전류의 크기*100)/ 변압기 정격1차 전류(150KVA, %Z=4.0% 기준)

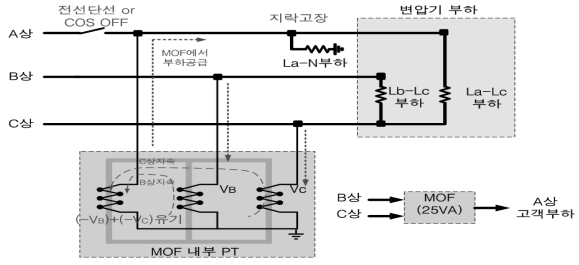

그림 14 PT 코일과 철심의 상호작용

Fig. 14 Reciprocal action of the PT coil and the iron core

3. 결 론

우리나라 계통방식에서 선로고장 등으로 비대칭 3상선로 조건에서 변압기는 결선의 형태와 철심의 구조에 따라 변압기 과부하, 파급소손, 온도상승, 손실증가, 보호계전기 오동작, 퓨즈용단, 역가압, 계량오차 등 다양한 문제가 발생할 수 있으며, 이에 대한 대책이 필요하다. 그림 15의 외철형 철심구조(좌)는 비대칭 3상 선로에서 상간의 에너지가 개별적으로 영향 없이 전달되나, 그림 16의 내철형 철심구조(우)는 타상의 에너지가 영향을 주기 때문에 상별 1-2차의 전류가 다르게 발생되기 때문에 역 조류로 인해 보호계전기 등 여러 가지 문제가 발생 된다. 따라서 코일의 결선 (Y,△)과 철심의 구조(내철형, 외철형)를 그림 16과 같이 일치시켜야 한다. 즉, 변압기의 △결선을 사용하면 철심을 내철형으로 제작하고, 변압기가 Y결선 시에는 외철형으로 제작해야 상기 문제를 방지할 수 있다. 또한 현재 사용되는 MOF 의 PT 철심(내철형타입)을 외철형 철심 또는 개별철심타입으로 제작해야만 PT소손과 전압오차를 개선할 수 있으며, 이와 관련된 규격 개정이 필요하다. 특히 L-L 부하와 L-N 부하의 비율에 따라 철심의 Outer Limb의 사이즈가 결정되며, 영상분이 없는 비접지선로 또는 △결선을 사용하는 변압기는 외철형 철심보다 내철형 철심 형태로 사용하는 것이 제작원가와 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다.

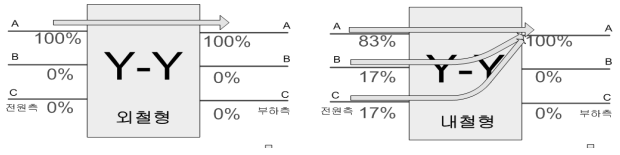

그림 15 철심구조별 상별 조류의 흐름

Fig. 15 Power-flow by iron core structure

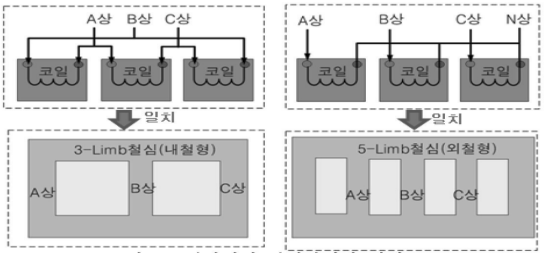

그림 16 변압기의 결선방식과 철심구조

Fig. 16 Connected method of the coil by iron core structure.

참 고 문 헌

[1] 신동열, 하복남, 정원욱, 차한주, “배전계통에서 변압기 결선에 의한 역 조류 현상에 관한 연구”, 조명설비학회 논문지 22권 제 9호, 2008.9.

[2] 신동열, 박용우, 차한주 “ 분산형 발전고객의 OCGR 오동작 및 과부족 계량에 대한 사례연구”, 대한전기학회 논문지 57권 제8호, 2008.8.

[3] 전력연구원 송배전연구소 기술지원(2011-K-00374-1), ′22.9kV 배전선로 단선으로 인한 수용가측 MOF 소손 원인 분석“, 2011.08.

[4] W. Enright, N. Watson, O.B.Nayak, ″Three-phase Five-Limb Unified Magnetic Equivalent Circuit Transformer models for PSCAD V3″, IPST ′99 Proceedings, Budapest, pp.462-467, 1999.

[5] 전력연구원 송배전연구소 기술지원(2011-K-000389-1), ″결상 및 불평형 부하시 변압기 결선(Y,△) 및 철심구조(3-Limb, 5-Limb)별 1-2차 전류해석“, 2011.08.

[6] 전력연구원 송배전연구소 기술지원(2011-K-000447-1), ″3상 통합형주상변압기 결상 및 부하불평형시 1-2차 전류해석“, 2011.09.

저 자 소 개

신 동 열 (申 東 烈)

1966년 4월 15일생. 충남대학교 전기공학과 석사졸업. 1992년 1월~2006년7월 한전 부산지사 근무. 2006년7월~현재 한전 전력연구원 파워시스템 연구소 근무, 2005년 특허분야 정부 신지식인 선정, 2006년 이달의 엔지니어상 수상

Tel : 042-865-5966

E-mail : sdy9199@kepco.co.kr

윤 동 현 (尹 棟 鉉)

1975년 7월 27일생. 2004년 충남대학교 전자공학과 석사졸업, 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정, 2007년~2011년 국방과학연구소 선임연구원, 2012년~현재 JCA 몬트롤(주) 차장

Tel : 042-935-8547

E-mail : dhyun7585@gmail.com

차 한 주 (車 翰 周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 석사졸업, 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공학박사), 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원, 2005년 ~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 전기전공 부교수.

Tel : 042-821-7006

E-mail : hjcha@cnu.ac.kr