

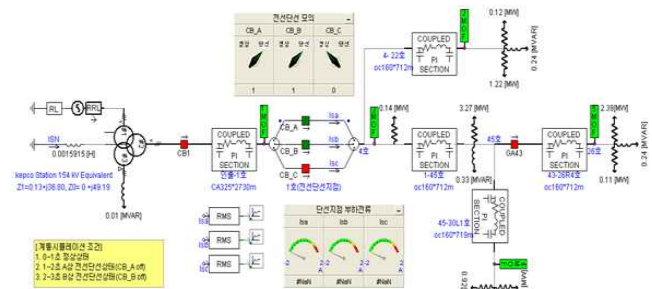
### 3상 변압기의 철심구조별 특성실험 및 분석

신동열\*, 박정호, 정영범, 김석곤  
한전 전력연구원

### Thee-phase transformer testing and analysis for characteristics of the core architectures

Dong-Yeol Shin\*, Chang-Ho Park, Young-Beom Jung, Seok-Gon Kim,  
KEPCO Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 배전선로에서 전선단선고장, 지락고장, 불평형 부하발생, 분산전원 연계 등 다양한 배전계통 현상 발생시 3상 변압기의 철심 구조별 문제점을 분석하였다. 특히 MOF 내부 PT 소손사례 분석을 통해 3상 내철형 변압기의 소손 원인과 계통에 미치는 영향을 분석하였으며, PSCAD/EMTDC를 이용하여 3상변압기의 철심 구조별 특성을 시뮬레이션과 모의실험 실험을 하였으며, 내철형 변압기의 소손 방지 대책을 제시하였다.



〈그림 3〉 전선 단선시 MOF위치별 선로구성도

#### 1. 서 론

##### 1.1 변압기 철심구조

3상 변압기는 크게 그림1과 같이 1상 Bank 타입, 3-Limb(내철형) 타입, 5-Limb(외철형) 타입 3가지 형태로 분류하며, 배전선로 부하의 형태에 따라 적절하게 변압기를 선정해야 하나, 변압기의 결선과 철심구조를 잘못 이해하고 사용함에 따라 여러 가지 문제점이 발생하고 있다.

특히, 3상 내철형 변압기를 1차측(전원측)에 Y결선하여 사용시, 배전계통에서 전선단선고장발생시 과전류에 의한 변압기 과부하소손, 지락고장 발생시 변압기에서 고장전류 공급(역 조류)에 의한 과압고장, 지락과전류계전기 오동작, 계통측 불평형 부하발생시 변압기 내부 순환전류 발생으로 인한 변압기 온도상승, 손실증가, 계량오차 발생 등 여러 가지 문제점이 발생되고 있다[1][2].

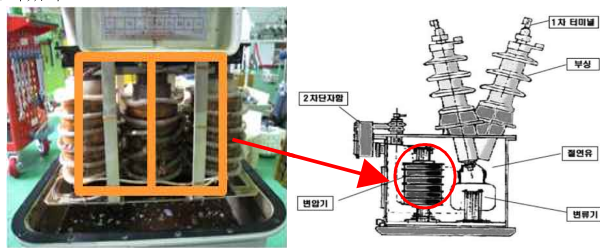


용어 : Limb 이란? 상부철심과 하부철심이 연결된 기둥(leg, Limb, 각)을 말하며, 3각 철심(3-Leg core, 3-Limb core)을 내철형, 5각 철심을 외철형이라 함

〈그림 1〉 변압기의 철심구조별 형태

##### 1.2 내철형 변압기 소손사례

배전선로에서 전선단선 고장시, 전원측 결상으로 인한 수용가측 MOF가 수습대 소손된 사례이다. 그림2와 같이 분석결과 MOF 내부 PT는 3-Limb 철심구조, 1-2차 Y-Y결선 형태로 과전류에 의해 1차권선이 소손되었다.

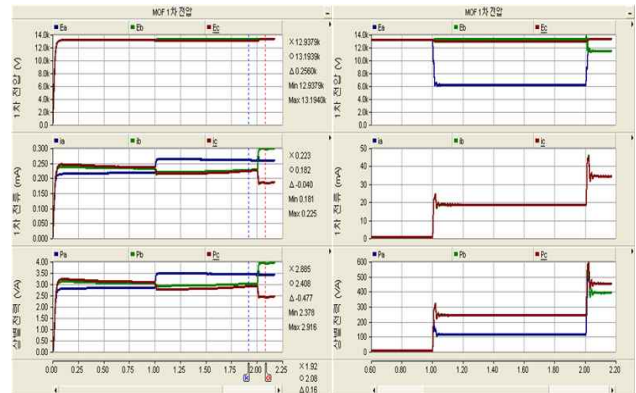


〈그림 2〉 MOF 내부 PT(내철형 변압기) 소손

변전소 인출부에서 개폐기 리드선 불량으로 A상 단선후 수습조후 B상이 단선되어 1~2시간 안에 복구하였으나, 전선단선지점 이후 수용가에 설치된 MOF(18대)가 연쇄적으로 2~3일 간격으로 소손되었다[3].

이러한 MOF소손 현상을 모의하기 위해서 그림3과 같이 PSCAD/EMTDC를 이용하여 해석하였다[4]. 시뮬레이션 결과 그림4와 같이 전원측 #1 MOF는 이상이 없었으나, 전선단선지점 이후 #2~5 MOF는 모두 과부하로 소손되었다. 분석결과 MOF 내부 PT는 내철형 변압기로 전선단선시 MOF의 철심에 의해 건전상의 전압이 역으로 유가되어 단선된 배전선로 부하를 공급하기 때문에 과부하로 소손되었다.

MOF의 정격용량은 25VA로 정상시에는 전력량계손실 3W미만이 걸리지만, 1선 단선시 약 250VA발생, 2선 단선시 약 450VA 발생해서 과부하로 MOF가 소손되었다.

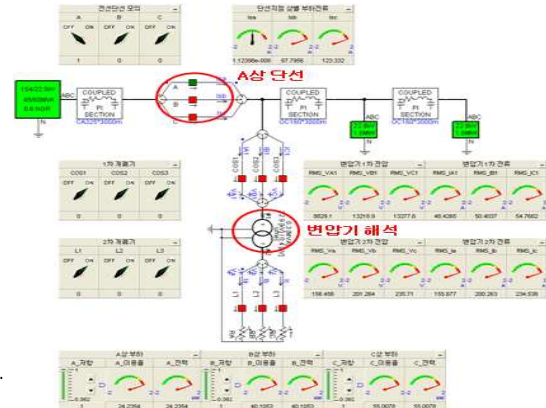


〈그림 4〉 #1MOF 정상(좌) 및 #2~5 MOF 소손(우)

#### 2. 본 론

##### 2.1 변압기 철심형태별 실험결과

실험1은 MOF 소손과 동일한 조건으로 그림 5와 같이 배전용 변압기를 Y-Y결선한 상태에서 철심형태별로 해석하였다. 표1 과 같이 내철형 타입은 외철형 타입과 다르게 전원측 단선고장시 1차측에 정격전류보다 14배(54A) 큰 과전류가 발생하였다[5][6].

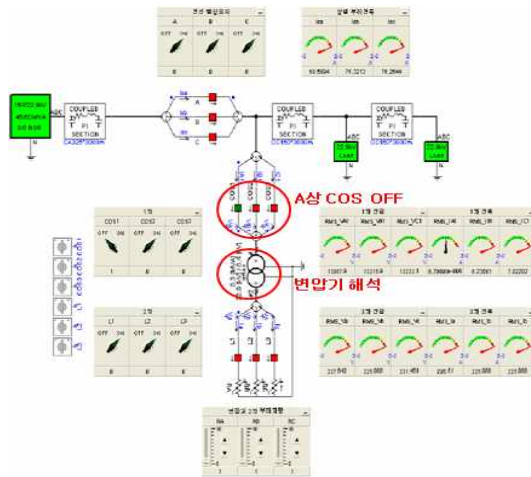


〈그림 5〉 A상 전선 단선시 철심구조별 실험1

〈표 1〉 전선 단선시, 철심구조별 실험1 결과

구분	단상 변압기 3대 결선			3 legged core			5 legged core			
	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	13318	13277	13349
전류 (A)	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
전압 (V)	A	4	1.3	2	4	<b>48</b>	<b>33</b>	4	1.3	2
	B	4	4	2	4	<b>50</b>	<b>33</b>	4	4	2
	C	4	4	4	4	<b>54</b>	<b>38</b>	4	4	4
전류 (A)	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

실험2는 그림 6와 같이 3상 변압기 철심구조별 COS OFF시, 1-2차측 전압 및 전류현상을 분석하였으며, 분석결과 표2와 같이 내철형 타입은 A상 또는 A-B상 OFF시 2차측에 전압이 유지되었다[5][6].



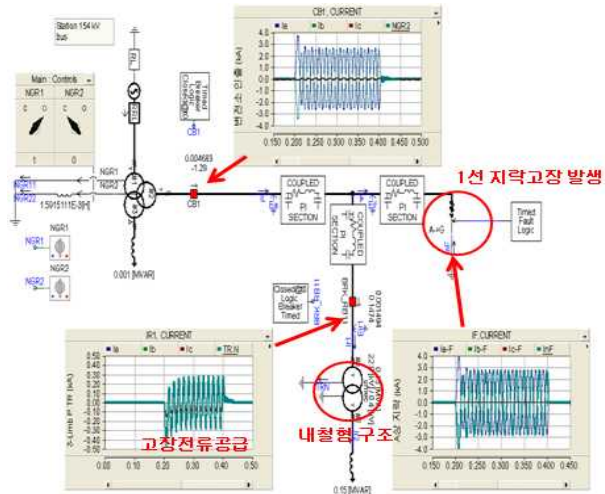
〈그림 6〉 A상 COS OFF시 철심구조별 실험2

〈표 2〉 COS OFF시, 철심구조별 실험2 결과

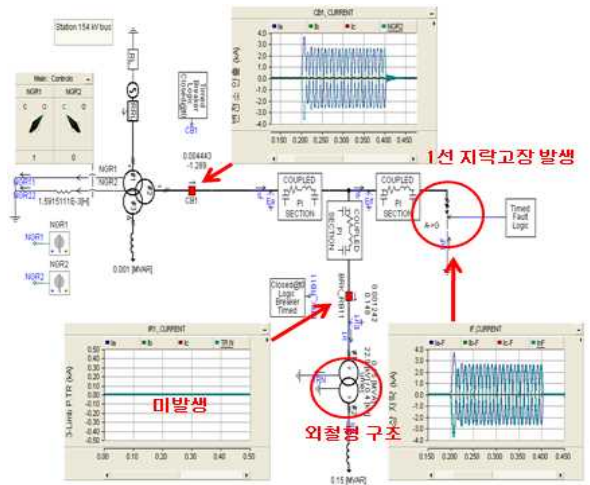
구분	단상 변압기 3대 결선			3 legged core			5 legged core			
	정상 상태	A상 COS OFF	A-B상 COS OFF	정상 상태	A상 COS OFF	A-B상 COS OFF	정상 상태	A상 COS OFF	A-B상 COS OFF	
전압 (V)	A	13226	0	0	13226	<b>13068</b>	6576	13226	0	0
	B	13226	13226	0	13226	13215	6576	13226	13226	0
	C	13226	13226	13226	13226	13233	13224	13226	13226	13226
전류 (A)	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
전압 (V)	A	4	0	0	4	<b>6.7</b>	<b>0</b>	4	4	0
	B	4	4	0	4	<b>7.0</b>	<b>6</b>	4	4	4
	C	4	4	4	4	<b>226</b>	<b>113</b>	228	0	0
전류 (A)	a	228	0	0	228	<b>225</b>	<b>114</b>	228	0	0
	b	228	228	0	228	<b>225</b>	<b>114</b>	228	228	0
	c	228	228	229	228	<b>225</b>	<b>114</b>	228	228	229

실험3은 변압기 결선이 Y-Y결선, 용량이 150kVA이 되어 있는 상태에서 10Km이내의 배전선로에서 1선 지락고장 발생시 내철형 변압기와 외철형 변압기에서 고장전류를 공급하는지를 분석하였다. 시뮬레이션 결과 내철형 변압기는 그림 7과 같이 1선지락 고장발생시 정격전류 4.0A 보다 큰 212A(순시300A)의 고장전류가 전원계통으로 공급하였으며, 동일한 실험조건에서 외철형 변압기는 그림 8과 같이 고장전류를 공급하지 않는 것으로 분석되었다[6].

따라서 3상 내철형 변압기를 배전선로에 사용시 전원측 지락고장시 고장전류에 의해 소손되거나, 변압기 2차측 부하와 무관하게 휴즈가 용단되거나, 보호계전기가 오동작되는 현상이 발생된다.

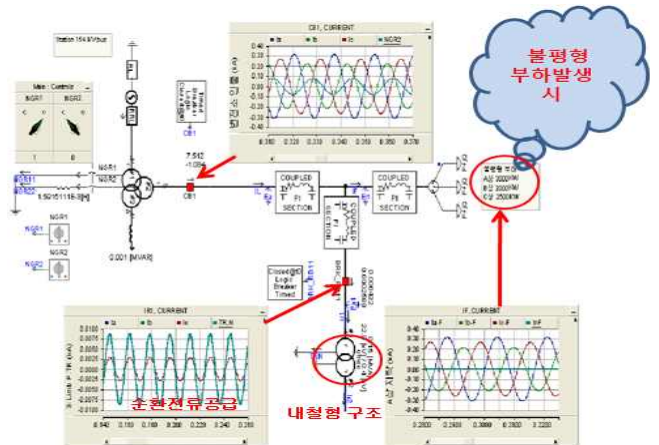


〈그림 7〉 1선지락 고장발생시 내철형 변압기 실험3



〈그림 8〉 1선지락 고장발생시 외철형 변압기 실험3

실험4는 동일한 변압기 용량으로 배전선로에서 A상 3000kW, B상 2000kW, C상 2500kW 불평형율 15% 부하발생시, 내철형과 외철형 변압기의 순환전류 발생 여부를 분석하였다. 그림9와 같이 내철형 변압기를 사용할 때, 전원계통의 불평형 전류로 인하여 내철형 변압기 1차측에 상별로 각각 약 2A 동위상의 순환전류가 발생되었으며, 이때 중성선의 전류는 상전류 보다 큰 약 6A 전류가 발생되었다. 동일한 조건에서 그림10과 같이 외철형 변압기를 시뮬레이션 한 결과 외철형 변압기 1차측에 순환전류가 발생하지 않았다. 따라서 내철형 변압기를 배전선로에 사용하면 계통의 불평형 전류에 의해 변압기 내부 순환전류가 발생되어 변압기가 과열되거나 손실이 증가하는 문제점이 발생된다.



〈그림 9〉 불평형 부하발생시 내철형 변압기 실험4

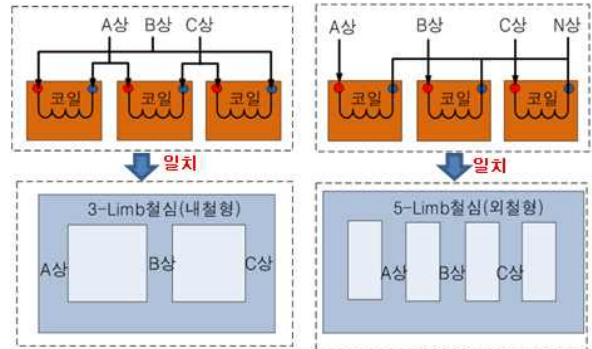


### 3. 결 론

변압기는 결선의 형태와 철심의 구조에 따라 변압기 과부하, 과급소손, 온도상승, 손실증가, 보호계전기 오동작, 휴즈용단, 역가압, 계량오차 발생 등 여러 가지 문제가 발생되며, 이에 대한 대책이 필요하다.

또한 L-L부하는 전력선과 전력선 사이의 부하로 영상분이 없는 부하로 변압기를  $\Delta$ 결선하여 공급해야 하고, L-N부하는 전력선과 접지선 사이 영상분이 존재하는 부하를 말하며, 변압기를 Y결선하여 부하를 공급해야 한다.

따라서 부하의 형태에 따라 변압기의 결선(Y, $\Delta$ )과 철심의 구조(3Limb, 5Limb)를 그림 11과 같이 일치해야 한다. 예를 들어 변압기 결선을  $\Delta$ 결선을 사용하면 철심을 내철형으로 제작하고, 변압기 결선을 Y결선시 외철형으로 제작해야만 여러 가지 문제를 방지할 수 있다.



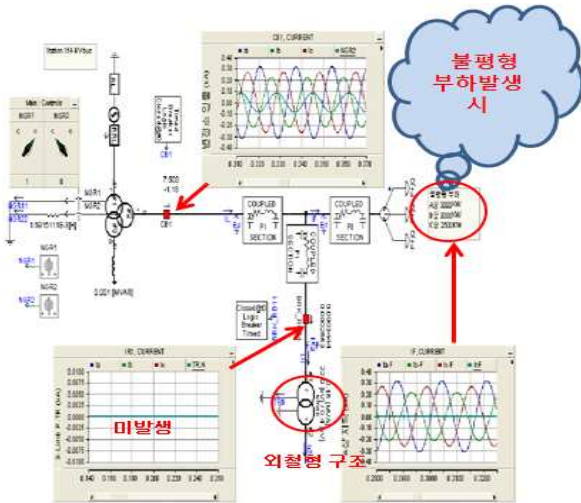
〈그림 11〉 변압기의 결선방식과 철심구조

또한 MOF 내부 PT철심은 1상 Bank타입 또는 5-Limb형태로 제작해야만 중성선에 순환전류와 소손을 예방할 수 있고, 관련 규격개정이 필요하다.

특히 L-L부하와 L-N 부하의 비율에 따라 Outer Limb의 사이즈가 결정되며, 영상분이 없는 비접지선로 또는  $\Delta$ 결선을 사용하는 변압기는 5Limb 보다 3Limb형태로 사용하는 것이 제작원가와 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 신동열, 박용우, 차한주 “분산형 발전고객의 OCGR 오동작 및 과부하 계량에 대한 사례연구”, 대한전기학회 논문지 57권 제8호, 2008. 8
- [2] 신동열, 하복남, 정원욱, 차한주 “배전계통에서 변압기 결선에 의한 역조류 현상에 관한 연구”, 조명설비학회 논문지 22권 제9호, 2008. 9
- [3] 전력연구원 송배전연구소 기술지원(2011-K-000374-1), “22.9kV 배전선로 단선으로 인한 수용가측 MOF소손원인 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, $\Delta$ ) 및 철심구조(3-Limb, 5-Limb)별 1-2차 전류해석”, 2011. 08
- [6] 전력연구원 송배전연구소 기술지원(2011-K-000447-1), “3상 통합형 주상변압기 결상 및 부하불평형시 1-2차 전류해석”, 2011. 09



〈그림 10〉 불평형 부하발생시 외철형 변압기 실험4

### 2.2 모의실험 검증

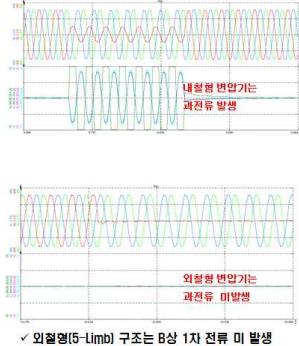
상기 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션한 실험결과를 검증하기 위해서 그림 11과 같이 모의실험 선로와 변압기 철심형태별로 제작하여 실측한 결과, 모의실험값과 상기 실험1~4 시뮬레이션한 값이 모두 일치하는 것으로 검증 되었다.

#### ◆ 모의실험 실험 모습



✓ 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해서 계통과 동일 조건에서 축소용 변압기를 제작하여 모의 실험하였음.

#### ◆ 실험1: B상 전선 단선시 모의 실험 결과



✓ 외철형(5-Limb) 구조는 8상 1차 전류 미 발생

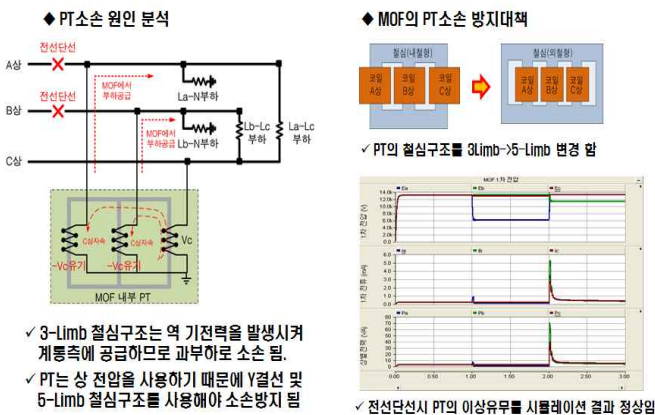
〈그림 11〉 모의 배전선로 실험 및 비교검증 모습

### 2.3 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 현상을 방지하기 위해서는 내철형 변압기는 변압기 결선을  $\Delta$ 결선으로 사용하든지, 아니면 철심의 형태를 외철형 형태로 교체하여 변압기 소손을 방지할 수 있다.

그림 12는 종래의 내철형 MOF를 외철형(5-Limb구조)으로 교체하여 시뮬레이션 한 결과 1선 단선시 또는 2선 단선시 MOF가 소손되는 것을 방지할 수 있었다.



〈그림 12〉 외철형 MOF로 교체시 시뮬레이션 결과