

154 kV 변압기 보호용 비율차동계전기 오동작 방지를 위한 2고조파 억제 방식의 적용방법 및 정정값에 관한 연구

A Study on the 2nd Harmonic Blocking Scheme and Setting Value of a Current Differential Relay for 154 kV Transformers to Prevent Maloperation

손용범* · 강상희*
(Yong-Beom Son · Sang-Hee Kang)

Abstract - Inrush current and fault current in a transformer need to be distinguished from one another. In order to do this, KEPCO uses a 2nd harmonic restraint/block method. We use two setting values for 2nd harmonic restraint; 15% and 10%. We also apply per-phase blocking method among various harmonic restraint methods. If the transformer is located at the radial system, we adjust 10% in the 2nd harmonic restraint, but this method is not enough to prevent mal-operations of the current differential relay and let us spend more time to change setting value again as the power system changes.

In this paper, a more reasonable setting value for a 2nd harmonic blocking scheme in KEPCO is proposed. To present a proposed method, the fault data of the current differential relays which have occurred since 2009 are analyzed. To evaluate the performance of the proposed method, the results of the RTDS test for the current differential relay of the transformer by KEPCO are analyzed.

Key Words : Current differential relay, Inrush current, 2nd harmonic ratio, 2nd harmonic restraint/block

1. 서 론

변압기 비율차동계전기의 정동작에 있어서 변압기 자화회로의 특성으로 인해 발생하는 여자돌입전류는 중요한 고려사항이라고 할 수 있다. 변압기 여자돌입전류와 내부고장은 구별되어야만 하며, 전통적으로 사용되는 구별방법으로는 2고조파 억제 방식이 있다. 이는, 변압기 여자돌입전류 발생시 2고조파 함유율이 보통 기본과 대비 20%이상의 값을 갖는 특징을 이용한 것이다[1]. 하지만, 점점 변압기가 고효율 철심으로 디자인되면서 2고조파 함유율은 낮아지고 있다. 이로 인해, 고장이 아닌 상황에서 여자돌입전류로 인해 예기치 않은 비율차동계전기의 동작이 발생하고 있다.

한전은 2고조파 억제 방식의 2고조파 함유율 정정값을 15%, 10% 중 한 가지를 선택하여 사용하고 있으며, 적용방식으로는 돌입발생상 억제 방식을 사용하고 있다. 만약, 변압기가 radial 계통 변전소에 있으면, 10%를 적용한다. 그러나 이 방법은 비율차동계전기의 오동작을 방지하기에는 충분하지 않다. 그리고 전력계통이 바뀌게 될 때, 보호계전기 재 정정을 위해 적지 않은

시간을 소비해야 한다.

본 논문에서는 현재 한전에서 적용하고 있는 여자돌입전류 대책인 2고조파 억제 방식의 정정값 및 적용방법에 대하여 그 타당성을 검토하고 좀 더 합리적인 기준을 제안한다. 이를 위해, 2009년~2017년 동안 실제로 발생한 변압기 고장데이터를 분석하였다. 또한, 사례연구로는 한전에서 시행한 변압기 보호계전기 RTDS 시험결과를 분석하여 제안한 기준의 타당성을 검증하였다. 분석방법은 한전에서 고장데이터 분석 시 주로 사용하는 고장분석 툴인 Siemens사의 SIGRA를 활용하여 고장데이터로부터 순시 샘플링 데이터를 추출한 후, MATLAB M-file로 작성한 변압기 알고리즘을 이용하였으며, 이를 통해 2고조파 함유율 및 억제 적용방법에 대하여 연구하였다.

2. 본 론

본 논문에서는 현재 한전에서 적용하고 있는 여자돌입전류 대책인 2고조파 억제 방식의 정정값 및 적용방법에 대하여 그 타당성을 검토하고 좀 더 합리적인 기준을 제안한다.

2.1 한전의 변압기보호용 비율차동계전기 운영기준

현재 한전에서는 154kV 변압기보호용 비율차동계전기 정정을 위한 2개의 가이드라인을 가지고 있다. 첫 번째는, 2016.01.28.에

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Myongji Univ., Korea.

E-mail: shkang@mju.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Myongji Univ, Korea.
Korea Electric Power Corporation, Korea.

E-mail: sybboy@naver.com, sybboy@kepco.co.kr

Received : October 25, 2017; Accepted : December 11, 2017

개정된 『보호계전기 정정업무 편람』이다. 두 번째는, 『전력설비 보호반 Setting Guide』이다. 한편에서는 다양한 제작사의 보호계전기가 사용되고 있다. 각각의 보호계전기에 맞는 세부적인 정정 가이드라인을 『전력설비 보호반 Setting Guide』에서 제공하며, 2고조파 억제 방식의 정정값에 대한 명시를 하고 있다. 표 1은 세부적인 정정 가이드라인 중 핵심요소만을 정리해놓은 『154kV 변압기보호반 정정가이드 비교표』의 “비율차동계전기” 부분이다[2].

표 1 154kV 변압기보호반 Setting 가이드[2]

Table 1 Setting guide of 154kV main transformer protection panel

구분	표준화 방안
보상	<ul style="list-style-type: none"> 영상보상 적용 <ul style="list-style-type: none"> - GD13-ER01, XR-520T, RET670, SEL387E, 7UT612, T3300, MRD-HA, SEL487E, 7UT85, STP-K110 위상보상 적용 <ul style="list-style-type: none"> - MTP-H2S
기준 전류	영상 보상 $0.94 \text{ A} = 60\text{MVA}/(\sqrt{3} \times 154\text{kV}) \times 5/1200$ $0.377 \text{ A} = 60\text{MVA}/(\sqrt{3} \times 23\text{kV}) \times 5/2000$
	위상 보상 $0.163 \text{ A} = 60\text{MVA}/(\sqrt{3} \times 154\text{kV}) \times \sqrt{3} \times 5/1200$ $0.652 \text{ A} = 60\text{MVA}/(\sqrt{3} \times 23\text{kV}) \times \sqrt{3} \times 5/2000$
동작 특성	<ul style="list-style-type: none"> 차전류는 벡터합이나, 억제전류가 스칼라합, Max, Adaptive 등 다양하므로, 해당 동작특성을 반영하여 아래항목 선정 필요 ① 차전류 : 벡터합, 억제전류 : 스칼라합/2 <ul style="list-style-type: none"> - GD13-ER01, XR-520T, SEL-387E, T3300, STP-K110, STP-K120 ② 차전류 : 벡터합, 억제전류 : 스칼라합 <ul style="list-style-type: none"> - 7UT612, MRD-HA, SEL487E ③ 차전류 : 벡터합, 억제전류 : 최대치 <ul style="list-style-type: none"> - MTP-H2S, RET670, 7UT85
비율 차동 요소	<ul style="list-style-type: none"> Slope : 40% 영상보상의 경우 최소동작치 결정시 2/3배 적용 Break Point : 정격전류의 300%~400%에 결정
대전류 차동요소	차전류로 동작하므로 상대단 모선 고장전류의 150% 적용
2고조파 억제방식	<ul style="list-style-type: none"> 돌입발생상 억제 방식 적용, 2고조파 함유율 : 15%

2.2 비율차동계전기 오동작 형태

한편에서 운영 중인 154kV 변압기는 Initial Inrush형태의 여자돌입전류로 인해 비율차동계전기의 오동작이 빈번히 발생하고 있다. 그 형태는 크게 2가지이다. 첫 번째는, 변전소가 전면 정전 및 재 가압이 되는 경우이다. 이러한 경우는 송전선로 2회선 동시고장으로 인한 변전소 무압 후 재폐로가 동작하는 경우에 발생할 수 있다. 또한, 계통고장으로 인한 여파로 변전소가 무압 된 후, 계통 복구조작을 통해 변전소가 재 가압 되는 경우도 있다. 두 번째는 변압기 증설 및 노후변압기 대체로 인한 변압기 초기

가압 또는 변압기 보호배전반의 대체로 인한 변압기 휴전 후 재가압 하는 경우이다.

2.3 제작사별 비율차동계전기 종류 및 여자돌입전류 대책

여자돌입전류에 대한 대책은 제작사별로 세부적인 사항은 다르지만, 기본과대비 2고조파 함유율을 이용하는 방법은 비슷하다. 표 2는 제작사별 2고조파 억제 방식의 적용 방법을 보여준다.

표 2 제작사별 2고조파 억제 방식 적용방법

Table 2 2nd harmonic blocking scheme according to relay production company

제작사	계전기 Type	제2고조파 억제 방식	
		종류	정정방법
경보	GD13 ER01	돌입발생상 억제	-
ABB	RET 670	돌입발생상 억제	CrossBlockEn : OFF
		1상 돌입발생시 3상 억제	CrossBlockEn : ON
세니온	STP K110	돌입발생상 억제	제2고조파억제모드 : 0
		1상 돌입발생시 3상 억제	제2고조파억제모드 : 1
		2상 돌입발생시 3상 억제	제2고조파억제모드 : 2
지멘스	7UT 612	돌입발생상 억제	CrossB.2.Harm : 0
		1상 돌입발생시 3상 억제	CrossB.2.Harm : ∞ 참고) 1272A 3cycle 정정시 처음 3cycle 동안은 3상 억제 3cycle 이후에는 돌입발생상 억제
Mits	MTP H2S	돌입발생상 억제	-
현대	HIMAP TCU	돌입발생상 억제	-
SEL	SEL 387E	돌입발생상 억제	Independent Harmonic Blocking(IHBL) : Y
		1상 돌입발생시 3상 억제	Independent Harmonic Blocking(IHBL) : N
	SEL 487E	돌입발생상 억제	Enable Harmonic Blocking Differential Element : Y
		1상 돌입발생시 3상 억제	Enable Harmonic Blocking Differential Element : N
젤과워	XR 520T	돌입발생상 억제	-

2고조파 요소의 상당한 양의 존재는 여자돌입전류의 존재를 확인하는데 전통적으로 사용되어왔으며, 일반적으로 20%에 정정되는 2고조파 비율은 비율차동계전기의 오동작을 안전하게 저지

하는데 사용되어 왔다[4]. 따라서 제작사 모두 2고조파 억제 방식을 사용하고 있다. 물론, 몇몇 제작사는 여자돌입전류의 관별을 위해 추가적인 알고리즘을 제공하기도 한다. ABB는 여자돌입전류 발생 시 나타나는 파형의 특정한 모양을 검출하는 waveform 방식을 추가로 사용한다. 보통 각 상의 기본파 차전류와 2고조파 차전류를 비교하는데 반해, Mitsubishi는 A상 기본파 차전류와 A상, C상 2고조파 차전류 중 Max값과 비교한다.

2고조파 적용방법에 있어서도 크게 3가지로 나뉘게 된다. 첫 번째는, 2고조파 함유율이 일정치 이상 발생한 상만 비율차동요소의 동작을 저지하는 돌입발생상 억제 방식이다. 두 번째는, 1상에서 2고조파 함유율이 일정치 이상 발생하게 되면, 3상의 비율차동요소의 동작을 모두 저지하는 1상 돌입발생시 3상 억제 방법이다. 세 번째는, 2상에서 2고조파 함유율이 일정치 이상 발생하게 되면, 3개 상 모두 비율차동요소의 동작을 저지하는 2상 발생 3상 억제 방법이다.

2.4 한전에서 적용중인 여자돌입전류 대책 적용 기준 및 문제점

최근 들어, 변압기 디자인의 변화로 2고조파의 발생 비율이 이전보다 줄어드는 현상이 발생되고 있다.

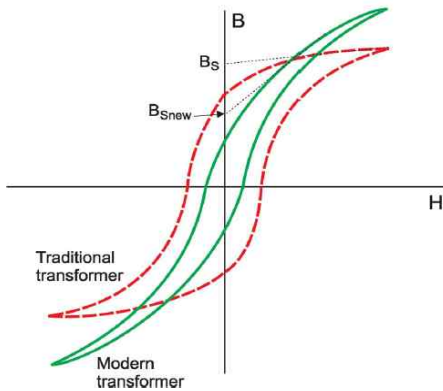


그림 1 변압기 히스테리시스 곡선의 변화

Fig. 1 Variation of transformer hysteresis curve

그림 1[3]은 변압기 디자인의 변화에 따른 히스테리시스 곡선의 차이를 보여준다. 최근에 생산되는 변압기는 효율성을 높이기 위해 철심을 작게 사용하고, 동을 많이 사용한다. 이는 B-H 곡선에서 보여 주듯이, 높은 자속밀도를 갖는 철 재료를 사용하여, 큰 자속밀도를 갖지만, 자속을 많이 담지 못하는 단점이 있다. 이는 여자돌입전류 발생 시, 돌입전류가 증가하고, 낮은 2고조파의 비율을 야기 시키는 원인이 된다[3]. 따라서, 기존의 2고조파 억제 방식만으로는 비율차동계전기의 오동작을 방지하는데 한계를 갖고 있으며, 추가적인 알고리즘의 연구가 활발히 진행 중에 있다. 여기서는, 현재 한전에서 적용중인 여자돌입전류 대책인 2고조파 억제 방식의 적용 기준 및 문제점에 대해서 살펴볼 것이다.

2.4.1 2고조파 함유율

한전에서 운영하고 있는 2고조파 함유율 정정기준은 15%이며, 2회선 radial 계통 변전소일 경우에는 10%를 적용하고 있다. 2010년까지는 모든 154kV M.Tr에 대하여 15%를 적용하였다. 하지만 2010년 송전선로 2회선 동시고장으로 인해 변전소 무압 후 재폐료가 동작하는 고장이 발생하였고, 그 결과 154kV M.Tr 비율차동계전기가 오동작하는 사례가 발생하였다. 여러 뱅크가 동시에 투입되면서 1차측 2고조파 함유율이 순간적으로 15%이상이 발생하였고, 그 결과 87 동작이 발생하였다.

현재 사업소 계통보호담당자는 2회선 동시고장이 발생할 수 있는 가공 송전선로뿐만 아니라, 4회선 동시고장이 발생할 수 있는 4회선 철탑개소, 그리고 앞에 설명한 개소의 하위단 변전소까지 모두 검토 대상으로 선정하여 2고조파 억제 함유율 정정값을 10%로 적용하고 있다. 하지만 변압기 디자인의 변화로 여자돌입전류 발생시 2고조파 함유율은 점점 낮아지고 있으며, 특히, 변압기 증설 또는 대체, 노후변압기 보호배전반 대체에 따른 변압기 무부하가압시 2고조파 함유율이 15% 이하가 발생하는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 때로는 2고조파 함유율이 10% 이하에 도달하기도 한다. 이러한 고장이 무부하가압시에도 문제지만, 실제 계통고장에 따른 변전소 무압발생 및 변전소 재가압시 비율차동계전기의 오동작이 발생하게 되면 더욱 큰 문제로 확대될 수 있다.

2.4.2 2고조파 억제 적용방법

현재 한전에서 운영하고 있는 『전력설비 보호반 Setting Guide』에서는 2고조파 함유율이 일정치 이상 발생한 상만 비율차동요소의 동작을 저지하는 돌입발생상 억제 방식을 적용하는 것을 기준으로 하고 있다. 이는 여자돌입전류 발생 상황에서 변압기 내부 고장 발생시, 비율차동계전기의 저지를 막기 위함이다. 즉, 변압기 내부고장에 대한 비율차동계전기 동작의 신뢰성을 제공하지만, 여자돌입전류에 대한 오동작 가능성을 높인다는 측면에서 동작의 안정성이 부족한 면이 있다. 또한, 변압기 여자돌입전류의 특징인 2고조파 함유량이 변압기 디자인의 영향으로 인해 낮아지고 있는 현상이 발생하고 있다. 하지만, 변압기 가압 시 인가되는 전원 A, B, C상은 120°의 위상차를 갖고 있기 때문에 3개상에서 동시에 낮은 2고조파 함유량이 발생하지 않는다. 따라서 이러한 특징을 살펴보고, 좀 더 적절한 2고조파 억제 적용방법을 검토해 볼 필요가 있다.

2.5 변압기 고장데이터 분석을 통한 2고조파 억제 방식의 정정값 및 적용방법 제안

한전에서 고장데이터 분석 시 주로 사용하는 고장분석 툴인 Siemens사의 SIGRA와 MATLAB의 M-file로 작성한 변압기알고리즘을 이용하여 변압기 고장데이터를 분석하고 좀 더 합리적인 2고조파 억제 방식의 정정값 및 적용방법을 제안한다.

2.5.1 SIGRA를 활용한 순시 샘플링 데이터 추출 및 2고조파 성분 분석

보통 전력계통에서 발생할 수 있는 과도현상 분석을 위해 EMTP-RV, ATP Draw, PSCAD, RTDS 등 다양한 EMTP 프로그램을 사용한다. 다양한 조건에서 모의를 할 수 있다는 강력한 장점이 있지만, 실제계통에서 발생한 과도현상을 동일하게 모의하기는 어렵다는 한계를 갖고 있다. 하지만, SIGRA를 활용하여 보호계전기에 저장된 Comtrade 파일로부터 순시 샘플링 데이터를 추출할 수 있으며, 이를 통해, 실제계통에서 발생한 고장을 재현할 수 있다. 그림 2는 2고조파 성분 분석 흐름도를 보여준다[4].

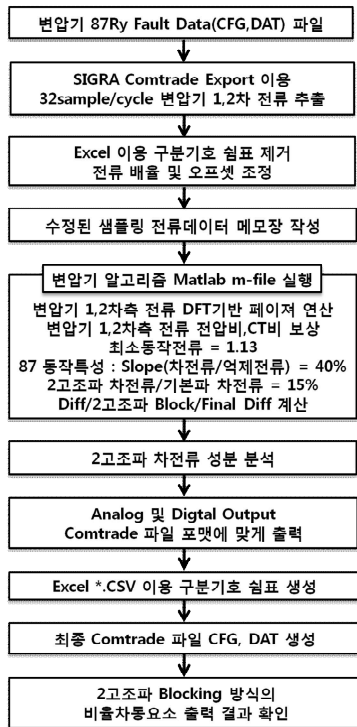


그림 2 2고조파 성분 및 2고조파 억제 방식 분석 흐름도
Fig. 2 Flow chart of analyzing 2nd harmonic component and 2nd harmonic blocking scheme

프로그램 언어로 작성된 계전기 알고리즘에 순시 샘플링데이터를 입력하여 얻은 D/O 출력 결과물을 Comtrade 파일 포맷에 맞게 작성하여 준다면, 순시 샘플링데이터와 계전기 알고리즘 출력 결과물을 Siga를 통하여 그래픽적으로 확인 할 수 있다.

본 논문에서는 154kV 변압기 고장발생시 비율차동계전기에 저장된 Comtrade 파일에서 순시 샘플링데이터를 추출하였으며, 이를 Matlab의 M-file로 작성한 변압기 알고리즘을 통해 2고조파 차전류 성분을 분석하였다. 알고리즘은 경보전기의 GD13-ER01의 비율차동요소 계산방식을 사용하였다. 또한, 변압기 알고리즘 D/O 출력 결과물인 Diff_A,B,C, 2ND_Block_A,B,C, FINAL_DIFF_A,B,C를 Comtrade 포맷에 맞게 작성하여, Siga로

2고조파 억제 방식의 비율차동요소 출력 결과를 효과적으로 확인 해보았다.

2.5.2 2009년~2017년 발생한 변압기고장 분석

표 3은 2009년~2017년까지 발생한 154kV 변압기 고장 중 비율차동계전기가 동작한 사례를 보여주며, 비율차동계전기에 저장된 고장데이터의 2고조파 성분을 분석하였다. 알고리즘에 적용한 2고조파 억제 함유율은 15%이며, 2고조파 억제 방식은 돌입발생상 억제방식을 적용하였다. 고장이 발생한 변압기 1차는 LA접지, 2차는 NGR 접지이다.

표 3 2009년~2017년까지 발생한 154kV 변압기 고장중 비율차동계전기가 동작한 사례

Table 3 Case that a differential current relay has operated during a fault occurred in transformer from 2009 to 2017

고장 일시	설비명	계전기 Type	동작상	고장원인
'11. 07.19	AS/S #2M.Tr	GD13 ER01	A,C	OLTC 내부고장
'15. 02.16	DS/S #5M.Tr	7UT 612	A,B,C	3차측 지지애자 절연파괴
'15. 04.07	ES/S #4M.Tr	7UT 612	A,B,C	B상 OLTC 내부고장
'16. 01.10	ES/S #3M.Tr	GD13 ER01	A,B,C	2차측 B상 동대 청설모 접촉
'16. 10.05	GS/S #2M.Tr	7UT 612	A,B,C	2차측 동대 빗물침투
'16. 10.20	HS/S #2M.Tr	7UT 612	A,B,C	2차측 동대 지지애자 조류 접촉
'16. 12.16	IS/S #3M.Tr	GD13 ER01	A,C	화재로 인한 내부고장
'16. 12.16	JS/S #4MT.r	7UT 612	A,B,C	화재로 인한 내부고장
'17. 02.07	KS/S #1M.Tr	XR 520T	A,B,C	3차측 내부고장
'14. 11.30	CS/S #3M.Tr	STP K110	A,B	무부하가압시 돌입전류
'15. 07.06	FS/S #1M.Tr	GD13 ER01	A	무부하가압시 돌입전류
'15. 11.03	GS/S #4M.Tr	GD13 ER01	C	무부하가압시 돌입전류

그림 3 및 표 4는 고장데이터 분석을 통해 얻은 고장파형 및 2고조파 분석결과이며, 변압기 2차측 동대 지지애자에 조류접촉 고장이 발생한 시점인 5081 샘플링부터 5115 샘플링까지의 87 동작, 2고조파 Max 값, Final 87 동작 시 2고조파 차전류 함유율 분석 결과를 보여준다. A상 완전지락고장이 아닌, 조류접촉에 의한 고저항 지락고장으로, 1차측 A상 전류와 B, C상 전류는 180°위상차가

표 4 '16.10.20 HS/S #2M.Tr 고장데이터 2고조파 차전류 함유율 분석 결과

Table 4 Result of analyzing the 2nd harmonic differential component from the fault data of #2M.Tr in HS/S on Oct 20, 2016

sample	cycle	87			2고조파 함유율(%)		
		A	B	C	A	B	C
181	0.00	0	0	0	15.0	4.4	20.2
182	0.03	0	0	0	24.9	22.5	3.6
183	0.06	0	0	0	191.0	107.6	60.7
184	0.09	0	0	0	395.5	552.1	135.3
185	0.13	0	0	0	268.1	373.0	170.9
186	0.16	0	0	0	205.3	239.6	166.1
187	0.19	0	0	0	171.2	190.3	149.5
188	0.22	0	0	0	148.6	163.8	132.3
189	0.25	0	0	0	131.7	145.8	117.0
190	0.28	0	0	0	117.9	131.4	104.0
191	0.31	1	0	0	105.7	118.6	92.6
192	0.34	1	1	0	94.8	107.0	82.3
193	0.38	1	1	0	84.7	96.3	73.0
194	0.41	1	1	0	75.9	86.7	65.3
195	0.44	1	1	0	69.0	78.3	60.5
196	0.47	1	1	0	65.6	72.1	60.5
197	0.50	1	1	0	67.5	70.4	66.7
198	0.53	1	1	0	75.7	75.3	77.9
199	0.56	1	1	0	87.4	85.2	90.9
200	0.59	1	1	0	97.1	94.6	100.5
201	0.63	1	1	0	100.4	98.3	103.0
202	0.66	1	1	0	96.7	95.4	98.2
203	0.69	1	1	1	88.3	87.9	88.7
204	0.72	1	1	1	77.8	78.2	77.4
205	0.75	1	1	1	66.9	67.9	65.9
206	0.78	1	1	1	56.4	57.8	55.0
207	0.81	1	1	1	46.6	48.4	45.0
208	0.84	1	1	1	37.8	39.8	36.0
209	0.88	1	1	1	30.0	32.2	28.0
210	0.91	1	1	1	23.1	25.3	21.3
211	0.94	1	1	1	17.2	19.4	15.7
212	0.97	1	1	1	12.3	14.7	11.4
213	1.00	1	1	1	8.5	11.3	8.3
214	1.03	1	1	1	5.6	8.8	6.2
215	1.06	1	1	1	3.4	7.1	5.1

■ : 87 동작 ■ : Max ■ : Final 87 동작

나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 고장이 변압기 2차측 부싱에서 발생하였고, 2차측 CT는 2차측 GIS CB에 위치하고 있기 때문에, 고장 후 A상 전류는 부하전류보다 작아지는 특징을 보였다. 영상분의 타상으로서의 영향으로 인해, A, B, C상 모두 87이 동작하였다. 고장 발생 후 수 샘플링 안으로 2고조파 함유량이 236.4~732.2%까지 올라갔다. 그 후 5109샘플링 즉, 고장발생 후 0.88cycle만에 11.9~14.6%까지 내려와 A, B, C상에서 모두 Final 87이 정상적으로 동작하였다.

표 5에서 보여주듯이, 2차측 지락고장 시에는 영상분의 타상으로서의 영향으로 인해 87 요소가 A, B, C상 모두 동작한다. 3차측 고장 시에는 1차측 전류에 영향을 미쳐 87 요소가 3상 모두 동작하

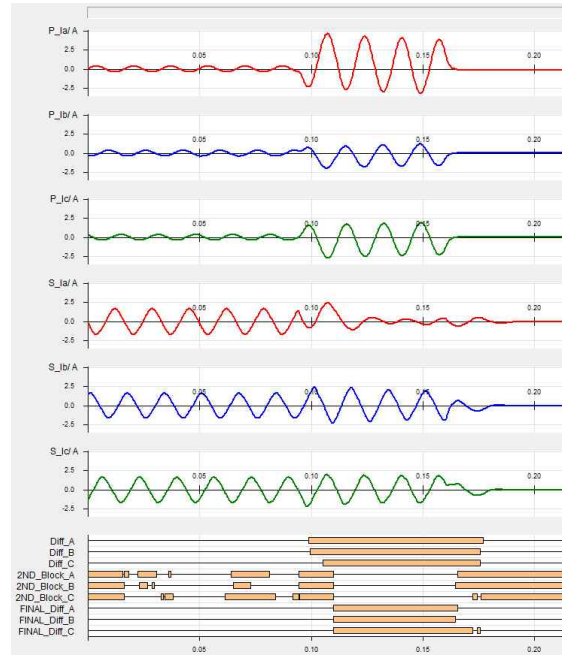


그림 3 '16.10.20 HS/S #2M.Tr 고장데이터

Fig. 3 The fault data of #2M.Tr in HS/S on Oct 20, 2016

표 5 2009년~2017년 154kV 변압기 고장 종합분석

Table 5 Overall analysis of the fault occurred in the 154kV transformer from 2009 to 2017

설비명	고장원인	동작상	돌입발생상 억제		2상돌입발생 시 3상억제
			2고조파 억제		함유율 정정값
			15%	10%	10%
Final 87 동작시간(cycle)					
AS/S #2M.Tr	OLTC 내부고장	A,C	0.84	0.88	0.88
DS/S #5M.Tr	3차측 지지애자 절연과괴	A,B,C	1.06	1.09	1.13
ES/S #4M.Tr	B상 OLTC 내부고장	A,B,C	1.06	1.09	1.16
ES/S #3M.Tr	2차측 B상 동대 청설모 접촉	A,B,C	0.88	0.91	0.94
GS/S #2M.Tr	2차측 동대 빗물침투	A,B,C	0.91	0.97	1.00
HS/S #2M.Tr	2차측 동대 지지애자 조류 접촉	A,B,C	1.03	1.06	1.06
IS/S #3M.Tr	화재로 인한 내부고장	A,C	0.94	0.94	0.97
JS/S #4M.Tr	화재로 인한 내부고장	A,B,C	0.88	0.88	0.94
KS/S #1M.Tr	3차측 내부고장	A,B,C	0.94	0.94	0.97
CS/S #3M.Tr	무부하가압시 돌입전류	A,B	0.41	0.41	×
FS/S #1M.Tr	무부하가압시 돌입전류	A	0.56	0.59	×
GS/S #4M.Tr	무부하가압시 돌입전류	C	0.84	0.88	×

는 특징을 보인다. OLTC 내부고장 시에는 중성점부근의 고장으로, 2차측 전류의 변화는 OLTC가 1,2차측 중 어디에 위치에 있는냐에 따라 다르지만, 그 영향은 미비하며, 1차측 전류의 증가에 주로 영향을 미친다. 화재로 인한 내부고장은 다양하게 나타났으며, 3개상 모두 동작하였다

2009년~2017년 발생한 변압기고장을 분석한 결과 2고조파 함유율을 15%로 정정할 경우와 10%로 정정할 경우 87동작의 지연은 평균 0.02cycle, 최대 0.06cycle로 샘플수로는 1주기 32샘플링 기준으로 평균 1샘플링, 최대 2샘플링으로 미비하였다. 하지만, 고조파 함유율을 10%로 정정하였다고 해도, 변압기 무부하가압시 여자돌입전류에 의해 나타나는 고조파가 10% 이하로 떨어지기 때문에 비율차동계전기의 원치 않는 동작을 저지하기는 어려웠다.

결국, 고조파 함유율을 10%로 정정하였을 때 우려되었던, 87동작의 지연은 크게 문제가 되지 않지만, 최근 변압기 디자인의 변화로 인한 2고조파 함유율의 저하를 고려해 볼 때 여자돌입전류 발생 시 나타나는 비율차동계전기의 오동작에 대한 저지효과는 돌입발생상 억제 방식의 경우 효과가 없었다. 하지만, 2상 돌입발생시 3상 억제 방식을 적용할 경우, 비율차동계전기의 오동작이 일어나지 않았다. 이 경우에도, 87 동작시간의 지연은 평균 0.06cycle, 최대 0.09cycle로 샘플수로는 1주기 32샘플링 기준으로 평균 2샘플링, 최대 3샘플링으로 미비하였다.

따라서 본 논문에서는 현재의 2고조파 함유율 정정 기준을 10%로 적용하고, 2고조파 억제 적용방식으로 2상 돌입발생시 3상 억제 방식을 사용하는 것이 좀 더 합리적인 정정값 및 적용방법이라고 제안한다.

3. 사례 연구

3.1 계통모델링 및 RTDS 시험항목

전력연구원에서 2015년에 시행한 154kV 변압기 보호계전기 RTDS 시험 시 비율차동계전기에 저장된 고장데이터를 분석하여 사례 연구를 진행하고, 제안한 방법이 변압기 고장 시 비율차동계전기 동작의 지연에 어떠한 결과를 미치는지 확인하였다.

그림 4 및 표 6은 계통모델 및 계통데이터를 보여준다.

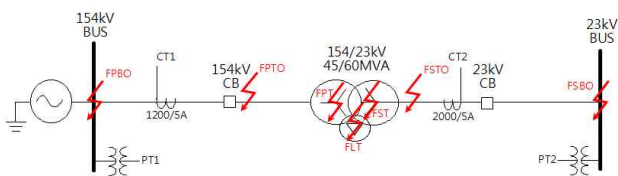


그림 4 RTDS 계통모델

Fig. 4 Power system model by RTDS

3.2 변압기 보호계전기 RTDS 시험결과 분석

표 8은 변압기 1차측 내부 80% 지점에 A상 지락고장이 발생한 시점인 96 샘플링부터 120샘플링까지의 87 동작, 2고조파

표 6 계통데이터

Table 6 System parameters

항 목	계통데이터 %Z @ 100MVA Base		비 고
	R1+jX1	0.1+j1.0	
전원단	154kV	R0+jX0 0.1+j1.0	-
변압기	154/23/ 6.6kV	%Z12=j31%	3∅ 60MVA Y-Y-Δ Yyn0d1
		%Z13=j50%	
CT	1차측	1200/5A, C800	CT 2차 "Y"결선
	2차측	2000/5A, C200	CT 2차 "Y"결선
부하	40MVA, P.F=0.9	R=47.61[Ω] L=0.0611[H] @ 10[MVA]	23kV 부하 산정

표 7 변압기 비율차동계전기 RTDS 시험 항목

Table 7 RTDS test details of the transformer current differential relay

고장위치	고장종류	
변압기 1차측 내부고장	A상 지락_80%	A상 지락_30%
	AB상 단락_80%	AB상 단락_10%
	ABC상 단락_80%	ABC상 단락_10%
변압기 2차측 내부고장	A상 지락_80%	A상 지락_30%
	AB상 단락_80%	AB상 단락_10%
	ABC상 단락_80%	ABC상 단락_10%
변압기 3차측 내부고장	A상 증간단락_80%	
변압기 1차 CB~ 1차측 BCT 고장	A상 지락 ABC상 단락	AB상 단락
변압기 2차 BCT~ 2차 CB 고장	A상 지락 ABC상 단락	AB상 단락
외부고장 (154kV 모선)	A상 지락 ABC상 단락	AB상 단락
외부고장 (23kV 모선)	A상 지락 ABC상 단락	AB상 단락
돌입전류시 내부고장	1차측 내부고장_A상 지락_50% 1차측 내부고장_AB상 단락_50% 1차측 내부고장_ABC상 단락_50% 2차측 내부고장_A상 지락_50% 2차측 내부고장_AB상 단락_50% 2차측 내부고장_ABC상 단락_50% 3차측 내부고장_B상 증간단락	

Max 값, Final 87 동작 시 2고조파 차전류 함유율 분석 결과를 보여준다. A상 지락고장이 발생할 경우, 영상분의 타상으로서의 영향으로 인해 A, B, C상 모두 87이 동작하였다. 고장발생 후 수 샘플링 안으로 2고조파 함유량이 98.36~151.39%까지 올라갔다. 그 후 119샘플링 즉, 고장발생 후 0.72cycle만에 11.27~11.33%까지

표 8 변압기 1차측 내부고장(A상 지락_80%) 고장파형 2고조파와 차전류 함유율 분석 결과

Table 8 Result of analyzing the 2nd harmonic differential component from the fault data in case of the internal fault occur in a primary side of the transformer (A phase to earth fault_80%)

sample	cycle	87			2고조파 함유율(%)		
		A	B	C	A	B	C
96	0.00	0	0	0	38.6	18.7	24.2
97	0.03	0	0	0	94.3	65.3	151.3
98	0.06	0	0	0	98.3	85.6	114.7
99	0.09	0	0	0	98.1	92.4	104.5
100	0.13	0	0	0	96.7	93.8	99.7
101	0.16	0	0	0	94.4	92.9	96.0
102	0.19	0	0	0	91.6	90.8	92.5
103	0.22	1	0	1	88.4	88.0	88.9
104	0.25	1	0	1	84.8	84.6	85.0
105	0.28	1	0	1	80.8	80.8	80.9
106	0.31	1	1	1	76.6	76.6	76.6
107	0.34	1	1	1	72.0	72.0	72.0
108	0.38	1	1	1	67.2	67.3	67.1
109	0.41	1	1	1	62.2	62.2	62.1
110	0.44	1	1	1	57.0	57.0	56.9
111	0.47	1	1	1	51.6	51.7	51.5
112	0.50	1	1	1	46.2	46.3	46.1
113	0.53	1	1	1	40.7	40.8	40.6
114	0.56	1	1	1	35.2	35.3	35.1
115	0.59	1	1	1	29.8	29.8	29.7
116	0.63	1	1	1	24.5	24.6	24.5
117	0.66	1	1	1	19.5	19.6	19.5
118	0.69	1	1	1	15.0	15.1	15.0
119	0.72	1	1	1	11.3	11.3	11.2
120	0.75	1	1	1	8.6	8.6	8.6

■ : 87 동작 ■ : Max ■ : Final 87 동작

내려와 A, B, C상에서 모두 Final 87이 정상적으로 동작하였다.

표 9에서 보여주듯이 1선 지락 고장 시에는 영상분의 타상으로의 영향으로 인해 87 요소가 A, B, C상 모두 동작한다. 3차측 중간단락 고장 시에는 2차측 전류의 영상분 생성여부는 상황에 따라 다르지만, 주로 1차측 전류의 상승으로 인해 87 요소가 최소한 2상 이상 동작하는 특징을 보인다. 그리고 영상분이 발생하지 않는 2상 단락, 3상 단락고장에서는 고장이 발생한 해당 상에서만 87 요소가 동작하는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 2고조파 함유율을 10%로 정정하고, 2상 돌입발생시 3상 억제 방식을 적용할 경우, 우려되었던 87 동작의 지연은 평균 0.12cycle, 최대 0.32cycle로 샘플수로는 1주기 32샘플링 기준으로 평균 3샘플링, 최대 10샘플링이며, 이는 RTDS 시험 순시요소 적합여부 판정기준인 30ms(1.8cycle) 이하를 모두 만족하였다.

3.3 제안한 2고조파 억제 방식의 정정값 및 적용방법 검토

본 논문에서 제안한 2고조파 함유율 정정값 10% 및 2상 돌입발

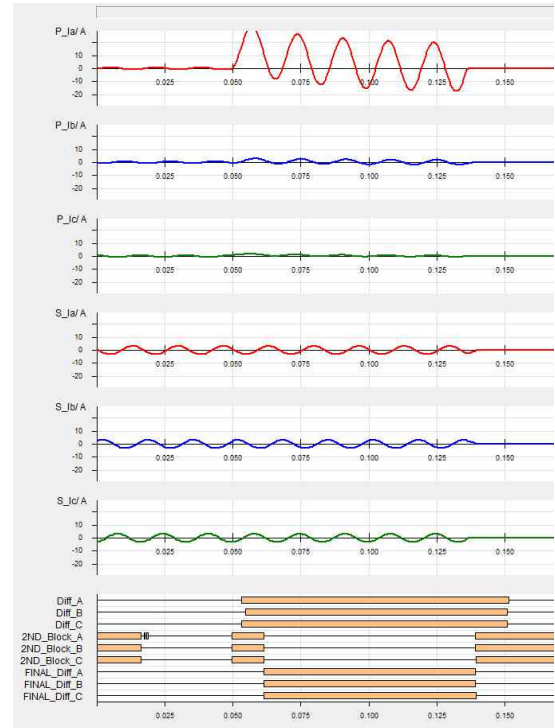


그림 5 변압기 1차측 내부고장(A상 지락_80%) 고장데이터

Fig. 5 The fault data in case of the internal fault occur in a primary side of the transformer(A phase to earth fault_80%)

생시 3상 억제 방식의 적용은 87 동작의 지연에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

현재 한전에서 돌입발생상 억제방식을 적용하고 있는 가장 큰 이유는 여자돌입전류에 의해 2고조파가 한 상에서 발생하고, 타상에서 고장이 발생한 경우 신속한 고장제거를 하기 위함이다. 하지만, 고장이 발생한 상에서는 보통 2고조파 함유율이 고장발생 직후에는 올라가지만, 수 샘플링 안으로 낮아지게 된다. 따라서 3상 단락, 2상 단락 고장 시 최소 2개 이상의 상에서 낮은 2고조파 함유율이 나타난다. 1선 지락고장 시에는 영상분의 타상으로의 영향으로 인해 최소 2개 상 이상에서 낮은 2고조파 함유율이 나타난다. 또한, 변압기 1, 2차측 중성점 근처에 위치한 OLTG 내부고장, 3차측 고장, 화재발생 시에도 최소 2개 상 이상에서 낮은 2고조파 함유율이 나타난다. 결국, 다양한 형태로 나타날 수 있는 변압기 고장에 대해 최소 2개 상 이상에서 낮은 2고조파 함유율이 나타나게 되며, 2고조파 억제 적용방법에 따른 검토 결과는 다음과 같다.

첫 번째, 돌입발생상 억제 방식의 경우, 변압기 내부고장제거에는 유리하지만, 여자돌입전류 발생 시 불필요한 87 동작을 초래하게 된다.

두 번째, 1상 돌입발생시 3상 억제 방식의 경우, A상에서 2고조파가 높게 발생하여 87 동작 전체 억제를 하였는데, B, C상에서 단락고장이 발생할 경우, 87 동작 억제 해제가 되지 않기 때문에 고장제거가 안될 수 있는 문제점이 있다.

표 9 변압기 보호계전기 RTDS 시험결과 종합분석

Table 9 Overall analysis of the result in RTDS test of the transformer current differential relay

고장위치	고장종류	동작상	돌입발생상 억제		2상돌입발생시 3상억제
			2고조파 억제 함유율 정정값		
			15%	10%	10%
Final 87 동작시간(cycle)					
변압기 1차측 내부고장	A상 지락 80%	A,B,C	0.72	0.75	0.75
	A상 지락 30%	×	-	-	-
	AB상 단락 80%	A,B	0.72	0.78	0.78
	AB상 단락 10%	×	-	-	-
	ABC상 단락 80%	A,B,C	0.78	0.81	0.91
변압기 2차측 내부고장	A상 지락 80%	A,B,C	0.72	0.94	0.94
	A상 지락 30%	×	-	-	-
	AB상 단락 80%	A,B	0.88	0.94	0.94
	AB상 단락 10%	A,B	0.84	0.88	0.88
	ABC상 단락 80%	A,B,C	0.81	0.94	1.00
변압기 3차측 고장	ABC상 단락 10%	A,B,C	1.00	1.03	1.06
	A상 증간단락 80%	A,B,C	0.94	1.00	1.00
변압기 1차 CB~1차측 BCT 고장	A상 지락	A,B,C	0.91	1.06	1.06
	AB상 단락	A,B	0.97	1.03	1.03
	ABC상 단락	A,B,C	0.84	1.00	1.16
변압기 2차 BCT~2차 CB 고장	A상 지락	A,B,C	0.72	0.94	0.94
	AB상 단락	A,B	0.91	0.94	0.94
	ABC상 단락	A,B,C	0.81	0.91	0.94
외부고장 154kV 모선	A상 지락	×	-	-	-
	AB상 단락	×	-	-	-
	ABC상 단락	×	-	-	-
외부고장 23kV 모선	A상 지락	×	-	-	-
	AB상 단락	×	-	-	-
	ABC상 단락	×	-	-	-
돌입전류시 내부고장	1차측 A상 지락 50%	A,B,C	0.94	1.00	1.03
	1차측 AB상 단락50%	A,B	0.88	0.91	0.91
	1차측 ABC상 단락50%	A,B,C	0.69	0.72	0.88
	2차측 A상 지락50%	A,B,C	0.78	0.97	1.00
	2차측 AB상 단락 50%	A,B	0.78	0.97	1.00
	2차측 ABC상 단락 50%	A,B,C	0.78	0.84	0.94
	3차측 B상 증간단락 80%	A,B,C	0.91	0.94	0.94

세 번째, 2상 돌입발생시 3상 억제 방식의 경우, A, B상에서 2고조파가 높게 발생하여 87동작 전체 억제를 하였는데, C상에서 고장이 발생할 경우, 고장제거가 되지 않는 것을 우려할 수 있지만, 앞서 설명하였듯이, C상 지락고장이 발생하면, 영상분의 타상으로의 영향으로 인해 최소 2개상에서 높은 고조파가 나타났다가 작아지므로 문제가 되지 않는다. 또한, 여자돌입전류 발생 시 불필요한 87 동작이 발생하지 않는다.

4. 결 론

본 논문에서는 현재 한전에서 적용하고 있는 여자돌입전류 대책인 2고조파 억제 방식의 정정값 및 적용방법에 대하여 그 타당성을 검토하고, 2고조파 함유율 정정값 10% 및 2상 돌입발생시 3상 억제 방식의 적용이 좀 더 합리적인 기준임을 검증하였다. 우려되었던 87 동작의 지연은 크게 발생하지 않았으며, 여자

돌입전류 발생 시 발생하는 불필요한 87 동작도 발생하지 않았다. 물론, 이 방법이 완벽한 대책이 될 수는 없을 것이며, 변압기 여자돌입전류 발생 시 나타나는 87 오동작을 방지하기 위해서는 새로운 알고리즘에 대한 연구가 필요한 것은 분명하다.

본 논문에서 제안하는 2고조파 억제 방식의 정정값 및 적용방법은 한전이 변압기 비율차동계전기를 매년 재정정하는 시간과 노력을 줄일 수 있으며, 무부하가압시 일어나는 비율차동계전기의 불필요한 오동작을 방지할 수 있다. 또한, 계통고장 시 발생하는 변전소의 재 가압으로 인한 변압기 비율차동계전기의 오동작 방지는 안정적인 전력공급을 위해 큰 기여를 할 것이라고 생각한다.

References

[1] S. P. Patel, "Fundamentals of transformer inrush," in 2011 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers,

pp. 290-300, 2011.

- [2] Power System Protection Department, KEPCO, "Setting Guide of the Relay to Protect the Power System", pp. 1, 2016.
- [3] R. Hamilton, "Analysis of Transformer Inrush Current and Comparison of Harmonic Restraint Methods in Transformer Protection," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, pp. 1890-1899, 2013.
- [4] Yong-Beom Son, "Practical Use of the Fault Record Analysis Software, SIGRA by Editing the Data of a Comtrade File", Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference journal, pp. 555-557, 2017. 7.

저 자 소 개



손 용 범 (Yong-Beom Son)

1982년 10월 16일생. 2008년 인하대 전기공학 학과 졸업. 2016년~현재 명지대학원 전기공학 학과 석사과정. 2007년~현재 한국전력공사 근무.

E-mail : sybboy@naver.com



강 상 희 (Sang-Hee Kang)

1962년 8월 15일생. 1985년 서울대 전기공학부 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사), 1993년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사), 현재 명지대 전기공학과 교수.

E-mail : shkang@mju.ac.kr