

유기전압비를 이용한 디지털형 변압기 보호계전기 개발 및 성능시험에 관한 연구

정성교^{*} 이재경^{*} 김한도^{*} 최대길^{*} 강용철^{**} 강상희^{***}
 (주) 쉘파워^{*} 전북대학교^{**} 명지대학교^{***}

A Study on The Development and Function Test of Digital Transformer Protection Relay Using The Induced Voltage

Jung Sung Kyo^{*} Lee Jae Kyung^{*} Kim Han Do^{*} Choi Dae gil^{*} Kang Yong Chul^{**} Kang Sang Hee^{***}
 Xelpower Co. Ltd^{*} Chonbuk National University^{**} Myongji University^{***}

Abstract - The transformer role is very important in power system operation and control; also its price is very expensive. Therefore many kinds of the efforts for transformer protection have been executed. So far as, current differential relay (87) has been mainly used for transformer protection. But current differential relaying method has several troubles as followings. Differential current can be occurred by transformers inrush current between winding1 and winding2 of transformer when transformer is initially energized. Also harmonic restrained element used in current differential relaying method is one of the causes of relays mal-operation because recently, harmonics in power system gradually increase by power switching devices (SVC, FACTS, DSG, etc). Therefore many kinds of effort have been executed to solve the trouble of current differential relay and one of them is method using ratio of increment of flux linkages (RIFL) of the primary and secondary windings.

This paper introduces a novel protective relay for power transformers using RIFL of the primary and secondary windings. Novel protective relay successfully discriminates between transformer internal faults and normal operation conditions including inrush and this paper includes real time test results using RTDS(Real Time Digital Simulator) for novel protective relay.

A novel protective relay was designed using the TMS320C32 digital signal processor and consisted of DSP module, A/D converter module, DI/DO module, MMI interface module and LCD display module and developed by Xelpower co., Ltd.

1. 서 론

현재 전력시스템을 구성하는데 중요한 역할을 담당하고 있는 변압기는 그 기능이 매우 중요하며 정격전압이 높아질수록 가격 또한 매우 고가이므로 이를 보호하기 위한 노력이 많이 이루어져 왔다. 지금까지는 변압기를 보호하기 위해 전류차동방식이 주로 사용되어 왔다. 이러한 전류차동방식은 변압기에 여자돌입전류(Inrush current)가 흐를 때 차전류(Differential current) 발생에 의해 오동작을 일으킬 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 기존의 전류차동방식은 고조파 억제요소를 이용하여 변압기의 여자돌입 상태를 구분하고 있으나 근래 전력계통에서 전력전자 소자들을 비롯한 고조파 발생원의 증가에 따른 고조파의 증가를 고려할 때 여전히 오동작 및 오부동작의 위험 요소를 안고 있다. 또한 전류차동방식은 전류신호의 기본파를 추출하여 적용하기에 신호처리를 위한 데이터 윈도우의 제한을 받으므로 사고감지 및 동작속도에 있어서 지연을 가져올 수 있다.

따라서 새로운 방식의 변압기 보호 알고리즘들이 연구되어왔으며 그 대표적인 방식으로 변압기 등가회로에 기초하여 전자기 미분방정식을 이용한 몇몇 보호알고리즘들이 발표되었다[1-4]. 그러나 제안된 방식들은 실제 적용을 하는데 있어 몇 가지 문제점들을 가지고 있다. [2]와 [3]의 경우 변압기의 권선전류(Winding Current)를 이용한 방식을 제안하고 있으나 현재 계전기들이 선로전류(Line Current)를 입력받는 것을 고려할 때 현실적으로 적용하기에 어려움이 있다. 또한 [2]의 경우는 권선저항을 무시하였고 [4]의 경우는 Δ 결선에서 상전류를 구할 때 순환성분을 근사화하였으며 그 값을 구하는 것이 어렵다는 문제점이 있다. 본 논문에서 적용된 유기전압비를 이용한 계전방식[1]은 기존의 계전기들과 같은 위치에서의 전압, 전류를 입력 받으며 변압기의 내부사고와 외부사고를 구분할 수 있을 뿐 아니라, 변압기의 여자돌입과 과여자 상태를 변압기의 내부사고와 구분할 수 있으며 또한 전압, 전류 신호의 순시치를 이용하므로 동작속도 면에서 전류차동계전방식에 비해 고속동작을 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 유기전압비를 이용한 변압기 보호 알고리즘을 적용하고 TMS320C32 Digital Signal Processor를 사용하여 (주)셀파워에서 개발한 디지털형 변압기 보호계전기를 소개하고 적용된 알고리즘과 성능시험 과정 및 시험결과를 발표하고자 한다.

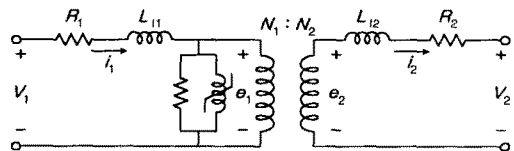
2. 본 론

2.1 유기전압비를 이용한 변압기 보호 알고리즘

개발된 새로운 형태의 유기전압비를 이용한 변압기 보호계전기는 기존의 계전기들과 같이 변압기의 1, 2차측의 전압과 전류를 입력받아서 변압기 등가회로상에 존재하는 이상변압기의 1, 2차측 유기전압비를 계산하여 그 차를 이용하여 동작하게 된다. 또한 다양한 변압기 결선방식(Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, Δ - Δ)에 모두 대응할 수 있고 Phasor 연산을 위한 신호처리기법(DFT)을 사용하지 않고 전압, 전류의 순시치를 사용함으로써 계산량에 있어서도 그 부담이 적어 매우 유리하다.

2.1.1 변압기의 내부유기전압

변압기의 내부 유기전압을 계산하기 위해서는 먼저 등가회로상의 권선저항과 누설리액턴스에 대한 파라메타 값을 알아야 하며 그 값들은 변압기 제조회사의 시험 데이터를 통해 구할 수 있다.



R1: 1차 권선저항, L11: 1차 누설리액턴스, N1: 1차 권수비
 R2: 2차 권선저항, L12: 2차 누설리액턴스, N2: 2차 권수비

그림 1. 변압기 등가회로

알고리즘에서 적용하고자 하는 유기전압(e_1, e_2)은 등가회로상의 각 파라메타와 전압, 전류에 의해 식(1-2)와 같이 결정된다.

$$e_1 = v_1 - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

$$e_2 = v_2 + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

계전기의 사고판단을 위한 계전요소(Detector)는 위의 식(1-2)에서 구한 유기전압 값을 이용하여 아래의 식(3)과 같이 결정된다.

$$Detector = \frac{e_1 - \frac{N_1}{N_2} e_2}{V_{base}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

$$V_{base} = (1차측 상전압의 실효치)/(4.44 \times f) \quad (4)$$

2.1.2 알고리즘 순서도

그림2의 순서도는 유기전압비를 이용한 변압기 보호계전기의 알고리즘 및 동작 흐름을 나타낸다.

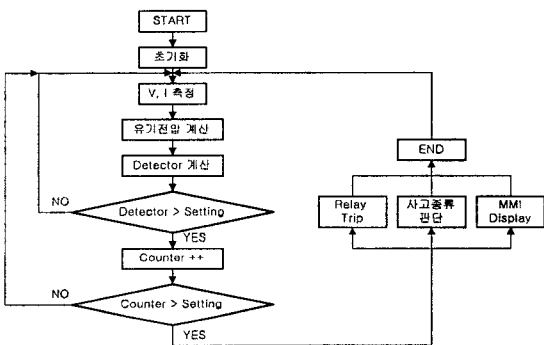


그림2. 유기전압비를 이용한 변압기 보호계전기 순서도

2.2 개발된 변압기 보호계전기 소개

개발된 유기전압비를 이용한 변압기 보호계전기는 그 적용 대상을 3권선 변압기를 기준으로 하였으며 전압, 전류 입력레벨은 각각 9채널까지 지원하며 확장 가능한 형태로 설계되었다.

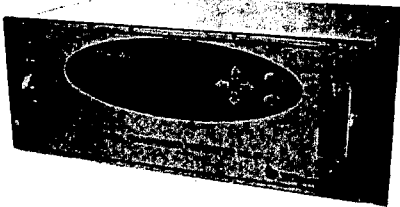


그림3. 유기전압비를 적용한 변압기 보호계전기

2.2.1 소프트웨어

계전기의 핵심부분인 계전 알고리즘은 2.1절에서 소개한 유기전압비를 이용한 방식이 사용되었으며 다양한 변압기 결선에 따라 모두 대응 가능하도록 설계되었다. 계전기의 고장데이터 저장기능은 총 4회, 이벤트 리스트는 총 50회까지 저장가능하며, 통신기능은 Modbus Protocol을 지원하도록 설계되었고 계전기의 사고기록은 개발된 PC용 상위 소프트웨어를 통해 확인 및 분석이 가능하다.

2.2.2 하드웨어

계전기의 하드웨어는 알고리즘 적용 및 현장설치후 사용자 편의를 고려한 최적의 설계를 추구하였으며 확장성 및 유지 보수 편의를 위해 각각의 기능별로 랫·작가

능한 카드타입으로 설계되었다. 아날로그 입력부는 3권선 기준으로 전류, 전압 각각 9채널까지 지원하며 고속의 연산 및 동작을 위해 TMS320C32 Digital Signal Processor를 사용하였고 통신기능을 위한 RS232, RS485 포트를 각각 1개씩 지원한다.

2.3 성능시험을 위한 변압기 및 시스템 모델

개발된 계전기는 현장 적용 이전에 반드시 다양한 경우들에 대해 성능시험을 거쳐 검증받아야 한다. 계전기의 성능시험은 RTDS에서 구현된 모의 테스트 시스템을 통하여 이루어졌다. 이러한 디지털 시뮬레이션은 먼저 시스템 모델에 대한 정확한 이해가 필요하며 그 모델은 다음과 같다.

2.3.1 시스템 모델 및 파라미터

시스템 모델은 먼저 상위계통인 송전계통을 등가화한 무한모선으로 대체하고 1차측 외부사고를 위한 단거리 송전선로를 구성하였다. 또한, 변전소 주 변압기는 국내 제조업체(효성)에서 개발된 변압기 데이터를 이용하였으며 2차측 외부사고를 위한 배전선로 및 부하들로 구성하였다. 그림4는 시스템 모델의 단선도를 나타내며 표1은 시스템 모델을 RTDS에서 구현하기 위해 사용된 입력 파라미터 값을 나타낸다. 또한 표2는 제조회사의 시험 데이터를 근거로 하여 유기전압을 구하기 위해 사용되는 변압기의 1, 2차측 권선저항과 누설리액턴스 값으로 환산한 값들이다.

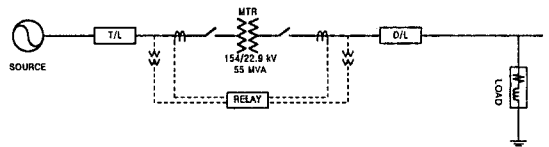


그림4. 시스템 모델 단선도

표1. 시스템 모델 입력 파라미터

전원	전압 [kV]	
	영상분 Z_{s0} [%]	0.257+j1.336
정상분, 역상분(Z_{s1}, Z_{s2}) [%]	0.072+j0.757	
송전선로 ACSR 410°	영상분 Z_{s0} [%/km]	0.076+j0.394
	정상분, 역상분(Z_{s1}, Z_{s2}) [%/km]	0.018+j0.138
	선로길이 [km]	20
변전소	정격용량 [MVA]	55
주변압기	임피던스 [%]	13.3
배전선로 ACSR 160°	영상분 Z_{s0} [%/km]	11.99+j29.26
	정상분, 역상분(Z_{s1}, Z_{s2}) [%/km]	3.47+j7.46
	선로길이 [km]	10
부하	용량 [MVA]	40
	역률	0.9

표2. 변압기 입력 파라미터

	1차측	2차측
전압 [kV]	154	22.9
권선저항 [Ω]	0.940769	0.019201
누설리액턴스 [H]	0.076405	0.001559

2.4 변압기 보호계전기 동작시험

변압기 보호계전기 성능시험은 크게 내부사고, 외부사고, 여자돌입 현상을 RTDS를 통해 모의하였다. 변압기 보호계전기는 내부사고에서 동작하여야 하며 여자돌입이나 외부사고, 무사고상태에서는 동작하지 않아야 한다. 이를 검증하기 위해 내부사고의 경우 중간단락 사고를 5[%]에서 95[%]까지 가변 시키면서 성능시험을 실시하였고, 외부사고시는 1차, 2차측에서 1선지락, 선간단락, 3상단락 사고를 모의하고 사고위치를 가변시키며 실시하

였으며 여자돌입사고에 대해서도 변압기 무부하 상태와 무부하상태에 대해 1차측 차단기를 이용해서 투입시킴으로써 여자돌입 상황을 모의하였다. 또한 잔류자속 및 투입 위상각에 의한 영향을 고려하기 위해 투입시점을 Random하게 선택하여 성능 시험을 실시하였다. 표3은 실시한 변압기 보호계전기의 성능시험 결과를 보여준다.



그림5. RTDS를 이용한 성능시험 장면

2.4.1 내부사고

내부사고 시험결과 Detector 크기의 정정을 1로 하였을 때 10(%) 이상의 층간단락에 대해 1/4 Cycle 안에 사고감지를 하였다. 그림6은 50(%)의 층간단락 사고시 계전기에 저장된 고장데이터를 분석용 PC 소프트웨어를 이용하여 받은 후 분석한 파형을 보여준다.

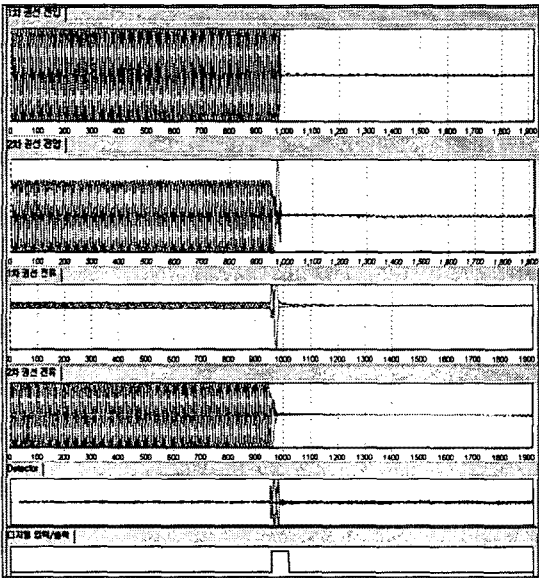


그림6. 내부사고시 계전기 동작 파형

2.4.1 외부사고

외부사고시 성능시험은 변압기 1차, 2차측에서 1선지락, 선간단락, 2선지락, 3상단락 사고에 대해 시험하였으며 사고위치는 1차측 사고시 10(km), 2차측 사고시 5(km) 위치 사고를 발생시켰다. 그 결과 계전기는 Detector 정정이 0.5이상일 때 동작하지 않았다.

2.4.1 여자돌입

여자돌입 성능시험은 변압기 투입 위상각과 다양한 잔

류자속의 크기를 고려하기 위해 1차측 차단기를 시간차를 두고 반복적인 개폐동작을 시킴으로써 수행하였고 그 결과 Detector 정정이 0.8 이상에서는 동작하지 않았다.

2.5 결과 분석 및 평가

계전기의 성능시험 결과를 분석해 보면 Detector의 정정에 따라 계전기 동작이 결정됨을 알 수 있다. 즉, 외부사고시 0.5이하, 여자돌입시 0.8이하의 정정에서 계전기는 오동작 할 수 있는 여지가 있으므로 Detector 정정을 1.0이상으로 정정함으로써 외부사고와 여자돌입시 오동작을 막고 동시에 10(%) 이상의 변압기 내부사고를 완벽하게 감지함으로써 변압기를 보호할 수 있다. 또한 내부사고시 1/4 Cycle 안에 사고를 감지함으로써 고속 차단을 통해 변압기 피해를 줄일 수 있는 장점을 갖는다.

표3. 변압기 보호계전기 기능시험 결과

Detector 정정	시험 항목		
	내부사고	외부사고	여자돌입
0.5 이하	○	△	△
0.8 이하	○	×	△
1	○	×	×
2	○	×	×
3	○	×	×
4	○	×	×
6	○	×	×
7	○	×	×
8	○	×	×
9	○	×	×

(○ : 정동작, △ : 오동작, × : 정부동작)

3. 결 론

(주) 젤파워에서는 기존의 전류차동 방식을 이용한 변압기 보호계전기에서 발생할 수 있는 문제점을 인지하고 이를 해결할 수 있는 새로운 보호방식의 계전기를 개발하였다. 개발된 계전기는 시험결과에서 볼 수 있듯이 비교적 뛰어난 성능을 나타내었다. 하지만 변압기의 미세한 내부사고를 감지하기 위해 Detector의 정정을 낮게 정정한다면 외부사고 및 여자돌입에서 오동작 할 수 있는 여지도 남아 있음을 알 수 있다. 따라서 앞으로 시험 데이터를 통한 변압기 파라미터의 정확한 계산과 계전기 입력인 전압, 전류의 아날로그 입력 값의 정밀도를 높임으로써 미세한 변압기 내부사고도 감지할 수 있는 새로운 방식의 변압기 보호계전기로써의 역할을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 강용철, 이병은 "유기전압비를 이용한 변압기 보호계전 알고리즘", 전기학회 논문지 A, 제49권 제10호, 524-530, 2000년 10월
- [2] A.G. Phadke, J.S. Thorp, "A New Computer-Based Flux-Restrained Current-Differential Relay for Power Transformer Protection", IEEE Trans. on PAS, vol.102, No.11, 3624-3629, 1983년 11월
- [3] K. Inagaki, M. Higaki, Y. Matsui, K. Kurita, M. Suzuki, K. Yoshida, T. Maeda, "Digital Protection Method for Power Transformers Based on an Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance", IEEE Trans. on PWRD, vol.3, no.4, 1501-1510, 1988년 8월
- [4] M.S. Sachdev, T.A. Sidhu, H.C. Wood, "A Digital Relaying Algorithm for Detecting Transformer Winding Faults", IEEE Trans. on PWRD, vol.4, no.3, 1638-1648, 1989년 7월