자속-전류비율곡선을 이용한 전력용 변압기의 여자돌입검출

김 수 경, 박 철 원, 신 명 철, 서 희 석, 장 병 태, 김 일 동, 김 영 한
성균관대학교 전기·전자 및 컴퓨터공학부 두원공업전문대학 전기과 한국전력공사 전력연구원

Inrush Current Dectection of Power Transformer using Flux-current Derivative Curve

S. K. Kim*, C. W. Park*, M. C. Shin*, H. S. Suh**, B. T. Jang***, I. D. Kim***, Y. H. Kim***

* School of Electrical and Computer Eng., Sung Kyun Kwan Univ.
** Dept. of Electrical Eng., Doo Won Tech. College
*** Korea Electric Power Research Institude of KEPCO.

Abstract

Convential inrush current dectection method is used to harmonic restraint method by filtered second frequency component. Nowadays this technique must be modified because harmonics are occurred in steady state of power system. A purpose of this study is to develop of inrush current detection relaying algorithm for power transformer based on flux-current derivative curve method. We used the relaying signals obtained from EMTP simulation.

1. 서 론

대형 변압기보호를 위한 차동계전은 변압기의 내부고장전류와 무부하 투입 등에 발생하는 여자돌입전류를 구별하여야 한다. 여자돌입전류는 변압기의 용량, 변압기 코어의 재질, 잔류자속, 투입위상각에 따라 달라지나 제2고조파 성분이 다량함유된다. 일반적으로 기본파에 대한 제2고조파의 비율은 여자돌입발생시 큰 값이 되고 내부고장발생시 작아지기 때문에 이 특성을 이용하여 여자돌입시 계전기의 트립지령을 억제시키는 고조파억제법이 널리 사용되고 있다. 따라서 특정주파수성분을 추출하는 필터가 계전기법의 성능을 좌우하게 되므로 필터에 관한 연구가 많이 이루어졌다[1].

그런데 변압기 제조기술의 진보에 따라 고조파가 감소된 변압기가 생산되고 송전용량의 증가에 따른 커패시턴스성분이 커지고 있으며 고조파부하원의 개폐 등에 의해서도 평상시 고조파가 계통에 유입되어 계전신호가 왜곡된다. 따라서 특정주파수성분에 의한 고조파억제법은 문제점이 있다[2]. 그리고 기존의 기법은 변압기 코어의 비선형성 등에 의하여 불확실성이 포함되기도 하며 내부고장발생시 CT가 포화되어 계전신호를 정확하게 전달 못하는 경우도 있게 된다. 따라서 정확하게 여자돌입을 검출하여 계전기의 오동작을 방지하기 위하여 종래의 내부고장 및 여자돌입판별기준이 수정·보완되어야만 한다.

본 논문은 Fuzzy 기법을 적용한 변압기의 차동보호에 앞서서 퍼지입력변수중의 한 요소로서 자속-전류비율곡선기법(flux-current derivative curve method)[3~6]의 가능성을 검토하였다.

연구된 기법은 선정된 모델계통을 고장발생각 및 투입위상각을 변화시키면서 EMTP 시뮬레이션[7, 8]을 수행하였으며 그 결과의 출력데이타를 활용하여 변압기의 내부고장과 여자돌입검출 여부를 테스트하였다.

2. 자속억제 전류차동계전

권선 저항을 무시한 단상 2권선 변압기는 그림 1과 같이 근사모델이 될 수 있다. 변압기의 1차측 전압을 V_p, 1차측 전류 i_p 그리고 상호 쇄교자속(mutual flux linkage) ϕ 라하면 그 관계는 식(1)이 된다.

$$L_p \frac{d\, i_p(t)}{dt} + \frac{d\,\phi(t)}{dt} = V_p(t) \qquad (1)$$

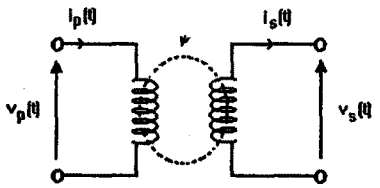


그림 1 단상 2권선 변압기

여기서, L_p는 1차 권선의 쇄교 인덕턴스이다. 식(1)을 시간 t_1에서 t_2까지 적분함으로써 이 시간동안의 쇄교자속을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\phi(t_2) - \phi(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} v_p(t)dt - L_p(i_p(t_2) - i_p(t_1))$$

전압과 전류를 Δt의 간격으로 샘플링하고, 적분항에 사다리꼴공식(Trapezoidal rule)을 적용하면 식(2)가 된다.

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \frac{\Delta t}{2}(v_{p.k} - v_{p.k-1}) - L_p(i_{p.k} - i_{p.k-1}) \quad (2)$$

여기서, $v_{p.k}$, $i_{p.k}$는 k번째 1차측 전압과 전류의 샘플치이다. 한편, 1차 및 2차측 전류들로부터 시점 t_k에서의 차동전류 $i_{d.k}$는 식(3)이 되며, 여자돌입발생시 차동전류는 여자돌입전류가 된다.

$$i_{d.k} = i_{p.k} - i_{s.k} \quad (3)$$

그림 2는 정상상태의 변압기 자화곡선(magnetising curve)이다.

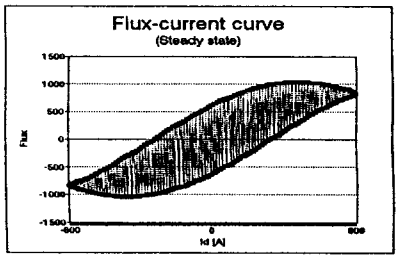


그림 2 변압기의 자화곡선

그런데 $(i_{d.k}, \phi_k)$점의 위치는 변압기 철심내의 잔류자속(remnant flux)이 0에 가까울 경우에만 명확하고, 변압기의 잔류자속의 양을 알지 못할 경우에는 의미가 없다. 즉 잔류자속 등의 영향으로 인하여 여자돌입 및 고장 그리고 정상상태가 완전히 구별하기 곤란하다. 이 문제를 극복하기 위하여 식(4)와 같이 쇄교자속의 기울기 $\frac{d\phi}{di}$를 고려하면 고장영역과 비고장영역의 구별이 용이하게 된다.

$$\left(\frac{d\phi}{di}\right)_k \simeq \frac{\phi_k - \phi_{k-1}}{i_k - j_{k-1}} = \frac{\frac{\Delta t}{2}(v_{p.k} - v_{p.k-1}) - L_p(i_{p.k} - i_{p.k-1})}{(i_{p.k} - i_{s.k}) - (i_{p.k-1} - i_{s.k-1})} \quad (4)$$

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

3.1 모델 전력계통

사례연구를 위하여 선정된 모델전력계통은 그림 3과 같이 변압기는 △-Y 결선인 45/60[MVA], 154/23[KV]를 선정하였다[6]. EMTP의 가포화변압기모델을 이용하여 여자돌입전류를 모의하였고 EMTP의 BCTRAN 보조루틴을 이용하여 변압기의 내부고장을 모의하였다. 고장발생각과 투입위상각을 가변하면서 층간단락고장, 부싱고장(외부고장), 권선지락 고장과 여자돌입상황에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

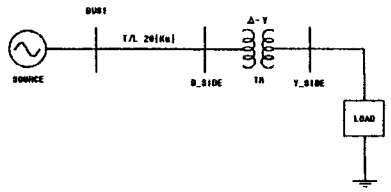
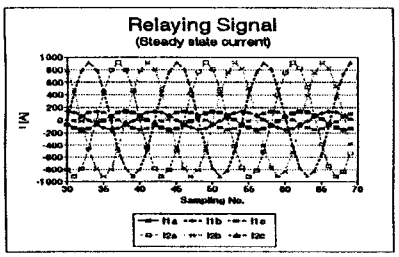


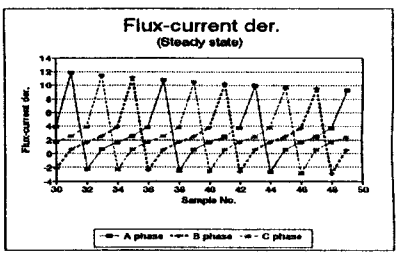
그림 3 모델계통의 단선도

3.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

식(4)를 이용하여 연산된 자속-전류비율의 값은 L_p 를 기준으로 고장영역과 비고장영역이 나뉘게 되는데, 본 연구에서 L_p는 -14.5 이다. 그림 4는 정상상태에서의 전류신호와 연산된 자속-전류 비율곡선이다. 그림 4(b)로부터 정상상태에서 연산된 값은 항상 L_p의 상단이내에서 진동하면서 수렴함을 알 수 있다.



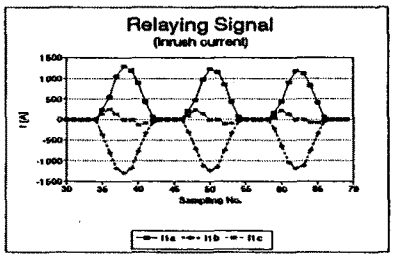
(a) 정상상태의 전류신호



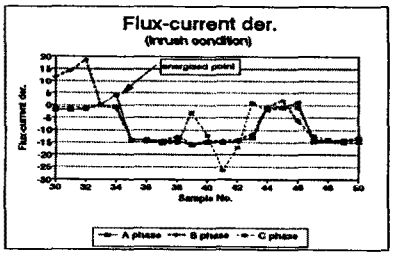
(b) 정상상태의 자속-전류비율

그림 4 정상상태의 전류신호와 자속-전류비율 곡선

그림 5는 A상을 기준으로 투입위상각이 0° 부근인 34샘플째에서 무부하 가압하였을 경우 여자돌입전류와 연산된 자속-전류비율곡선이다. 그림 5(b)로부터 여자돌입발생시에는 비대칭 성이 강한 A, B상은 여자돌입발생후 고장영역에 속하는 개수가 9개정도 이었으며, 대칭성이 있는 C상에 대해서는 7개가 되었다.



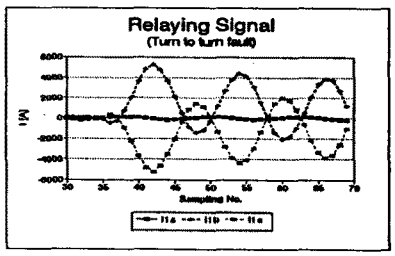
(a) 여자돌입시 전류신호



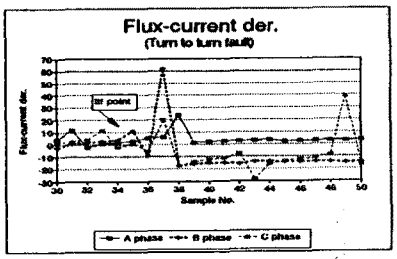
(b) 여자돌입시 자속-전류비율

그림 5 여자돌입상태의 전류신호와 자속-전류비율 곡선

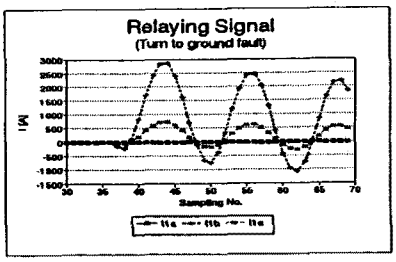
그림 6은 정상적으로 전압이 공급되는 도중에 A상의 전압 위상각이 0° 부근인 34샘플째에서 여러 가지 고장이 발생한 경우의 전류신호와 연산된 자속-전류비율곡선이다. 여기서 그림 6(a)는 B상권선의 5 : 80 : 15인 부분에서 단락고장이 발생한 경우의 1차측 3상전류이고, 그림 6(c)는 B상의 권선이 20 : 80인 위치에서 지락고장이 발생한 경우의 1차측 3상전류이며 그림 6(e)는 A상의 외부단자에서 고장이 발생한 경우의 1차측 3상전류이다. 그림 (b),(d),(f)에서 알 수 있는 바와 같이 층간단락고장시에는 고장발생후에 연산된 값의 고장영역내에 해당되는 개수가 11~12정도가 되었고, 권선지락고장시에는 고장상에 대한 연산된 값의 고장영역에 드는 개수가 7~8에서 12로 상승하였다. 또한 외부고장시에는 고장상에 대하여 연산된 값이 모두 고장영역에 속하였다.



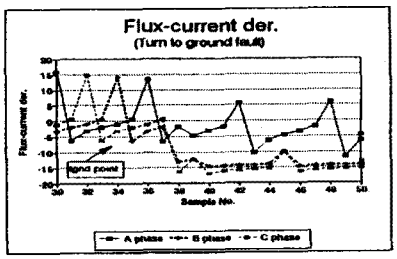
(a) 층간단락고장시 전류신호



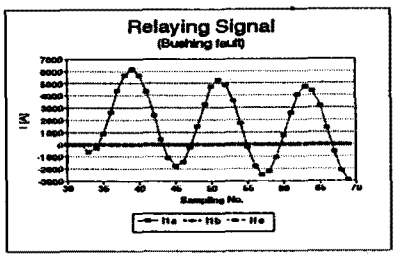
(b) 층간단락고장시 자속-전류비율



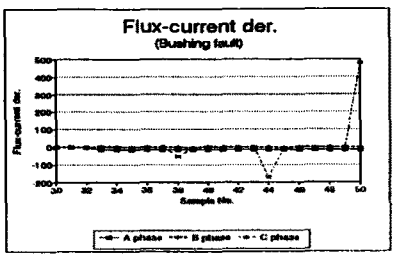
(c) 권선지락고장시 전류신호



(d) 권선지락고장시 자속-전류비율



(e) 부싱고장시 전류신호



(f) 부싱고장시 자속-전류비율

그림 6 고장발생시 전류신호와 자속-전류비율 곡선

표 1은 상기 5가지 경우에 대하여 연산된 자속-전류의 비 ($\frac{d\psi}{di}$)에 의한 고장영역에 해당하는 개수이다. 주기당 샘플수인 12샘플에 대한 고장영역에 속하는 개수를 이용하면 비고장과 고장을 검출할 수 있다. 정상상태는 Small, 여자돌입상황은 Medium, 내부고장상황은 Large 등 언어변수의 형태로서 Fuzzy형 변압기 보호계전기의 입력으로 사용이 가능하다.

표 1 고장영역에 속하는 연산된 자속-전류비율의 개수

Type \ S.N.		30~41	31~42	32~43	33~44	34~45	35~46	36~47	37~48	38~49	39~50
Steady state	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inrush	A	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9
	B	6	7	8	9	9	9	9	9	9	9
	C	5	6	7	7	7	7	6	7	7	7
TTF	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12
	C	3	4	5	6	7	8	9	10	11	11
TGND	A	0	0	1	0	0	0	0	2	2	2
	B	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12
	C	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12
Busing Fault	A	8	9	10	11	12	12	12	12	12	12
	B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2

4. 결 론

본 연구는 변압기의 여자돌입검출을 위하여 자속-전류법을 시도하였다. 주기당 샘플수에 대한 고장영역에 속하는 샘플수로서 비고장과 고장검출이 가능하며 Fuzzy형 변압기 보호계전기의 입력요소로 사용이 가능하다. 특히 이 기법은 필터링 연산이 필요하지 않으며, 고조파억제방식형의 계전기의 여자돌입시의 오동작 가능성을 해소할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] M. A. Rahman, B. Jeyasurya, "A State of the Art Review of Transformer Protection Algorithms", IEEE Trans. on PD., Vol.3, No.2, pp. 534~544, April 1988.

[2] 한국전력공사, "지능형 보호 계전기 연구개발", 기초전력공학 공동연구소(중간보고서) Sept. 1996.

[3] Sarosh N. Talukdar, James R. Bailey, "Hysteresis Models for System Studies", IEEE Trans. on PAS., Vol.95, No.4, pp. 1429~1434, July/Aug. 1976.

[4] H. W. Dommel, A. Yan, Shi Wei, "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Trans. on PS., Vol.PWRD-1, No.2, pp. 209~215, April 1986.

[5] A. G. Phadke, J. S. Thorp, "A New Computer-based Flux-restrained Current Differential Relay for Power Transformer Protection", IEEE Trans. on PS., Vol.PAS-102, No.11, pp. 3624~3629, Nov. 1983.

[6] A.T. Johns, S.K. Salman, "Digital Protection for Power System", IEE POWER SERIES 15, Peter Peregrinus Ltd., 1995.

[7] 서희석, 신명철, " 변압기보호계전 알고리즘 개발을 위한 변압기의 고장해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 844~846, July 1996.

[8] Patrick Bastard, Pierre Bertand, Michel Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies", IEEE Trans. on PD., Vol.9, No.2, pp. 690~699, April 1994.