

변압기 보호용 전류비율차동 계전기의 동작영역 설정방법

논 문
60-1-2

Setting Method of a Percentage Current Differential Relay for Transformer Protection

김 수 환* · 장 상 회†
(Su-Hwan Kim · Sang-Hee Kang)

Abstract - A percentage current differential relay is widely used for transformer protection. Because many percentage current differential relays recently use modified methods instead of conventional methods for deciding the operating characteristics of the large current region, in this paper, the operating region of a percentage current differential relay is analyzed in input-output current domain instead of operating-restraint current domain. An effective method to set the operating region when a CT is saturated is proposed with a series of investigations comparing a conventional method with the proposed modified method. The performance of the proposed method is evaluated for internal and external faults of a power transformer having the voltage rating of 345/154kV. EMTP-RV is used for the relaying data collection.

Key Words : Differential relay, CT saturation, Operating region, Transformer protection

1. 서 론

전력용 변압기에서 고장이 발생하였을 때 보호 계전기가 동작하지 않아 설비 피해가 확대되거나, 잘못된 동작으로 배후계통에 불필요한 정전 피해를 일으키게 되면, 전력 공급 신뢰도 유지 및 설비 안전 확보에 큰 어려움이 있다. 그러므로 보호 계전기는 보호 대상의 고장 유무를 정확히 판단하여 동작하는 것이 매우 중요하다.

전력용 변압기의 보호에는 전류비율차동 계전방식이 주로 사용된다. 전류비율차동 계전방식은 동작전류와 억제전류의 비율로 고장을 판단하는 방식이며, 동작전류와 억제전류는 일반적으로 보호 대상의 입·출력단 전류의 스칼라 합과 벡터 합으로 계산된다. 변압기 보호용 전류비율차동 계전기의 동작영역은 소전류 영역과 대전류 영역으로 구분되는데, 소전류 영역은 변류기에 의한 오차를 고려하고, 대전류 영역은 변류기 포화를 고려하여 정정한다. 이처럼 전류비율차동 계전기는 변류기 오차에 의한 영향을 크게 받으므로, 계전기의 동작영역 정정시 변류기의 특성을 정확히 반영해야 한다.

변류기의 2차측 전류는 1차측 전류에 의해 발생된 자속에 비례하여 생성된다. 하지만 변압기 외부 고장시 큰 고장전류가 발생하여 변류기가 포화하면 변류기 2차측 전류가 1차측 전류에 비례하여 증가하지 않게 되고, 이로 인한 차전류에 의해 계전기가 오동작 할 수 있다. 이와 같은 변류기 포화에 의한 오동작을 방지하기 위해 전류비율차동 계전기의

동작영역은 대전류 영역에서 계전기의 동작 감도를 낮추는 방향으로 정정된다.

변압기 보호용 전류비율차동 계전기의 설정 동작영역 특성은 크게 두 가지로 구분되는데, 첫 번째는 소전류 영역의 낮은 기율기의 직선과 대전류 영역의 높은 기율기의 직선이 직접 만나는 모양이고[1], 두 번째는 소전류 영역과 대전류 영역의 두 직선 사이에 일정한 윗셋이 존재하는 모양이다[2].

본 논문에서는 두 설정 방법을 비교 분석하여, 변압기 보호용 전류비율차동 계전기의 동작 영역을 보다 정확히 정정할 수 있는 방안을 제시하였다. 억제전류와 동작전류로 표현된 기존의 전류비율차동 계전기의 동작영역을 보다 효과적으로 분석하기 위해 입력전류와 출력전류의 관계로 변환하는 방법을 제시하였다.

사례연구를 위해 EMTP-RV를 이용하여 변압기를 포함한 전력 계통을 모델링 하였으며, 비선형 자화특성을 반영할 수 있는 변류기 모델을 사용하여 변류기 포화 현상을 모의하였다.

2. 변압기 보호용 전류비율차동 계전기

전류차동 계전기는 보호 대상의 입력전류와 출력전류를 측정하여 두 전류가 같지 않을 때 동작하는 계전기로, 보호 대상과 변류기의 다양한 오차 요인에 의해 계전기가 오동작 및 오부동작할 가능성이 있다. 전류비율차동 계전기는 이러한 단점을 보완하기 위해 전류차동 계전기에 억제코일과 동작코일을 설치하여 각 코일에 흐르는 전류의 비가 일정값 이상일 때 동작하도록 만든 계전기이다[3].

그림 1은 일반적인 기계식 전류 비율차동 계전기의 등가 회로를 나타낸 것이다.

* 준 회원 : 명지대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 명지대 전기공학과 교수·공학

E-mail : shkang@mju.ac.kr

접수일자 : 2010년 8월 16일

최종완료 : 2010년 11월 18일

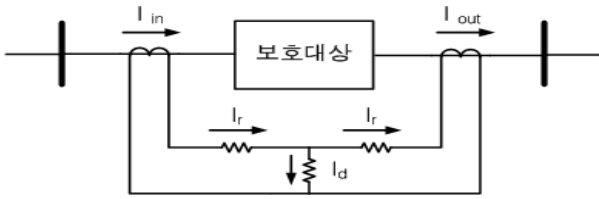


그림 1 전류 비율차동 계전기의 등가 회로
 Fig. 1 The equivalent circuit of a percentage current differential relay

전류비율차동 계전기의 동작전류와 억제전류는 식(1), (2)와 같이 계산되며[4], 일반적인 동작영역은 그림 2와 같다. 각 식에서 각 전류는 변류기 2차측 전류이다.

$$I_d = I_{in} - I_{out} : \text{동작전류(변류기 2차측 전류)} \quad (1)$$

$$I_r = I_{in} + I_{out} : \text{억제전류(변류기 2차측 전류)} \quad (2)$$

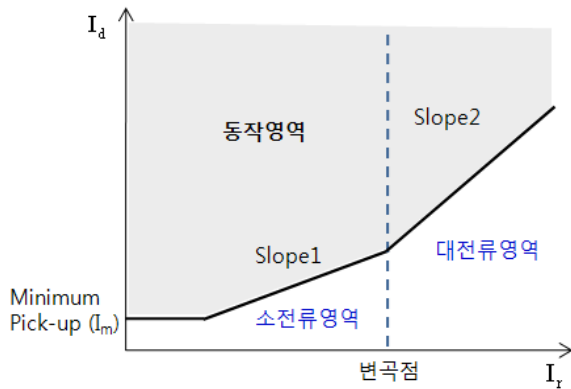


그림 2 전류 비율차동 계전기의 동작영역
 Fig. 2 Operating region of a percentage current differential relay

전류비율차동 계전기의 동작영역은 소전류 영역과 대전류영역으로 구분된다. 이 중 소전류 영역은 minimum pick-up과 Slope1으로 구성되는데, minimum pick-up은 변압기의 자화전류 등 상시오차를 고려한 것이고, Slope1은 변류기 및 계전기 오차를 고려한 것으로 각 오차요인에 의해 계전기가 오동작하지 않도록 설정된다. 대전류 영역의 기울기(Slope2)는 외부 고장시 변류기 포화에 의한 차전류로 계전기가 오동작하지 않도록 동작감도를 낮추는 방향으로 설정된다.

일정한 단면적을 갖는 변류기의 철심은 변류기를 관통하는 전류에 따라 일정한 자속을 갖는다. 철심의 자속은 관통하는 전류의 크기에 비례하여 증가하게 되는데, 전류가 일정값 이상 크게 증가하면 자속이 전류에 비례하여 증가하지 않는 포화 현상이 나타난다.[5]

전류비율차동 계전기의 경우 변류기의 포화 현상이 계전기의 동작에 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 계전기의 정정시 변류기의 포화 특성을 정확히 반영하는 것이 매우

중요하다.

3. 전류비율차동 계전기 동작 영역 변환

일반적인 변압기 보호용 전류비율차동 계전기의 동작영역은 그림 3과 같이 Slope1과 Slope2가 변곡점에서 만나는 특성을 갖는다.

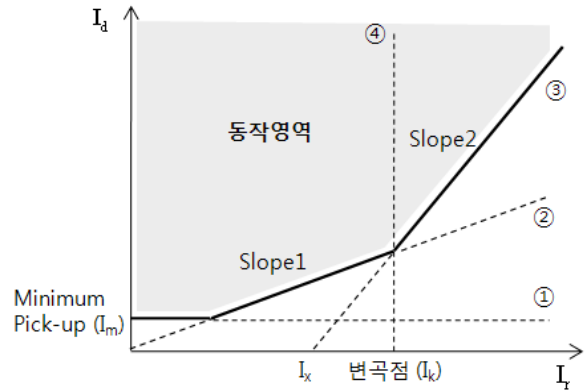


그림 3 일반적인 비율차동 계전기의 동작 영역 (동작전류-억제전류 영역)
 Fig. 3 Conventional operating region of a percentage current differential relay (operating-restraint current domain)

본 논문에서는 동작전류(I_d)와 억제전류(I_r)로 표현된 동작영역을 그림 3과 같이 4개의 직선으로 구분하고, 각 직선식에 식(1)과 (2)를 대입하여 입력전류(I_{in})와 출력전류(I_{out})의 관계로 동작영역을 분석하였다.

그림 3에서 직선②, ③의 기울기 K_1 , K_2 와 직선④의 변곡점(I_k)은 변압기와 변류기 및 계전기의 오차특성에 의해 결정된다.

$$\textcircled{1} \quad I_d = I_m = I_{in} - I_{out} \Rightarrow I_{out} = I_{in} - I_m \quad (3)$$

$$\textcircled{2} \quad I_d = K_1 I_r \Rightarrow I_{out} = \frac{(1-K_1)}{(1+K_1)} I_{in} \quad (4)$$

$$(0 \leq K_1 \leq 1)$$

$$\textcircled{3} \quad I_d = K_2 (I_r - I_x) \Rightarrow I_{out} = \frac{(1-K_2)}{(1+K_2)} I_{in} + \frac{K_2}{(1+K_2)} I_x \quad (5)$$

$$(0 \leq K_2 \leq 1)$$

$$\textcircled{4} \quad I_r = I_k = I_{in} + I_{out} \Rightarrow I_{out} = -I_{in} + I_k \quad (6)$$

그림 4는 일반적인 비율차동 동작영역을 식(3)~(6)을 이용하여 입력전류(I_{in})와 출력전류(I_{out})의 관계로 도식한 것이다.

입력전류-출력전류로 표현된 동작 영역은 $I_{in}=I_{out}$ 인 직선을 기준으로 대칭적으로 존재하여야 한다. 입력전류-출력전류 영역에서는 직선④의 위쪽이 대전류 영역에 해당한다.

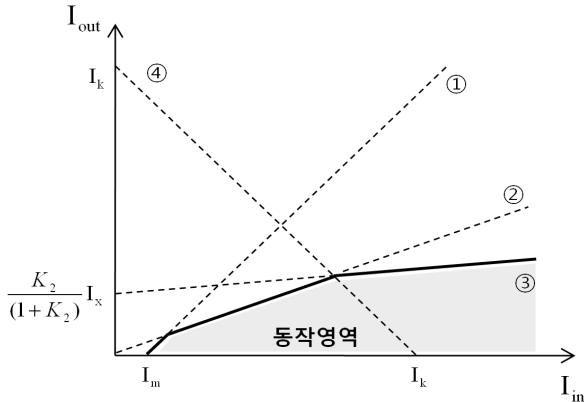


그림 4 일반적인 비율차동 계전기의 동작 영역 (입력전류-출력전류 영역)

Fig. 4 Conventional operating region of a percentage current differential relay (input-output current domain)

4. 입력전류-출력전류 영역에서의 변류기 포화 특성

외부 고장에 의해 큰 고장 전류가 발생하여 보호대상의 한 변류기가 포화되면 (출력측 변류기 포화의 경우) 그림 5와 같이 전류차동계전기 입장에서는 피보호 기기의 입력 측 전류(I_{in})는 증가하나 출력측 전류(I_{out})는 증가하지 않는 것으로 된다. 이와 같이 포화가 발생하는 경우 변압기의 외부고장임에도 큰 차전류가 발생하여 계전기가 오동작할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 전류 비율차동 계전기의 동작 영역은 포화가 발생하는 영역을 부동작 영역으로 설정해야 한다. 그림 5는 이와 같은 경우를 위해 I_x' 이하의 영역을 동작 영역으로 설정한 그림이다. 변압기 입력측의 변류기가 포화되는 경우에도 동일한 원리를 적용할 수 있다.

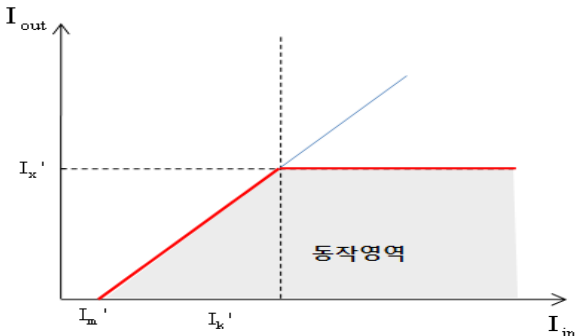


그림 5 변류기 포화시 입력전류-출력전류 영역에서의 동작 특성 1

Fig. 5 The Input-Output current characteristic 1 for CT saturation

그림 5는 변류기 및 계전기의 오차를 무시하고, 출력측이 완전히 포화한 경우를 고려한 경우이다. 실제로는 변류기 및 계전기의 오차가 존재하고, 변류기가 완전히 포화하지 않아 변류기 1차전류가 증가하면 변류기 2차전류 또한 어느 정도 증가한다. 따라서 비율차동 동작영역의 기울기 및 두

직선이 만나는 변곡점을 변류기 포화특성에 따라 결정하는 것이 매우 중요하다.

고장전류에 직류 오프셋 성분이 포함될 경우 입·출력전류의 특성이 다르게 나타날 수 있다. 그림 6은 직류 오프셋 성분을 포함한 고장전류에 의해 변류기가 포화된 경우 변류기의 2차측 전류를 도시한 것이다. 이 경우 고장 후 첫 주기보다 두 번째 주기에서 변류기가 심하게 포화되기 때문에, 포화되지 않은 입력측 전류의 증가시 변류기 포화정도에 따라 포화된 출력측 전류가 감소하는 특성이(혹은 그 반대의 경우가) 나타날 수 있다. 그림 7은 입력측 전류의 증가시 출력측 전류가 감소하는 경우 계전기의 입력전류-출력전류 특성을 도시한 것이다.

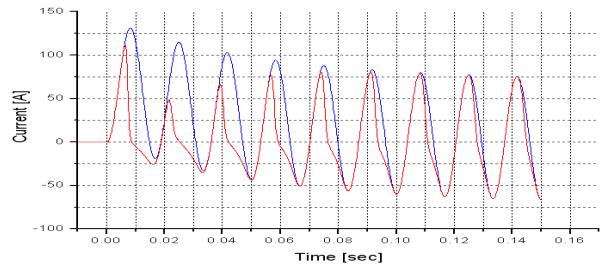


그림 6 직류 오프셋 성분에 의한 변류기 포화

Fig. 6 CT saturation by DC offset component

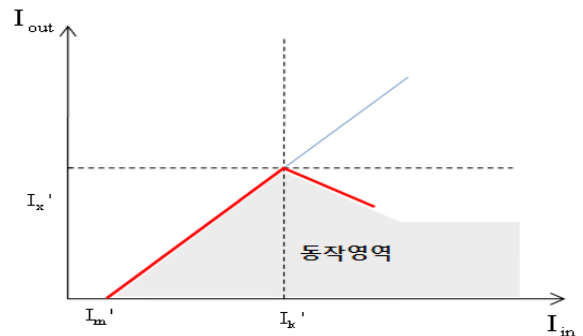


그림 7 변류기 포화시 입력전류-출력전류 영역에서의 동작 특성 2 (DC offset 포함)

Fig. 7 The Input-Output current characteristic 2 for CT saturation (with DC offset)

5. 변형된 전류비율차동 계전기 동작 영역

최근 일부 변압기 보호용 비율차동 계전기는 그림 8과 같은 변형된 동작영역을 사용한다. 변형된 전류비율차동 동작 영역은 Slope1과 Slope2 사이에 일정한 오프셋을 두는 특성이 있는데, 이것은 일반적인 비율차동 동작영역 보다 대전류 영역에서 계전기의 동작감도를 더 낮게 하여, 변류기 포화에 의한 오동작을 최대한 방지하기 위한 것으로 판단된다.

일반적인 동작영역과 마찬가지로 변형된 동작영역의 특성을 쉽게 이해하기 위해 동작전류(I_d)와 억제전류(I_r)로 표현된 그림 8의 동작 영역을 본 논문에서 사용하는 입력전류(I_{in})와 출력전류(I_{out})의 관계로 나타내면 그림 9와 같다. 이는 앞의 3절에서와 같이 동작전류(I_d)와 억제전류(I_r)로 표현

된 동작 영역을 4개의 직선으로 구분하고, 각 직선식에 식 (1)과 (2)를 대입하여 입력전류(I_{in})와 출력전류(I_{out})의 관계로 변환한 것이다.

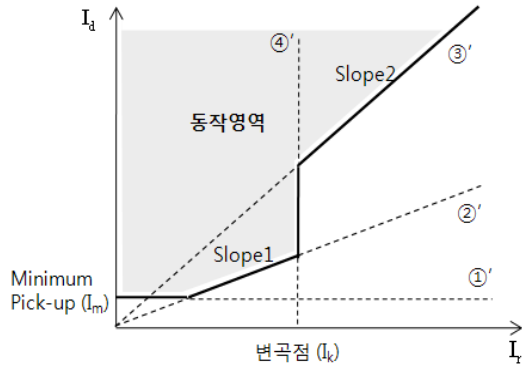


그림 8 변형된 비율차동 계전기의 동작 영역 (동작전류 - 억제전류 영역)

Fig. 8 Modified operating region of a percentage current differential relay (operating - restraint current domain)

$$①' \quad I_d = I_m = I_{in} - I_{out} \Rightarrow I_{out} = I_{in} - I_m \quad (7)$$

$$②' \quad I_d = K_1 I_r \Rightarrow I_{out} = \frac{(1 - K_1)}{(1 + K_1)} I_{in} \quad (8)$$

$(0 \leq K_1 \leq 1)$

$$③' \quad I_d = K_2 I_r \Rightarrow I_{out} = \frac{(1 - K_2)}{(1 + K_2)} I_{in} \quad (9)$$

$(0 \leq K_2 \leq 1)$

$$④' \quad I_r = I_k = I_{in} + I_{out} \Rightarrow I_{out} = -I_{in} + I_k \quad (10)$$

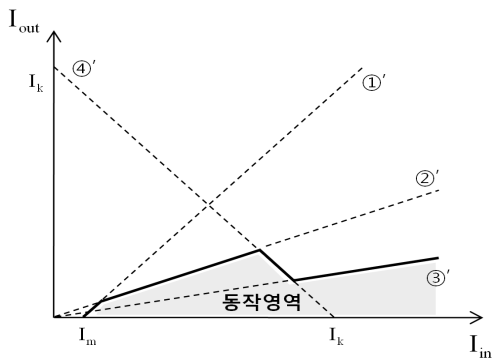


그림 9 변형된 비율차동 계전기의 동작 영역 (입력전류-출력전류 영역)

Fig. 9 Modified operating region of a percentage current differential relay (input-output current domain)

그림 9를 보면, 변형된 비율차동 계전기 동작영역은 변압기 출력측의 변류기 포화시 입력측 전류의 증가에 따라 출력측 전류가 증가하지 않는 경우뿐만 아니라, 직류 옵셋 성

분에 의해 출력측 전류가 감소하는 경우에도 계전기가 오동작하지 않도록 고려한 것을 알 수 있다.

6. 사례 연구

본 논문에서 사용한 전류비율차동 계전기 동작영역 분석법에 따라 추정된 내용을 검증하기 위해 전력계통 과도현상 모의 프로그램인 EMTP-RV를 사용하여 500[MVA], 345/154[kV] 변압기를 포함한 총 50km의 송전선로를 모델링 하였다. 변압기는 단상 변압기 3대를 Y-Y 결선으로 연결하였다. 변압기 내부고장 모의를 위해 EMTP의 보조 프로그램인 BCTRAN을 이용하여 변압기 내부 권선을 분할하였고[6], 변류기 포화 모의를 위해 EMTP의 보조 프로그램인 HYSDAT을 이용하여 변압기 양단 변류기의 히스테리시스 데이터를 생성하였다. 가공 송전선로의 선로정수와 변압기 양단에 설치된 변류기의 데이터는 표 1, 표 2와 같다[7]. 계전 알고리즘의 샘플링 주파수는 960[Hz]로 설정하였고, 중첩(aliasing) 현상을 방지하기 위해 차단주파수 480[Hz]에서 이득이 0.1인 Butterworth 2차 저역통과 필터를 사용 하였다.

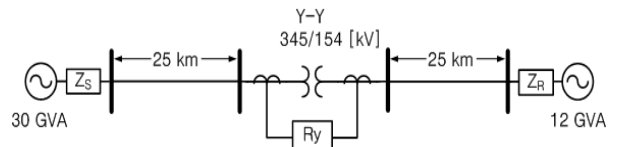


그림 10 모델 계통

Fig. 10 Model system

표 1 송전선로의 파라미터

Table 1 Overhead transmission line parameters

Sequence	Parameter	Value		Unit
		345 kV	154 kV	
Positive Negative	R ₁ , R ₂	0.0175	0.0428	Ω/km
	L ₁ , L ₂	0.7022	0.8792	mH/km
	C ₁ , C ₂	0.0334	0.0117	μF/km
Zero	R ₀	0.1745	0.2380	Ω/km
	L ₀	2.1851	3.0924	mH/km
	C ₀	0.0090	0.0045	μF/km

표 2 변류기 데이터

Table 2 Current transformer data

	변압기 1차측	변압기 2차측
변류비	1000/5	2000/5
오차계급	C400	C400
권선저항	0.51 [Ω]	1.00 [Ω]
부담	3.14 [Ω]	3.14 [Ω]
포화점	2.047[A], 0.756[V _s]	2.047[A], 1.512[V _s]

변압기 외부 고장시 직류 옵셋에 의한 변류기 포화 특성을 각 동작영역에 반영하기 위해, 변압기 2차측 1km, 5km, 10km, 20km 지점에서 고장 투입 위상각이 0°인 3상 단락 고장을 모의하였다. 또한 대전류 영역의 동작감도를 낮추는

것이 변압기 내부 고장시 계전기의 동작에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 변압기 내부 A상 권선의 지락 및 단락 고장을 모의하였다. 변압기 내부 권선지락 고장은 권선의 중성점으로부터 5 - 95%지점에서 고장을 모의하였고, 변압기 내부 권선단락 고장은 권선의 50%지점에서 3 - 20%의 층간 단락 고장을 모의하였다.

전류비율차동 계전기의 정정을 위해 일반적인 동작영역은 IEEE Std. 242의 추천값을 사용하였고, 변형된 동작영역은 A사 계전기의 추천값을 사용하였다. 각 동작영역의 정정값은 표 3과 같다.

계전 알고리즘 적용시 억제전류와 동작전류의 계산방법이 다르면 계전기의 궤적이 다르게 나타난다. 본 논문에서 비교하는 두 경우에는 변압기 외부 고장시에는 궤적이 거의 같고, 내부 고장시 다른 궤적이 나타난다. 따라서, 본 논문에서는 동작 감도가 낮아 동작해야할 내부고장에서 오부동작할 가능성이 있는 A사 계전기의 억제·동작전류 계산방법을 적용하여 비교 검증하였다.

표 3 동작 영역 정정값

Table 3 Operating region setting values

	IEEE Standard	A사
억제전류	$(I_1 + I_2)/2$	$\max(I_1, I_2)$
동작전류	$ I_1 + I_2 $	$ I_1 + I_2 $
Minimum Pick-up	0.2 [PU]	0.3 [PU]
Slope 1	30%	25%
Slope 2	70%	100%
Knee point	3.0 [PU]	2.0 [PU]

그림 11은 변압기 보호용 계전기가 동작하지 않아야 하는 변압기 2차측 외부 3상 단락 고장시 각 고장거리별 계전기의 동작결과를 보인 것이다. IEEE 표준의 동작영역은 직류 옵셋에 의해 변류기가 포화할 경우, 모든 궤적이 동작영역으로 침범하여 계전기가 오동작하는 것을 알 수 있고, 일정한 옵셋을 둔 A사 계전기의 동작영역은 대전류 영역의 동작감도를 낮춰, 직류 옵셋에 의한 변류기 포화에도 계전기가 오동작하지 않음을 알 수 있다.

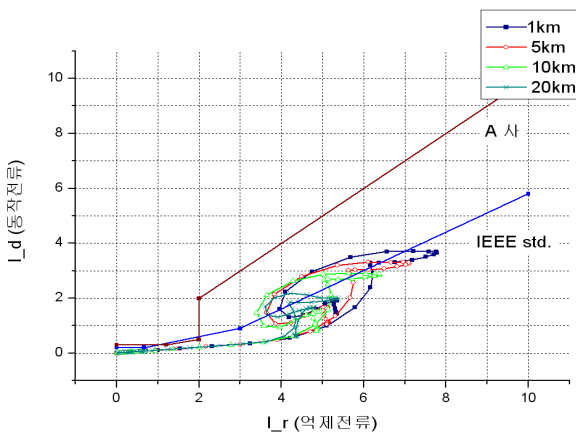


그림 11 변압기 2차측 외부 3상 단락 고장시 동작 비교
Fig. 11 Comparison of the operating characteristics for 3-phase faults at the transmission line

그림 12와 그림 13은 계전기가 정동작해야 하는 변압기 내부고장 모의 결과이다. 변압기 내부 권선지락 고장시에는 두 정정방법 모두 정상적으로 고장을 검출하는 것을 알 수 있지만, 변압기 내부 층간단락 고장시에는 권선의 50% 지점에서 3%의 층간단락 고장이 발생할 경우, 궤적이 A사 계전기의 억제영역을 침범하여 정상적으로 고장을 판별하지 못하여 계전기의 동작이 지연될 수 있다.

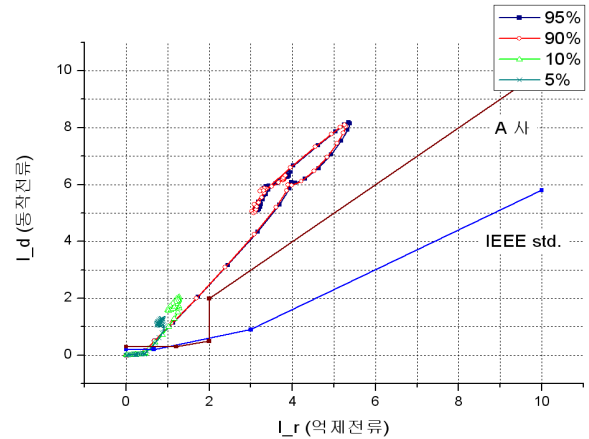


그림 12 변압기 내부 A상 권선 지락 고장시 동작 비교
Fig. 12 Comparison of the operating characteristics for turn-to-ground faults at A phase

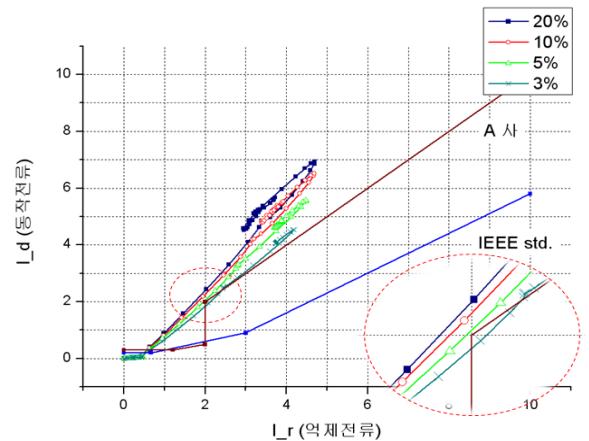


그림 13 변압기 내부 A상 층간 단락 고장시 동작 비교
Fig. 13 Comparison of the operating characteristics for turn-to-turn faults at A phase

변형된 전류비율차동 계전기 동작영역을 적용한 A사 계전기의 경우 대전류 영역의 동작영역을 축소시켜 변류기 포화에 강인하게 대처할 수 있지만, 변압기 내부 고장시 고장 판별 궤적이 억제 영역을 침범할 수 있기 때문에 Slope2의 정정시 이와 같은 내용을 정확히 고려하여야 한다. 반면 일반적인 동작영역은 변압기 내부 고장시에는 매우 정확한 동작을 할 수 있지만, 변류기 포화에는 매우 취약하여 Slope2의 기울기를 매우 크게 정정하여야 한다.

7. 결 론

본 논문에서는 변압기 보호용 전류비율차동 계전기의 일반적인 동작영역과 변형된 동작영역을 입력전류-출력전류 영역에서 분석하여 각 동작영역의 동작 특성을 쉽게 파악할 수 있게 하였다. 또한 각 동작특성에 따른 장·단점을 사례연구를 통하여 검증하였고, 효과적으로 동작 영역을 정정하기 위해 고려해야 할 사항들을 제안하였다.

Slope1과 Slope2가 변곡점에서 만나는 일반적인 동작영역의 경우, 변압기 내부 고장시에는 정확한 고장판단을 할 수 있지만, 직류 윗셋성분에 의한 변류기 포화시에는 정확히 고장을 판별하지 못하고 오동작 할 수 있다. 반면, Slope1과 Slope2 사이에 일정한 윗셋을 두는 변형된 비율차동 동작영역은 대전류 영역의 동작영역을 축소하여 직류윗셋에 의한 변류기 포화에는 매우 강인하게 대처할 수 있지만, 변압기 내부 고장시 고장판별 궤적이 억제영역으로 침범하여 계전기의 동작 지연이 발생할 수 있다. 따라서 두 방법 모두 이와 같은 사항을 정확히 고려하여 Slope2의 기울기를 정정하여야 한다.

본 논문을 통하여 변압기 보호용 전류비율차동 계전기의 정확한 동작영역 정정이 가능해지므로, 보호 계전기의 부동작 및 오동작에 의한 피해를 줄여 전력 공급의 신뢰도 및 설비의 안전 확보에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 명지대학교 산업기술연구소의 지원으로 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Std C37.91TM, "IEEE Guide for Protecting Power Transformers", 2008.
- [2] GE Power Management, "745 Transformer Management Relay", Instruction Manual, 2001.
- [3] J. Lewis Blackburn, "Protective Relaying : Principles and Applications", Third Edition, 2006, pp. 289-311.
- [4] 한국전력거래소, "보호계전기 정정기준 수립에 관한 연구 (최종보고서)", 명지대학교 차세대전력기술 연구센터, pp. 209-214, 2003. 6

- [5] Charles I. Hubert, "Electric Machines : Theory, Operating, Applications, and Controls ", 2nd Edition, 2003. pp. 1-84.
- [6] Hatem A. Darwish, Abdel-Maksoud I. Taalab, Hady E. Labana, "Step-by-Step Simulation of Transformer Winding Faults for Electromagnetic Transient Programs", Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, pp. 177-182 May 2006.
- [7] IEEE Std 242, "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems", 2001

저 자 소 개



김 수 환 (金 秀 桓)

1981년 8월 14일생. 2008년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 포스코ict 스마트그리드팀

Tel : (031) 779-1847

Fax : (031) 779-2709

E-mail : kshcw@poscoict.com



강 상 희 (姜 相 熙)

1962년생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수

Tel : (031) 330-6364

Fax : (031) 330-6816

E-mail : shkang@mju.ac.kr