

변류기 전류보상 알고리즘을 이용한 모선보호용 전류 차동계전 알고리즘

論 文

49A-9-3

A Current Differential Relaying Algorithm for Bus Protection Using a Compensating Algorithm of Secondary Currents of CTs

姜 龍 澈* · 尹 在 晟** · 金 東 龍***

(Yong-Cheol Kang* · Jae-Sung Yun** · Dong-Yong Kim***)

Abstract - A conventional variable percentage current differential relaying algorithm for bus protection may misoperate for external faults with severe CT saturation and internal faults with high impedance. This paper proposes a percentage differential current relaying algorithm for bus protection combined with a compensating algorithm of secondary currents of CTs. Even though CTs are saturated and their secondary currents are severely distorted, the proposed relaying algorithm does not only misoperate for external faults with CT saturation but also detects the internal faults with high fault impedance. Thus, the method improves the sensitivity of the relays and does not require any counterplan for CT saturation.

Key Words : Percentage current differential relaying algorithm, CT saturation, Compensating algorithm, Sensitivity

1. 서 론

모선 보호용으로 사용되는 전류차동 계전방식(current differential relaying)은 모선에 연결되어 있는 송전선의 변류기 2차 전류를 계전기에서 받아 들여 차동전류(differential current)를 계산하고, 계산된 차동전류가 설정된 값보다 크면 모선에서 사고가 발생했다고 판단하는 방식이다. 그런데, 실제로는 여러 가지 오차를 감안하여 차동전류가 억제전류에 비례하여 동작여부를 결정하는 비율 전류차동 계전방식(percentage current differential relaying)을 사용한다.

그런데, 비율 전류차동 계전방식은 심한 외부사고가 발생하여 변류기가 포화되는 경우에, 차동전류가 감지되어 내부 사고가 아닌 데도 내부사고로 잘못 인식하는 문제점이 있다. 따라서, 외부사고 시 변류기 포화 문제에 대한 별도의 대책을 반드시 마련해야 하는데, 현재까지는 이에 대한 확실한 대책이 없었으므로, 대전류 영역에서 동작영역을 축소한 가변비율 전류차동 계전방식(variable percentage current differential relaying)을 사용하여 왔다.

가변비율 전류차동 계전방식의 경우에 대전류 영역에서의 동작영역을 너무 많이 축소하게 되면 계전기의 성능이 저하되기 때문에, 동작영역을 심하게 축소할 수 없다. 따라서, 외부사고시 변류기가 심하게 포화되면 계전기가 잘못 동작할 가능성이 여전히 존재하므로, 이에 대한 별도의 대책을 반드시 마련해야 한다. 또한, 이 방식은 대전류 영역에서 동작 영역이 축소되었기 때문에 중부하시 고저항 내부사고가 발생한 경우에 계전기가 동작하지 않을 수가 있다.

가변비율 전류차동 계전방식과 같이 사용되는 변류기 포화에 대한 대책으로 몇 가지 방식이 제안되었다.[1,2] 1980년대 후반에 일본의 도시바에서, 변류기 포화 시에 발생한 차동전류와 내부사고 시에 발생하는 차동전류 사이에 파형의 차이점을 이용한 파형판별법을 개발하였다.[1] 하지만, 이 방법은 파형을 판별하는 데 시간이 요구되고, 전원의 시정수가 크면 적용하기 어려운 문제점이 있다. 따라서, 1990년대 초에 1000 [kV] 변전소 모선 보호용 계전방식의 경우, 변류기 포화에 대한 만족할 만한 대책이 없었으므로, 철심 변류기 대신 근본적으로 포화 현상이 없는 공심변류기(air-cored CT)를 사용하여 모선 보호용 비율 전류차동 계전 방식을 구현하였다.

가변비율 전류차동 계전방식은, 변류기 포화로 인하여 왜곡된 전류를 처리할 수 있는 방법이 없기 때문에 차선택으로 사용하는 방식이다. 따라서, 변류기 포화 시 왜곡된 전류를 복원할 수 있다면 동작영역이 넓은 비율 전류차동 계전방식을 구현할 수 있다. 최근 변류기가 포화되어 2차 전류가 왜곡되었을 때 변류기의 자화곡선을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류로 보상하는 알고리즘이 개발되었다.[3]

본 논문에서는, 변류기 전류 보상 알고리즘을 이용한 모선 보호용 비율 전류차동 계전방식을 제안한다. 제시한 방식은 변류기 포화시, 계전기의 입력인 전류가 왜곡된다 하더라도, 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있으므로, 외부 사고시 변류기가 포화되어 변류기 전류가 왜곡되어도 동작하지 않을 뿐만 아니라, 가변비율 전류차동 계전방식에서 변류기 포화대책으로 축소되었던 대전류 영역에서 동작 영역을 확대가능하다. EMTP(Electromagnetic Transient Program)를 이용하여 사고 데이터를 생성한 후, 기존 방식과 제시한 방식의 성능을 분석하였다.

2. 가변비율 전류차동 계전방식의 성능분석

전류차동 계전방식의 원리를 그림 1에 나타내었다. 그림 1

* 正 會 員 : 全 北 大 工 大 電 子 情 報 工 學 部 專 任 講 師 · 工 博

** 準 會 員 : 全 北 大 工 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

*** 正 會 員 : 全 北 大 工 大 電 子 情 報 工 學 部 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2000年 4月 14日

最 終 完 了 : 2000年 8月 24日

에서 차동전류(differential current, I_d)는 식 (1)과 같이 구하며, 차동전류가 감지되면 내부사고가 발생된 것으로 판단한다.

$$I_d = I_1 - I_2 \quad (1)$$

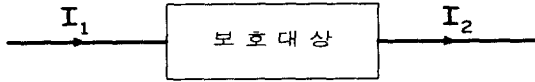


그림 1 전류차동 계전방식의 원리
Fig. 1 Principles of current differential relaying

그런데, 변류기 등의 여러 가지 오차로 인하여 차동전류가 발생할 수 있기 때문에, 실제로는 차동전류가 식 (2)와 같은 억제전류(restraint current, I_r)와 비례하여 동작영역을 결정하는 비율 전류차동 계전방식이 사용되고 있으며, 이를 식 (3)에 나타내었다.

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (2)$$

$$|I_d| > k |I_r| \quad (3)$$

여기서, 기울기 k 는 계전기의 감도를 나타낸다. 즉, k 가 크면 계전기의 감도가 둔하며(insensitive), 동작영역이 작고, k 가 작으면 감도가 좋고(sensitive), 동작영역이 넓다.

그런데, 비율 전류차동 계전방식은 변류기 포화를 수반한 외부사고가 발생하면 차동전류가 감지되어 계전기가 내부사고로 잘못 인식하여 동작하게 된다. 따라서, 외부사고 시 변류기 포화 문제에 대한 별도의 대책을 반드시 마련해야 한다. 하지만, 현재까지는 변류기 포화에 대한 확실한 대책이 없었으므로, 대전류 영역에서 감도를 둔하게 한 가변비율 전류차동 계전방식을 사용하고 있다.

이 방식은 소전류 영역과 대전류 영역의 기울기를 다르게 하는 방식이며, 각 영역에서의 기울기와 여러 가지 파라미터에 따라 달라진다. 이 방식은 설령 내부사고를 인식하지 못하는 부분이 발생하더라도, 외부사고를 내부사고로 잘못 인식하여 계전기가 동작하는 것을 억제하고자 하는 의도이다.

여러 가지 방식 중에서, 본 논문에서는 참고문헌 [4]에서 제시한 방식의 성능을 시험하고자 하며, 이의 특성은 식 (4), 식 (5)로 표현하였으며, 이를 그림 2로 표현하였다.

$$I_r < 2[A] \text{인 경우} \\ I_d > 0.3I_r + 0.2 \quad (4)$$

$$I_r > 2[A] \text{인 경우} \\ I_d > I_r - 1.2 \quad (5)$$

참고문헌 [4]의 방식은 $I_r < 2[A]$ 인 영역에서는 기울기를 0.3으로 한 반면, 대전류 영역 즉, $I_r > 2[A]$ 인 영역에서 기울기를 1로 증가시켜 즉, 감도를 둔하게 하여 동작영역을 축소하였다.

그런데, 이와 같이 동작영역을 설정한 경우에는, 서론에서 언급한 대로, 두 가지 문제점을 가지고 있다. 먼저 외부사고의 경우, 큰 사고전류로 인하여 변류기가 심하게 포화되면, 계전기가 동작영역 안으로 진입할 수 있기 때문에 변류기 포화에 대한 별도의 대책이 필요하다. 또한, 고저항 내부사고가 발생했을 경우에는 축소된 동작영역 때문에, 내부사고를 인식하지 못하여 계전기의 성능이 저하되는 문제점이 있다.

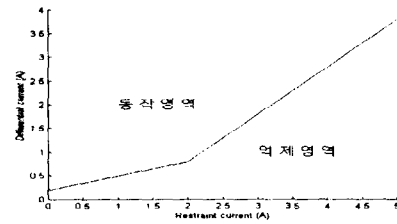
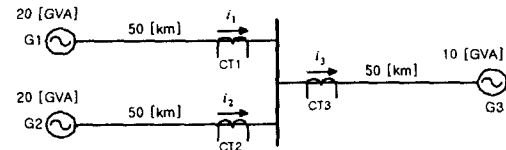


그림 2 가변비율 전류차동 계전방식의 특성
Fig. 2 Characteristics of a variable percentage current differential relaying algorithm

2.1 모델 계통

기존의 계전방식과 제안된 계전방식의 성능을 검토하기 위하여, 세 개의 송전선로가 연결된 모선을 선택하였으며, 이를 그림 3에 나타내었다. 모델 계통의 전압은 345[kV]이고, 주파수는 60[Hz]이다.



송전선로 파라미터

$$R'=0.0345[\Omega/\text{km}], L'=0.9724[\text{mH}/\text{km}], C'=0.0117[\mu\text{F}/\text{km}]$$

전원 임피던스($X1, X0$: 정상, 영상 임피던스)

$$G1: X1 = 0.1578 + j 5.9494 [\Omega] \quad X0/X1 = 0.5$$

$$G2: X1 = 0.1578 + j 5.9494 [\Omega] \quad X0/X1 = 0.5$$

$$G3: X1 = 0.3994 + j 11.896 [\Omega] \quad X0/X1 = 0.5$$

그림 3 모델 계통

Fig. 3 A model system

그림 3의 모델 계통은 송전선의 최대전류가 약 1350[A]로 제한되기 때문에 변류비 1500:5의 철심 변류기를 사용하였고, 부담은 3.42[Ω]인 순 저항 부담을 사용하였다. 4.24[A], 1.48[V]의 포화점을 갖는 변류기를 HYSDAT와 Type 96소자를 사용하여 히스테리시스 특성까지 모델링 하였다.

그림 3의 계통에서 억제전류와 차동전류는 식 (6), 식 (7)과 같다. 본 논문에서는 식 (6), 식 (7)의 억제전류와 차동전류의 순시값으로부터 실효값을 구하여 사고 판단에 사용하였고, 이하 그림에 나타나 있는 모든 억제전류와 차동전류는 순시값이 아닌 실효값이다.

$$i_r = \frac{i_1 + i_2 + i_3}{3} \quad (6)$$

$$i_d = i_1 + i_2 - i_3 \quad (7)$$

2.2 변류기 포화를 수반한 외부사고

그림 4는 CT3의 송전선로측 단자에서 사고저항이 1[Ω]인 3상 단락 사고가 발생한 경우에 CT1, CT2, CT3의 A상 2차 전류를 나타낸다. CT3의 경우는 CT1과 CT2의 전류가 합해져 흐르기 때문에 사고 발생 후 약 9 [ms]후부터 변류기가 심하게 포화되어 전류가 왜곡됨을 알 수 있다. CT1과 CT2는 CT3보다는 다소 늦게 포화되었다.

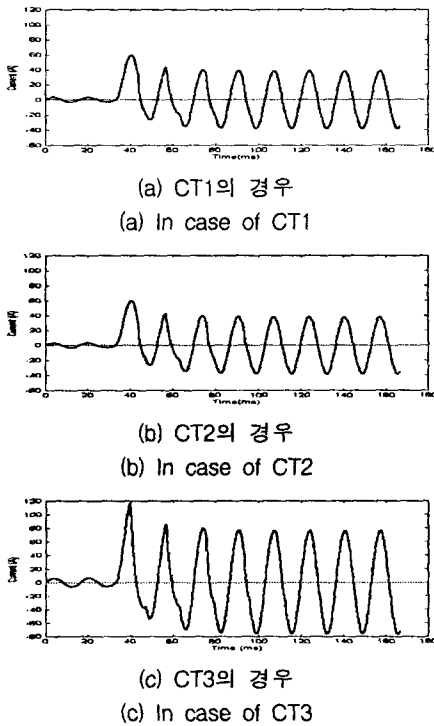


그림 4 변류기 2차 전류
Fig. 4 Secondary currents of CTs

이렇게 왜곡된 2차 전류로 인하여 계전기에서 계산한 차동 전류의 실효값을 그림 5에 나타내었다. 사고 후 약 14[ms]가 지난 후에 35[A]가 넘는 차동전류가 발생함을 알 수 있다.

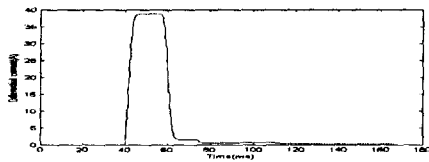


그림 5 변류기 포화에 의한 차동전류
Fig. 5 Differential current due to CT saturation

그림 6은 사고순간부터 억제전류와 차동전류의 쌍을 나타낸 것이다. ‘o’는 사고 직후에서 1.5주기까지, ‘x’는 사고 후 1.5주기에서 3주기까지를 나타낸다. 그림 6에서, 대전류 영역에서 계전기의 감도를 1로 회생하였음에도 불구하고, 사고 후 약 12[ms] 정도 지난 후에 동작영역으로 진입하는 것을 알 수 있다. 따라서, 계전기는 모선사고가 발생하지 않았음에도 불구하고 사고가 발생한 것으로 잘못 판단하게 된다.

2.3 고저항 내부사고 시

가변비율 전류차동 계전방식은 고저항의 내부사고가 발생하면 동작하지 않을 수 있다. 그림 7에, 선로의 조류와 사고저항을 달리하여 모선 사고를 발생시켰을 때, 억제전류와 차동전류의 실효값을 나타내었다.

각 기호(□, △, +, ×)는 전원 G1, G2, G3의 상대적인 위상각을 의미한다. 예를 들면, ‘+’는 발전기 G1, G2의 위상각이 0°, 발전기 G3의 위상각이 -15° 임을 나타낸다. 이는 조류

의 크기를 결정하며, 발전기의 위상각의 차가 클수록 더 많은 조류가 흐른다. 또, 같은 기호 내에서는 기호 하나가 아래로 내려갈수록 사고저항이 150[Ω]에서 500[Ω]까지 25[Ω]씩 증가하고 있음을 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이 조류가 커질수록 왼쪽에서 오른쪽으로, 사고저항이 커질수록 위쪽에서 아래로 이동하고 있다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 대전류 영역에서 고저항 내부사고가 발생하면 동작영역 안으로 들어오지 않아, 이러한 사고는 계전기에서 내부사고로 인식할 수 없게 되므로, 계전기의 성능이 저하된다.

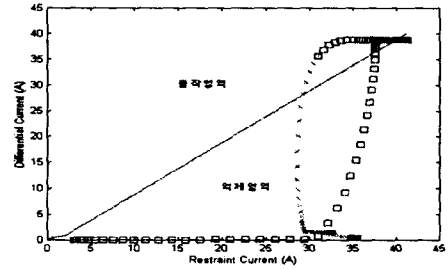


그림 6 변류기가 포화된 경우 계전기의 동작
Fig. 6 Relay's performance when CTs are saturated

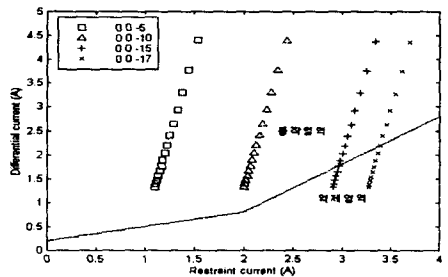


그림 7 고저항 내부사고 시 억제전류와 차동전류
Fig. 7 Restraint and differential currents for high-impedance internal faults

3. 보상 알고리즘을 결합한 비율 전류차동 계전방식

가변비율 전류차동 계전방식은 변류기가 포화되는 문제를 확실하게 해결 할 수 없기 때문에 차선택으로 선택한 방법이다. 본 논문에서는 변류기 포화 문제를 해결하기 위하여 참고 문헌 [3]에서 제시한 철심 변류기 2차 전류 보상알고리즘을 적용하여 비율 전류차동 계전방식으로 구현하였다.

3.1 변류기 2차 전류 보상 알고리즘의 적용 [3]

변류기 2차 전류 보상 알고리즘의 원리는 참고 문헌 [3]에 자세히 나와 있어, 본 논문에서는 간단히 소개한다.

step 1: 자속쇄교(flux linkage) $\lambda(t)$ 계산

$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + R \int_{t_0}^t i_2(t) dt + L[i_2(t) - i_2(t_0)] \quad (8)$$

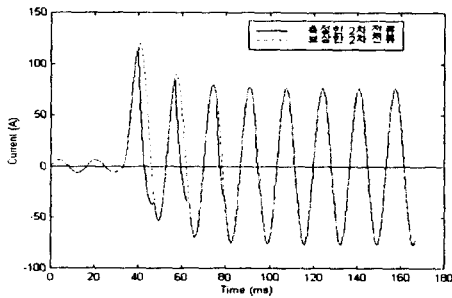
여기서, $i_2(t)$ 는 2차전류이고, R , L 은 각각 2차회로의 전체 저항, 전체 인덕턴스이다.

step 2: 자화곡선으로부터 $\lambda(t)$ 에 해당하는 자화전류 $i_m(t)$ 계산

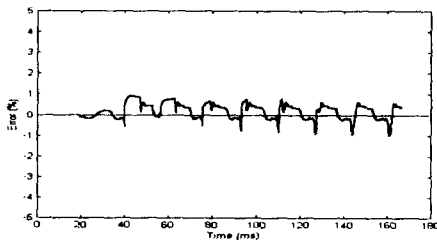
step 3: 변류비에 맞는 2차 전류 $\frac{1}{n} i_1(t)$ 추정

$$\frac{1}{n} i_1(t) = i_2(t) + i_m(t) \quad (9)$$

이러한 보상 알고리즘을 이용하면 변류기가 포화되었을지라도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있다. 그림 4a, 그림 4b, 그림 4c의 왜곡된 전류를 보상 알고리즘을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였고, 그 중 CT3 경우의 보상한 2차 전류와 변류비 오차를 그림 8에 나타내었다.



(a) 측정된 2차 전류와 보상한 2차 전류
(a) Measured and compensated secondary currents



(b) 변류비 오차
(b) Ratio error

그림 8 CT3의 보상한 2차 전류와 변류비 오차
Fig. 8 Compensated secondary current of CT3 and ratio error

3.2 비율 전류차동 계전방식으로 동작영역 확대

가변비율 전류차동 계전방식은 변류기 포화로 인한 계전기의 오동작을 억제하기 위하여 대전류 영역에서 계전기의 감도를 희생한 방식이었다. 본 논문에서는 전류보상 알고리즘을 이용하였기 때문에 대전류 영역에서 계전기의 감도를 희생할 필요가 없으므로, 대전류 영역에서 감도를 회복하여 계 동작영역을 확대한 비율 전류차동 계전방식을 제시한다.

본 논문에서는 모든 영역에서 기울기를 0.3으로 선택하여 비율 전류차동 계전방식을 구현하였다. 이 기울기를 어떻게 정하느냐 하는 것은 본 논문의 범위를 벗어나므로 생략한다. 이는 많은 사례 연구를 통하여 다른 값으로 결정될 수 있다.

그림 9는 확대된 동작영역과 고저항 내부사고의 결과를 보여준다. 0.3의 기울기를 가지고 비율 전류차동 계전방식으로 구현하면, 기존 방식이 감지할 수 없었던, 조류가 큰 상태에서의 고저항 내부사고를 인식할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 성능 분석

기존의 가변비율 전류차동 계전방식과 제안된 비율 전류차동 계전방식의 성능을 비교하였다. 사례 1, 사례 2는 변류기 포화를 수반한 외부사고의 예를, 사례 3은 고저항 내부사고의 예를 보였다.

각각의 그림에서 (a)는 기존의 가변비율 전류차동 계전방식의 경우이며, (b)는 제안된 방식의 경우이다.

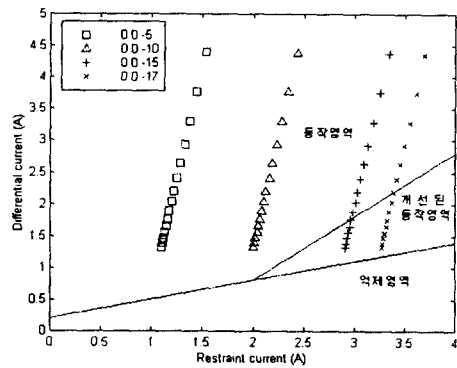
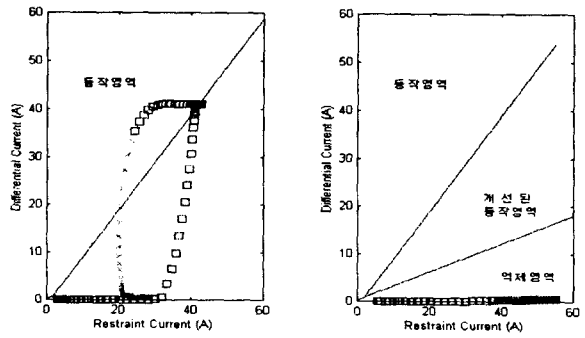


그림 9 제시한 방식의 특성과 내부사고의 결과
Fig. 9 Characteristics of the proposed method and results for internal faults

3.3.1 사례 1: CT3의 단자에서의 외부사고(0° 사고)

그림 10은 사례 1의 경우에 계전기의 동작을 나타내었다. 기존의 방식의 경우에 외부사고가 발생하여 변류기가 포화되었기 때문에, 사고 후 약 11[ms] 후에 동작영역 내부로 진입하는 것을 알 수 있다. 그런데, 제안된 방식에서는, 왜곡된 전류가 변류비에 맞는 전류로 보상되었기 때문에 차동전류가 거의 발생하지 않아, 동작영역을 확대했음에도 불구하고 동작영역 내부로 진입하지 않음을 알 수 있다.



(a) 기존의 방식 (b) 제안된 방식
(a) A conventional method (b) The proposed method

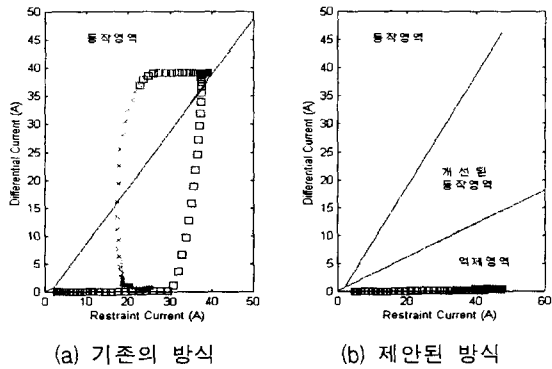
그림 10 사례 1에서 계전기의 동작
Fig. 10 Relay's performance in case 1

3.3.2 사례 2: CT3의 단자에서 5km 떨어진 지점에서의 외부사고(0° 사고)

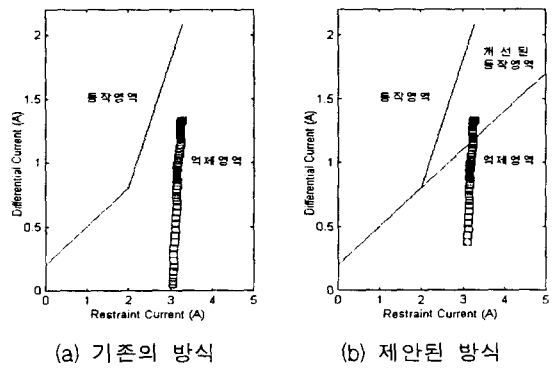
사례2의 경우에서도, 그림 11에서 나타난 바와 같이, 기존의 방식의 경우 그림 11(a)와 같이 동작영역 안으로 들어감을 알 수 있고, 제안된 방식의 경우는 동작하지 않음을 그림 11(b)를 통하여 알 수 있다.

3.3.3 사례 3: 모선에서 발생한 500[Ω] 내부사고

사례 3의 경우에는, 그림 12에서 기존의 계전방식의 경우에는 그림 12(a)와 같이 계전기의 동작영역 외부에 존재하기 때문에 계전기는 내부사고를 인식할 수 없다. 하지만, 제안된 계전방식의 경우에는 그림 12(b)와 같이 동작영역이 확대되었기 때문에, 계전기는 내부사고를 인식할 수 있게 된다.



(a) 기존의 방식 (a) A conventional method (b) 제안된 방식 (b) The proposed method
 그림 11 사례 2에서 계전기의 동작
 Fig. 11 Relay's performance in case 2



(a) 기존의 방식 (a) A conventional method (b) 제안된 방식 (b) The proposed method
 그림 12 사례 3에서 계전기의 동작
 Fig. 12 Relay's performance in case 3

4. 결 론

본 논문에서는 변류기 전류 보상 알고리즘을 결합한 비율 전류차동 계전 방식을 제안하였다. 변류기 2차 전류 보상 알고리즘을 적용하여 변류기 포화를 수반한 외부사고 시 계전기가 잘못 동작하는 문제를 해결하였다. 또한, 비율전류차동 계전방식으로 구현하여 대전류 영역에서 계전기의 감도를 회복하여 고저항 내부사고의 경우에도 사고를 인식할 수 있도록 하였다.

기존의 가변비율 전류차동 계전방식은 동작영역이 작고, 변류기 포화에 대한 별도의 대책이 필요하지만, 제안된 계전방식은 변류기 포화에 대한 별도의 대책이 필요하지 않을 뿐만 아니라, 비율 전류차동 계전방식이기 때문에 기존의 계전방식에 비하여 동작영역이 더 넓어 성능이 우수하다.

감사의 글

본 연구(관리번호: 98-060)는 한국전력공사의 지원에 의해 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음

참 고 문 헌

[1] 보호 릴레이 시스템 기본 기술체계, 일본전기학회

기술보고, 제 641호, 1997년 7월

[2] G.Hosemann, H.M.Steigerwald, "Modal Saturation Detector for Digital Differential Protection", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 933-940, July 1993.
 [3] Y.C. Kang, J.K. Park, S. H. Kang, A. T. Johns, R.K.Aggarwal, "An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, no. 1, pp. 097, January 1997.
 [4] H.Y.Li, E.P.Southern, P.A.Crossley, S.Potts, S.D.A.Pickering, B.R.J.Caunce, G.C.Weller, "A New Type of Differential Feeder Protection Relay Using the Global Positioning System for Data Synchronization", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, no. 3, pp. 1090-1097, July 1997.

저 자 소 개



강 용 철 (姜 龍 撤)
 1964년 8월 2일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1999년 3월~현재 전북대학교 전자정보공학부 전임강사

Tel : 063-270-2391

E-mail : yckang@moak.chonbuk.ac.kr



윤 재 성 (尹 在 晟)
 1971년 4월 25일생. 1997년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 3월~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

E-mail : hana42@moak.chonbuk.ac.kr



김 동 용 (金 東 龍)
 1945년 7월 31일생. 1967년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 캐나다 마니토바 대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1975년~현재 전북대학교 전자정보공학부 교수. 1998년~현재 전북대학교 부속 전기전자회로합성연구소장

Tel : 063-270-2395

E-mail : kimdy@moak.chonbuk.ac.kr