

전압-전류 추이와 자속-차전류 기울기 특성을 이용한 변압기 보호계전기법의 성능 개선

論 文

53P-2-1

Performance Improvement of Protective Relaying for Large Transformer by Using Voltage-Current Trend and Flux-Differential Current Slope Characteristic

朴 哲 圓* · 朴 載 世** · 鄭 然 萬*** · 河 炅 在[§] · 申 明 澈^{§§}

(Chul-Won Park · Jae-Sae Park · Yun-Man Jung · Kyung-Jae Ha · Myong-Chul Shin)

Abstract - Percentage differential characteristic relaying(PDR) has been recognized as the principal basis for power transformer protection. Second harmonic restraint PDR has been widely used for magnetizing inrush in practice. Nowadays, relaying signals can contain 2nd harmonic component to a large extent even in a normal state, and 2nd harmonic ratio indicates a tendency of relative reduction because of the advancement of material. Further, as the power system voltage becomes higher and more underground cables are used, larger 2nd harmonic component in the differential current under internal fault is observed. And then, conventional 2nd harmonic restraint PDR exposes some doubt in reliability. It is, therefore, necessary to develop a new algorithm for performance improvement of conventional protective relaying. This paper proposes an advanced protective relaying algorithm by using voltage-current trend and flux-differential current slope characteristic. To evaluate the performance of the proposed algorithm, we have made comparative studies of PDR, fuzzy relaying and DWT relaying. The paper is constructed power system model including power transformer, utilizing the WatATP, and data collection is made through simulation of various internal faults and inrush. As the results of test, the new proposed algorithm was proven to be faster and more reliable.

Key Words : EMTP, fuzzy logic, large transformer protection, magnetizing inrush, percentage differential relaying, wavelet transform

1. 서 론

전력용 변압기 보호를 위해서 CT 특성의 불일치와 변성비에 따른 보조변류기 사용 등을 고려하여 전류비율차동계전기법(Current Percentage Differential Relay : CPDR)이 사용된다. 그런데 기기용 차동보호계전과 달리 변압기에서는 철심의 비선형성 때문에 발생하는 과도여자돌입과 같은 특수한 과도현상이 발생한다. 이로 인한 계전기의 트립 오동작을 방지하기 위하여 감도 저하법, 고조파 억제방식 등이 제안되었다[1,2]. 대부분 여자돌입시 제2고조파 성분이 다량 함유된다는데 착안하여 기본파에 대한 제2고조파의 비율을 이용한 제2고조파 억제방식을 사용하여 내부사고와 여자돌입을 판별하여 트립 오동작을 방지하고 있다. 그런데 변압기 철심 재질의 변화와 변압기 철심이 설계방식의 변화에 따라 여자돌입시에 제2고조파성분이 적게 발생하고 있으며, 계통의 고압화와 지중화에 따라 커패시턴스가 큰 계통일수록 내부사고시에도 제2고조파성분이 많이 포함되는 등 계통 변화에 따른 과도상태 고조파 발생 특성변화로 계전기의

오·부동작을 초래할 수 있다[3~5]. 이런 문제점을 개선하기 위하여 최근에는, 퍼지 논리 및 신경회로망을 이용하는 방법과 쇄교자속비를 이용한 알고리즘 등이 제안되었다[6~8]. 또한, 종래 전류신호만을 이용하는 방법에 전압신호를 추가 포함해서, 전압, 전류의 추이만을 이용한 차동알고리즘이 발표되었다[5]. 그런데 상기 알고리즘에서는, 특이한 여자돌입과 독특한 내부사고인 경우에 신뢰성을 보장할 수 없으며 오·부동작이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 전압, 전류 추이에 의한 알고리즘을 보완하여 특이한 여자돌입과 내부고장을 확실하게 판별할 수 있도록 성능이 개선된 보호알고리즘을 제안하고자 한다. 먼저 전압, 전류 추이를 이용한 알고리즘을 소개한 후, 자속-차전류 기울기 특성에 대한 유도를 통하여 개선된 보호알고리즘을 정립한다. 제안된 개선 기법은 WatATP99 소프트웨어로부터 수집된 여러 가지 데이터[6,12]들을 분석함으로써 타당성을 입증하였으며, 종래의 PDR, 퍼지 논리 알고리즘, 이산 웨이블릿(DWT) 알고리즘과 고장판별시간, 사용된 필터 등 여러 가지 항목에 대하여 비교 검토하였다.

* 終身會員 : 原州大 電氣科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 仁川專門大 電氣科 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 原州大 電子通信科 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 慶南大 컴퓨터工學部 教授 · 工博

§§ 終身會員 : 成均館大 情報通信工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 2月 12日

最終完了 : 2004年 4月 19日

2. 전압, 전류 추이 및 자속-차전류 기울기 특성에 의한 변압기 보호계전기법

2.1 개선된 변압기 고장판별 알고리즘의 도출

본 절의 알고리즘 도출에 사용된 전압 및 전류 데이터들은 3장의 시뮬레이션을 통하여 수집한 것이고, 차전류의 고조파성분에 대한 분석은 DFT를 이용하였다.

2.1.1 전압의 실효치 분석

그림 1은 지락사고시 1차측 3상 전압의 실효치이다. 정상 상태에서의 전압은 3상평형으로 일정하게 흐르다가, 내부 지락사고가 발생하면, 고장이 발생한 상과 고장과 관련된 상은 과도상태가 된다. 일반적으로 사고가 발생한 고장상 단자전압의 실효치는 정상상태일 때 보다 감소하게 된다. 그림 1에서의 고장상은 b상임을 알 수 있다. 내부 단락사고가 발생될 때도 지락사고와 유사하게 사고가 발생한 고장상 단자전압의 실효치는 정상상태일 때 보다 감소하게 된다. 그림 2는 여자돌입시 1차측 3상 전압의 실효치이다. 변압기 1차측을 가압할 때 발생한 여자돌입상태에서는 투입 후, 얼마의 시간이 지난 후에 비로소 정상상태의 전압으로 나타나게 된다. 이때 변압기의 1차측 전압은 전압이 없는 상태에서 전압이 급격하게 증가하게 되는 것을 알 수 있다.

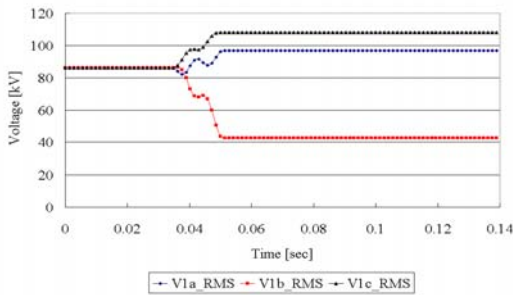


그림 1 지락사고시 1차측 3상 전압의 실효치
Fig. 1 RMS value of 3 phase voltage in primary side under turn to ground fault

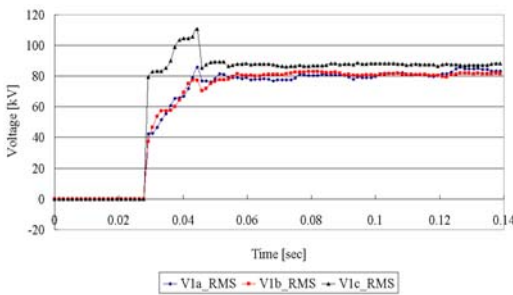


그림 2 여자돌입시 1차측 3상 전압의 실효치
Fig. 2 RMS value of 3 phase voltage in primary side during inrush

2.1.2 차전류의 순시치 분석

보호계전기에서 계기용변성기로부터 입력되는 데이터는 순시치이다. 이들은 사고발생시점과 고장발생위치, 그리고 변압기 투입위상각에 따라 그 양상이 달라지게 되는데, 이에 따라 차전류도 다르게 나타난다. 그림 3은 지락사고시의 3상 차전류 순시치이다. 정상상태에서의 차전류는 발생하지 않거나 약간의 전류가 나타나다가, 내부 지락사고가 발생되면, 과도상태의 고장전류로 인하여 고장과 관련된 상의 순시

차 전류들은 급격하게 상승함으로 인하여 차전류의 순시치는 급격하게 커지게 된다. 내부 단락사고시에도 내부 지락사고와 유사한 특성을 지니게 된다. 그림 4는 여자돌입시의 3상 차전류 순시치이다. 변압기를 1차측에서 가압할 때 발생한 여자돌입상태에서는, 투입 직후 1차측의 전류만이 급격하게 상승하기 때문에 3상 모두에 차전류가 발생하게 된다. 이때 가압하는 전압의 위상각에 따라 여자돌입전류의 크기가 좌우되는데, 투입위상각이 0°인 경우가 가장 크게 나타난다. 한편 주목할 것은 전압의 투입위상각과 관계없이 3상 모든 차전류가 어떤 일정한 시간대에, 그 값이 영점부근의 값을 나타낸다는 것이다. 즉, 약 1/6주기(0.00277[sec]) 인 동안 모두 0에 근접한 값을 나타내는 특징을 갖는다는 것이다.

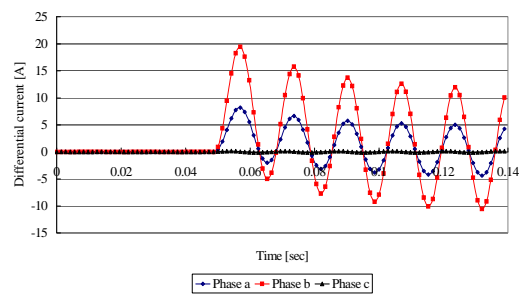


그림 3 지락사고시 3상 차전류
Fig. 3 Three phase differential current under turn to ground fault

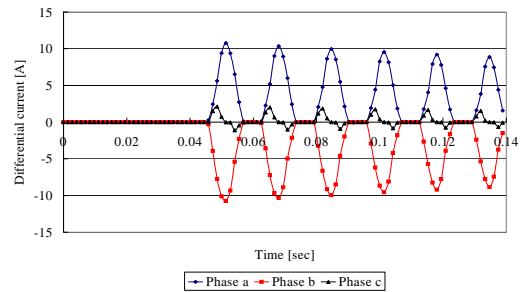


그림 4 여자돌입시 3상 차전류
Fig. 4 Three phase differential current during inrush

2.1.3 차전류의 실효치 분석

그림 5는 지락사고시 3상 차전류의 실효치이다. 정상상태에서의 차전류는 거의 발생하지 않다가 내부 지락사고와 단락사고 등 고장이 발생되면 고장과 관련된 상의 실효치 전류들은 급격하게 상승하기 때문에 이로 인하여 차전류의 실효치도 급격하게 커지게 된다. 일정시간이 지난 후에는 직류유셋성분이 소멸된 상태의 큰 값의 차전류 실효치가 된다. 그림 6은 여자돌입시 3상 차전류의 실효치이다. 여자돌입의 경우, 가압한 변압기 1차측의 전류만이 투입위상각에 따라 3상 모두에 차전류가 급격하게 상승하게 된다. 차전류의 실효치는 차전류의 순시치와는 다르게 그 값이 0인 주기는 없게 되나, 여자돌입전류의 감쇠 특성으로 인하여 실효치의 값이 작아지게 된다.

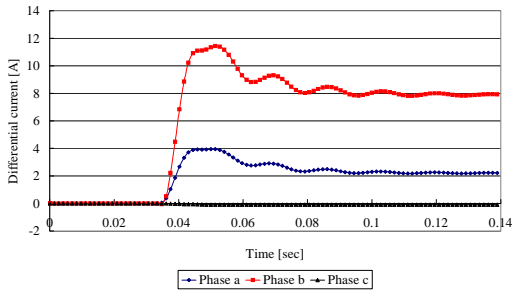


그림 5 지락사고시 3상 차전류의 실효치
 Fig. 5 RMS value of 3 phase differential current under turn to ground fault

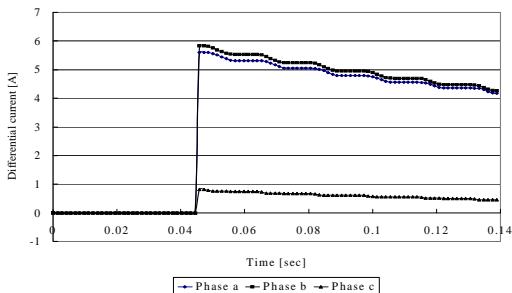


그림 6 여자돌입시 3상 차전류의 실효치
 Fig. 6 RMS value of 3 phase differential current during inrush

2.1.4 차전류의 고조파 분석

그림 7은 지락사고시 a상 차전류의 고조파 비율이다. 내부 지락사고가 발생되면, 고장과 관련된 상에는 기본파의 크기는 상승하게 되며, 제2고조파 및 제5고조파 성분은 일시적으로 커졌다가 감소하게 된다. 이때 제2고조파 및 제5고조파 성분은 약 1주기 동안 과도상태가 지속된다. 단락사고시의 제2고조파 및 제5고조파성분도 지락사고시와 같이 지속 시간이 비슷하다. 그런데 기본파에 대한 제2고조파 비(F2/F1)는 과도상태의 기간을 제외하고 크기가 10%이하로 작다는 것을 알 수 있다. 그림 8은 여자돌입시 a상 차전류의 고조파 비율이다. 가압이 발생되면, 제2고조파 및 제5고조파 성분은, 내부사고의 경우와 다르게, 완전히 사라지지 않고 일정한 정도를 계속 함유하게 된다. 내부사고시에는, 제2고조파와 제5고조파가 기본파에 비하여 매우 작게 함유되나, 여자돌입시에는, 일정하게 함유되는 것을 알 수 있다.

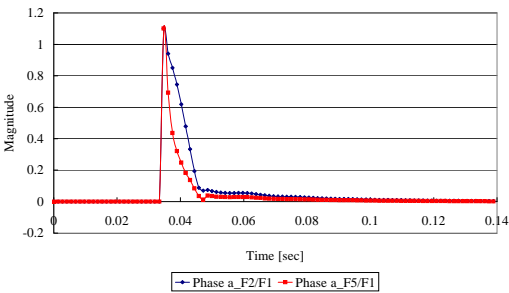


그림 7 지락사고시 a상 차전류의 고조파 비율
 Fig. 7 Harmonic ratio of a phase differential current under turn to ground fault

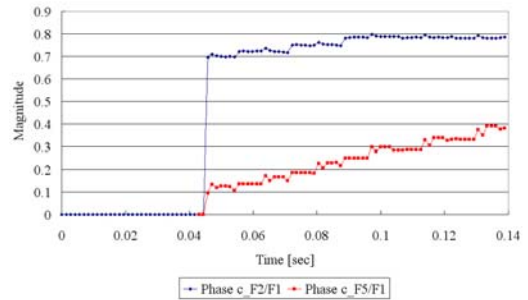


그림 8 여자돌입시 a상 차전류의 고조파 비율
 Fig. 8 Harmonic ratio of a phase differential current during inrush

2.1.5 자속-차전류 기울기 특성 분석

샘플 k의 시점에서의 자속-차전류 평면상의 기울기 $d\psi_k/di_{d,k}$ 는 식(1)과 같이 정의된다[6].

$$\left(\frac{d\psi}{di_d}\right)_k = \frac{\left\{\frac{1}{2}\Delta t(v_{p,k} - v_{p,k-1}) - L_p(i_{p,k} - i_{p,k-1})\right\}}{\{(i_{p,k} - i_{s,k}) - (i_{p,k-1} - i_{s,k-1})\}} \quad (1)$$

여기서, ψ_k 는 자속이고, $i_{d,k}$ 는 차전류이며, 첨자 p와 s는 각각 변압기의 1차측과 2차측을 의미하고, Δt 는 한 샘플의 간격이며, L_p 는 변압기 1차측의 누설 인덕턴스를 의미한다.

그림 9는 내부고장시에 계산된 자속-차전류 기울기 특성이다. 정상상태에서 자속-차전류 기울기값은 대체로 0으로 유지하다가 고장상태가 되면, 자속-차전류 기울기값이 일정한 값 이하(여기서는 -15 정도) 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 그림 10은 여자돌입시의 계산된 자속-차전류 기울기 특성이다. 자속-차전류 기울기값은 -15와 정상상태에서의 값 0의 두 영역사이를 번갈아서 드나들고 있음을 알 수 있다. 따라서 한 샘플윈도우내에서 고장영역에 위치하는 자속-차전류 기울기 값의 샘플개수를 조사하면 내부고장과 여자돌입의 판별이 가능하게 된다.

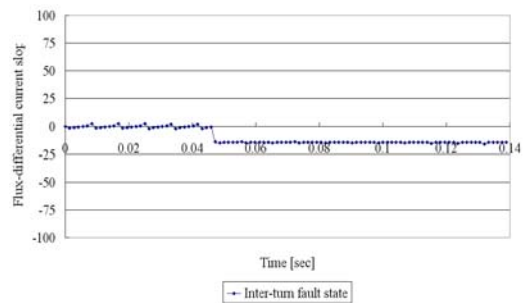


그림 9 내부고장에서의 자속-차전류 기울기값의 시간에 따른 추이
 Fig. 9 Transition characteristics of flux differential current slope under internal fault

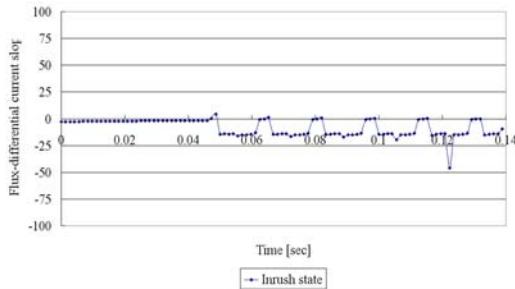


그림 10 여자돌입에서의 자속-차전류 기울기값의 시간에 따른 추이

Fig. 10 Transition characteristics of flux differential current slope during inrush

2.2 개선된 변압기 고장판별 알고리즘

전 절의 전압 및 전류 데이터의 분석을 통하여 다음과 같은 6가지의 규칙을 도출하였다.

규칙 1 : 차전류의 변화

- 1상 또는 2상의 차전류 변화 → 내부사고
- 3상 차전류 변화 → 외란 or 여자돌입

규칙 2 : 변압기 1차측 단자전압의 변화

- 3상중 어떤 상이라도 기준전압에 비해 감소 → 내부사고
- 3상 모두 기준전압에 비해 50% 이상의 증가 → 여자돌입
- 3상 모두 기준전압에 비해 50% 미만의 증가 → 과여자

규칙 3 : 차전류의 값이 0인 기간

- 3상 모두 차전류의 값이 0인 기간이 1/6주기 이상 → 여자돌입

규칙 4 : 차전류의 고조파 변화

- 제2고조파 및 제5고조파 성분의 일시적 변동이후 일정비율 지속 → 여자돌입 or 과여자
- 제2고조파 및 제5고조파 성분의 일시적인 변동이후 0에 근접하게 감소 → 내부사고

규칙 5 : 차전류의 고조파 비율의 변화

- 제2고조파 및 제5고조파 비율의 일정비율 함유 지속 → 여자돌입 or 과여자
- 제2고조파 및 제5고조파 비율의 변동이후 0에 근접하게 감소 → 내부사고

규칙 6 : 자속-차전류 값의 변화

- 음의 값으로 일정하게 유지 → 내부사고
- 음의 값과 0 부근의 값이 규칙적으로 반복 → 여자돌입
- 0 부근의 값을 유지 → 정상상태

상기 6가지의 규칙을 이용하여 정립된 고장판별을 위한 개선된 알고리즘은 크게 도입부, 외란 판정부, 사고 판정부 그리고 결과 출력부로 구성된다. 도입부에서는 여러 가지 임계치와 판단기준, CT결선 등 초기치 들을 설정한다. 외란 판정부에서, 과여자는 전압의 상승률과 제5고조파의 변동과 지속에 의하여 판별되고, 여자돌입은 여자돌입 카운터(LCNT)에 의하여 판단하게 된다. 사고판정부에서는 차전류 값이 0인 부근의 주기, 차전류의 기본파에 대한 제2고조파 비율 및 자속-차전류 기울기 값의 변화 규칙에 따라, 내부 고장 카운터(F_CNT)를 이용하여 변압기의 내부사고를 판정하게 된다.

3. 전력용 변압기 모델링과 시뮬레이션

3.1 모델 전력계통

그림 11은 모델전력계통이다. 송전선은 ACSR의 데이터를 이용하였고, 변압기는 3상 2권선으로, 45/60MVA, 154kV/22.9kV, Δ-Y 결선이다. 제안된 기법에 의한 성능개선 평가를 위하여 모의 계통에 대한 변압기의 여자돌입과 여러 가지 내부고장상태 등 약 20여 가지를 WatATP99로 시뮬레이션을 수행하였다. 그 과다상태에 대한 분석에 따라 본문 2장에서 성능 개선을 위한 개선된 알고리즘이 도출, 정립되었다. 또한, 이 출력데이터는 제안된 개선 알고리즘의 올바른 성능 평가를 위하여 여러 가지 기법과의 비교, 검토를 위해서 활용하였다. 그림 11의 모델전력시스템에 대한 WatATP99 시뮬레이션에서, THEV는 전원 Source이고, 1차측 3상전압의 절점이름은, A,B,C상순으로 PSIDA, PSIDB, PSIDC이고, 2차측 3상전압의 절점이름은, SSIDA, SSIDB, SSIDC으로 하였다. 변압기의 1차측 3상전류의 절점이름은, SW_DA-PSIDA, SW_DB-PSIDB, SW_DC-PSIDC이고, 2차측 3상전류의 절점은, SSIDA-SW_YA, SSIDB-SW_YB, SSIDC-SW_YC이다. 정상상태에서 변압기의 양단 전압·전류신호는 정현파로서 크기는 변압비에 따라 일정하며 120° 위상차를 갖는 3상평형이 된다[6,10~12].

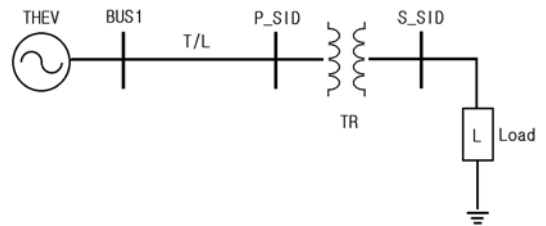


그림 11 모델 전력계통

Fig. 11 Simulation model system

3.2 여자돌입과 내부고장 시뮬레이션에 대한 결과 고찰

3.2.1 지락고장의 경우

그림 12는 변압기 1차측 Δ결선 B,C상 권선의 권선비가 80:20인 부분에서 0.051393초 시점에서 권선 지락고장이 발생된 경우, 제안된 기법과 퍼지논리 알고리즘에 의한 비퍼지 값[3], 이산웨이브렛 알고리즘에 의한 detail 1의 비율[4]에 의한 고장 판별결과이다. 제안된 개선 알고리즘에 의하면, 차전류의 실효치 샘플값이 0부근, 실제로는 절대치 0.2 이하로 5번 계속 유지되지 않기 때문에 내부고장의 가능성으로 간주되어 F-CNT가 증가하게 된다. 이어서 차전류의 제2고조파의 비율이 약 11번째 샘플에서 선정된 일정비율 10% 이하로 되기 때문에 또 F-CNT가 증가하게 된다. 마지막으로 자속-차전류 기울기 특성에 따르면, 고장발생이후 그 값이 -7.5이하로 6회 이상 계속 유지되기 때문에 최종 내부고장으로 판정이 나게 된다. 그림 13으로부터, 제안된 기법에 의한 고장검출에 걸리는 시간은 고장발생이후 6번째 샘플시점인 약 반주기(0.00834[sec]) 정도로서 가장 신속한 것을 알 수 있다.

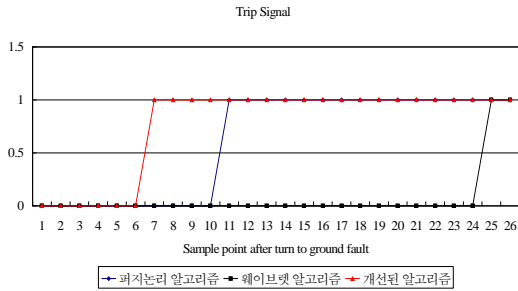


그림 12 지락고장시의 고장판별
Fig. 12 Fault discriminant under turn to ground fault

3.2.2 단락고장의 경우

그림 13은 변압기 1차측 Δ 결선 B,C상 권선의 5:80:15인 부분에서 0.051393초 시점에서 권선 단락고장이 발생한 경우, 제안된 개선 알고리즘과 여러 가지 기법에 의한 고장 판별결과이다. 개선 알고리즘에 의하면, 차전류의 실효치 샘플값이 0.2 이하 부근에서 5번 계속 유지되지 않기 때문에 내부고장의 가능성으로 간주되어 F-CNT가 증가하게 되고, 또한 차전류의 제2고조파의 비율이 약 13번째 샘플에서 일정비율이하로 감소되기 때문에 F-CNT가 증가하게 된다. 마지막으로 자속-차전류 기울기 특성에 따르면, 고장발생이후 그 값이 -7.5이하로 6개 샘플 수 동안 연속하여 계속 유지되기 때문에 최종 내부고장으로 판정이 나게 된다. 그림 13로부터, 제안된 기법에 의한 고장검출에 걸리는 시간은 지락고장과 동일하게 고장발생후 6번째 샘플시점인 약 반주기정도로 고장판별속도가 개선된 것을 알 수 있다.

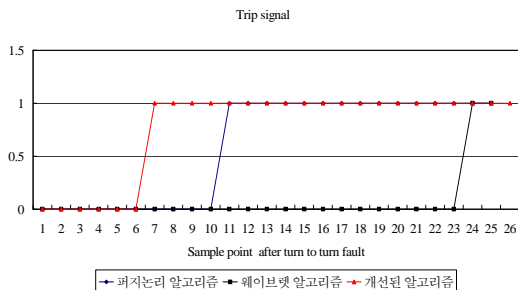


그림 13 단락고장시의 고장판별
Fig. 13 Fault discriminant under turn to turn fault

3.2.3 여자돌입의 경우

그림 14는, WatATP99에서 0.04448초 시점에서 변압기를 계통에 투입한 경우에 발생한 3상 여자돌입전류에 대한 제안된 개선 알고리즘과 여러 가지 기법에 의한 고장 판별결과이다. 제안된 개선 알고리즘에 의하면, 여자돌입이후, 13번째 샘플치에서 차전류의 실효치 샘플값이 0부근에서 5번 계속 유지되므로 여자돌입의 가능성으로 간주되어 I-CNT가 증가하게 된다. 이어서 차전류의 제2고조파의 비율이 여자돌입이후 9번째 샘플까지 일정비율이상을 유지하기 때문에 또 I-CNT가 증가하게 된다. 마지막으로 자속-차전류 기울기 특성에 따르면, 여자돌입이후 그 값이 -7.5이하로 6개 샘플 수 동안 연속되지 않고 일정한 주기를 가지고 반복해서 0 부근의 값과 번갈아 되기 때문에 최종 여자돌입으로 판정

이 나게 된다. 그림 15로부터 3가지 기법 모두 트립 동작을 하지 않는 것을 알 수 있으나, 제안된 기법에 의한 여자돌입 판별에 걸리는 시간이 여자돌입이후, 약 2/3주기 (0.0111[sec]) 정도로서 가장 신속하다는 것을 알 수 있었다.

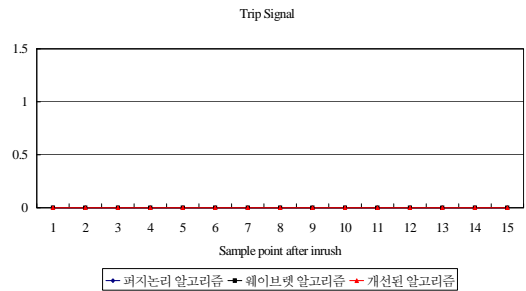


그림 14 여자돌입시의 고장판별
Fig. 14 Fault discriminant during inrush

3.2.4 제2고조파의 함유율이 적은 여자돌입의 경우

제2고조파가 적게 함유된 여자돌입의 경우와 제2고조파가 많이 함유된 내부고장과 같은 특이한 경우에 대한 시뮬레이션은 WatATP99를 이용한 시뮬레이션을 수행한 다음, 수집된 여자돌입 및 내부고장의 파형 List를 MS Excel 프로그램을 이용하여 일정비율의 제2고조파 성분을 함유하거나 제거함으로써 특이한 파형을 생성하였다[6]. 그림 15는 기본과에 대한 제2고조파의 비율이 약 10%정도로 적게 함유된 특이한 여자돌입의 경우, 제안된 개선 알고리즘과 퍼지 알고리즘, 종래의 제2고조파 억제부 비율차동알고리즘에 의한 고장 판별결과이다. 제안된 알고리즘에 의하면, 여자돌입이후, 13번째 샘플치에서 차전류의 실효치 샘플값이 0부근에서 5번 계속 유지되어서 여자돌입의 가능성으로 간주되어 I-CNT가 증가하게 된다. 또한 차전류의 제2고조파 비율은, 제2고조파가 제거된 후, 일정비율이하에서 그 값을 유지하게 된다. 그러나 제안된 기법의 자속-차전류 특성에 따르면, 여자돌입이후 그 값이 -7.5이하로 6개 샘플 수 동안 연속되지 않고 일정한 주기를 가지고 반복해서 0 부근의 값과 번갈아 되기 때문에 최종 여자돌입으로 판정이 나게 된다. 즉 제2고조파가 적게 함유된 여자돌입의 경우라도 정확하게 여자돌입이 판별되어 트립 동작이 발생하지 않게 된다. 그림 16으로부터 제안된 기법과 퍼지논리 알고리즘 모두 동작을 하지 않는 것을 알 수 있으나, 제안된 기법이 퍼지논리 기법보다 여자돌입 검출 시간이 여자돌입이후, 9번째 샘플로서 약 2/3 주기정도로서 가장 신속함을 알 수 있다.

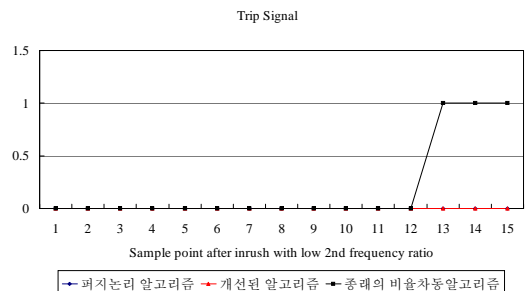


그림 15 제2고조파의 함유율이 적은 여자돌입시의 고장판별
Fig. 15 Fault discriminant during inrush with low 2nd frequency ratio

3.2.5 제2고조파의 함유율이 높은 지락고장의 경우

그림 16은 기본파에 대한 제2고조파의 비율이 약 35% 정도로 높게 함유된 특이한 지락고장시의 1차측 3상전류신호 [6]에 대한 고장판별이다. 제안된 개선 알고리즘에 의하면, 차전류의 실효치 샘플값이 0부근에 5번 계속 유지되지 않기 때문에 내부고장의 가능성으로 간주되어 F-CNT가 증가하게 된다. 이어서 차전류의 2고조파의 비율이 약 14번째 샘플까지도 약 30% 이상 계속 함유하기 때문에 여자돌입으로 간주되어 I-CNT가 증가하게 된다. 이에 따라 종래의 제2고조파 억제부 비율차동계전기법에서는 바로 2고조파가 많이 포함된 이유로 인하여 고장인 경우에도 불구하고 트립 부동작이 발생하게 된다. 그러나 제안된 기법의 자속-차전류 기울기 특성에 따르면, 고장발생이후 그 값이 -7.5이하로 계속 유지되기 때문에 최종 내부고장으로 판정이 나게 되어 트립 신호를 발생하게 된다. 그림 16으로부터 제안된 기법이 퍼지논리 알고리즘에 의한 고장검출에 걸리는 시간보다 약 반 주기정도로 신속함을 알 수 있다.

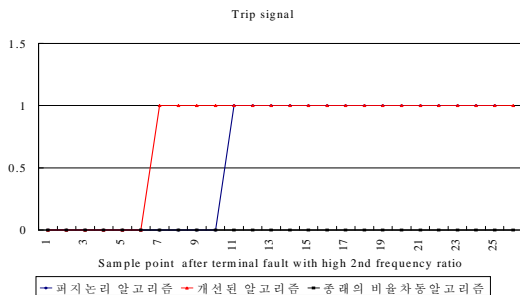


그림 16 제2고조파의 함유율이 높은 단자 지락고장시의 고장판별

Fig. 16 Fault discriminant under terminal to ground fault with high 2nd frequency ratio

3.3 개선된 알고리즘에 대한 결과 고찰

표 1은 본 논문에서 제안된 개선 알고리즘과 퍼지논리 계전알고리즘, 이산웨이브렛 계전알고리즘에 대한 전반적인 비교이다. 주기당 샘플링수를 비교하면, 이산 웨이브렛 계전알고리즘의 경우, 여자돌입과 내부고장 판별을 위해서 대상 전류신호를 DWT에 의하여 여러 단계 분석해야 되기 때문에 주기당 샘플링 수가 퍼지논리 알고리즘 보다 매우 많게 된다. 필터에 대하여는, 개선된 알고리즘과 퍼지논리 계전알고리즘에서는 기본파에 대한 제2고조파 함유율을 사용하기 때문에 원하는 고조파 추출을 위하여 DFT필터가 사용되나, 이산 웨이브렛 계전알고리즘에서는 DWT의 수행과정에서 다단계 저역통과필터와 고역통과필터가 사용된다. 개선된 알고리즘은 단자전압의 상승률과 차전류 순시치와 실효치, 그리고 제2고조파 비율을 이용하는데, 퍼지논리 계전알고리즘에서는 비율차동계전기법인 제2고조파 함유와 차전류와 억제전류의 비율을 사용하고, 추가로 자속-차전류를 사용하기 때문에 종래의 기법의 확장이라고 할 수 있다. 그러나 이산 웨이브렛 계전알고리즘은 종래의 비율차동계전기법과 전혀 다른 방법이라고 할 수 있다. 개선된 알고리즘과 퍼지논리 계전알고리즘의 이동 윈도우길이는 일반적으로 사용되는 1주기인데 반하여 이산웨이브렛 계전알고리즘에서는 DWT의 detail 1 비율의 변화를 이용하기 때문에 1/4 주기

이동 윈도우길이를 사용하였다. 한편, 이산 웨이브렛 계전알고리즘에서는 여자돌입판별을 위해서 제2고조파성분을 사용하지 않는다. 여자돌입과 내부고장 판별을 위한 특징추출방법에서, 개선된 알고리즘에서는, 파형의 형태에 따른 차전류의 0 부근 유지 여부, 제2고조파의 비율, 그리고 자속-차전류 기울기 특성 등을 이용하였다. 퍼지논리 알고리즘에서는 퍼지화가 이용되었고, 이산 웨이브렛 알고리즘에서는, DWT가 이용되었다. 20여 가지 시뮬레이션 결과 개선된 알고리즘과 퍼지 알고리즘, 두 가지 모두 특이한 여자돌입과 단자 지락고장시에도 모두 오동작은 없었다. 이는, 자속-차전류 기울기 특성에 의한 것으로 생각된다. 개선된 알고리즘에서 가장 중요한 고장판별의 기준은 자속-차전류 특성으로 임계치는 6이었다. 퍼지논리 알고리즘의 경우에는, 정상상태, 여자돌입, 내부고장을 퍼지화하는 방법에 따라 임계치를 6으로 설정하였고, 이산웨이브렛 알고리즘의 경우 detail 1 추이로부터 알고리즘을 도출할 때 임계치가 0.45로 결정하였다. 고장판별방법은, 퍼지논리 알고리즘에서는 출력퍼지값이 6보다 크면 내부고장으로 판별되었고, 이산웨이브렛 알고리즘에서는, DB5 detail 1의 비율이 모두 임계치 0.45 보다 적어질 때 내부고장으로 판별하도록 하였다. 한편, 퍼지의 독특한 특성으로 인하여 퍼지논리 알고리즘이 이산웨이브렛 알고리즘 보다 유연할 것으로 생각된다. 연산과정 측면에서는, 퍼지 알고리즘이 복잡하나 주기당 샘플 수가 적기 때문에 구현이 용이하다고 여겨진다. 그러나 최근에 초고속 마이크로 프로세서가 많이 출시되었기 때문에 주기당 샘플링수가 많다고 하더라도 이산 웨이브렛 알고리즘을 실시간으로 구현하는데 큰 어려움이 없을 것으로 생각된다.

표 1 제안된 기법과 퍼지 및 DWT 계전기법의 비교

Table 1 Comparison of proposed relaying and fuzzy relaying and DWT relaying

항목 \ 기법	제안된 개선 알고리즘	퍼지 논리 알고리즘	이산 웨이브렛 알고리즘
주기당 샘플링수(s/c)	12(적음)	12(적음)	144(많음)
사용 디지털 필터	DFT	DFT	LPF, HPF
종래의 기법과의 유사성	매우 유사함	유사함	매우 다름
이동 윈도우 길이	1주기	1주기	1/4주기
자속-차전류 기법	사용함	사용함	사용하지 않음
제2고조파 사용	사용함	사용함	사용하지 않음
특징추출 방법	파형의 형태, DFT분석, 자속-차전류	퍼지화	DWT
오동작 유무	없음	없음	없음
특이한 경우의 오동작 유무	없음	없음	시뮬레이션 못함
임계치	많음	6	0.45
고장판별 방법	차전류의 0 부근 유지, 2고조파의 비율, 자속-차전류 기울기	출력퍼지값	DB5 detail 1의 비율
유연성	보통	많음	보통
연산량	적당	매우 많음	적음
구현의 용이성	매우 용이함	용이함	가능함
고장판별시간[sec] (여자돌입 검출포함)	0.00834~0.01111	0.01667 이내	0.03333 이내

마지막으로 여자돌입과 내부고장 판별시간은 개선된 알고리즘은 약 2/3주기정도로 가장 빠르며, 퍼지논리 알고리즘은 1주기 정도로 이산 웨이브렛 알고리즘의 판별시간 보다 약 1주기(0.01667[sec]) 정도 빠른 것으로 나타났다. 표 1의 여러 가지 비교 항목들로부터 종합적으로 판단해보면, 개선된 알고리즘이 고장판별속도와 정확도 측면에서 가장 우수한 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 단자전압의 실효치 변동, 차전류의 순시치와 실효치 변동, 차전류의 파형 특성과 고조파 분석, 자속-전류 기울기 특성을 분석하여 변압기의 내부사고와 내부사고가 아닌 여자돌입 등 외란 상태를 정확하고 신속하게 구분 할 수 있는 개선된 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안된 개선 알고리즘은, 퍼지논리 알고리즘, DWT에 의한 알고리즘 및 종래의 PDR 알고리즘과 여러 항목에 대하여 비교함으로써 그 우수성을 입증하였다. 제안된 알고리즘은, 자속-차전류 기울기 특성을 도입하여 특이한 여자돌입과 내부고장의 경우에 트립 오동작을 야기할 수 있는 종래 PDR 알고리즘의 문제점을 개선하였으며, 여자돌입 판별시에 제2고조파의 함유율만을 의존하지 않기 때문에 철심 재질 개선과 계통의 환경변화로 발생할 수 있는 종래의 제2고조파 억제법에 의한 오동작을 방지할 수 있었다. 개선된 기법은, 여자돌입의 경우에는 약 2/3주기이내에 여자돌입 판별이 가능하였고, 내부고장의 경우에는 약 1/2주기이내에 신속하게 고장검출이 가능하였다. 종래의 여러 가지 알고리즘과 비교한 결과, 고장판별속도 뿐만 아니라 여러 가지 비교항목에 대해서도 제안된 기법이 성능이 개선되어 우수함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 유상봉 외 7인 공저, “보호계전 시스템의 실무활용기술”, 도서출판 기다리, pp. 258~271, 2002.3.
 [2] 한국전력공사, “보호제어 유니트의 소프트웨어”, 변전소중합보호제어 시스템설계 및 제작기술 개발 최종보고서 부록, pp. 1~87, 1997.2.
 [3] Sun Zhijie, Zeng Xianhua, Tang Hansong, et al., “Flux Restrained Transformer Differential Protection”, 2003 ACPSP, Vol.1, pp. 299~303, Oct. 2003.
 [4] 명지대학교 차세대 전력기술센터(NPTC), “Next-Generation Protection Technology”, pp. 1~214 Feb. 2002.
 [5] Sang-Tae Kim, Bo-Geon Jin, Seung-Jae Lee, Sang-Hee Kang, Myeon-Song Choi, Sang-Hyun Yoon, Tae-Sung Lee, Sang-Ki Chung, “v-i trend-based protective relaying algorithm for 3-phase power transformer”, Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE, Volume: 1, July pp. 605~610.
 [6] Chul-Won Park, Myung-Chul Shin, Jong-Hung Kim, “Fuzzy Logic-Based Relaying for Large Power Transformer Protection”, *IEEE Trans. on PWRD.*, Vol.18, No.3, pp.718~724, July 2003.
 [7] 박철원, 신명철, 권명현, “도비시 웨이브렛변환을 이용한

변압기의 여자돌입과 내부고장 판별논리기법”, 대한전기학회 논문지, 50A권 5호, pp. 211~217, May, 2001.
 [8] 강용철, 이병은, 김은숙, 원성호, “쇄교자속비를 이용한 변압기 보호”, 대한전기학회 논문지, 52A권 11호, pp. 655~660, Nov., 2003.
 [9] 박철원, 박재세, 신명철 외, “전력용 변압기를 위한 IED의 설계에 관한 연구”, 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 268~270, July 2003.
 [10] Patrick Bastard, Pierre Bertrand, Michel Meunier, “A Transformer Model for Winding Fault Studies”, *IEEE Trans. on PWRD.*, Vol.9, No.2, pp. 690~699, April 1994.
 [11] 강상희, 이승재, 김일동, 김명철, 김기화, “차동전류 보호계전을 위한 변압기 특성분석”, 1996년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 671~673, July 1996.
 [12] 박철원 외, “변압기의 EMTP 모델링과 고장해석”, 2003년도 대한전기학회 강원지부 학술강연회 논문집, pp. 1~6, Dec., 2003.

감사의 글

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

저 자 소 개



박 철 원 (朴 哲 圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년~1993년 금성산전연구소 주임연구원. 1993년~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원. 1993년~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사. 1997년~현재 국립원주대학교 전기과 부교수.

Tel : 033-760-8425

Fax : 033-760-8420

E-mail : cwpark@sky.wonju.ac.kr



박 재 세 (朴 載 世)

1952년 1월 25일생. 1975년 숭실대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1978년~현재 인천시립전문대학교 전기과 교수.

Tel : 032-760-8700

Fax : 032-760-8895

E-mail : js1229@icc.ac.kr



정연만 (鄭然萬)

1960년 4월 6일생. 1983년 숭실대학교 전자공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학). 1993년~현재 국립원주대학 전자통신과 교수.

Tel : 033-760-8385

E-mail : jymkg1@sky.wonju.ac.kr



하경재 (河炘在)

1957년 6월 10일생. 1980년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1984년~현재 경남대학교 컴퓨터공학부 교수.

Tel : 055-249-1821

E-mail : kjha@kyungnam.ac.kr



신명철 (申明澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1978년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1975년~1978년 충북대학교 전기공학과 조교수. 1982년~1983년 미국 코넬대 전기공학과 교환교수. 2000년~2001년 미국 펜실바니아 주립대

전기공학과 교환교수. 1978년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수. 대한전기학회 차기회장.

Tel : 031-290-7103

Fax : 031-290-7103

E-mail : mcshin@yurim.skku.ac.kr