

고주파를 이용한 송전선로의 사고 검출 및 판별에 관한 연구

論 文

48A-8-2

A Study on the Fault Detection and Discrimination of Transmission Line using Fault-generated High Frequency Signals

李 東 俊* · 金 喆 煥** · 金 一 東***

(Dong-Jun Lee · Chul-Hwan Kim · Il-Dong Kim)

Abstract - Most conventional protection relays are based on processing information in the spectrum that is close to or at power frequency. It is, however, widely known that faults on transmission lines produce frequency components of a wide range. High frequency signals caused by sudden changes in system voltage that occurs in the immediate post-fault period are generally outside the bandwidth of receptibility of most protection scheme. In this respect, a specially designed stack tuner is connected to the coupling capacitor of CVT, in order to capture the high frequency signals. Digital signal processing is then applied to the captured information to determine whether the fault is inside or outside the protected zone, and to discriminate the fault type. In this paper, modal transform is not applied to fault generated signals, because signals which are converted by modal transform are not have an information of each phase any longer. Instead, using peak voltage value of data windows is able to discriminate fault type. The paper concludes by presenting fault detection and discrimination of various faults on transmission line which are based on extensive simulation studies carried out on a typical 154kV Korean transmission line, using the EMTP software.

Key words : High Frequency Signal, Stack Tuner, EMTP, Fault Detection, Fault Discrimination

1. 서 론

전력 계통이 대형화, 복잡화 되어감에 따라 전력을 공급하는 송전선로가 차지하는 비중은 더욱 커져가고 있다. 따라서 송전선로를 보호할 계전기의 개발은 필수적이며 현재까지 많은 계전기들이 연구, 개발되어져 왔다. 그 중 많은 계전기들은 계통의 전압 또는전류의 기본주파수(60Hz) 성분을 이용하여 동작하고 unit protection과 같은 보호협조를 통해 보호구간내의 사고를 검출, 차단한다. 기

본 주파수를 이용한 방식은 사고시 발생하는 고조파 및 직류유크 등을 제거해야한다. 따라서, 이들 성분의 필터링이 필요하다.

실제 송전선로에서 발생할 수 있는 사고는 전력 계통의 구성 및 다양한 사고조건에 따라 다르지만, 일반적으로 전력 계통에 기본 주파수이외의 넓은 범위의 고주파 성분을 발생시킨다. 이러한 측면에서 기본 주파수 이외의 고주파 성분을 이용한 계전기의 연구가 많이 진행되어 왔으며, 고주파성분을 이용하면 신속한 사고검출이 가능하다. 최근, 진행파(travelling wave)를 이용하는 방법[1-2], 사고시 발생하는 고주파를 이용하는 방법 등이 제시되고 있으며, 이러한 연구는 활발히 진행되고 있다[3-5]. 그 중 고주파를 이용하는 방법은 Bath대학의 R. K. Aggarwal 교수를 중심으로 연구가 진행되어져 왔지만 현재까지 사

* 準 會 員 : 成均館大 電氣 · 電子系列 碩士

** 正 會 員 : 成均館大 電氣 · 電子系列 教授 工博

*** 正 會 員 : 斗源工科大学 電氣工學科 教授

接受日字 : 1999년 2월 3일

最終完了 : 1999년 7월 9일

고 검출방식만 제시된 실정이다.

따라서, 본 논문은 사고시 발생하는 고주파를 이용하여 사고 검출 및 판별 기능을 갖는 non unit protection 방식을 제시하였다. 사고 판별을 위해서 R. K. Aggarwal 교수가 사용한 모드 변환(modal transform)을 사용하지 않았다. 이것은 모드 변환을 사용하게 되면 각 상의 정보가 모드성분으로 분해되어 각 상의 정보를 상실하기 때문에 사고 판별이 곤란하기 때문이다. 따라서, 서로 다른 대역을 가지는 두 개의 필터로부터 동작신호와 억제신호를 얻고 두 신호의 비와 각 상 전압의 피크치를 비교하여 사고를 판별하였으며, EMTP를 사용한 국내 실계통의 다양한 사고의 모의를 통하여 제시한 알고리즘의 성능을 검증하였다. 또한, 제시된 기법은 기존 거리계전방식에 부수되는 필터링 지연(filtering delay)이 불필요하므로, 보다 신속한 사고 검출이 가능하다. 아울러, non unit protection 방법을 이용하므로 지역적으로 얻어진 정보만으로 보호구간 영역이 확실한 보호 이점을 가지고 있어 고가의 통신 장비나 별도의 통신선이 요구되지 않는 경제적인 방법이다.

2. Wave trap과 stack tuner의 설계

사고시 발생하는 광범위한 고주파는 일반적인 CVT (Capacitor Voltage Transformer)를 통해서서는 추출이 불가능하므로 새로운 장치가 요구된다[6].

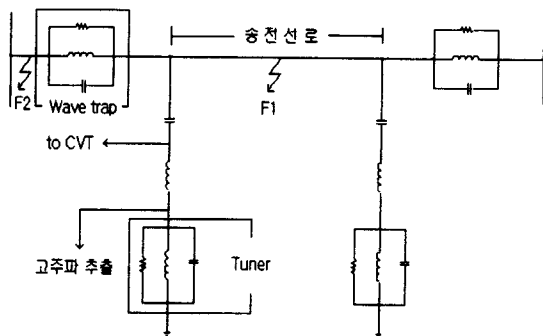


그림 1 Wave trap과 Tuner
Fig. 1 Wave trap and Tuner

따라서 본 논문에서는 그림 1과 같은 CVT의 결합 콘덴서(coupling capacitor)에 연결하여 고주파를 추출하는,

국내의 특정 실계통에 적합한 stack tuner를 설계하였다. 국내 전력계통에서 사고 발생시 50kHz 이상의 고주파 대역이 고르게 발생하기 때문에 tuner의 중심 주파수는 60kHz로 설계하였다[7]. 또한 보호구간 내에서 발생하는 고주파의 타구간으로의 전파를 방지하고, 보호구간과 비보호구간의 구분을 위해 PLC에서 사용하는 wave trap을 사용하였다. Wave trap은 대역저지 필터로서 송전선로에 직렬로 연결되며, 역시 중심 주파수는 60kHz로 설정하였다. 이것은 현재 국내에서 사용하고 있는 반송주파수의 범위(50kHz~450kHz)안에 드는 적절한 값으로 기존의 wave trap을 그대로 사용할 수 있을 것이다.

또한, Stack tuner와 wave trap의 임피던스를 송전선로 서지 임피던스의 각각 10배와 1.1배로 함으로서 반사를 최소화하였다. 모든 사고에서 발생하는 고주파 대역을 이용하는 wave trap과 stack tuner를 설계하기 위해 "Pspice" 프로그램을 이용한 보호구간 내, 외의 주파수 스펙트럼을 분석하였다. 그림 1에서 보호구간 내 F1지점과 보호구간 밖의 F2지점에서의 tuner와 wave trap의 주파수 응답을 분석하기 위해, 각각 F1지점과 F2지점에서 전압을 인가해 보았다. 그림 2(a)는 F1지점에서 전압을 인가하였을 때, 그림 2(b)는 F2지점에서 전압을 인가하였을 때 tuner에서 추출한 전압을 주파수 분석한 것이다

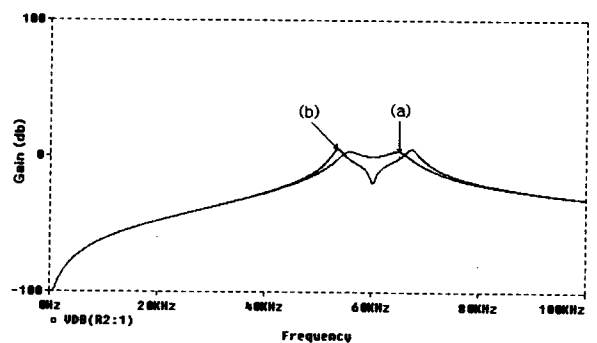


그림 2 Tuner에 나타난 전압의 주파수 스펙트럼
Fig. 2 Frequency Spectrum at Tuner

그림에서 나타나듯이 중심주파수가 60kHz로 설계된 wave trap의 영향으로 보호구간 내·외의 사고는 각각 60kHz 대역에서 큰 차이를 보이고 있다. 따라서, 이러한 특성을 이용하여 보호구간 내부사고와 외부사고의 구별이 가능하다.

3. 사고검출 및 판별 알고리즘

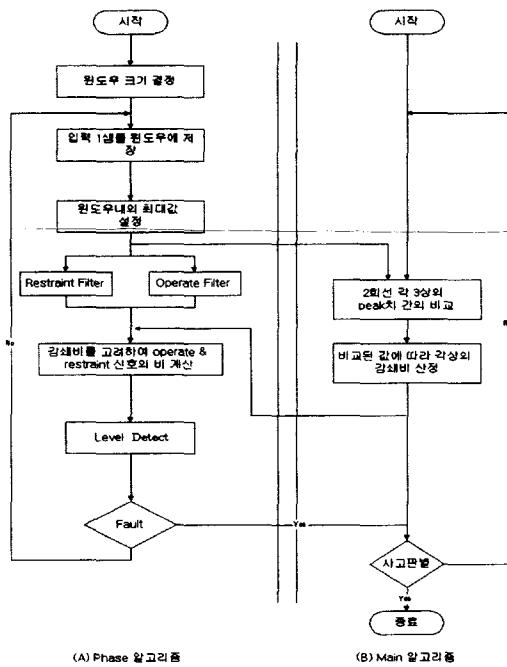


그림 3 고주파를 이용한 사고검출 및 판별 알고리즘의 순서도

Fig. 3 Fault Detection and Discrimination Algorithm using High Frequency Signal

그림 3은 본 논문에서 제시하는 사고 검출 및 판별 알고리즘의 순서도를 나타내고 있다. 알고리즘은 크게 두 부분으로 구성된다. 그림 3(a)의 phase 알고리즘은 2회선 각 3상별로 동작하며 이와 동시에 병렬로 그림 3(b)의 메인 알고리즘이 실시간으로 동작하게 된다. 결국 2회선 각 3상별로 6개의 알고리즘과 이를 제어하게 되는 1개의 메인 알고리즘으로 구성되어있다. 보호구간 내의 사고 검출 및 보호구간 내·외의 구분을 위해 입력신호는 53kHz 대역(억제신호)과, 60kHz 대역(동작신호)의 신호를 추출하는 대역통과(band pass) 필터를 거치게 되며, 이 두 신호의 비를 계산함으로써, 보호구간 내외의 사고판별이 가능하게 된다. 이는 wave trap이 외부사고의 경우, 동작신호 대역을 차단하기 때문에 이 두 신호의 비는 작을 것이며 내부사고에서는 1에 가까운 값을 나타내기 때문이다. 따라서, 계전점만의 정보를 이용하여 보호구간 내외의 사고 판별이 가능하므로, 부수적인 보호협조 시스템이 필요 없다.

억제신호와 동작신호, 이 두 대역의 신호를 추출하기 위해 6차의 타원형 대역통과(Elliptic Band-pass) 필터를

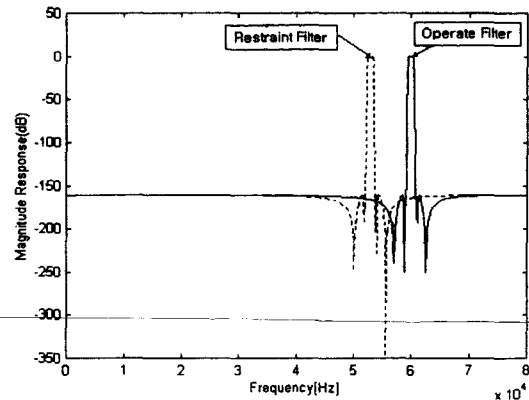


그림 4 대역통과 필터의 주파수 응답
Fig. 4 Response of band-pass Filter

설계하였다. 그림 4는 설계된 필터의 주파수 응답을 보여주고 있다.

2회선 송전선로는 회선간의 상호유도 작용에 의하여 한 회선의 사고는 건전회선에 외란을 발생시키고 이를 판별하기 위해서는 위의 두 대역 신호의 비만 가지고는 불가능하다. 기존의 R. K. Aggarwal 교수가 제안한 고주파를 사용하는 방법[3, 4, 5]에서는 모드 변환을 이용하여 사고 검출을 시도하였다. 모드 변환을 사용하게 되면 각 상의 정보는 모드 성분으로 분해 되어 각 상의 정보를 상실하기 때문에 사고의 판별이 불가능해진다. 따라서 본 논문에서는 사고판별을 위해서 각 상 전압의 피크치를 사용하였다. 사고종류와 사고거리가 변화함에 따라 사고상에서 발생한 사고전압에 의해, 비 사고상에 유도되는 고주파 전압의 피크값은 최악의 경우라도 사고상 전압의 피크치의 50%를 넘지 않음을 다양한 사고 모의를 통하여 확인하였다.

이를 이용하여 phase 알고리즘에서 데이터 윈도우내의 피크치를 계산하고, 메인 알고리즘에서는 이 피크치들을 서로 비교하여 최대치와의 비율을 구해, 감쇄 정수를 산정하고 동작 신호에 적용하였다. 동작 신호와 억제 신호의 비 신호 레벨(x)는 표 1과 같이 정해진 값에 따라 레벨 검출기에서 count 레벨을 결정하고 이 레벨이 일정치 이상일 때 고장임을 검출하고, 각상의 고장정보를 이용해 메인 알고리즘에서 사고판별을 하게 된다.

표 1 신호레벨과 Count 레벨

Table 1 Signal Level and Count Level

신호레벨, x	count 레벨
....	...
$0.5 \leq x < 0.6$	-0.4
$0.6 \leq x < 0.7$	-0.3
$0.7 \leq x < 0.8$	-0.2
$0.8 \leq x < 0.9$	-0.1
$1.0 \leq x < 1.1$	1
$1.1 \leq x < 1.2$	+1.1
$1.2 \leq x < 1.3$	+1.2
$1.3 \leq x < 1.4$	+1.3
$1.4 \leq x < 1.5$	+1.4
...	...

4. 알고리즘 모의 및 결과 검토

4.1 사고모의

사고모의는 EMTP를 사용하여 그림 5와 같은 국내 154kV 실계통 2회선 송전선로를 이용하였고, 각 보호구간 양단에 각각 4개의 Wave trap과 Tuner를 부착하여 고주파를 추출하였다.

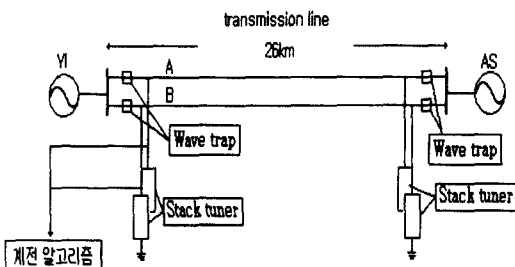


그림 5 모의에 사용된 모델 계통도
Fig. 5 154Kv Transmission System

사고의 종류는 1선지락, 2선지락, 선간단락, 외부 1선지락 사고를 사고거리와 사고발생각을 변화시키면서 모의하였다. 모의된 데이터는 실제와 근접한 모의가 될 수 있도록 고역 통과필터와 A/D변환 이후에 알고리즘을 적용하였다.

4.2 알고리즘 성능 평가

(A)1선지락사고(사고거리 3km)

사고는 B회선 a상에서 발생하였고 그림 6은 사고시 tuner에 나타난 전압을 scale down, 고역통과필터 및 A/D변환한 이후의 파형이다. A회선은 건전회선이지만 송전선로의 상호유도 작용에 의해 순간적으로 전압이 발생하였으나, 그 크기는 사고회선의 사고상과 비교했을 때 작은 값을 알 수 있다.

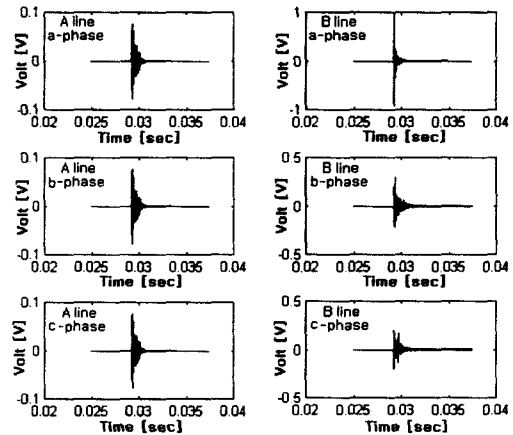


그림 6 사고 전압
Fig. 6 Fault Voltage

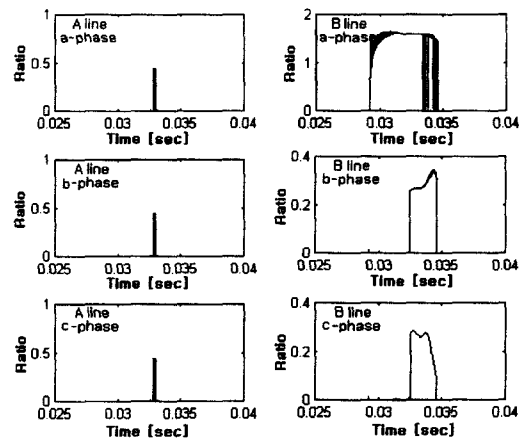


그림 7 동작신호와 억제신호의 비

Fig. 7 Ratio of The Operate Signal and The Restraint Signal

그림 7은 2개의 필터를 통과시켜 추출해낸 60kHz 성분의 동작 신호와 53kHz 성분의 억제신호와의 비를 나타내고 있다. 각 상의 피크치를 비교한 후 감쇄정수를 구해 동작신호에 적용했기 때문에 사고회선의 사고상을 제외하고, 모두 짧은 시간동안 작은 값을 나타내고 있다.

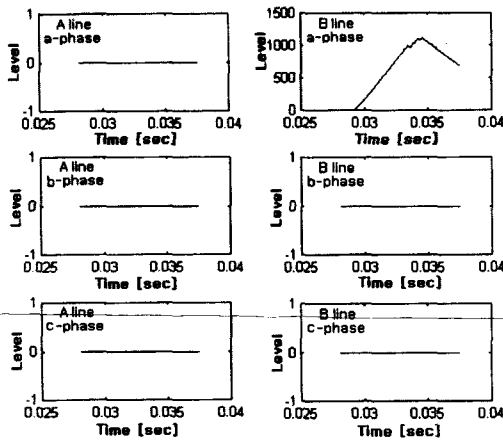


그림 8 레벨 검출기
Fig. 8 Level Detector

그림 8은 동작신호와 억제신호의 비, 신호 레벨(x)를 정해진 레벨에 따라 실시간으로 카운트해 나가는 과정을 보이고 있다. 사고회선의 사고상을 제외하고는 레벨이 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 계전알고리즘의 최종 트립 신호를 보여주고 있다. 레벨 검출기에서 설정한 값을 초과한 순간 B회선 a상에서만 트립 신호가 나타남을 알 수 있다.

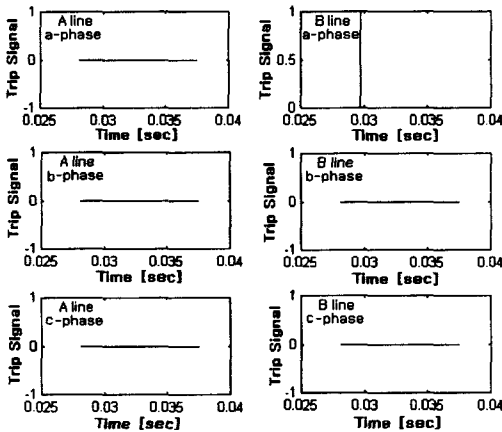


그림 9 트립 신호
Fig. 9 Trip Signal

(B)선간단락사고(사고거리 13km)

그림 10~13은 B회선 a, b상 선간단락사고 발생시 본 연구에서 제시한 알고리즘 적용 결과들을 보여주고 있다.

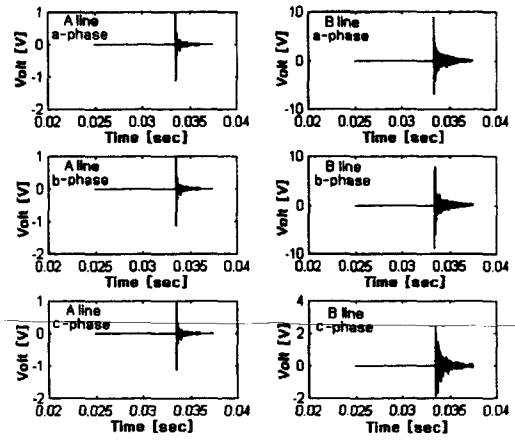


그림 10 사고 전압
Fig. 10 Fault Voltage

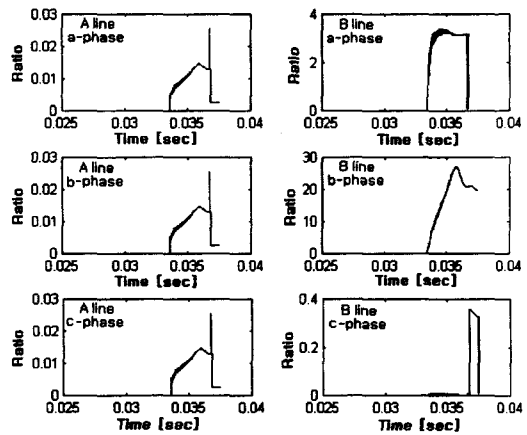


그림 11 동작신호와 억제신호의 비
Fig. 11 Ratio of The Operate Signal and The Restraint Signal

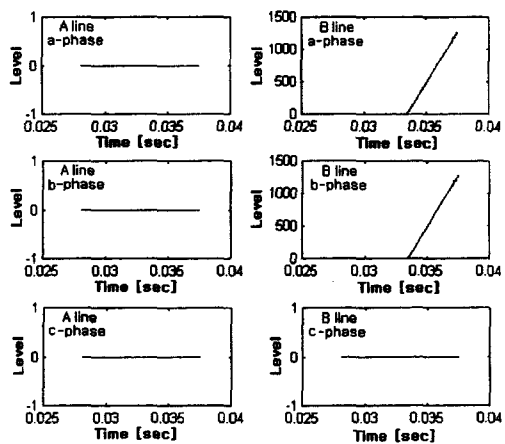


그림 12 레벨 검출기
Fig. 12 Level Detector

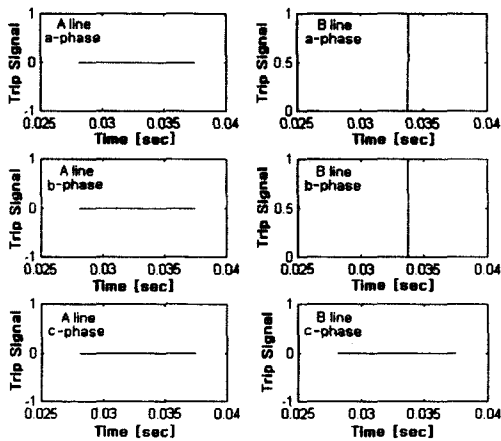


그림 13 트립 신호
Fig. 13 Trip Signal

그림 10은 2회선 3상전압을 보여주고 있다. 비사고 회선에서도 역시 크지는 않지만 사고발생시 유도된 전압이 발생함을 알 수 있다. 그림 11은 각 전압의 피크치를 이용하여 계산한 감쇄정수와 동작신호와 억제신호의 비를 보여주고 있다. 역시 사고상인 B회선 a, b 회선의 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 결국, 사고상인 B회선 a, b상에서 동시에 레벨이 증가하고 결국 a, b상에서 트립 신호가 발생함을 그림 13에서 알 수 있다.

(c)외부 2선지락사고

그림 14~17은 외부 2선지락사고시 사고전압을 알고리즘에 적용한 결과를 보여주고 있다. 사고는 B회선 a, b상에서 사고가 발생된 경우이다.

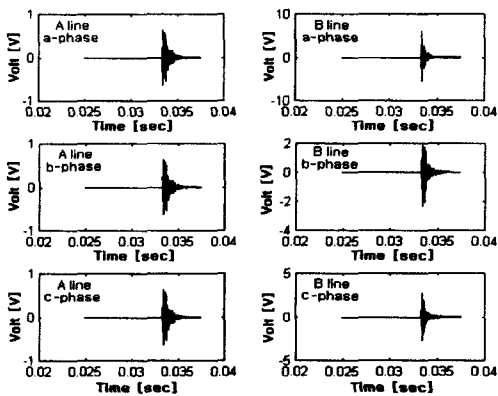


그림 14 사고 파형
Fig. 14 Fault Voltage

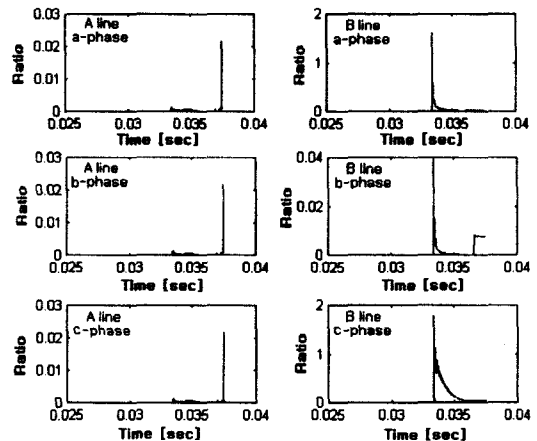


그림 15 동작신호와 억제신호의 비
Fig. 15 Ratio of The Operate Signal and The Restraint Signal

외부 사고 발생시 stack tuner에 나타나는 고주파 전압은 wave trap이 중심주파수 60kHz 대역의 성분을 통과시키지 않으므로 억제신호(53kHz)가 동작신호(60kHz)에 비해 상당히 크게 나타나고 그 결과로 동작신호와 억제신호의 비는 작게 된다. 그림 15는 이를 나타내고 있다. 그림 16에서 레벨이 B회선 a, c상에서 약간 나타나고 있지만 트립 레벨에는 미치지 못하고 있고, 따라서 트립 신호가 발생하지 않음을 그림 17에서 확인할 수 있다.

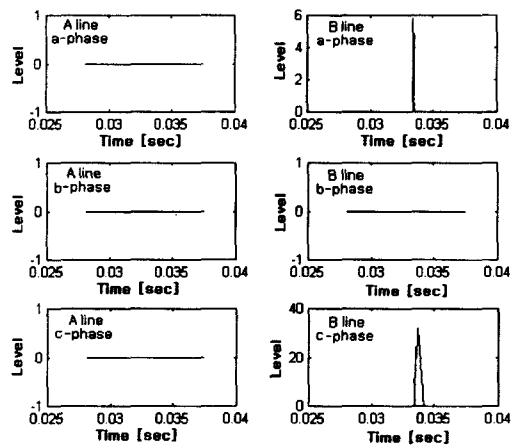


그림 16 레벨 검출기
Fig. 16 Level Detector

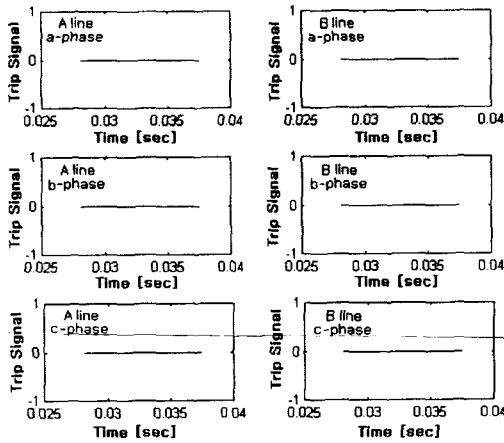


그림 17 트립 신호
Fig. 17 Trip Signal

5. 결론

본 논문에서는 송전선로에 발생하는 고주파를 이용하여 사고의 검출 및 판별을 할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 전력계통의 사고모의는 EMTF 프로그램을 사용하여 국내 실제통을 모의하였고, 그 결과는 matlab에서 알고리즘의 입력으로 사용함으로써 전체적인 계전알고리즘의 성능을 평가하였다. 그 결과 설계된 알고리즘은 사고거리와 사고발생각에 관계없이 1선지락, 2선지락, 선간단락 등의 내부사고를 검출할 수 있었고 판별에도 우수한 성능을 나타냈다. 또한, 보호구간 밖에서 발생한 1선지락, 2선지락, 선간단락 사고에 대해서는 알고리즘이 외부사고로 판단하여 동작하였다.

본 논문에서 제시한 알고리즘은 R. K. Aggarwal교수가 제안한 non unit protection의 개념을 바탕으로 하였으나, 사고검출에만 한정되었던 연구를 기존에 제시되지 않은 새로운 방식인 각 상 전압의 피크치를 사용하여 사고검출 및 사고판별까지 가능한 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에 제시된 알고리즘은 기존의 unit protection에 대한 경제적인 이점, 거리계전방식의 필터링 지연에 대한 연산속도면의 장점등이 있다.

한편, 고주파를 사용하기 위해서는 고성능의 하드웨어 사양이 요구되며 알고리즘의 신뢰성향상을 위해 추후 보다 다양한 사고모의와 외란에 의한 계전기의 오동작 가능성등에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] P.A. Crossley, P.G McLaren, "Distance Protection based on travelling waves", IEEE PAS, vol. PAS-102, No. 9, PP. 2971-2983, 1983. 9
- [2] Christos Christopoulos, D.W.P. Thomas, Arthur Wright, "Scheme, based on travelling-waves, for the protection of major transmission lines", IEE proceedings, Vol. 135, Pt. C, No 1, PP. 63-73, 1988. 1
- [3] A T Johns, Bo Z, R K Aggarwal, "A novel non-unit protection scheme based on fault generated high frequency noise on transmission lines", IEE DPSP'93,PP. 65-68, 1993
- [4] A. T. Johns, R. K. Aggarwal, Z. Q. Bo, "Non-unit protection technique for EHV transmission systems based on fault-generated noise Part1", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No.2, PP 133-147, 1994, 3
- [5] A. T. Johns, R. K. Aggarwal, Z. Q. Bo, "Non-unit protection technique for EHV transmission systems based on fault-generated noise Part2", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No.2, PP 133-147, 1994, 3
- [6] An IEEE Power Systems Relaying committee Working Group Report, "EHV protection problems", IEEE PAS, vol. PAS-100, No. 5, PP, 2399-2406, 1981. 5
- [7] 임 병호, 이 동준, 김 철환, 김 일동, "Fault-generated signal을 이용한 계전기 알고리즘의 최적 모드-transform선정", 전력계통 보호기술 연구회 논문집, Vol.2, No.1, PP, 109-116, 1998, 11

저 자 소 개



이 동 준 (李 東 俊)

1971년 일생. 1997년 성균관대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

Tel : 0331-290-7166

E-mail : ldj71@hanmail.net



김 철 환 (金 喆 煥)

1961년 1월 16일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학과 교수.

Tel : 0331-290-7164

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

김 일 동 (金 一 東)

1949년 6월 23일생. 1984년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1988년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 두원공과대학 교수

Tel : 0334-670-7168

E-mail : idkim@doowon.ac.kr