

Modeling of a High Impedance Fault Using Two Time-Varying Resistances

南 淳 烈* · 姜 龍 澈** · 朴 鍾 根***

(Soon-Ryul Nam · Yong-Cheol Kang · Jong-Keun Park)

Abstract - A more reliable algorithm for detecting a high impedance fault (HIF) requires voltage and current at the relaying point containing information of HIF characteristics including buildup/shoulder as well as nonlinearity/asymmetry. This paper presents a modeling method of an HIF in a distribution system. In order to do this, the proposed method uses two series time-varying resistances (TVRs) controlled by Transient Analysis of Control Systems (TACS) in EMTP. One TVR is employed for nonlinearity/asymmetry and then the other TVR for buildup/shoulder. The proposed method is implemented in EMTP and thus the voltage and current at the relaying point can be obtained.

Key Words : High impedance fault, Buildup, Shoulder, Nonlinearity, Asymmetry, Time-varying resistance

1. 서 론

배전선에 고저항 사고가 발생하면, 사고 전류가 부하 전류에 비해 현저하게 크지 않을 뿐만 아니라, 그 특성이 매우 복잡하여 현재 사용되고 있는 고저항 사고 계전기의 검출율은 약 50 ~ 60% 수준에 머물러 있다.

고저항 사고의 대표적인 특성으로는 증가현상(buildup), 멈춤 현상(Shoulder), 비선형성(nonlinearity), 비대칭성(asymmetry) 등이 있다. [1, 2] 보다 신뢰성 있는 고저항 사고 검출 알고리즘을 개발하기 위해서는 부하 및 사고 조건을 달리하여 계전점에서의 전압, 전류의 데이터를 기반으로 해야 하며, 이를 위해서는 위에서 언급한 고저항 사고의 다양한 특성을 포함한 모델링이 선행되어야 한다. 이를 목적으로 여러 모델링 방법이 제안되었으며[3, 4, 5, 6], 참고문헌 [3]에서는 배전선의 고저항 사고를 EMTP를 이용하여 전압원으로 모델링 하는 방법을 제시하였다. 이 방식은 고저항 사고의 실험에서 얻은 전압, 전류의 데이터를 이용하여, 고저항 사고를 전압원으로 모델링 하였고, 다양한 부하 조건 및 사고 조건에 대하여 고저항 사고를 모의하여 계전점에서의 전압 전류 데이터를 얻는 방식을 제시하였다. 하지만, 이 방식은 앞에서 언급한 고저항 사고의 특성 중에서 비선형성 및 비대칭성만을 표현하는데 중점을 두었고, 고저항 사고의 증가현상, 멈춤 현상 등은 표현할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 고저항 사고의 비선형성과 비대칭성뿐만 아니라 증가 현상과 멈춤 현상도 모의하기 위해서 직렬로 연결된 두 개의 시변 저항을 이용하여 모델링 하였다. 하나

의 시변 저항은 비선형성과 비대칭성을, 또 다른 시변 저항은 증가 현상과 멈춤 현상을 모델링 하는데 사용되었다. 먼저, 사고 이후의 전압, 전류 데이터로부터 비선형성과 비대칭성을 모델링 하는 시변저항을 구하였고, 그 다음에 증가 현상과 멈춤 현상을 모델링 하는 시변저항을 구하여, 두 시변저항의 합을 각 순간에서의 시변 저항으로 설정하였다.

2. 시변 저항을 이용한 고저항 사고 모델링

2.1 고저항 사고의 특성

그림 1은 갠 자갈에서의 고저항 사고 실험을 통해 얻은 전류 파형으로서, 고저항 사고의 특성 중에서 증가 현상(buildup)을 보여 주고 있다. 증가 현상이란, 고저항 사고 발생 이후에 사고 전류의 크기가 시간이 지남에 따라, 점진적으로 증가하는 현상을 말한다. [1] 그림 1의 경우에는 사고 발생 후 약 15 주기까지 증가 현상이 나타나고, 그 이후에는 증가 현상이 나타나지 않고 있다.

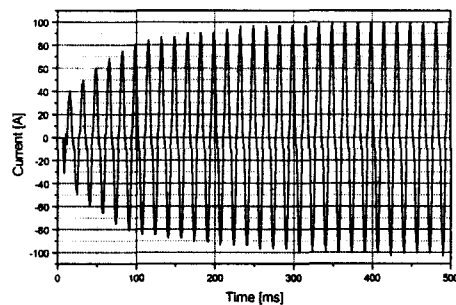


그림 1 갠 자갈에서의 고저항 사고 전류

Fig. 1 A current waveform of a HIF on crushed pebbles

* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程
 ** 正 會 員 : 全北大 電子情報工學部, 專任講師, 工博
 *** 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2000年 2月 17日
 最終完了 : 2000年 8月 30日

그림 2는 강 자갈에서의 고저항 사고 실험을 통해 얻은 전류 파형으로서, 증가 현상뿐만 아니라 멈춤 현상도 나타나고 있다. 이 경우에는 증가 현상이 고저항 사고가 발생한 후 수십 주기동안 나타나고 있다. 멈춤 현상은 이러한 증가 현상이 나타나는 동안에 전류의 증가가 멈추거나 둔화되는 현상을 말한다. [1] 그림 2를 살펴보면 사고 후 약 4 주기와 12 주기에서 3~4 주기 동안 전류의 증가 현상이 멈추거나 둔화하고 있으며, 사고 후 정상 상태에 도달하는 40 주기 정도까지 증가현상과 멈춤 현상을 반복하면서 사고 전류가 증가하고 있다. 갠 자갈에서의 경우보다 증가현상이 오래 지속되었는데, 이는 멈춤 현상이 도중에 나타났기 때문이다.

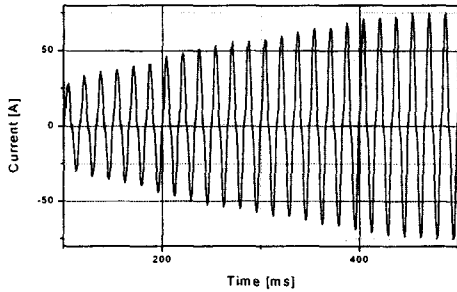


그림 2 강 자갈에서의 고저항 사고 전류
Fig. 2 A current waveform of a HIF on robust pebbles

증가현상과 멈춤 현상이 사고 발생 이후 간헐적으로 나타나는 반면에, 그림 1과 그림 2에서 보듯이 비선형성(nonlinearity)성과 비대칭성(asymmetry), 특히 비대칭성은 사고 발생 이후 계속 나타난다. 그림 3은 강 자갈에서의 고저항 사고 발생 후 20 번째 주기와 40 번째 주기 동안의 전류 파형을 함께 보여 주는데, 증가 현상이 나타나는 시간 영역에서도 비선형성과 비대칭성이 나타남을 알 수 있다.

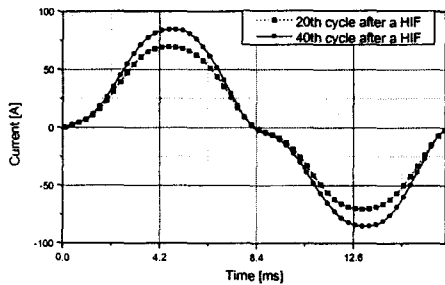


그림 3 사고 발생 후 20 번째와 40 번째 주기의 전류
Fig. 3 Currents at the 20th and 40th cycles after an HIF

2.2 고저항 사고 모델링

본 논문은 비선형성, 비대칭성, 증가 현상, 멈춤 현상, 등 고저항 사고의 다양한 특성의 모델링을 목적으로 하기 때문에, 이러한 특성들이 나타나고 있는 그림 2의 강 자갈에서의 고저항 사고 실험을 대상으로 모델링 하였다. 실험에서 얻은 전압, 전류 파형으로부터 고저항 사고를 직렬로 연결된 두 개의 시변 저항으로 표현하였다.

참고문헌 [3]에서는 사고 발생 이후 증가 현상이 지난 다

음의 정상 상태에서의 전압-전류 특성을 이용하여 고저항 사고를 전압원으로 모델링 하는데 중점을 두었다. 사고 후 정상 상태에서는 증가 현상이나 멈춤 현상은 없고 비선형성과 비대칭성만이 나타나므로, 전류에 종속하여 전압이 변하는 전압원으로 고저항 사고를 모델링이 가능하였다. 그런데, 전압원만을 이용하여 증가 현상이나 멈춤 현상과 같은 현상까지 모의하고자 한다면 모델링 방법이 복잡해지게 된다. 왜냐하면 사고 후 정상 상태가 나타나는 시간 영역인 T_f 에서의 전압-전류의 관계가 증가 현상이나 멈춤 현상이 나타나는 시간 영역인 T_b 그리고/또는 T_s 에서의 전압-전류의 관계가 서로 다르므로, 각 시간 동안 각각 다른 전압원으로 구현해야만 하는 어려움이 있다.

이러한 어려움을 해결하기 위해서 본 논문에서는 고저항 사고의 여러 가지 특성을 다른 종류의 시변 저항을 이용하여 표현하였다.

비선형성과 비대칭성은 사고가 발생하면 계속 지속되는 현상인데 반해, 증가현상과 멈춤 현상은 사고 후 시간이 지남에 따라서 접촉 물질과의 접촉 저항이 줄어들거나 유지되면서 생기는 과도 현상이므로, 이는 어느 정도 시간이 지나면 없어진다. [1] 이러한 특징에 착안하여 본 논문에서는, 그림 4에 나타난 바와 같이, 비선형성과 비대칭성을 표현하는 시변 저항 $R_1(t)$ 에, 증가현상과 멈춤 현상을 표현하는 시변 저항 $R_2(t)$ 를 직렬로 연결하여 고저항 사고를 모델링 하였다. 사고 이후 임의의 순간 t 에서의 사고 가지의 전체 저항 $R(t)$ 는 식 (1)과 같이 정해진다.

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) \tag{1}$$

여기서 $R_1(t)$ 는 사고 발생 이후 각 주기마다 일정한 특성이 반복되는 반면에, $R_2(t)$ 는 사고 발생 초기에 매우 큰 값을 가지다가 T_b 와 T_s 동안에 점점 단조 감소하여, 최종적으로 T_f 에서 0이 된다. $R_1(t)$ 와 $R_2(t)$ 는 EMTP의 TACS에서 시간에 의해서 제어되는 요소이다.

본 논문에서는, T_f 기간동안에는 증가 현상이나 멈춤 현상이 없으므로 $R_2(t)$ 를 0으로 두고 $R_1(t)$ 를 먼저 결정하였고, 그 다음에 $R_2(t)$ 를 결정하였다.

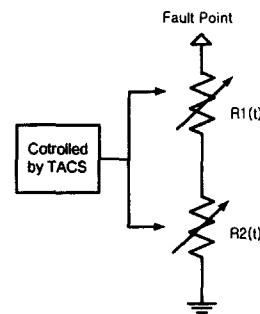


그림 4 두 개의 직렬 시변저항을 이용한 고저항사고 모델링
Fig. 4 HIF modeling using two series TVRs

2.2.1 비선형성과 비대칭성의 모델링

증가현상과 멈춤 현상이 나타나지 않고 아크 현상만이 나타나는 Tf 시간 영역에서 한 주기 동안의 전압과 전류를 이용하여 시변 저항 $R_1(t)$ 를 구현하였다. 그림 2에서 Tf 시간 영역에서의 한 주기 동안의 전압, 전류 파형을 전압-전류 평면에 그려보면 그림 5와 같다. 이때 $R_1(t)$ 는 그림 5의 각 점에서의 전압과 전류의 비로 정의되는데, 그림 5의 곡선 위의 모든 점을 EMTP에 입력하기 복잡하므로, 본 논문에서는 그림 5를 1상한과 3상한에서 각각 7개의 점을 선택하여 구간별로 선형화하고(그림 6), 선형화된 식으로부터 TACS에 전압-전류의 쌍을 입력하여 $R_1(t)$ 를 구현하였다.

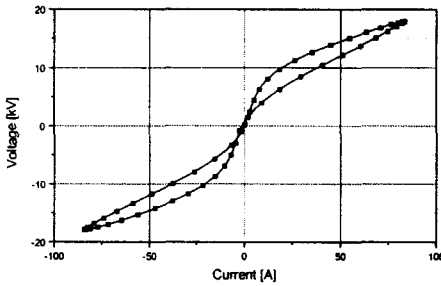


그림 5 Tf 에서의 한 주기 동안의 전압-전류 곡선
Fig. 5 Voltage-current characteristic for a cycle during Tf

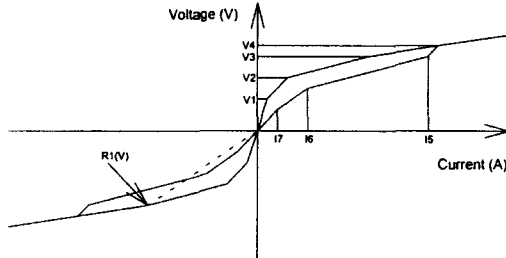


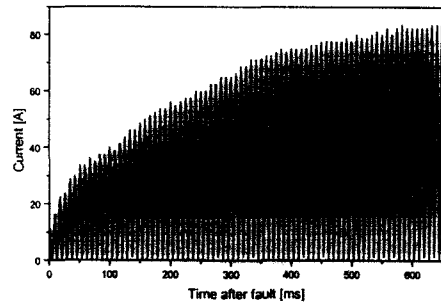
그림 6 선형화된 그림 5의 전압-전류 곡선
Fig. 6 Linearized voltage-current characteristic of Fig. 5

그림 6에서 전압이 $v_n \leq v(t) < v_{n+1}$ 영역에 있을 때의 전류는 식 (2)와 같이 구하였으며, $R_1(t)$ 는 전압과 전류의 비로 정의되므로, 식 (3)과 같이 구해진다.

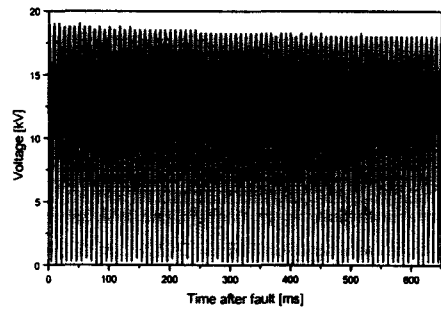
$$i(t) = i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} \times (v(t) - v_n) \quad (2)$$

$$R_1(t) = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{v(t)}{i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} \times (v(t) - v_n)} \quad (3)$$

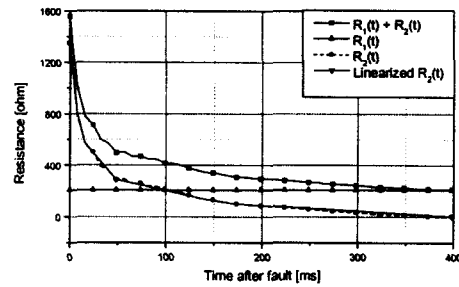
그림 5는 배전계통의 말단에 인공 고저항 지락 사고 실험을 통해서 얻은 전압-전류 파형이므로, 그림 5를 배전선의 말단이 아닌 앞 부분에서 모의하는 경우에는 사고 지점의 최대 전압이 그림 5의 최대 전압보다 클 수 있다. 그런 경우에는 그림 6에서 나타낸 바와 같이 이전 구간과 동일한 변화율로 전류가 증가한다고 가정하였다.



(a) 사고 전류의 절대값
(a) Absolute values of the fault current



(b) 전압의 절대값
(b) Absolute values of the voltage



(c) 시간에 따른 저항
(c) A resistance with the time
그림 7 전류가 최대가 되는 순간에서 저항
Fig. 7 Resistances at the instants of the maximum current

2.2.2 증가 현상과 멈춤 현상의 모델링

$R2(t)$ 는 각 순간에서의 전체 저항 $R(t)$ 값을 구한 후, $R_1(t)$ 를 빼면 구할 수 있다. 그런데, 매 순간에서의 $R(t)$ 를 구하는 과정은 복잡하여, EMTP로 구현하는 것이 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는, 그림 7에서 나타난 바와 같이, 전류와 전압의 절대값을 구하고, 임의의 순간이 아닌, 반주기 동안에 전류가 최대가 되는 순간의 $R(t)$ 를 구하였고, 이를 그림 7(c)에서 사각형으로 나타내었다. Tf 에서는 $R_2(t)$ 가 0이 되므로, 이 기간의 $R(t)$ 는 $R_1(t)$ 가 된다. 사고 이후의 아크 특성은 동일하다고 가정하였으므로, 사고 이후의 반

주기 동안의 전류가 최대가 되는 순간에서의 $R_1(t)$ 역시 상수가 되고, 이를 그림 7(c)에서 삼각형으로 나타내었다. 그 다음에, 위에서 구한 $R(t)$ 에서 상수인 $R_1(t)$ 를 빼서 전류가 최대가 되는 순간에서의 $R_2(t)$ 를 구하였으며, 이를 그림 7(c)에서 점선으로 나타내었다. 그런데, 이렇게 구한 $R_2(t)$ 는 각 반 주기동안에서 전류가 최대가 되는 순간에서의 저항이므로, 본 논문에서는 이 값들을 보간(interpolation)하여 임의의 순간 t 에서의 $R_2(t)$ 를 구하였다.

2.3 제시한 모델의 확인

제시한 모델링 방법을 확인하기 위한 모델 계통은 그림 8에 나타나 있다. 인공 지락 실험은 한전의 22.9 [kV] 배전선의 말단에서 실시하였는데, 배전선에 고저항 사고 실험을 한 순간의 배전선에서 공급하고 있던 부하 상태는 정확하게 알 수 없으므로, 본 논문에서는 적절한 값을 사용하였다. 그림 8의 계통은 단락 용량이 100 [MVA]인 22.9 [kV] 배전계통에서 배전선의 길이를 10 [km]로 하였고 전원에서 1 km마다 0.5 [MVA] 씩 10 km까지 총 5 [MVA]의 선형 부하를 연결하고 선형 부하의 역률은 99%가 되도록 하였다. 그림 8의 배전계통의 배전선 말단에, 2.2에서 설명한 시변 저항을 연결하여 사고 지점의 전압과 사고 가지에 흐르는 전류를 얻어, 이들을 실험에서 얻은 전압, 전류 파형을 비교하였다.

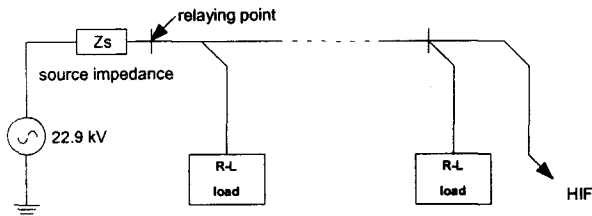


그림 8 모델 계통
Fig. 8 The model distribution system

먼저 증가 현상, 멈춤 현상이 나타나지 않는 T_f 동안의 한 주기의 전압, 전류로부터 $R_1(t)$ 를 모델링 하였으며, 그림 8의 모델 계통에서 모의하여 얻은 사고 전류와 고저항 사고 실험에서 얻은 사고 전류를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 T_f 의 한 주기동안에서의 모의한 전류와 실제의 전류는 매우 유사함을 알 수 있다. 모의한 전압, 전류의 파형으로부터 구한 전압-전류 특성(그림 10)도 고저항 사고 실험에서 얻은 특성 곡선인 그림 5와 유사함을 알 수 있다.

다음으로 2.2.2에서 설명한 방식대로 $R_2(t)$ 를 구하였고, 이를 위에서 구한 $R_1(t)$ 에 더하여, 그림 8의 대상 계통에 모의하였다. 모의된 사고 전류와 고저항 사고 실험의 사고 전류를 그림 11에 나타내었다. 약간의 차이는 그림 7에서 $R_2(t)$ 를 각 반주기에서 전류가 최대가 되는 순간에서의 저항을 직선으로 보간하였기 때문에 발생한 것이다.

실제 전류와 모의된 전류의 주파수 성분을 표1에 나타내었다. 표1에서 알 수 있는 바와 같이, 사고 전류의 대부분이

기본파와 홀수 조파로 이루어져 있으며, 모의한 전류도 매우 비슷하다.

따라서, 비선형성, 비대칭성을 표현하는 시변 저항 $R_1(t)$ 과 증가 현상, 멈춤 현상을 표현하는 시변 저항 $R_2(t)$ 로 분리하여 고저항 사고를 모델링 하는 방식이 타당함을 알 수 있다.

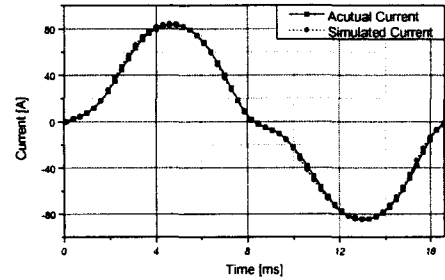


그림 9 실제의 전류와 모의된 전류
Fig. 9 The actual and simulated currents

표 1 실제의 전류와 모의된 전류의 주파수 성분
Table 1 Frequency components of the actual and simulated currents

| (%) | 1조파 | 2조파 | 3조파 | 4조파 | 5조파 |
|------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 실제전류 | 75.86 | 0.4204 | 11.77 | 0.5489 | 3.829 |
| 모의전류 | 76.40 | 0.9726 | 11.76 | 0.8485 | 3.771 |

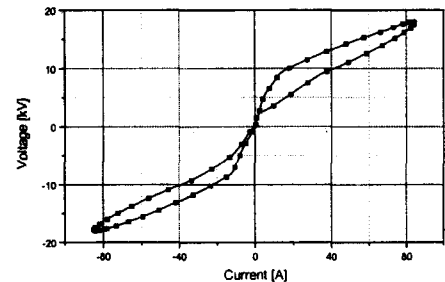


그림 10 모의된 고저항 사고의 전압-전류 특성 곡선
Fig. 10 V-I characteristic of the simulated HIF

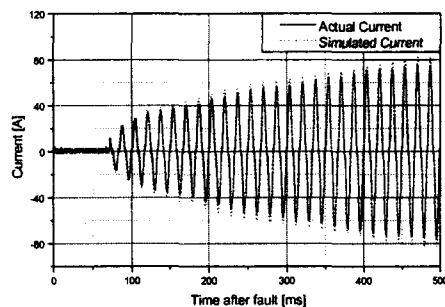


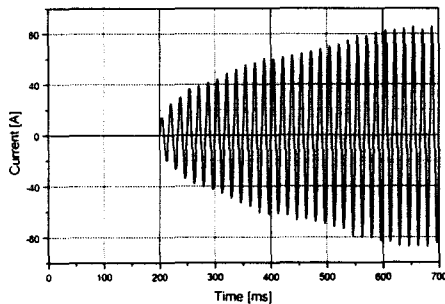
그림 11 실제의 전류와 모의된 전류
Fig. 11 The actual and simulated currents

3. 사례 연구

같은 고저항 사고라 하더라도 사고가 발생한 배전선에 연결된 부하의 종류와 용량이 다르거나 사고 거리 등 사고 조건이 다르면, 사고 지점의 전압 및 사고 가지에 흐르는 전류뿐만 아니라, 계전점에서의 전압과 전류도 다르게 된다. 그러므로, 신뢰성 있는 고저항 사고 검출 알고리즘을 개발하기 위해서는 다양한 부하 조건 및 사고 조건에 따라 고저항 사고를 모의해서 다양한 사고 데이터를 생성해야 한다. 이러한 사례 연구로서, 그림 8의 계통에서 사고 위치 및 부하의 종류를 다르게 한 상태에서 고저항 사고를 모의하여, 계전점과 사고 가지의 전류를 구하였다.

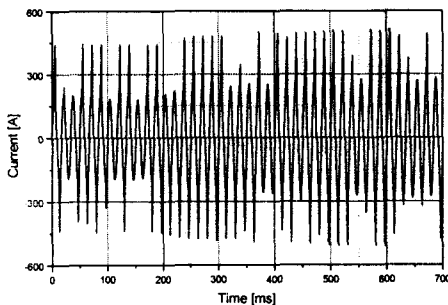
3.1 선형 + 아크로 부하

용량 4 [MVA]인 아크로 부하를 2 [km] 배전선 말단의 A상에 연결하였고 B, C상에는 역률 99%인 같은 용량의 4 [MVA]인 선형 부하를 연결하였다. 용량이 2 [MVA]인 3상 선형 부하를 1 [km] 지점에 연결하여, 총 부하 14 [MVA]를 연결하였다. 계전점으로부터 0.2 [km] 지점에서 고저항 사고를 모의하였으며, 사고 가지에서의 전류와 계전점에서의 사고 전류를 그림 12에 나타내었다. 아크로 부하를 사용하고 있기 때문에 계전점에서의 전류를 보면 사고 발생 이전에도 고조파가 포함되어 있음을 알 수 있다.



(a) 사고 가지 전류

(a) Current at the faulted branch



(b) 계전점에서의 전류

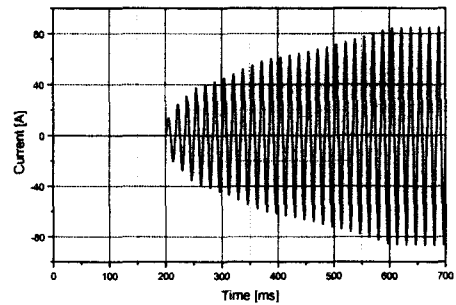
(b) Current at the relaying point

그림 12 아크로 부하가 있는 경우의 0도 사고

Fig. 12 For 0 (deg) fault with arc furnace and linear loads

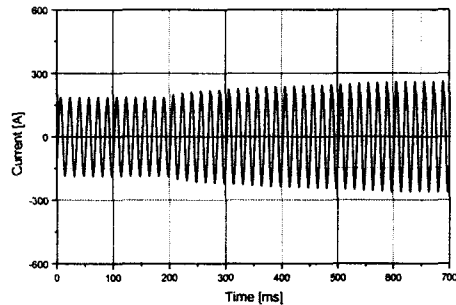
3.2 선형 + 컨버터 부하

용량 5 [MVA]의 삼상 12 펄스 컨버터 부하를 2 [km] 배전선의 말단에 연결하였으며 1 [km] 지점에 역률 99%인 2 [MVA]의 선형 부하를 연결하여 전체 부하가 7 [MVA]가 되도록 하였다. 계전점으로부터 0.2 [km] 지점에서 0도 사고를 모의한 결과를 그림 13에 나타내었다. 본 논문에서는 12 펄스 컨버터 부하를 사용하였기 때문에 컨버터 부하에 의한 고조파의 영향이 거의 없으므로, 선형 부하만 있는 경우와 유사한 특성을 보이고 있다.



(a) 사고 가지 전류

(a) Current at the faulted branch



(b) 계전점에서의 전류

(b) Current at the relaying point

그림 13 컨버터 부하가 있는 경우의 0도 사고

Fig. 13 For 0 (deg) fault with converter and linear loads

4. 결론

본 논문에서는 두 개의 직렬 시변 저항을 이용하여 고저항 사고를 모델링 하는 방법을 제시하였다. 22.9 [kV] 배전 계통의 고저항 사고 실험에서 얻은 전압, 전류 파형으로부터 고저항 사고를 두 개의 시변 저항으로 모델링 하였다. 증가 현상/멈춤 현상의 모델링을 위해서 하나의 시변 저항을 이용하였으며, 비선형성, 비대칭성의 모델링을 위해서는 다른 시변 저항을 이용하였다. 제시한 방법을 이용하여 모의함으로써 실험에서 얻은 전압, 전류 파형과 매우 유사한 파형을 얻을 수 있음을 보였다.

제시한 모델링 방법은 증가 현상과 멈춤 현상 등 다양한 고저항 사고의 특징을 표현할 수 있는 장점이 있으며, 보다 신뢰성 있는 고저항 사고 검출 알고리즘을 개발에 필요한 데이터를 생성하는 데 유용하게 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. I. Jeerings, J. R. Linders, "Ground Resistance - Revisited", IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, No. 2, April 1989, pp.949-956
- [2] A. F. Sultan, G. W. Swift, D. J. Fedirchuk, "Detecting Arcing Downed-Wires Using Fault Current Flicker and Half-Cycle Asymmetry", IEEE Trans. on PWRD, vol. 9, No. 1, January 1994, pp.461-467
- [3] 강용철, 남순열, 박종근, 장성일, "EMTP를 이용한 전압원으로의 배전계통 고저항 사고 모델링 기법", 전기학회 논문지 A, 제48권 제11호, 1999년 11월, pp.1388-1393
- [4] M. Kizilcay, K.H. Koch, "Numerical Fault Arc Simulation Based on Power Arc Tests", EMTP News letter
- [5] W. Rogers, "Modeling of Free-Air Arcs", EMTP News letter
- [6] A. T. Johns, R. K. Aggarwal, Y. H. Song, "Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol.141, No. 2, March 1994, pp.148-154

저 자 소 개



남 순 열 (南 淳 烈)
 1973년 12월 10일생. 1996년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 서울대 공대 전기공학부 박사과정
 Tel : 02-880-7258, Fax : 02-878-1452

E-mail : ptsouth@plaza1.snu.ac.kr



박 종 근 (朴 種 根)
 1952년 10월 21일생. 1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1979년 동경대 공학계 대학원 졸업(석사). 1982년 동 대학원 졸업(박사). 1982년 4월~1982년 9월 일본 도시바 중전기기술 연구소 연구원. 1982년 10월~1983년 3월 일본 국립 에너지 물리학 연구소 연구원. 1983년 4월~현재 서울대 공대 전기공학부 교수
 Tel : 02-880-7247

E-mail : parkjk@plaza.snu.ac.kr



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