

시변 저항을 이용한 배전 계통의 고저항 사고 모델링

남 순열* 강 용철** 박종근*
 *서울대학교 **전북대학교

Modeling of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Time-Varying Resistance

Soon-Ryul Nam* Yong-Chul Kang** Jang-Keun Park*
 *Seoul Nat'l Univ. **Chonbuk Nat'l Univ.

Abstract - A more reliable relaying algorithm for detecting a high impedance fault (HIF) requires fault currents at the relaying point containing information of various HIF characteristics as well as load conditions. As HIF characteristics, there are buildup, shoulder, nonlinearity and asymmetry. This paper presents a modeling method of a HIF in a distribution system using EMTP. In order to represent HIF characteristics, the proposed method uses two time-varying resistances. The first TVR models nonlinearity and asymmetry using voltage as the input. The second TVR models buildup and shoulder using time information as the input. The proposed method is implemented in EMTP.

대칭성 뿐만 아니라 증가 현상과 멈춤 현상도 모의하기 위해서 두 개의 독립된 시변 저항을 이용하여 고저항 사고를 모델링 하였다.

2. 본 론

2.1 시변 저항을 이용한 고저항 사고 모델링

그림 1은 강 자갈에서의 고저항 사고 실험을 통해 얻은 전류 파형으로서, 증가 현상과 멈춤 현상을 보여주고 있다. 사고 발생 후 40 주기 정도에서 사고 후 정상 상태에 도달하며, 사고 발생 후 4 주기와 12 주기에서 3~4 주기 동안 전류의 증가 현상이 멈추거나 감소하고 있다.

1. 서 론

배전선의 고저항 사고는 배전선이 어떤 원인에 의해 자갈, 모래, 수목, 보도 블록, 자갈 등 저항이 큰 물질에 접촉하는 형태의 사고를 말한다. 고저항 사고는 사람이 거주하는 장소에서 가까운 곳에서 발생하므로, 신뢰성 있는 고저항 사고의 검출이 요구된다. 하지만, 고저항 사고의 사고 전류가 부하 전류에 비해 현저하게 증가하지 않고, 특성이 아크로와 같은 부하의 특성과 유사하여 사고 판정에 어려움이 많다. 이와 같은 이유로 현재 사용되고 있는 고저항 사고 계전기의 검출율은 약 50 ~ 60% 수준에 머물러 있으므로, 보다 신뢰성 있는 고저항 사고 검출 방식이 요구된다.

현재 대부분의 고저항 사고 검출 알고리즘은 실제로 발생하거나 실험에서 구한 고저항 사고의 전압과 전류를 분석하여, 이를 기반으로 개발되었다. 이러한 데이터에는 고저항 사고의 특성이 잘 나타나지는 않지만, 접촉물질이 동일한 고저항 사고라 하더라도 사고 순간의 부하 용량 및 종류가 다른 경우에는 계전점에서의 전압, 전류가 달라지게 된다. 그러므로, 보다 신뢰성 있는 고저항 사고 검출 알고리즘의 개발은 부하 및 사고 조건에 따른 다양한 사고 파형을 기반으로 해야 하며 이를 위해서는 고저항 사고의 모델링이 선행되어야 한다.

고저항 사고의 특성으로는 증가현상(buildup), 멈춤 현상(Shoulder), 비선형성(nonlinearity), 비대칭성(asymmetry) 등이 있다.[1] 이와 같은 특성들을 갖는 고저항 사고의 모델링을 위하여 여러 가지 방식이 제안되었으나,[2, 3, 4] 주로 비선형성과 비대칭성을 표현하는데 중점을 두었다. 본 논문에서는 비선형성과 비

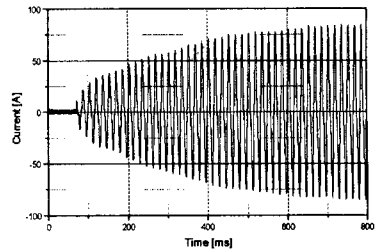


그림 1 강 자갈에서의 고저항 사고 전류
 Fig. 1 A HIF Current on robust pebbles

비선형성과 비대칭성은 사고 발생 후 모든 시간 영역에서 나타난다. 그림 2는 사고 발생 후 20 주기와 40 주기에서의 전류 파형을 함께 보여 주는데, 증가 현상과 멈춤 현상이 나타나고 있는 사고 발생 후 20 주기에서도 비선형성과 비대칭성이 나타나고 있음을 알 수 있다.

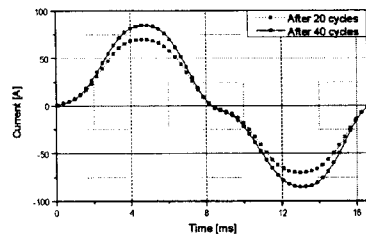


그림 2 사고 발생 후 시간에 따른 전류 파형
 Fig. 2 A current with the time after a HIF

2.2 고저항 사고 모델링

본 논문은 고저항 사고 실험에서 얻은 전압과 전류 파형으로부터 전압-전류 특성을 얻은 후, 이를 EMTP의 TACS를 이용하여 시변 저항으로 구현하였다.

고저항 사고는 배전선이 아크와 접촉 물질을 통해서 전류가 도통되는 사고로서, 고저항 사고에 나타나는 비선형성과 비대칭성은 배전선과 접촉 물질 사이에 발생하는 아크 현상에 의한 특성이며 증가현상과 멈춤 현상은 사고 후 시간이 지남에 따라서 접촉 물질과의 접촉 저항이 줄어들거나 유지되면서 생기는 과도 현상이다. 따라서 본 논문에서는 아크의 특성을 나타내는 요소와 접촉 저항을 나타내는 요소로 분리하여 고저항 사고를 모델링 하였다.

현재까지 고저항 사고의 모델링을 다룬 대부분의 논문들에서는 사고 후 정상 상태에서의 아크 현상인 비선형성과 비대칭성을 나타내는데 중점을 두었다. 사고 후 정상 상태에서는 증가 현상이나 멈춤 현상은 없고 비선형성과 비대칭성만이 나타나므로, 전압에 중속하여 전류가 변하는 전류원을 이용함으로써 고저항 사고의 모델링이 가능하였다. 그러나 전류원을 이용하여 증가 현상이나 멈춤 현상과 같은 과도 현상까지도 모의하기 위해서는 모델링이 복잡해지는 문제가 발생한다. 사고 후 정상 상태에서의 전압-전류의 관계가 증가 현상 또는 멈춤 현상이 나타나는 과도 상태에서의 전압-전류의 관계와 다르기 때문에 각 시간 영역에 해당하는 전압-전류의 관계를 다른 전류원으로 구현해야만 하기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 전압-전류의 관계를 나타내는 다른 방법으로서 전압에 중속하는 시변 저항을 선정할 수 있다. 그러나, 과도 상태에서의 전압-시변 저항의 관계에는 아크 현상에 의한 저항 성분과 접촉 저항 성분이 함께 포함되어 있으므로 아크 현상에 의한 저항 성분만이 나타나는 사고 후 정상 상태에서의 전압-시변 저항의 관계와는 다르게 된다. 과도 상태에서의 전압-시변 저항의 관계에서는 접촉 저항 성분을 제외한 아크 현상에 의한 저항 성분만을 따로 구할 수 없으므로, 과도 상태에서의 전압과 아크 현상에 의한 시변 저항의 관계가 사고 후 정상 상태에서의 관계와 동일하다고 가정하였다.

아크 현상에 의한 비선형성과 비대칭성이 전압에 중속하는 시변 저항으로 모델링된 후에는 증가 현상과 멈춤 현상의 모델링이 이루어져야 한다. 증가 현상과 멈춤 현상은 사고 후 시간이 지남에 따라 접촉 저항이 줄어들거나 유지되면서 생기는 과도 현상이므로, 시간에 중속하는 시변 저항으로 구현할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 아크 현상을 나타내는 시변 저항과 접촉 저항을 나타내는 시변 저항의 직렬 형태로 고저항 사고를 모델링 하였다. 그림 3에서 $R1(v)$ 는 비선형성과 비대칭성을 구현하기 위한 전압에 중속하는 시변 저항이고, $R2(t)$ 는 증가현상과 멈춤 현상을 구현하기 위한 시간에 중속하는 시변 저항을 나타내며, EMTP 내의 TACS에 의해서 전압과 시간에 의해서 독립적으로 제어된다.

$R1(v)$ 와 $R2(t)$ 의 모델링은 $R1(v)$ 를 먼저 한 후 $R2(t)$ 를 하게 된다. 사고 후 정상 상태에서는 증가 현상이나 멈춤 현상이 없으므로 $R2(t)$ 를 0으로 두고 $R1(v)$ 를 결정하면 되기 때문이다. $R1(v)$ 가 결정되면 $R2(t)$ 를 구해야 하는데, 사고 후 모든 시간 영역에서 $R1(v)$ 가 동일하다고 가정하였으므로 과도 영역 영역에서의 $R2(t)$ 를 결정할 수 있게 된다.

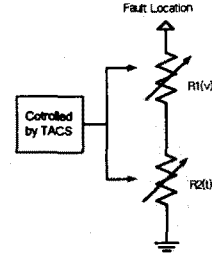


그림 3 시변 저항을 이용한 고저항 사고의 모델링
Fig. 3 HIF modeling using TVR

2.1.1 비선형성과 비대칭성의 모델링

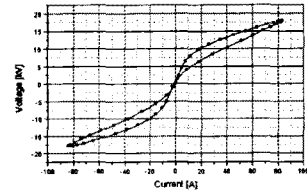


그림 4 고저항 사고의 전압-전류 곡선
Fig. 4 V-I characteristic curve of a HIF

아크 현상에 의한 특성은 과도 상태와 사고 후 정상 상태에서 동일하다고 가정하였으므로, 아크 현상만이 나타나는 사고 후 정상 상태 영역에서 한 주기 동안의 전압-시변 저항의 관계를 구현하여 모든 시간 영역에 적용하면 된다. 그림 1에 나타나 있는 전류 파형을 전압-전류 평면에 그려보면 그림 4와 같이 되며, 이 함수는 복잡하므로 우선 구간별로 선형화하였다. 그림 4의 전압-전류 특성 곡선에서 기울기의 변화가 큰 점들을 선택하여 선형화 하였으며, 본 논문에서는 1 상한과 3 상한에서 각각 7 개의 점을 선정하여 선형화하였다. 선형화된 전압-전류 특성 곡선을 각 구간에서의 시변 저항으로 표현하였으며, 각 구간에서의 시변 저항은 전압과 전류의 비로 정의하였다. $v_n \leq v < v_{n+1}$ 영역에서의 시변 저항은 다음과 같다.

$$R1(v) = \frac{v}{i(v)} = \frac{v}{i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} \times (v - v_n)} \quad (1)$$

본 논문은 고저항 사고 실험을 통해서 얻은 전압-전류 파형을 시변 저항으로 구현하였는데, 이를 모의하는 경우에는 사고 가지의 최대 전압값이 실험에서의 최대 전압값보다 크거나 작을 수도 있다. 큰 경우에는 이전 구간과 동일한 변화율을 가지는 시변 저항을 갖는다고 가

정하였으며, 작은 경우에는 시변 저항이 불연속적으로 변화하게 되므로 이런 경우는 제외하였다.

2.1.1 증가 현상과 멈춤 현상의 모델링

아크 현상을 나타내는 $R1(v)$ 가 결정된 후에는 증가 현상과 멈춤 현상을 나타내는 $R2(t)$ 를 결정해야 한다. $R2(t)$ 는 각 순간에서의 저항 값을 구한 후, 그 순간의 아크에 의한 저항 성분을 제거함으로써 구할 수 있다. 그러나 이는 너무 복잡할 뿐만 아니라, EMTP로 구현하는 것도 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 각 반 주기동안에 전류가 최대가 되는 순간의 저항을 대표값으로 선정하여 구간별로 선형화 하였으며, 그림 5에 나타나 있다. 그림에서의 저항은 $R2(t)$ 와 $R1(v)$ 가 합쳐진 값이므로 $R2(t)$ 만을 구하기 위해서는 $R1(v)$ 를 제거해야 하는데, 모든 시간 영역에서의 아크 특성이 동일하다고 가정하였으므로 전류가 최대가 되는 순간에서의 $R1(v)$ 는 상수가 된다. 사고 후 정상 상태에서는 $R2(t)$ 가 0이 되므로 그림 5의 점선 부분이 전류가 최대가 되는 순간의 $R1(v)$ 에 의한 저항 성분이 된다. $R2(t)$ 는 사고 직후에 큰 저항을 가지다가 과도 상태에서 점차 감소하게 된다. 감소 도중에 멈춤 현상이 나타나면 저항이 그대로 유지되다가 다시 감소하여 최종적으로는 0이 된다.

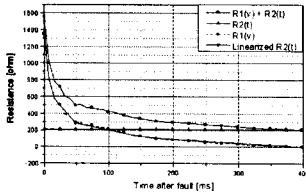
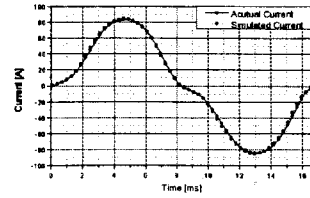


그림 5 시간에 따른 저항의 변화
Fig. 5 A change of a resistance with the time

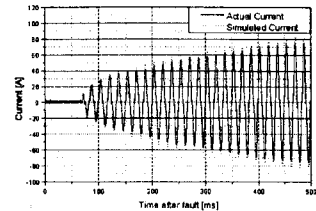
2.2 제시한 모델의 검증

제시한 모델링 방법을 검증하기 위한 모델 계통은 단락 용량이 100(MVA)인 22.9[kV] 배전 계통으로서 배전선의 길이를 10(km)로 하였고 전원에서 1(km)마다 0.5(MVA)로 하여 총 5(MVA)의 선형 부하를 연결하였으며 선형 부하의 역률은 99(%)가 되도록 하였다. 배전선의 말단 부분에 모델링한 시변 저항을 연결하여 고저항 사고를 모의하였으며, 사고 지점의 전압과 전류를 구한 후 실험에서의 파형과 비교하였다. 그림 6(a)는 사고 후 정상 상태에서의 비선형성과 비대칭성을 비교한 것으로서 모의한 전류와 실험에서의 전류가 거의 유사한 특성을 나타내고 있다. 그림 6(b)는 증가 현상과 멈춤 현상을 비교한 것으로서 약간의 차이가 있지만 추세가 비슷함을 알 수 있으며, 그림 5에서의 $R2(t)$ 를 더 세분화하여 선형화한다면 정확도를 높일 수 있다.

따라서 비선형성, 비대칭성을 표현하는 시변 저항 $R1(v)$ 와 증가 현상, 멈춤 현상을 표현하는 시변 저항 $R2(t)$ 로 분리하여 고저항 사고를 모델링하는 방식이 타당함을 알 수 있다.



(a) 비선형성과 비대칭성
(a) Nonlinearity and asymmetry



(b) 증가 현상과 멈춤 현상
(b) Buildup and shoulder
그림 6 실제의 전류와 모의된 전류

Fig. 6 The actual and simulated currents

3. 결론

본 논문에서는 고저항 사고를 시변 저항을 이용하여 모델링하는 방법을 제시하였다. 22.9 [kV] 배전 계통의 고저항 사고 실험에서 얻은 전압, 전류 파형으로부터 고저항 사고를 두 개의 시변 저항으로 분리하여 모델링하였다. 고저항 사고의 특성인 비선형성과 비대칭성의 모델링을 위해서 전압에 종속하는 시변 저항을 이용하였으며 증가 현상과 멈춤 현상의 모델링을 위해서는 시간에 종속하는 시변 저항을 이용하였다. 제시한 방법을 이용하여 모의함으로써 실험에서 얻은 전압, 전류 파형과 동일한 파형을 얻을 수 있음을 검증하였다.

제시한 모델링 방법은 고저항 사고의 전압-전류 특성이 주어지면 EMTP를 이용하여 다양한 부하 조건 및 사고 조건에 따라 쉽게 모의할 수 있다는 장점이 있으므로, 보다 신뢰성 있는 고저항 사고 검출 알고리즘의 개발에 필요한 데이터를 생성하는 데 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

[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] M. Kizilcay, K.H. Koch, Numerical Fault Arc Simulation Based on Power Arc Tests, EMTP News letter
- [3] W. Rogers, "Modeling of Free-Air Arcs", EMTP News letter
- [4] 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