

지중배전선로 서지해석의 실증적 연구

윤창섭*, 이종범, 이재봉
원광대학교 한국전력연구원

A Study on the Field Test for Surge Analysis in Underground Distribution Systems

Chang-Sub Yun * , Jong-Beom Lee Jae-Bong Lee
Wonkwang University KEPRI

Abstract - This paper describes the modelling techniques for surge analysis in underground distribution systems with power cables. To evaluate the Analysis model, the change of line model and permittivity is considered. power cable parameters calculated by LCC of EMTP are considered to evaluate surge model in underground distribution systems. It is evaluated that impulse model according to the shape of impulse source model. However it is confirmed through comparison with measurement value in field test of underground distribution systems.

1. 서 론

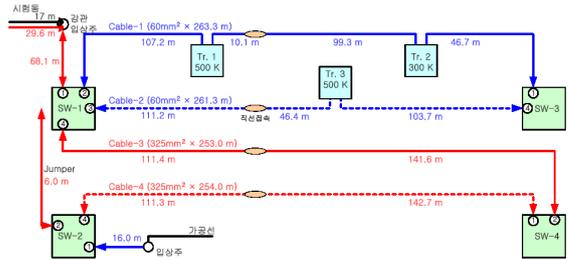
전국의 주요 지역을 중심으로 하는 고밀도 도시화로 인하여 지중배전계통은 나날이 증대되고 있으며 전력의 안정적 공급을 필요로 하는 중요한 시설과 장비들이 설치된 수용가도 점차 증가되고 있다. 또한 지중배전계통에서는 가공으로 이루어진 선로와는 다르게 신속한 고장의 복구가 쉽지 않으며 가공배전선로를 통해 침입한 뇌 임펄스 또는 차단기 동작 등의 영향으로 각종 과도현상이 발생하여 계통에 과전압이 발생하게 된다. 과전압이 계통에 반복적으로 발생하면 지중배전케이블 열화가 진행되며 이러한 영향은 누적되고 더 나아가서는 절연파괴가 되어 장시간 정전을 유발시키는 요인으로 작용된다. 따라서 지중배전계통에서 과전압의 발생과 보호를 위한 서지특성을 해석하는 것은 계통의 상태를 파악하고 보호하여 안정적인 운전 상태를 확보하기 위한 중요한 연구이다. 이러한 연구를 수행하기 위해서는 지중배전계통에 대한 실제 시험과 시뮬레이션을 병행하여 보다 정확한 모델링 기법에 관한 연구가 필요하다. 따라서 이러한 연구를 위해 한국전력공사에서 지중배전계통 서지 특성에 관한 실측시험을 실시하였고 시험을 통해 측정된 결과와 EMTP 시뮬레이션의 결과 비교를 통해 서지해석 모델을 제안하고자 하였다. [1] 논문에서는 국내에서 한국전력 고장 실측시험장에서 실시된 모의 지중배전계통에 대해 서지 전과특성 시험을 실시하고 측정된 결과를 근거로 하는 EMTP 모델 값을 제시하였다. 또한 지중배전케이블의 서지전과특성을 해석하고 지중배전계통에 대한 서지해석 모델을 정립 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지중배전계통 시험 선로

시험 선로는 국내 지중배전계통의 배전설계기준에 따라 설계하여 시험선로의 여건과 다양한 회로 연결 조건(선로의 길이 변화, 선종의 변화, 분기선로 모의, 측정점의 연결 등)의 시험이 가능하도록 하였다. 시험선로는 그림 1과 같이 시험동으로부터 강관 입상주 까지 지중케이블과 가공선로를 모두 설치함으로써 뇌 임펄스가 가공선을 통하여 지중선으로 입사되는 경우와 지중케이블에 직접 입사하는 두가지 경우를 시험할 수 있도록 하였다. 케이블은 지중배전계통에서 주로 사용되고 있는 325 mm 규격의 케이블과 60 mm 규격의 케이블 선로 4개 회선을 설치하였으며 각 회선을 개폐기에 접속함으로써 개폐기의 조작에 의하여 선로 길이의 변화와 분기선로 등을 모의할 수 있도록 배치하였다. 60 mm 규격의 케이블에는 중간에 지상변압기를 설치하여 지상변압기에 의한 뇌임펄스 전달특성 영향도 분석 할 수 있도록 하였다. 모든 케이블은 현재 국내 지중배전계통에 가장 많이 설치되어 있는 CNCV-W 케이블이다. 2번개폐기(SW-2)에는 가공선이 연결될 수 있도록 하여 지중케이블에 유입된 뇌서지가 가공선과 연결된 부분에서 어떠한 변화를 보이는 지 검토할 수 있도록 하였다. 개폐기 1번과 2번은 근접하여 설치되어 있고 지중배전계통의 표준 구간인 약 250m의 거리에 개폐기 3번과 4번이 근접하

여 설치되었다.



〈그림 1〉 지중배전계통 모의시험선로 간선도

2.1.1 실측시험 서지발생장치

본 연구에서는 고장 전력시험센터에 설치된 뇌임펄스 전압 발생장치를 이용하여 지중배전시험선로에 1.2×50μs 표준 뇌임펄스 전압, 50kV로 시험을 하였다. 뇌임펄스 전압 발생장치의 전압을 생성시키는 기본 회로는 Marx 회로를 채용하고 있다. 최대 600kV의 전압을 발생시키기 위하여 여섯 개의 커패시터를 직류 충전전원으로 충전하고 직렬 연결된 커패시터를 트리거 갭을 통하여 시험대상물에 임펄스 전압을 인가하는 구조이다. 이때 파형의 모양은 주로 직렬저항에 의하여 결정되고, 시험대상물의 정전용량이 크거나 파두시간을 길게 할 경우에는 충전 커패시터의 용량을 증가시켜야 한다. 충격전압 발생장치의 제원은 표 1과 같다.

〈표 1〉 충격전압 발생장치 사양

Performance	Value
Total Charging Voltage	600kV 30kJ
Wave Shape	1.2/50 μs , Standard Impulse
Charging Capacitors	6 Stages of 1 μF - 100 kV Capacitors

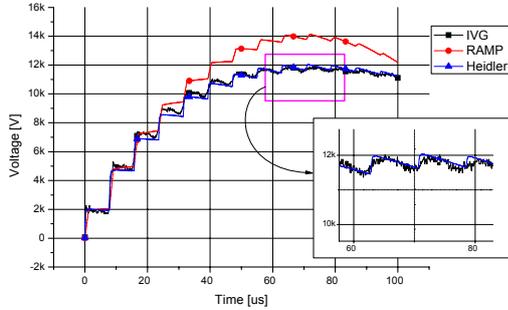
2.1.2 서지모델링

EMTP에서 서지해석을 위한 뇌임펄스 모델링은 매우 중요하다. 따라서 실측시험을 통해 측정된 뇌임펄스 파형과 EMTP해석에 적용하고자 하는 파형은 최대한 동일한 특성을 가져야만 한다. 지중배전계통에 인가된 뇌임펄스와 시뮬레이션의 뇌임펄스가 동일한 특성을 가질 때 계통해석을 통해 다른 성분의 정확성을 확보할 수 있다. 실제 자연현상의 뇌임펄스는 선형적인 파형이 아니라 지수적인 특성을 갖는 비선형의 파형을 나타낸다. 그러므로 본 연구에서는 선형적 특성을 갖는 RAMP파형보다 지수적인 특성을 갖는 서지파형이 적합할 것으로 판단하였다.

실측시험에 사용된 파형과 등가성분을 갖는 파형을 모델링하기 위해 모의 지중배전선로 EMTP 해석을 이용하여 RAMP 파형과 Heidler 파형의 비교를 통해 신뢰성 있는 모델을 수립하고자 하였다. 이를 위해 지중배전케이블을 시험동에서부터 개폐기 3번까지 접속하여 CNCV 325mm케이블로 구성된 97.8m, 253m, 254m의 지중배전선로를 모의하여 1.2×50μs 표준 뇌임펄스 전압 50kV를 인가하였다. 실측시험의 전압 파형은 IVG(Impulse Voltage Generator)에 설치된 오실로스코프를 통하여 측정하였으며 그림 2는 실측시험에 사용된 동일한 선로를 모델링하여 IVG의 파형과 EMTP에 계산이 쉽고 적용하기가 편리한 Slope-RAMP파형과 Heidler파형을 RAMP, Heidler로 표시하고 비교하였다.

실측시험을 통해 측정된 전압의 Peak값은 12.07kV로 나타났다. 시뮬레이션에서 적용된 RAMP파형과 Heidler파형은 전원모

델로서 각기 다른 특성을 나타내는데 RAMP파형은 선형적인 파형의 형태로 표시되며 Heidler파형은 비선형적인 형태로 뇌임펄스가 모의된다. 여기서 두가지 모델을 각기 적용하였을 때 나타나는 전압에는 큰 차이가 있었다. 그림2.3에서 보논바와 같이 동일한 지중배전선로일 때 RAMP파형은 실측시험을 통해 측정된 전압보다 2.1kV의 높은 전압이 발생하였다. Heidler파형을 적용하였을 때는 실측시험과 동일한 전압이 나타났다. 이를 통하여 볼 때 EMTP시뮬레이션에서 뇌임펄스 해석을 위한 모델을 선정할 경우, 같은 파라미터를 가질 때 선형적인 RAMP파형보다 비선형특성을 가지는 Heidler파형이 정확도가 높은 것으로 확인되었다.



〈그림 2〉 실측시험결과와 시뮬레이션 전압 비교

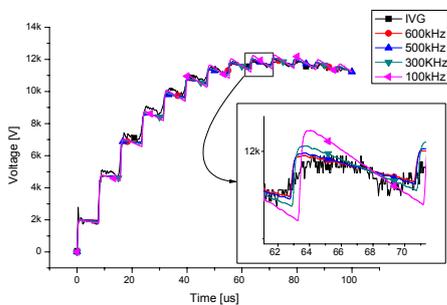
2.2 서지전파특성 시험모델

서지해석을 위해 배전케이블의 모델링은 매우 중요하다. 뇌임펄스가 인가되었을 때 케이블의 모델링이 정확하지 않다면 결과값은 왜곡되어 나타날 것이고 이러한 데이터로 과도현상을 해석할 경우 부정확한 설계로 이루어질 수 있으며 심각한 경우 운전중 고장에 이르게 될 가능성이 있다. 따라서 실제측정값에 근거하는 데이터를 사용하여 모델링을 하여 신뢰성 있는 케이블의 모델을 수립해야 할 필요가 있다.[2]

〈표 2〉 지중배전케이블 특성

공칭 단면적 (mm ²)	도체 (mm)	내부 반도전층 (mm)	절연층 (mm)	외부반도전층 (mm)	중선선				시스 (mm)	외경 (mm)	전기저항 (Ω/km)
					소선경 (mm)	소선 수	총단면적 (mm ²)	외경 (mm)			
60	9.3	0.6	6.6	0.7	1.2	18	20	30	3.0	36	0.305
325	21.7	0.6	6.6	0.7	2.6	38	201	53	4.0	61	0.0568

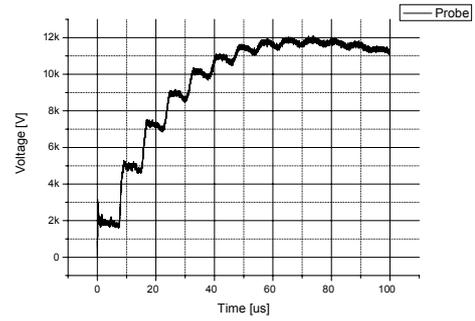
서지해석을 위해서는 선로정수계산을 위하여 계산 주파수를 입력하여야 한다. 주파수의 변화를 주어 실측시험에서 측정된 결과와 비교한 결과를 그림 3에 나타내었다. 100kHz에서 600kHz까지 주파수값을 변경하며 시뮬레이션한 결과, 주파수가 낮을수록 계단형태로 발생하는 전압의 상승비와 하강비가 높게 나타났다. 선로정수 계산주파수는 500kHz로 계산하였을 경우 실측파형과 가장 일치하였다. 따라서 대지 저항율은 일반적인 대지에 100Ω을 사용하며 200Ω 300Ω등 다양한 저항 값을 사용하여 계산하여도 발생된 전압 값에는 영향을 미치지 못했다.



〈그림 3〉 주파수변화에 따른 발생전압

한편 실측시험을 통해 측정된 진행파의 속도는 IVG에서 인가된 1.2/50μs 50 kV의 뇌임펄스 전압을 커패시턴스가 큰 케이블에 인가하면 케이블의 커패시턴스에 의하여 초기 전압이 1.9kV 수준

으로 감소되고 케이블이 충전되는 과정의 V-t 곡선으로 그림 4처럼 나타난다.



〈그림4〉 지중배전케이블에서의 진행파 파형

케이블의 뇌임펄스 전파특성은 7.5μs단위로 전압이 상승하는 것으로 나타났다. 시간 0에서 IVG로부터 1.9kV 정도의 뇌임펄스가 인가되어 15.0μs에서 두 번째로 전압이 상승되기 시작하여 9.0μs 정도에 5.0 kV 정도가 되고, 세 번째로 8.6μs에서 다시 전압이 상승하여 17.0μs 정도에 7.2kV 정도가 되고, 네 번째로 22.5μs에서 다시 상승하여 24.5μs에서 9.0kV 정도가 된다. 지중배전케이블에서의 전압상승은 초기에 약 7.5μs마다 발생하고 있다. 이것은 표준 뇌임펄스가 IVG에서 인가된 후 개폐기 SW1과 SW4를 지나 SW2까지 전달된 후 SW2에서 반사되어 IVG에 설치되어 있는 Probe에서 측정된 것으로 추정된다. 따라서 전파속도는, 뇌임펄스가 7.5μs동안 (97.7+253+254)×2 m의 케이블을 이동한 것이므로 (97.7+253+254)×2 m/7.5 μs = 161.25 m/μs가 된다. 이렇게 계산된 진행파 속도를 이용하여 지중배전케이블의 비유전율을 계산할 수 있다. 실측시험의 서지 전파속도를 식 (1)에 적용하여 계산할 수 있다.

$$\text{전파속도 } v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad [\%] \quad (1)$$

여기서 v : 전파속도, μ : 매질의 투자율, ϵ : 매질의 유전율

실측된 케이블의 전파속도를 근거로 하여 식 (1)을 이용하여 계산하면 케이블의 비유전율은 CNCV-W 325 mm에서 약 ≒3.4가 된다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 연구개발 사업 (R-2005-0-030)으로 수행 되었습니다.

3. 결 론

본 논문에서는 보다 정확한 지중배전계통의 과도현상해석을 위해 실측시험에 근거하여 작성된 모델을 제안하였다. 과도현상해석에 영향을 주는 요인으로는 임펄스 모델과 선로정수모델, 선로의 물리적 전기적 특성, 선로정수 계산 주파수, 대지 저항율, 선로구성 조건 등이 기인한다. 이러한 요인 중에서 뇌임펄스 모델은 이상적인 RAMP모델보다 자연계 현상과 가까운 지수특성을 갖는 Heidler모델이 실측파형과 가장 일치되는 것으로 나타났다. 또한 선로정수계산 주파수는 100kHz~600kHz의 주파수를 이용해 계산한 결과 500kHz가 감쇠되는 값과 용이한 계산, 파형의 형상에서 일치되는 결과를 나타냈다. 이러한 결과를 통해 작성된 모델링으로 EMTP 서지해석 시뮬레이션을 하였을 때, 지중배전계통의 과도현상에 해석 데이터에 높은 신뢰성을 가질 수 있는 것으로 사료되며 차후 피뢰기를 통한 뇌임펄스 전류시험을 통해 배전급 피뢰기의 보호효과에 대한 과도해석을 하고자 한다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 한국전력, “지중배전계통 과도현상 해석 및 보호대책 연구-중간보고서” 2007. 1
- [2] 한국전력, 97본사단-181 “設計 基準” 1997
- [3] 한국전력, “배전계통 이상전압 측정 및 대책 연구-최종보고서” 2000. 8