

지중배전계통에서 변압기 모델을 고려한 과도현상 해석

윤창섭* 이종범* 송일근** 김병숙**
원광대학교 한전 전력연구원

Analysis of Transient Phenomena Considering Transformer Model
in Underground Distribution Systems

Chang-Sub Yun*, Jong-Beom Lee*, Il-Kun Song**, Byong-Sook Kim**
*Wonkwang University, **KEPRI

Abstract - This paper describes the transient phenomena considering transformer model in combined distribution systems with power cables. To evaluate the overvoltage, the change of transformer model and system structure are considered. Transformer parameters calculated by BCTRAN of EMTP are considered to evaluate surge generation in underground distribution systems when underground distribution system has various parameters. It is evaluated that overvoltage value increases and decreases according to the structure of system. However it is confirmed that there is not much effect to overvoltage as transformer is operated in distribution line.

1. 서 론

국내의 지중배전계통은 인구밀집과 도시전력공급 원활화와 용지 부족의 해결 및 도시 환경조화를 충족하기 위해 그 규모가 증가하는 추세에 있다. 더불어 지중계통의 원활한 운용을 위해 과도현상 해석이나 보호방안 등의 연구를 하고 있다. 그러나 배전계통에서의 과도전압 발생현상에 대한 정확한 분석이 이루어지지 못함으로써 적절한 보호기준이 마련되지 못하고 지중설비를 과열연하고 있음에도 불구하고 원인불명의 고장이 발생하고 있다. 그러므로 국내 지중배전계통의 과도현상 해석의 정밀성을 높이기 위해 명확한 모델링기법을 제안하여 지중배전계통의 과도현상을 해석하고 적절한 보호기준 마련을 위한 연구가 필요하다.[1-2] 따라서 과전압을 일으키는 원인의 종류와 선로, 지지물, 피뢰기, 변전소, 지중배전용 지상변압기 설비 등 계통해석에 영향을 미치는 파라미터에 대한 영향을 체계적으로 검토하여야 하며, 본 논문에서는 지중배전계통의 과도현상을 효과적으로 분석하기 위해 지중배전계통에 적용되는 변압기와 다양한 파라미터를 고려하여 그에 따른 영향을 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 모델링

국내 배전계통은 22.9kV-Y 3상 4선식 다중접지 시스템으로 구성되어 있다. 지중배전선로는 가공선로와 동시적으로 존재하는 경우가 많다. 따라서 지중배전선로의 서지침입을 모의하기 위한 가공선로를 최소 조건으로 구성하고 지중배전선로에 구성되는 변압기 모델을 고려하여 모델링을 하였다. 배전선로 모델에 적용되는 조건은 국내에서 사용되고 있는 한국전력의 설계 기준을 참고하여 작성되었으며 지중배전선로에 사용되는 지상용 변압기를 고려하여 모델링을 하였다[3-8]. 서지 모델은 피뢰기를 고려하지 않은 모의시험선로이기 때문에 실제계통과 같은 가압된 상태가 아니다. 그러므로 선로의 지중경로에 침입된 서지를 통한 과도현상의 특성을 규명하기

위해 100V의 서지전압을 0.5×4us 파형으로 모의하여 가공선로를 통해 인가하였다. 또한 지중배전선의 서지 침입을 모의하기 위해 가공선로를 정합시켜 가공선로에서의 반사파 영향을 제외시켰다. 가공선로 전주로 침입되는 서지는 혼합 접속부를 통해 지중선로로 전파되는 계통모델로 모의하였다. 이러한 모델링은 지중배전계통 과도현상해석을 위한 계획으로 고장 실증시험장에서 실시될 예정이다.

2.1.1 가공배전선로

가공배전선로는 국내에서 사용되는 콘크리트 전주를 적용하였으며 선로 모델에 사용된 케이블의 선종은 ACSR로 하고, 가공지선 32mm를 적용하였고 상도체는 160mm², 중성선은 95mm²를 각각 적용하였다. 선로의 길이는 20m로 구성하였다. 가공선로의 길이를 20m로 정한 이유는 지중케이블이 접속되는 지점의 가장 가깝게 모의하는 것이 지중배전계통에 가장 큰 과전압이 발생하기 때문에 서지해석을 위한 가혹한 환경이 되도록 설정하였다.

2.1.2 지중배전선로

지중배전선로를 모델링하기 위해 고려해야 할 사항은 전력케이블의 매설방법, 선로의 배치, 선로의 구조에 따라 달라지며, 매설방법으로는 직매식, 관로식, 전력구식이 있으며 현재 포설되어있는 형식은 관로식이 주류를 이룬다. 본 논문에서 사용된 지중배전용 전력케이블은 CNCV-W와 FR CNCO-W를 삼각 배열 형태로 관로식과 전력구 식으로 구성하였다. 또한 전력케이블의 선로 정수는 전자기해석 프로그램인 EMTP를 통해 계산하여 적용하였다. 지중배전선로의 길이는 Case마다 200m 간격을 모의하였고, 분기선로의 경우 230m씩 병렬 선로로 구성되 선로 중간지점에 지상변압기를 모델링하였다. 또한 분기선로가 고려된 모델에는 지중배전선로를 230m 단위로 모델링하였다.

2.1.3 변압기 모델링

지중배전선로에 사용되는 변압기는 주로 지상용변압기로서 모델링하기 위해 고려해야 할 사항은 변압기에 적용되는 특성이다. 변압기의 개방시험과 단락시험을 통해 얻어지는 입력데이터를 통해 EMTP내의 BCTRAN 보조루틴을 사용하여 변압기를 모의한다. 이때 사용되는 데이터는 계통주파수, 변압기 정격용량(S_POS), 정격전압(V_HL/V_LV), 개방시험을 통한 여자데이터인 여자손실(L_EX) 여자전류 (I_EX) 여자전압(V_EX) 또 단락시험으로 얻을 수 있는 단락손실(L_SH) 단락전류(I_SH), 단락전압(V_SH)이다. 이러한 변압기 시험데이터를 가지고 BCTRAN에 사용되는 값으로 변환하기 위해 변환식으로 나타내었다[9].

$$I_{pos} = I_{ex} \times \frac{V_{LV}}{V_{ex}} \times \frac{V_{LV}/\sqrt{3}}{S_{POS}} \times 100 \quad (1)$$

$$L_{pos} = L_{ex} \times \left(\frac{V_{LV}}{V_{ex}} \right)^2 \quad (2)$$

$$Z_{ik} = \frac{V_{sh}}{\sqrt{3}I_{sh}} \times \frac{S_{pos}}{V_{HV}^2} \times 100 \quad (3)$$

여기서,

- I_{pos} : 정상분 여자전류 성분[A]
- I_{ex} : 개방시험 측정 여자전류[A]
- V_{LV} : 저압측 권선 정격전압[kV]
- V_{ex} : 단락전압[kV]
- S_{pos} : 변압기 정격용량[MVA]
- L_{pos} : 정상분 여자손실 성분[kW]
- L_{ex} : 여자손실[kW]
- V_{ex} : 여자 전압[kV]
- Z_{ik} : 정상분 단락회로 임피던스[Ω]
- V_{sh} : 단락전압[kV]
- I_{sh} : 단락전류[A]
- V_{HV} : 고압측 권선 정격전압[kV]

위와 같은 식을 적용하여 계산된 값을 통해 변압기를 모델링 할 수 있는데 이때 BCTRAN이라는 EMTP의 보조루틴을 사용하여 계산하게 된다. 데이터를 입력하기 위해서는 변압기의 정격사양과 전기적 특성이 필요하다. 변압기를 모델링하기 위해 본 논문에서 사용된 A 사 변압기의 정격 및 전기적 특성은 표1, 표2와 같다.

표 1. 변압기 정격사양
Table 1. Performance of transformer

상수	3상
주파수	60Hz
HV정격전압	22,900V
LV정격전압	380-220V
고압탭전압	F23,900-R22,900-21,900-20,900-19,900V
탭결환 방식	무전압(off-Load)
결선	Dyn11
충격전압절연내력(HV/LV)	95/-kV
상용주파절연내력(HV/LV)	50/3kV

표 2. 변압기 전기적 특성
Table 2. Electrical characteristic of transformer

용량 (KVA)	무부하 전류(%)	전압 변동율 (%)	무부하 손실 (W)	부하 손실 (W)	효율 (%)	임피던스 (%)
150	1.3	2.0	410	2180	98.3	6

2.2 선로길이의 변압기를 고려한 영향

지중배전선로는 송전계통과는 달리 선로가 매우 복잡하고 다양하며 길이 또한 일정하지 않다. 이러한 점을 감안 할 때 변압기의 설치 여부와 동시에 길이에 대한 영향도 고려하여 선로의 길이에 따라 선로에 발생하는 이상전압의 분포를 측정할 필요가 있다. 따라서 선로의 길이를 200m, 400m, 600m 800m로 각각 공통적으로 적

용하고 말단에 변압기 여부에 따른 이상전압의 분포를 측정하였다. 그림 1은 지중선로의 길이를 200m간격으로 다양화 하여 변압기를 고려하지 않은 상태로 800m까지 선로의 말단에서 측정한 전압이다.

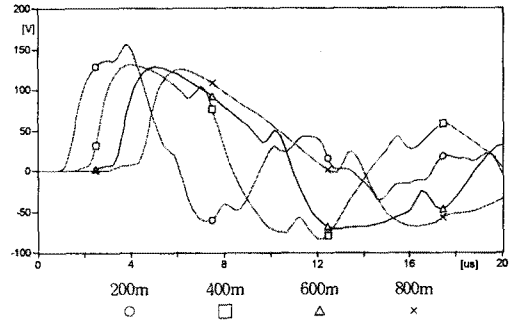


그림 1. 변압기를 고려하지 않은 선로말단 전압
Fig 1. Voltage at the end of line without transformer

거리에 따른 영향으로 전압의 피크가 발생하는 시간이 다른 것을 알 수가 있다. 또한 200m지점에서의 짧은 선로에서 말단과 접속점의 서지 증첩으로 인하여 다른 길이의 경우보다 30V 높게 나타나는 것으로 측정되었다. 그림 2는 선로길이를 200m간격으로 800m까지 모의하여 선로의 말단에 변압기를 설치하여 얻은 전압이다.

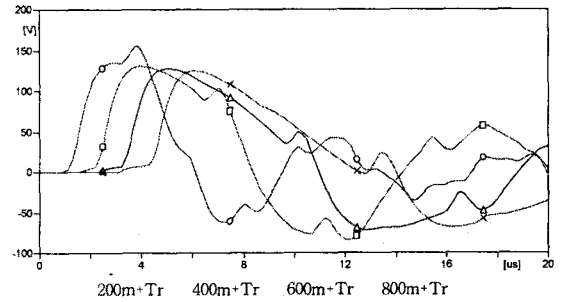


그림 2. 변압기를 고려한 선로말단 전압
Fig 2. Voltage at the end of line with transformer

지중선로의 길이를 200m간격으로 변화시키면서 말단에 변압기를 고려하였지만 파형의 변화는 전혀 없었다. 단일 지중선로에서 말단 변압기의 영향은 길이에 따른 상승시간 변화 이외에는 나타나지 않는 것으로 판단되었다.

2.3 변압기 수를 고려한 영향

실제 지중선로에서 변압기의 설치지점은 선로내의 전압 발생에 영향을 주는 요소로 작용할 수 있다. 설치된 변압기 설비의 수에 따라서 이상전압의 발생과 감소에 관여를 하며 변압기 인출 회로와 그렇지 않은 단일 선로에서의 특성은 다르게 나타날 것으로 판단된다. 따라서 설치된 변압기 설비 수가 다를 때 나타나는 영향을 측정하기 위해 800m선로를 모의하고 선로 400m지점에 변압기 인출점이 있을 때와 없을 때의 전압을 측정하였다. 변압기 설비의 수와 변압기의 용량은 선로의 부하용량에 따라 다르게 구성되며, 이러한 선로의 여러 가지 상황에 따라서 이상전압 또한 비교할만한 영향을 나타낼 것으로 추정되기 때문에 설치된 변압기설비의 수를 고려한 측정의 의미가 있다고 판단하여 측정하였다. 그림 3에는 선

로의 중간지점에 변압기 인출선로가 존재하여 복수의 변압기가 설치되었을 때 측정된 전압이다.

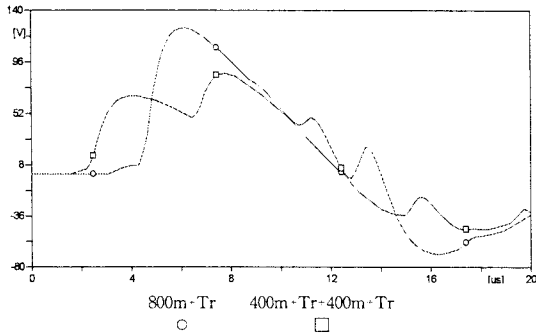


그림 3. 변압기 수를 고려한 경우의 전압
Fig 3. Voltage obtained by considering transformer number

모의된 선로 800m에서 말단에만 변압기가 설치된 경우에는 128V의 전압이 발생하였으나 400m의 접속점에 변압기 인출점이 모의된 경우에는 발생된 침투 전압 값이 88V가 발생했다. 앞서 측정된 2.2의 단일선로에서 말단의 변압기 유무는 발생전압에 영향을 주지 않았지만 선로의 중간에 설치된 변압기는 과전압 발생의 감소 효과를 나타내는 것으로 측정되었다.

2.4 분기선로와 변압기를 고려한 영향

선로의 길이와 변압기설비를 고려한 상태에서의 영향에서 단일선로일 경우와 분기선로에서의 이상전압 발생은 또 다른 형태를 나타낸다. 분기선로는 단일선로와는 다른 형태로 서지가 전파 되며 이때 발생하는 전압을 측정하기 위해 변압기가 설치된 분기선로의 형태를 800m의 단일 지중선로와 지중선로 접속점에서 230m, 460m의 길이의 분기가 추가된 형태로 구분하여 모의하고 그림 4와 같이 얻어졌다.

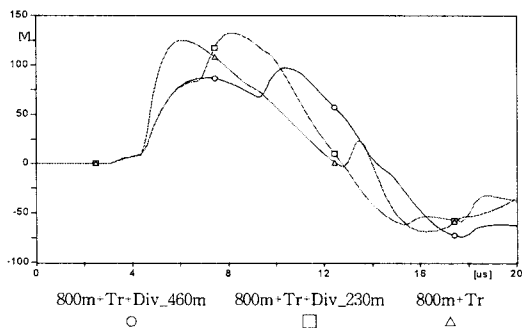


그림 4. 분기선로를 고려한 전압
Fig 4. Voltage obtained by considering feeder

단일선로에서 발생한 전압의 침투 값은 230m의 분기선로가 포함된 경우에서와 같았다. 그러나 분기선로의 길이가 460m로 적용 되었을 경우 발생된 전압은 100V 이하의 값으로 125V값을 보이는 다른 모델에 비해 과전압 감소효과가 나타나는 것을 알 수가 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 지중배전계통에서 변압기영향을 고려한 다양한 파라미터에 대해서 연구하였다. 지중선로에 변압기를 고려하여 과도현상을 해석하기 위해서는 변압기의 유무 이외에도 다양한 모의 조건들을 병행하여야 했다. 논문의 모의과정에서 변압기를 적용하여 해석한 결과 과도전압에 관련하여 변압기의 영향은 미미했다. 그러나 계통의 설비구조에 따른 영향은 크게 나타나 변압기의 특성보다 계통 구조의 영향을 많이 받는다고 판단되었다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 선로거리 변화에 따른 변압기 설비의 설치 유무와는 관계없이 과전압 발생에 영향은 거의 없으며 길이에 따른 침투전압이 발생하는 시간만 변화하였다.
- (2) 동일거리 선로 길이에서 단일선로 말단에 설치된 변압기가 있을 때 발생한 과전압은 선로 중간에 변압기 인출점이 있을 경우보다 크게 나타났다.
- (3) 같은 조건에서의 선로에서 분기선로의 길이가 짧은 경우에는 분기선로가 없는 경우와 동일한 과전압을 나타내지만 접속된 선로의 50%의 분기선로가 접속된 경우 발생하는 과전압 값이 감소하는 것으로 판단되었다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업(R-2005-0-030)으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] KEPCO, "배전계통 절연협조에 관한 연구", 2003
- [2] 기술연구원 "지중배전선 절연설계에 관한 연구" 1992.3
- [3] KEPCO, "설계기준 - 4906", 1999
- [4] KEPCO, "설계기준 - 3500 (접지공사)", 1999
- [5] KEPCO, "설계기준 - 5300(지중구조물)", 1999
- [6] KEPCO, "설계기준 - 5100(접지저항)", 1999
- [7] KEPCO, "설계기준 - 5001 총칙", 1999
- [8] KEPCO, "설계기준 - 5902 부록2", 1999
- [9] 김상태, "확신률과 퍼지률을 이용한 3상 변압기" 명지대학교 박사학위논문, 2002. 12
- [10] Electromagnetic Transient Program work book . EPRI EL-4651, pp 2149-6, 1986
- [11] Electromagnetic Transient Program Rule book Vol 1 (1-11), 9-16
- [12] KEPCO 기술연구원, "전력계통 과도현상 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구 I", 1991
- [13] KEPCO 기술연구원, "전력계통 과도현상 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구 III", 1991