

동봉접지 방식의 배전계통에서 과도접지 임피던스 개선 방안에 관한 연구

곽충근, 한병길, 임민규, 이예빈, 노대석
한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail:kcg2846@koreatech.ac.kr

An Improving Method of Transient Grounding Impedance in Distribution System of Grounding Rods Type

Chung-Guen Kwak, Byeong-Gill Han, Min-Gyu Lim, Ye-bin Lee and Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

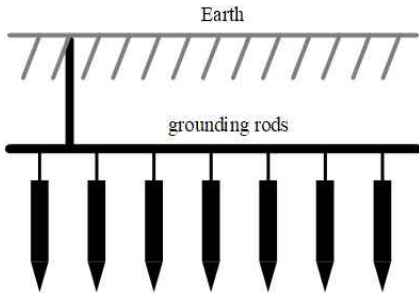
최근, 고도 정보화 시대의 급속한 발전과 신재생에너지원의 전력계통 유입의 증가로, 배전계통에서 낙뢰 및 서지 등의 피해에 대비한 피뢰·접지시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 60Hz 대역의 상용전원 계통 고장사고의 관점에서, 지락 또는 단락사고 시 인체의 감전사고 예방 및 설비보호 측면만을 고려하여 운용되어 왔으나, 신재생에너지 전원이 연계된 국내 22.9kV-Y 다중 직접접지 배전계통의 접지개념을 상용주파수뿐만 아니라 고주파 대역을 고려한 과도접지임피던스의 개선 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 동봉접지 형태의 과도접지임피던스를 개선할 수 있는 방안을 제시한다. 또한, 전력계통 상용 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, 수용가부, 뇌서지 발생장치부, 동봉접지 과도접지임피던스부로 구성된 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 개선방안과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션 수행한 결과, 동일한 뇌서지가 발생해도 수용가 측으로 흐르는 누설전류가 감소됨을 확인하였다. 따라서, 태양광 전원이 연계된 배전계통에서 과도접지임피던스를 고려한 최적화된 접지시스템을 적용하면, 뇌서지에 의한 영향을 저감하여 계통의 안전성 향상에 기여함을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 우리나라의 전력계통은 발전설비측면에서 신재생에너지가 차지하는 비중이 점차 증가하고 있는 추세이며, 전력계통의 안전성 측면에서 낙뢰 및 서지 등의 피해에 대비한 피뢰·접지시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 안전성 향상 측면에서 국내 배전계통의 접지개념을 상용주파수뿐만 아니라 고주파 대역에서의 접지임피던스를 고려한 최적화된 접지시스템이 필요한 실정이다. 고도의 전력품질이 요구되고 다양한 분산형 전원이 연계된 국내 22.9kV-Y 다중 직접접지 배전계통에서는 과도접지임피던스를 고려한 최적화된 접지시스템을 적용할 수 있는 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 태양광전원이 연계된 배전계통에서 과도접지임피던스에 따른 뇌서지 특성을 분석을 실시하였다.

2. 동봉접지방식의 배전계통에서 과도접지임피던스 특성

과도접지임피던스는 접지도체와 대지와 접촉저항 외에 인덕턴스 성분과 대지의 커패시턴스 성분으로 구성된다. 이러한 접지임피던스는 접지전극에 임펄스 전류를 인가한 후, 측정된 전압과 전류를 통하여 산정한다. 여기서, 전압과 전류의 위상 차이가 없는 경우, 과도접지임피던스는 저항성분으로만 이루어져 있는 것이므로 고유의 값을 갖는다. 한편, 전압과 전류의 위상 차이가 있는 경우, 뇌서지 전압에 따른 과도접지임피던스는 인덕턴스 성분과 대지의 커패시턴스 성분에 의하여 세 가지 특성을 가진다. 한편, 접지동봉 방식은 그림 1과 같이 현장 접지 조건 및 대지고유저항에 따라 접지전극의 길이와 간격, 수량을 고려하여 설계되며, 각각의 동봉을 직렬로 연결하는 방식이다. 이러한 접지 방식들은 서로 다른 합성 임피던스 값을 가지기 때문에, 주파수에 따른 과도접지임피던스 해석이 요구된다.



[그림 1] 동봉접지의 과도접지 임피던스 특성

3. 동봉접지방식의 배전계통에서 과도접지임피던스 산정방안

한편, 동봉접지형태의 과도접지임피던스는 용량성 임피던스, 저항, 유도성 임피던스를 조합하여 나타낼 수 있다. 먼저, 접지동봉 1개의 저항 값은 식 (1)과 같으며, N개의 접지동봉을 병렬 접지한 경우의 합성저항(R_r)은 식 (2)과 같다. 여기서, η 는 결합계수로 대지저항률과 무관한 특성을 지니며, 접지동봉간의 간격이 커지면 병렬효과가 나타나 η 가 작아진다. 또한, 접지동봉의 1개의 인덕턴스 값은 식 (3)과 같이 대지의 비투자율을 1로 상정하고, 접지극의 거리와 직경을 고려하여 산정한다. 한편, 접지동봉 1개의 커패시턴스 값은 식 (4)와 같이 대지의 유전상수(ϵ_r)와 접지극의 직경, 거리를 고려하여 산정한다. 따라서, 배전선로 및 수용가의 합성 과도접지임피던스는 식 (5)와 같이 저항과 인덕턴스, 커패시턴스 값을 이용하여 산정한다.

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l_r} \times \left(\ln \frac{2l_r}{r}\right) [\Omega] \quad (1)$$

$$R_r = \eta \times \frac{R_1}{n} [\Omega] \quad (2)$$

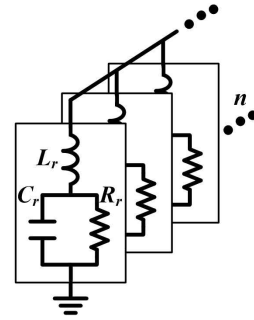
$$L_r = 2l_r \times \left(\ln \frac{4l_r}{r}\right) \times 10^{-7} [H] \quad (3)$$

$$C_r = \frac{\epsilon_r \times l_r}{18 \times \ln\left(\frac{4l_r}{d}\right)} \times 10^{-9} [F] \quad (4)$$

$$Z_r = R_r + j \frac{w C_r}{w L_r} [\Omega] \quad (5)$$

여기서, R_1 : 접지동봉 접지저항[Ω], l_r : 접지봉의 길이[m], r : 접지봉의 반경[m], R_r : 접지동봉이 n개 연결된 합성 접지 저항, η : 결합계수, n : 접지동봉의 병렬 개수, L_r : 접지동봉의 합성 인덕턴스, C_r : 접지동봉의 합성 커패시턴스, ϵ_r : 유전율, Z_r : 배전선로 및 수용가의 합성 과도접지임피던스

한편, 상기에서 제시한 식 (2) ~ 식(4)를 바탕으로 동봉접지방식의 과도접지임피던스 구성은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 접지동봉을 병렬로 연결하는 경우, 저항과 유도성 임피던스는 1/n배로 감소하고, 용량성 임피던스는 n배로 상승한다. 또한, 접지동봉의 길이를 증가시키는 경우, 저항과 유도성 임피던스는 증가하고, 용량성 임피던스는 감소한다. 따라서, 접지동봉의 길이와 굵기, 개수를 고려하여 임피던스 값을 산정해야 한다.

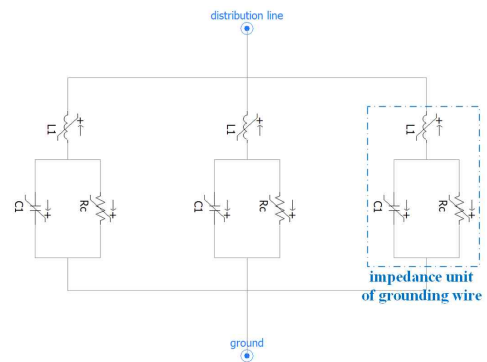


[그림 2] 동봉접지방식의 과도접지임피던스 구성

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 배전계통의 과도접지임피던스 모델링

4.1 과도접지임피던스 검출부 모델링

배전선로 및 수용가용 과도접지임피던스부는 접지동봉 형태를 바탕으로, 그림 3과 같이 용량성 임피던스, 저항, 유도성 임피던스를 조합하여 나타낼 수 있다. 즉, 과도접지임피던스부는 일반적인 형태인 3개의 동봉을 이용하여 모델링한다.

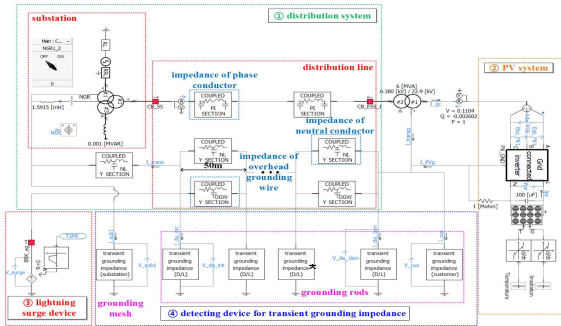


[그림 3] 배전계통 및 수용가용 과도접지임피던스 검출부

4.2 전체 시스템 모델링

전체 시스템의 구성은 그림 4와 같이 배전계통부(①), 수용가부(②), 뇌서지 발생장치부(③), 과도접지임피던스 검출부(④)로 구성된다. 뇌서지발생장치부는 접지시스템에 시험전류를 인가하기 위한 전류원으로 주파수를 가변

할 수 있도록 인버터 형태로 구성하였고, 전위상승 측정 시스템은 접지시스템의 지표면상에서 전류 유입에 따라 발생하는 전위상승을 측정하기 위한 것이다.



[그림 4] 전체 시스템 구성

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 과도접지임피던스의 모델링에 대한 유효성을 확인하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 배전용변전소 및 배전선로의 저항, 인덕턴스, 커패시턴스는 각각 $1[\Omega]$, $97.5[\mu\text{F}]$, $17.5[\mu\text{H}]$ 로 상정하고, 접지저항은 $3[\Omega]$ 과 $298[\Omega]$ 으로 상정한다. 또한, 태양광전원의 유도성, 용량성, 접지저항은 Case I ~ III로, 용량은 $100[\text{kVA}]$ 로 상정하였다. 한편, 뇌서지 발생장치는 전압 $20[\text{kV}]$, 주파수 25kHz 를 발생시키도록 하고, 배전선로의 상도체, 중성선, 가공지선의 선종은 각각 ACSR $160[\text{mm}^2]$, $95[\text{mm}^2]$, $32[\text{mm}^2]$ 을 적용한다.

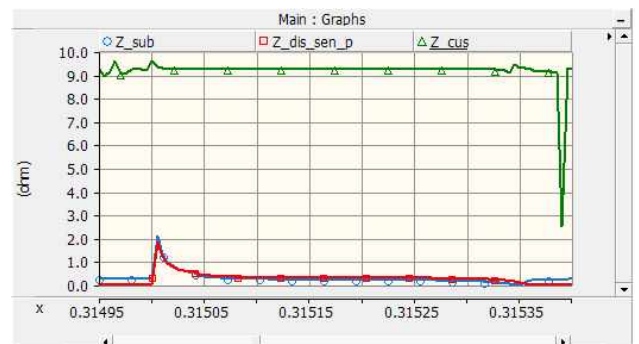
[표 1] 시뮬레이션 조건

항목		내용	
접지 임피던스	변전소	유도성($RL+jwL$)	$RL:1[\Omega]$ $L:17.5[\mu\text{H}]$
		용량성($RC+1/jwC$)	$RC:1[\Omega]$ $C:97.5[\mu\text{F}]$
		접지저항(R)	$3[\Omega]$
	배전선로	유도성($RL+jwL$)	$RL:1[\Omega]$ $L:17.5[\mu\text{H}]$
		용량성($RC+1/jwC$)	$RC:1[\Omega]$ $C:97.5[\mu\text{F}]$
		접지저항(R)	$298[\Omega]$
태양광 전원	유도성(jwL)	Case I	$L:1.3[\mu\text{H}]$
		Case II	$L:6.5[\mu\text{H}]$
		Case III	$L:0.43[\mu\text{H}]$
	용량성(jwC)	Case I	$C:0.85[\mu\text{F}]$
		Case II	$C:1.69[\mu\text{F}]$
		Case III	$C:2.54[\mu\text{F}]$
접지저항(R)	Case I	$27.7[\Omega]$	
	Case II	$13.9[\Omega]$	

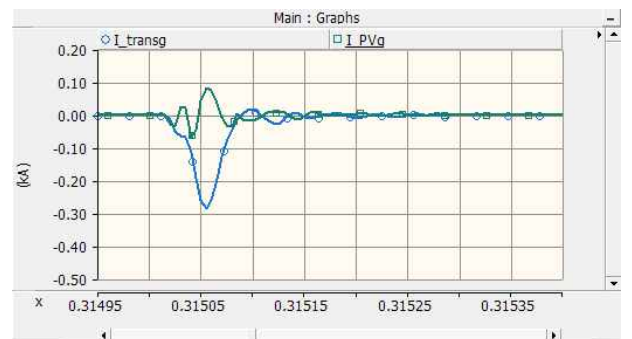
		Case III	$9.2[\Omega]$
뇌서지 발생장치		$V_{\text{peak}}: 20[\text{kV}]$ Frequency: $25[\text{kHz}]$	
태양광전원		$100[\text{kW}]$	
선로 임피던스	상도체	ACSR 160mm^2 ($R:0.182[\Omega/\text{km}]$, $L:1.04[\text{mH}/\text{km}]$)	
	중성선	ACSR 95mm^2 ($R:0.328[\Omega/\text{km}]$, $L:2.43[\text{mH}/\text{km}]$)	
	가공지선	ACSR 32mm^2 ($R:0.910[\Omega/\text{km}]$, $L:2.55[\text{mH}/\text{km}]$)	

5.2 기존 접지방식의 과도접지임피던스 특성

상기의 시뮬레이션 조건에서 태양광 전원의 유도성, 용량성, 접지저항의 값을 Case I으로 설정하고, 배전선로 인출점에서 25kHz 급 뇌서지를 발생시키는 경우, 뇌서지 전압과 뇌서지 전류의 과도접지임피던스의 특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5(a)는 과도접지임피던스 파형, 그림 5(b)는 태양광전원용 변압기의 불평형 및 태양광인버터 누설전류를 나타낸다. 먼저, 그림 5(a)에서 뇌서지 전압 파고치는 배전용 변전소, 배전선로 인출점, 태양광전원 순으로 낮아짐을 알 수 있다. 또한, 그림 5(b)에서 뇌서지 최대 전류값은 배전선로 인출점에서 $0.28[\text{kA}]$, 태양광전원에서 $0.9[\text{kA}]$ 로 산정됨을 알 수 있다.



(a) 과도접지임피던스 파형

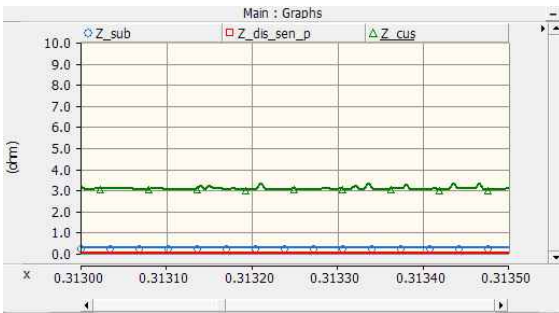


(b) 연계용변압기의 불평형 및 인버터 누설전류
[그림 5] Case I에 의한 과도접지임피던스 특성

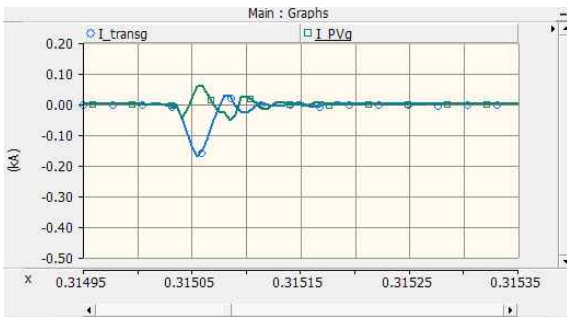
5.3 제안한 접지방식의 과도접지임피던스 특성

상기의 시뮬레이션 조건에서 태양광 전원의 유도성, 용량성, 접지저항의 값을 Case III로 설정하고 뇌서지를 발생시

키는 경우, 뇌서지 전압과 뇌서지 전류 과도접지임피던스의 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6(a)는 과도접지임피던스 파형, 그림 6(b)는 태양광전원용 변압기의 불평형 및 태양광인버터 누설전류를 나타낸다. 즉, 그림 6(a)에서 과도접지임피던스의 최대값은 배전용변전소에서 $0.2[\Omega]$, 배전선로에서 $0.3[\Omega]$, 태양광 전원에서 $3.2[\Omega]$ 으로 산정됨을 알 수 있다. 한편, 그림 6(b)에서와 같이 태양광전원용 연계변압기의 중성점에는 순간적으로 최대 약 $0.17[\text{kA}]$ 의 전류가 흐르고, 태양광 인버터의 접지에는 $0.6[\text{kA}]$ 의 전류가 흐르는 것을 알 수 있다.



(a) 과도접지임피던스 파형



(b) 연계용변압기의 불평형 및 인버터 누설전류
[그림 6] Case III에 의한 과도접지임피던스 특성

5. 결 론

본 논문에서는 태양광 전원이 연계된 배전계통에서 과도접지임피던스의 특성을 확인하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원이 연계된 배전계통에서 과도접지임피던스에 따른 뇌서지 특성분석을 실시하였다. 시험 조건으로 태양광전원의 유도성, 용량성, 접지저항을 Case I ~ II로 나누고, 용량은 $100[\text{kVA}]$ 로 상정하였다. 시뮬레이션 결과 접지임피던스가 작은 경우 태양광전원용 연계변압기의 중성점 및 태양광 인버터의 접지측에 흐르는 전류가 작아짐을 알 수 있다. 따라서, 태양광 전원이 연계된 배전계통에서 접지임피던스를 고려한 최적화된 접지시스템을 적용할 경우 뇌서지에 의한 영향을 저감하여 계통의 안전성 향상에 기여함을 알 수 있으며, 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 저항성분이 대부분인 접지전극인 경우나 접지저항이 매우 큰 배전선로의 경우, 과도접지임피던스 특성은 주파수에 대한 영향이 적음을 알 수 있다.

(2) 25kHz 급의 동일한 뇌서지가 발생할 경우 과도접지임피던스의 크기에 따라 태양광전원용 연계변압기의 중성점 및 태양광 인버터의 접지측에 흐르는 전류는 과도접지임피던스가 작을수록 낮아진다.

(3) 태양광 전원이 연계된 배전계통에서 접지임피던스를 고려한 최적화된 접지시스템을 적용할 경우 뇌서지에 의한 영향을 저감하여 계통의 안전성 향상에 기여함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Ju-Hong Eom, Sung-Chul Cho, Tae-Hyung Lee, "An Analysis Method for the Transient Ground Impedance Using Variable Frequency and Lightning Impulse Current", The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, vol. 22, no. 6, pp. 100-108, 2008.
- [2] Bok-Hee Lee, Sung-Chul Cho, "Numerical Calculation for Grounding Impedance of a Horizontal Ground Electrode Based on the Electromagnetic Field Theory", The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, vol. 28, no. 2, pp. 76-83, 2014.