

# 태양광전원이 연계된 배전계통에서 과도접지임피던스 모델링에 관한 연구

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

## A Study on Modeling of Transient Grounding Impedance in Distribution System with PV system

Chung-Guen Kwak, Kyung-Hwa Kim, Ye-Bin Lee, Se-Bin Kim, Dae-Seok Rho  
 Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

### 요약

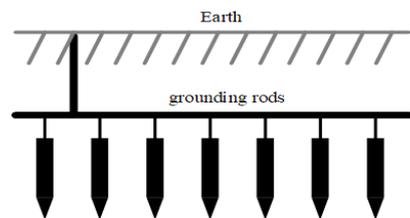
최근, 고도 정보화 시대의 급속한 발전과 신재생에너지원의 전력계통 유입의 증가로, 태양광전원이 연계된 배전계통에서 낙뢰 및 서지 등의 피해에 대비한 피뢰·접지시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다양한 분산형 전원이 연계된 국내 22.9kV-Y 다중 직접접지 배전계통의 접지개념을 상용주파수뿐만 아니라, 고주파 대역에서의 접지임피던스를 해석하기 위한 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 태양광전원이 연계된 배전계통에서 과도접지임피던스 모델링을 제시하며, 이것은 배전계통부, 태양광전원부, 뇌서지 발생장치부, 과도접지임피던스 검출부로 구성된다. 본 연구에서 제시한 모델링을 바탕으로, 태양광전원이 연계된 배전계통의 과도접지임피던스의 특성을 분석한 결과, 태양광전원용 연계변압기의 중성점에는 순간적으로 최대 약 175[A]의 전류가 흐르고, 태양광 인버터의 접지에는 64[A]의 전류가 흐르는 것을 알 수 있었다. 따라서, 태양광전원이 연계된 배전계통에서 뇌서지가 발생하는 경우, 태양광전원용 인버터에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 확인하였다.

## 1. 서론

최근, 고도 정보화 시대의 급속한 발전과 신재생에너지원의 전력계통 유입의 증가로, 배전계통에서 낙뢰 및 서지 등의 피해에 대비한 피뢰·접지시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로, 접지임피던스는 접지저항과 접지전극 자체의 저항, 인덕턴스, 토양의 정전용량 등으로 결정된다. 이러한 접지시스템은 접지망 형태에 따라 과도 상태에 대한 임피던스 특성이 다르게 나타난다. 종래의 접지시스템은 60Hz 대역의 상용전원 계통 고장사고의 관점에서 지락 또는 단락 사고 시 인체의 감전사고 예방 및 설비보호 측면만을 고려하여 운용되어 왔으나, 고도의 전력품질이 요구되고 다양한 분산형 전원이 연계된 국내 22.9kV-Y 다중 직접접지 배전계통에서는 접지망 형태에 따라 과도접지임피던스를 해석할 수 있는 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 모의 배전계통부, 태양광전원부, 뇌서지 발생장치부, 과도접지임피던스 검출부로 구성된 과도접지임피던스 모델링을 제시한다.

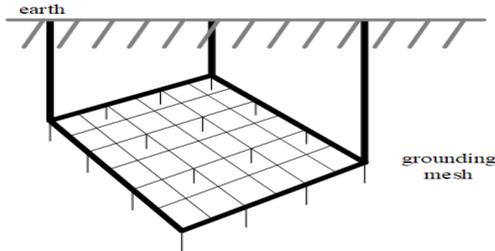
## 과도접지임피던스 특성

배전계통에서 주로 사용되는 접지망은 그림 1과 같이 접지 동봉방식과 메쉬접지 방식으로 분류된다. 먼저, 접지동봉 방식은 그림 1(a)와 같이 현장 접지 조건 및 대지고유저항에 따라 접지전극의 길이와 간격, 수량을 고려하여 설계되며, 각각의 동봉을 병렬로 연결하는 방식이다. 한편, 메쉬접지 방식은 그림 1(b)와 같이 설비 특성상 낮은 접촉전압이나 보폭전압을 확보하기 용이하여, 대형 플랜트나 발전소, 변전소에 일반적으로 사용되는 방식으로 격자 형태로 연결된 구조이다. 이러한 접지 방식들은 서로 다른 합성 임피던스 값을 가지기 때문에, 주파수에 따른 과도접지임피던스 해석이 요구된다.

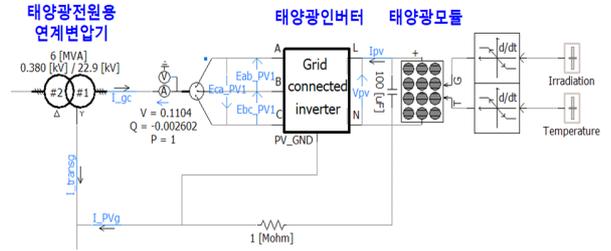


(a) 동봉접지

## 2. 태양광전원이 연계된 배전계통의



(b) 메쉬접지  
[그림 1] 접지망의 형태

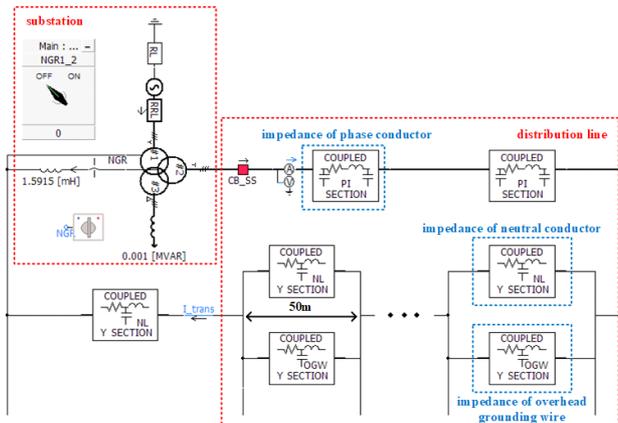


[그림 3] 태양광 전원부 구성

### 3. PSCAD/EMTCD를 이용한 배전계통의 과도접지임피던스 모델링

#### 3.1 배전계통부 모델링

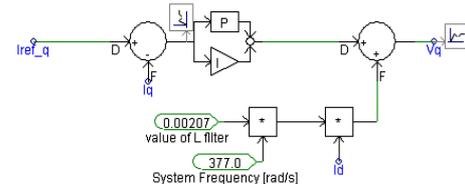
배전계통부는 그림 2와 같이 배전용변전소와 배전선로로 구성된다. 여기서, 154/22.9[kV] 배전용변전소의 주변압기 (45/60[MVA])는 3권선 Yg-Yg-Δ결선방식을 채용하고, 배전선로는 상도체, 중성선, 가공지선으로 구성되며, 22.9kV-Y 다중직접접지 방식을 적용한다. 또한, 배전선로의 상도체와 중성선, 가공지선의 선종은 각각 ACSR 160[mm<sup>2</sup>], ACSR 95[mm<sup>2</sup>], ACSR 32[mm<sup>2</sup>]로 상정하고, 이를 바탕으로 선로 임피던스를 산정한다. 한편, 배전선로의 중성선은 배전용변전소 주변압기의 중성점으로부터 인출되고, 50m마다 전주를 설치하여 가공지선을 연결하여 접지동봉방식으로 대지와 접지한다.



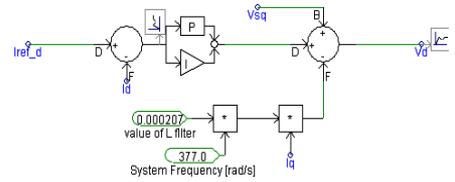
[그림 2] 배전계통부 모델링

#### 3.2 태양광전원부 모델링

태양광전원은 그림 3과 같이 태양광전원용 연계변압기, 태양광인버터, 태양광모듈로 구성된다. 여기서, 태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위한 제어기를 모델링하면 그림 4와 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



(a) q-axis current controller

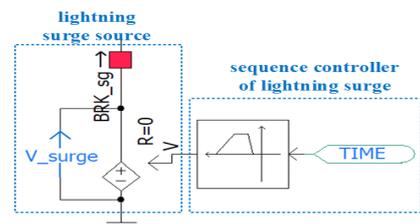


(b) d-axis current controller

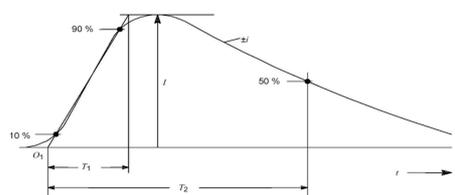
[그림 4] 태양광 전원부 구성

#### 3.3 뇌서지 발생장치부 모델링

뇌서지 발생장치부는 그림 5와 같이 뇌서지 발생장치와 뇌서지 시퀀스 제어기로 구성된다. 여기서, 뇌서지 발생장치는 그림 5(a)와 같이 시퀀스 제어기의 지령에 따라 뇌서지를 발생시킨다. 또한, 뇌서지 시퀀스 제어기는 그림 5(b)와 같이 뇌서지 표준 파형(KS C IEC 62305)을 고려하여, 규약 영점 ( $O_1$ )으로부터 30[%] ~ 90[%]를 통과하는 과도장파 과미부분에서 과고값의 50[%]까지 감소하는데 걸리는 과미장을 시간에 따라 제어한다.



(a) 뇌서지 발생장치

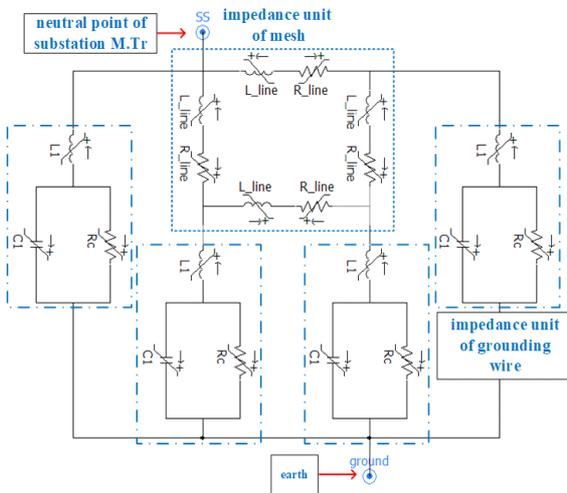


(b) 뇌서지 표준파형

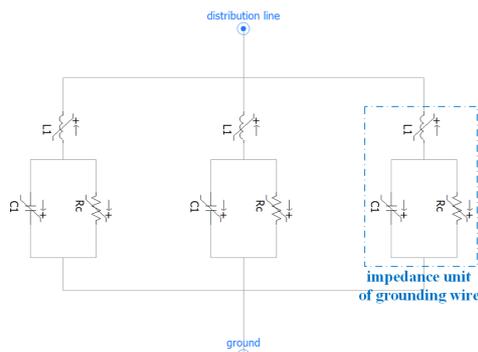
[그림 5] 뇌서지 발생장치부

### 3.4 과도접지임피던스 검출부 모델링

배전용변전소의 과도접지임피던스 검출부는 그림 6과 같이 저항과 용량성 임피던스, 유도성 임피던스를 이용하여 격자구조 단위 임피던스와 접지동봉 단위 임피던스로 구성한다. 여기서, 격자구조 단위 임피던스는 6[m]×6[m] 구조로 상정하고, 격자 저항과( $R_{line}$ ), 격자 인덕턴스( $L_{line}$ )를 직렬로 구성한다. 또한, 대지연결 단위 임피던스는 격자구조의 단위 임피던스의 각 접속점에서 대지와 연결된 구조로, 저항, 유도성 임피던스, 용량성 임피던스를 조합하여 구성한다. 한편, 배전선로 및 수용가용 과도접지임피던스부는 접지동봉 형태를 바탕으로, 그림 7과 같이 용량성 임피던스, 저항, 유도성 임피던스를 조합하여 나타낼 수 있다.



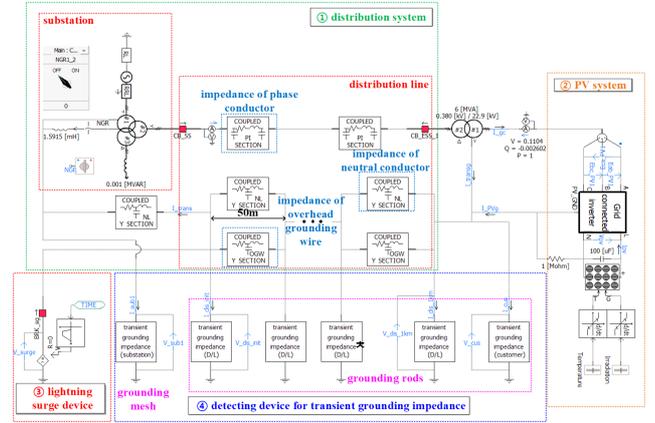
[그림 6] 변전소용 과도접지임피던스 검출부



[그림 7] 배전계통 및 태양광 전원의 과도접지임피던스 검출부

### 3.5 전체 시스템 모델링

전체 시스템의 구성은 그림 8과 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 측정시스템은 접지시스템의 지표면상에서 전류 유입에 따라 발생하는 전위상승을 측정하기 위한 것이다.



[그림 8] 전체 시스템 구성

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

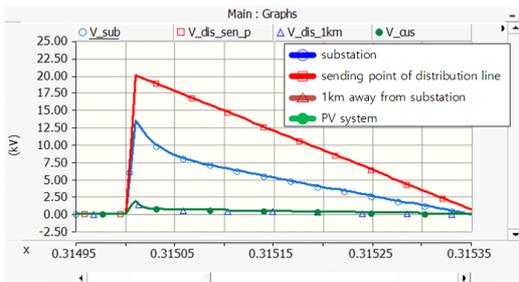
본 논문에서 제시한 과도접지임피던스의 모델링에 대한 유효성을 확인하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 배전용변전소의 메쉬접지의 단위 저항, 인덕턴스, 커패시턴스는 각각 1[Ω], 97.5[uF], 17.5[uH]로 상정하고, 배전선로 및 수용가용 저항, 인덕턴스, 커패시턴스는 각각 1[Ω], 97.5[uF], 17.5[uH]로 상정한다. 또한, 뇌서지 발생장치는 20[kV]의 전압을 25kHz와 1MHz의 주파수로 발생시키도록 상정한다. 한편, 태양광전원의 용량은 100[kVA]로 상정하고, 배전선로의 상도체, 중성선, 가공지선의 선종은 각각 ACSR 160[mm<sup>2</sup>], 95[mm<sup>2</sup>], 32[mm<sup>2</sup>]을 적용한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목		내용	
접지 임피던스	변전소	유도성(RL+jwL)	RL:1[Ω] L:17.5[uH]
		용량성(RC+1/jwC)	RC:1[Ω] C:97.5[uF]
		접지저항(R)	3[Ω]
	배전선로	유도성(RL+jwL)	RL:1[Ω] L:17.5[uH]
		용량성(RC+1/jwC)	RC:1[Ω] C:97.5[uF]
		접지저항(R)	298[Ω]
태양광전원	유도성(RL+jwL)	RL:1[Ω] L:17.5[uH]	
	용량성(RC+1/jwC)	RC:1[Ω] C:97.5[uF]	
	접지저항(R)	8[Ω]	
뇌서지 발생장치		V <sub>peak</sub> : 20[kV] Frequency: 25[kHz]	
태양광전원		1[MW]	
선로 임피던스	상도체	ACSR 160mm <sup>2</sup> (R:0.182[Ω/km],L:1.04[mH/km])	
	중성선	ACSR 95mm <sup>2</sup> (R:0.328[Ω/km],L:2.43[mH/km])	
	가공지선	ACSR 32mm <sup>2</sup> (R:0.910[Ω/km],L:2.55[mH/km])	

4.2 25kHz급 뇌서지에 의한 과도접지임피던스 특성

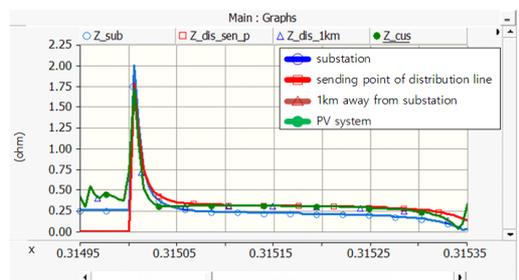
상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 배전선로 인출점에서 25kHz급 뇌서지를 발생시키는 경우, 뇌서지 전압과 뇌서지 전류 과도접지임피던스의 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9(a)는 뇌서지 전압 파형이고, 그림 9(b)는 뇌서지 전류 파형, 그림 9(c)는 과도접지임피던스 파형, 그림 9(d)는 태양광전원용 변압기의 불평형 및 태양광인버터 누설전류를 나타낸다. 먼저, 그림 9(a)에서 뇌서지 전압 파고치는 배전용 변전소, 배전선로 인출점, 배전선로 1km 지점, 수용가 순으로 낮아짐을 알 수 있다. 또한, 그림 9(b)에서 뇌서지 최대 전류 값은 배전용변전소에서 51.2[kA], 배전선로 인출점에서 32.1[kA], 배전선로 1km지점에서 3.1[kA], 태양광전원에서 2.37[kA]로 산정됨을 알 수 있다. 한편, 그림 9(c)에서 과도접지임피던스의 최대값은 배전용변전소에서 2[Ω], 배전선로 인출점에서 1.75[Ω], 배전선로 1km 지점에서 1.68[Ω], 수용가 부하에서 1.68[Ω]으로 산정됨을 알 수 있다. 한편, 태양광전원용 연계변압기의 중성점에는 순간적으로 최대 약 175[A]의 전류가 흐르고, 태양광 인버터의 접지에는 64[A]의 전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 따라서, 태양광 인버터에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있었다.



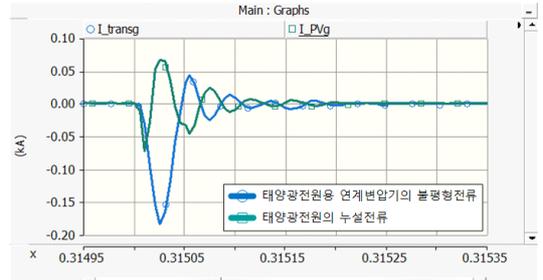
(a) 뇌서지 전압 파형



(b) 뇌서지 전류 파형



(c) 과도접지임피던스 파형



(d) 태양광전원용 연계변압기의 불평형 및 인버터 누설전류 [그림 9] 25kHz급 뇌서지에 의한 과도접지임피던스 특성

5. 결 론

본 논문에서는 태양광 전원이 연계된 배전계통에서 과도접지임피던스의 특성을 확인하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, 태양광 전원부, 뇌서지 발생장치부, 과도접지임피던스 검출부의 모델링을 제시하고, 주파수 25kHz에 대한 뇌서지의 특성을 분석하였다. 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) 태양광전원용 연계변압기의 중성점에는 순간적으로 최대 약 175[A]의 전류가 흐르고, 태양광 인버터의 접지에는 64[A]의 전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 따라서, 태양광 인버터에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있었다.

**감사의 글**

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20214910100010)로서, 관계부처에 감사드립니다.

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.