

배전선로에서의 고주파 대역에 따른 과도접지임피던스 모델링에 관한 연구

곽충근*, 최성문*, 신건*, 최익준*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:kcg2846@koreatech.ac.kr

A Study on Modeling of Transient Ground Impedance with High Frequency Band in Distribution System.

Chung-Guen Kwak*, Seong-Moon Choi*, Jian Shen*, Ik-Joon Choi*, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 고도 정보화 시대의 급속한 발전과 신재생에너지원의 전력계통 유입의 증가로, 배전선로에서 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 운용되고 있지만, 22.9kV-Y 다중 직접접지를 적용하는 국내 배전선로의 접지개념을 상용주파수뿐만 아니라 고주파 대역에서의 접지임피던스를 평가 할 수 있는 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 고주파 대역에 따른 과도접지임피던스를 모의 평가할 수 있는 과도접지임피던스 모델링을 제시한다. 이 모델링은 모의 배전선로부, 뇌서지 발생장치부, 과도접지임피던스 계측부로 구성된다. 또한, 접지방식(접지동봉, 메쉬망, XIT 등)과 토양이온화의 정도에 따른 과도접지임피던스의 특성을 분석한 결과, 주파수 영역에 따라 동일한 뇌서지가 발생할 경우에도, 과도접지임피던스가 다르게 나타남을 알 수 있었다.

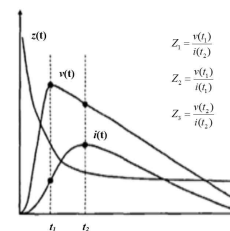
1. 서 론

최근, 낙뢰 및 서지에 의한 사고의 증가로 접지시스템의 과도접지임피던스에 관심이 집중되고 있으며, 과도접지임피던스는 접지시스템의 특성을 구분 짓는 중요한 요소이다. 접지시스템의 과도접지임피던스를 결정하는 중요한 요소들은 접지저항, 접지전극 자체의 저항 및 인덕턴스 그리고 토양의 정전용량이다. 최근 전력계통의 사고 시 낙뢰 및 서지 등 과도상태에서의 피해가 증가하는 추세이며, 종래의 접지시스템은 60Hz 대역의 상용전원 상태에서 지락 또는 단락사고 시 인체의 감전사고 방지 및 설비보호 측면에서 고려되어 왔다. 그러나 분산형전원의 증가 및 전력품질에 대한 기대 수준의 향상으로 고주파 대역에서의 접지임피던스 측정 및 과도현상에 대한 분석기술이 요구되고 있다. 본 논문에서는 고주파대역의 과도접지임피던스 시험장치의 모델링 및 시뮬레이션을 통해 과도임피던스에 대해 분석하였고, 등가주파수 개념을 도입하여 과도접지임피던스를 비교·분석 하였다.

2. 과도접지임피던스의 특성

2.1 과도접지임피던스의 개념

접지전극에 임펄스 전류를 인가한 후 측정된 전압과 전류를 통하여 과도접지임피던스를 산정하며, 접지전극이 순수 저항성분으로만 이루어져 있다면 전압과 전류의 위상 차이는 없게 되며, 과도접지임피던스는 고유의 값을 갖게 된다. 한편, 접지전극에 포함되어 있는 인덕턴스 성분과 대지의 커패시턴스 성분은 전압과 전류 파형 사이에 위상차를 발생시키며 그림 1과 같이 세 가지의 경우로 나뉜다.



[그림 1] 과도접지임피던스의 특성

첫 번째는 전압의 최대값과 전류의 최대값을 이용한 규약접지임피던스(Z_1), 두번째는 전압의 최대값과 전압의 최대값을 갖는 시간(t_1)에서의 전류값을 이용한 실효저지임피던스(Z_2), 세 번째는 전류의 최대값과 전류의 최대값을 갖는 시간(t_2)에

서의 전압값을 이용한 임피던스이다. 기존의 과도접지임피던스는 두 번째의 실효저지임피던스(Z_2)를 이용하여 구한 값이다.

2.2 접지구성에 따른 과도접지임피던스 특성

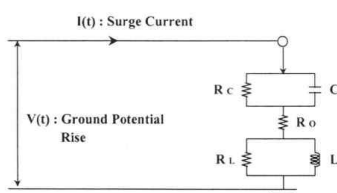
현장에서 주로 사용하는 접지동봉, 메쉬망, XIT(습식 전해질) 접지극에 대하여 동일 조건하에서 접지계를 설계하여 고주파 서지에 대한 접지시스템별 과도 응답특성을 분석하면 표 1과 같다. 한편, 접지임피던스는 주파수의 크기에 따라 매우 큰 차이를 나타낼 수 있으며, 저주파에서 고주파로 갈수록 상용의 접지저항과는 전혀 다른 접지 임피던스 크기를 나타낸다. 또한 위상 특성을 통해 임피던스의 유도성 및 용량성의 영향을 분석할 수 있으며, 접지전극의 길이와 포설 면적에 따라 고주파로 갈수록 유도성에서 용량성 임피던스 특성을 지님을 알 수 있다.

[표 1] 주파수별 과도접지임피던스

주파수(Hz)	Impedance		
	접지동봉	메쉬망	XIT
0	$4.26 \angle 0.00^\circ$	$4.08 \angle 0.00^\circ$	$4.11 \angle 0.00^\circ$
60	$4.27 \angle 1.16^\circ$	$4.09 \angle 0.00^\circ$	$4.11 \angle 0.80^\circ$
1000	$4.29 \angle 3.42^\circ$	$4.10 \angle 0.00^\circ$	$4.11 \angle 1.08^\circ$
20,000	$4.53 \angle 15.66^\circ$	$4.13 \angle 0.00^\circ$	$4.18 \angle 8.59^\circ$
100,000	$8.26 \angle 40.57^\circ$	$5.01 \angle 0.00^\circ$	$5.62 \angle 28.9^\circ$

2.3 토양이온화에 따른 과도접지임피던스 특성

토양은 보통 흙이나 자갈 같은 토양 입자와 물 그리고 공기로 구성된 복합 유전체이다. 일반적으로 접지전극의 접지저항을 나타내는 수식은 정전계의 조건에서 유도된 관계식이 가장 많이 사용된다. 접지전극의 접지저항을 나타내는 수식은 직류 성분의 전류가 입사된 경우 반구형 접지전극에서 발생하는 전위를 구하는 식으로부터 유도되기 때문에 정전계의 조건이라 할 수 있다. 토양의 유전율과 저항률을 구하기 위해서 모의 등가모델은 그림 2와 같이 커패시터 성분이 회로에 구성되며, 토양의 도전성분에 대한 부분은 저항 R, 유전체 성분은 커패시턴스 C에 의해 나타내 진다. 이상적인 직각파 전류에 대한 접지임피던스 모델의 임피던스 초기치를 Z_{HF} , 정상상태의 임피던스를 Z_{LF} 라고 하면, Z_{HF} 와 Z_{LF} 는 식(1), 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2] 토양이온화에 따른 과도접지임피던스 등가회로

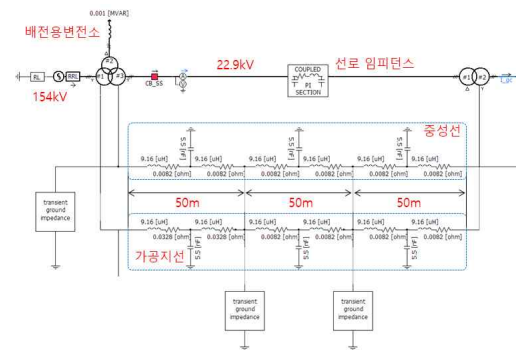
$$Z_{HF} \approx R_o + R_L \quad (1)$$

$$Z_{LF} \approx R_c + R_o \quad (2)$$

3. PSCAD/EMTCD를 이용한 배전계통의 과도접지임피던스 모델링

3.1 모의 배전선로부 모델링

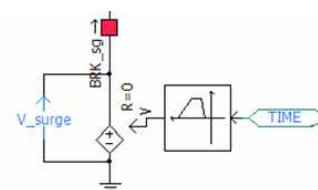
주파수 가변을 통한 과도접지임피던스 측정을 위해 접지시스템에 고주파 전류를 인가하여야 하며, 그림 3과 같이 모의 배전선로를 구성하였다. 모의 배전선로부의 구성은 배전용변전소 모델링, 배전선로 및 중성선, 가공지선을 각각 모의하였다. 가공지선 및 중성선의 접지구성은 우리나라의 배전선로가 22.9kV-Y 다중접지인 배전계통을 고려하고, 배전선로의 평균공장이 50m인 점을 고려하여 모델링하였다.



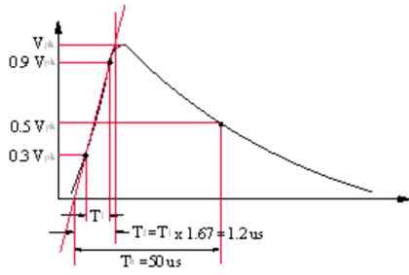
[그림 3] 모의 배전선로부 구성

3.2 뇌서지 발생장치부 모델링

뇌서지 발생장치부는 그림 4와 같이 뇌서지 전압 표준파형 ($1.2 \times 50 \mu s$)을 기준으로 뇌서지 발생장치부를 모델링하였다. 이때 뇌서지 전압의 파형을 가변할 수 있도록 하고 과도접지 임피던스 측정 외에 접지선에 발생하는 전압 및 전류를 측정하는 기능을 포함하였다. 또한, 접지임피던스 측정 방식은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 측정되도록 구성하였고, 주파수를 가변하여 고주파 영역에서도 개별적인 측정이 가능하도록 하였다.



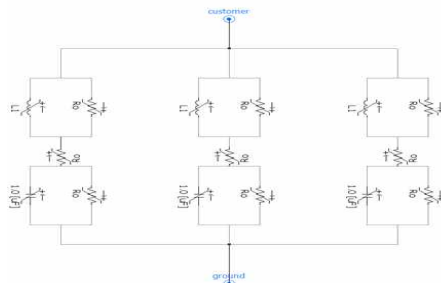
(a) 뇌서지발생장치부



(b) 뇌서지 전압 표준파형
[그림 4] 뇌서지발생장치부 구성

3.3 과도접지임피던스 계측부 모델링

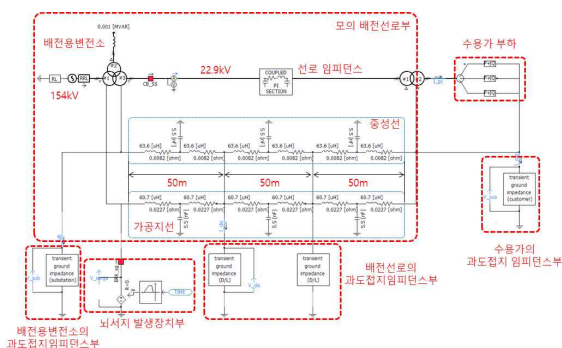
과도접지임피던스 계측부는 등가회로에 따라 용량성 임피던스, 저항, 유도성 임피던스를 조합하여 그림 5와 같이 모델링하였고, 배전용 변전소부, 배전선로부, 수용가부로 각각 나누어 설치하였다. 배전선로부의 과도접지임피던스 계측부는 국내 일반적인 배전선로의 공장이 50m임을 감안하여 50m 간격으로 3개의 전주를 구성하였으며, 각각의 배전용 전주의 접지측 과도접지임피던스부를 모델링하였다.



[그림 5] 과도접지임피던스부

3.4 전체 시스템 모델링

전체 시스템의 구성은 그림 6과 같이 배전용변전소, 모의 배전선로부, 수용가 부하로 구성된다. 뇌서지발생장치부는 접지시스템에 시험전류를 인가하기 위한 전류원으로 주파수를 가변 할 수 있도록 인버터 형태로 구성하였고, 전위상승 측정 시스템은 접지시스템의 지표면상에서 전류 유입에 따라 발생되는 전위상승을 측정하기 위한 것이다.



[그림 6] 전체 시스템 구성도

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 구현한 과도접지임피던스 시험장치의 모델링을 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같으며, 시험조건은 접지시스템에 전류를 주입하기 위한 시험전압, 주파수 및 저항을 가변시키도록 하였다. 이때 접지임피던스는 변전소, 배전선로, 수용가로 구분하여 각각 유도성, 용량성, 접지저항으로 구분하였다. 임펄스 발생장치는 V_{peak} 20[kV], 수용가부하는 3[MVA]를 기준으로 하였고, 선로임피던스는 상도체, 중성선, 가공지선에 대하여 현재 사용되고 있는 선종을 적용 하였다.

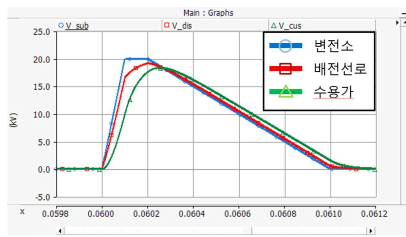
[표 1] 시뮬레이션 조건

항목			내용
접지 임피 던스	변 전 소	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]
	배 전 선 로	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]
	수 용 가	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			Vpeak:20[kV] Frequency:1[kHz],10[kHz]
수용가 부하			3[MVA]
선로 임피 던스	상도체		ACSR 160mm2 (R:0.182[Ω/km],L:1.04[mH/km])
	중성선		ACSR 95mm2 (R:0.328[Ω/km],L:2.43[mH/km])
	가공지선		ACSR 32mm2 (R:0.910[Ω/km],L:2.55[mH/km])

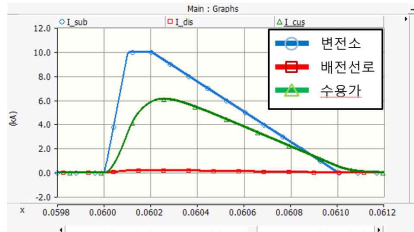
4.2 1kHz급 뇌서지에 의한 과도접지임피던스 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 접지시스템에 전류를 인가하기 위하여 뇌서지 발생장치의 시험전압 파형의 주파수를 1kHz급 뇌서지로 설정하고, PSCAD/EMTCD를 이용하여 시험한 결과 과도접지임피던스는 그림 7과 같다. 또한 여기서, 배전용변전소, 배전선로, 수용가 부하의 뇌서지 전압을 비교하면 뇌서지의 파고치는 배전용 변전소, 배전선로, 수용가 순으로 근소한 차이를 보이며 낮아지며, 뇌서지 전류의 최대값은 배전용변전소에서 75[KA], 배전선로에서 40[KA]이며, 비교적 거리 및 접지임피던스가 수용가부하에서는 3[KA] 정도의 값을 나타냈다. 또한, 과도접지임피던의 경우 배전용 변전소의 경우 100[Ω], 배전선로 및 수용가 부하의 경우는 2

~ 3[Ω]의 값을 나타냈다.



(a) 뇌서지 전압 파형



(b) 뇌서지 전류 파형

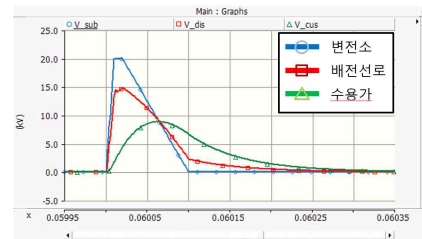


(c) 과도접지임피던스 파형

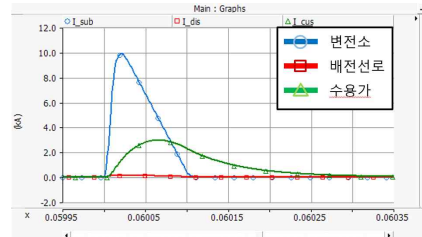
[그림 7] 1kHz급 뇌서지에 의한 과도접지임피던스 특성

4.3 10kHz급 뇌서지에 의한 과도접지임피던스 특성

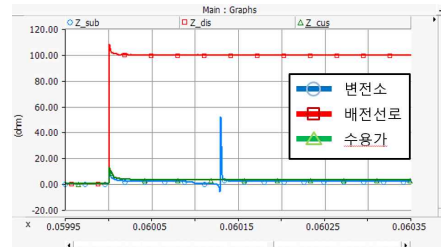
시험전압 파형의 주파수를 10kHz급 뇌서지가 유입되었을 때 측정된 결과는 그림 8과 같이 측정되었다. 여기서, 배전용변전소, 배전선로, 수용가 부하의 뇌서지 전압을 비교하면 뇌서지의 과도치는 배전용 변전소, 배전선로, 수용가 순으로 1kHz급 뇌서지가 유입되었을 때보다 큰 차이를 보이며 낮아지고, 뇌서지 전류의 최대값은 배전용변전소에서 75[Ka], 배전선로에서 23[Ka]이며, 비교적 거리가 멀고 접지 임피던스가 큰 수용가부하에서는 3[Ka]정도의 값을 나타냈다. 또한, 과도접지임피던스의 경우 안정상태에서는 1kHz급 뇌서지가 유입되었을 때와 같이 배전용변전소의 경우 100[Ω], 배전선로는 및 수용가 부하의 경우는 2 ~ 3[Ω]의 값을 나타냈다. 그러나 배전용 변전소의 과도 접지임피던스의 최대값은 52[Ω]의 임펄스 파형의 형태로 나타남을 알 수 있었다.



(a) 뇌서지 전압 파형



(b) 뇌서지 전류 파형



(c) 과도접지임피던스 파형

[그림 8] 10kHz급 뇌서지에 의한 과도접지임피던스 특성

5. 결 론

본 논문에서는 국내 22.9kV-Y 다중직접접지 배전선로에서 고주파대역에 따른 과도접지임피던스를 변전소, 배전선로, 수용가로 나누어 모델링하였다. 또한, 1kHz급 및 10kHz급 뇌서지에 의한 과도접지임피던스 특성 및 시뮬레이션을 통해 각 지점의 과도접지임피던스를 비교·분석한 결과 접지임피던스부의 전기적 특성인 저항, 인덕턴스, 컨덕턴스의 크기 및 조합에 따라 과도접지임피던스가 다르게 측정됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20182410105070)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 신동호, 김용, 정철희, 조대훈, 김필수(1999) “서지 전류에 의한 접지계의 과도응답 특성 및 접지저항 비교” 대한전기학회 pp. 222-225, 1999.11