

250kHz급 뇌서지에 의한 과도접지 임피던스 개선 알고리즘에 관한 연구

곽충근*, 신건*, 전진택*, 박동명*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: kcg2846@koreatech.ac.kr

A Study on Operation Algorithm of Transient Grounding Impedance in 250kHz-scale Lightning Surge

Chung-Guen Kwak*, Jian Shen*, Jin-Taek Jeon*, Dong-Myoung Park*, Dae-Seok Rho*

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

요약

최근, 고도 정보화 시대의 급속한 발전과 신재생에너지원의 전력계통 유입의 증가로, 배전선로에서 낙뢰 및 서지 등의 피해에 대비한 피뢰·접지시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 시스템에서는 60Hz 대역의 상용전원 계통 고장사고의 관점에서 지락 또는 단락사고 시 인체의 감전사고 예방 및 설비보호 측면만을 고려하지만, 상용주파수뿐만 아니라 고주파 대역에서의 접지임피던스를 고려한 운용방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 주파수 대역에 따른 뇌서지의 분류기준을 제시하고, 이를 바탕으로 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 산정 방안 및 개선 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC S/W를 이용하여 배전계통부, 수용가부, 뇌서지 발생장치부, 메쉬접지 과도접지 임피던스부 등으로 구성된 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 개선 알고리즘 및 모델링을 바탕으로 250kHz급 뇌서지에 의한 과도접지 임피던스 특성을 분석한 결과, 제시한 알고리즘을 통해 고주파 대역에서의 과도접지 임피던스를 개선할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 고도 정보화 시대의 급속한 발전과 신재생에너지원의 전력계통 유입의 증가로, 배전선로에서 낙뢰 및 서지 등의 피해에 대비한 피뢰·접지시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 시스템에서는 60Hz 대역의 상용전원 계통 고장사고의 관점에서 지락 또는 단락사고 시 인체의 감전사고 예방 및 설비보호 측면만을 고려하지만, 상용주파수뿐만 아니라 고주파 대역에서의 접지임피던스를 고려한 운용방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 주파수 대역에 따른 뇌서지의 분류기준을 제시하고, 이를 바탕으로 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 산정 방안 및 개선 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC S/W를 이용하여 배전계통부, 수용가부, 뇌서지 발생장치부, 메쉬접지 과도접지 임피던스부 등으로 구성된 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 개선 알고리즘 및 모델링을 바탕으로 250kHz급 뇌서지에 의한 과도접지 임피던스 특성을 분석한 결과, 제시한 알고리즘을 통해 고주파 대역에서의 과도접지 임피던스를 개선할 수 있음을 알 수 있다.

낙뢰표정 관측시스템은 전 세계적으로 방향 탐지법을 이용한 LLP(lightning positioning and tracking system)시스템과 도달 시간차 방법을 이용한 LPATS(lightning positioning and tracking system)시스템 그리고 간접계 방식을 이용한 SAFIR(system de surveillance et d'alerte foudre par interferometrie)시스템이 있으며, 방향 탐지법과 도달 시간차 방법을 혼합한 IMPACT방법도 최근 상용화 되고 있다. 국내에서도 1980년대 낙뢰위치 표정시스템(lightning location and protection. Inc)을 도입하였고, 2000년 상반기부터 낙뢰관측 시스템(IMPACT 및 LDAR II)을 도입하여 운영하고 있다. 이러한 낙뢰관측 시스템에 사용되는 뇌서지의 주파수 기준은 표 1과 같다.

[표 1] 뇌서지의 주파수 기준

분 류	주파수	적용 사례
extremely low frequency	1Hz - 3kHz	submarine communications
very low frequency	3kHz - 30kHz	ultrasound
low frequency	30kHz - 300kHz	navigational beacons
medium frequency	300kHz - 3MHz	AM Band
high frequency	3MHz - 30MHz	amateur radio

2. 주파수 영역에 따른 뇌서지 분류 기준

very high frequency	30MHz - 300MHz	FM band
ultra high frequency	300MHz - 3GHz	television

3. 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 개선 알고리즘

3.1 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 정식화

동봉접지 방식의 과도접지 임피던스는 저항, 유도성 임피던스, 용량성 임피던스를 조합하여 나타낼 수 있다. 먼저, 접지동봉 1개의 저항($R_{r,1}$)은 식 (1)과 같이, 접지동봉의 길이(l_r), 반경(r_r) 및 도체의 고유저항(ρ)에 의하여 산정된다. 또한, n 개의 접지동봉을 병렬로 연결한 경우의 합성저항($R_{r,n}$)은 식 (2)와 같이, 접지동봉의 개수(n)와 결합계수(η)를 바탕으로 나타낼 수 있다. 또한, 1개 접지동봉의 인덕턴스 ($L_{r,1}$)와 커패시턴스($C_{r,1}$)는 각각 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, n 개 접지동봉의 합성 인덕턴스($L_{r,n}$) 및 합성 커패시턴스($C_{r,n}$)는 식 (5), 식 (6)와 같이 산정된다. 따라서, 동봉접지의 합성 과도접지 임피던스($Z_{r,n}$)는 합성저항($R_{r,n}$)과 합성 인덕턴스($L_{r,n}$), 합성 커패시턴스(C_r)를 이용하여 식 (7)와 같이 산정할 수 있다.

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

$$R_{r,n} = \eta \times \frac{R_{r,1}}{n} [\Omega] \quad (2)$$

$$L_{r,1} = 2l_r \times \left(\ln \frac{4l_r}{p_r}\right) \times 10^{-7} [H] \quad (3)$$

$$C_{r,1} = \frac{\epsilon_r \times l_r}{18 \times \ln\left(\frac{4l_r}{d}\right)} \times 10^{-9} [F] \quad (4)$$

$$L_{r,n} = \eta \times \frac{L_{r,1}}{n} [H] \quad (5)$$

$$C_{r,n} = \eta \times n \times C_{r,1} [F] \quad (6)$$

$$Z_{r,n} = R_{r,n} + j\left(\omega L_{r,n} - \frac{1}{\omega C_{r,n}}\right) [\Omega] \quad (7)$$

여기서, $R_{r,1}$: 접지동봉 한 개의 접지저항 $[\Omega]$, l_r : 접지동봉의 길이 $[m]$, ρ : 도체의 고유저항 $[\Omega \cdot mm^2/m]$, p_r : 접지동봉의 반경 $[m]$, $R_{r,n}$: n 개 접지동봉의 합성 접지저항 $[\Omega]$, η : 결합계수, n : 접지동봉의 병렬 개수, $L_{r,1}$: 접지동봉 한 개의 인덕턴스 $[H]$, $C_{r,1}$: 접지동봉 한 개의 커패시턴스 $[F]$, d : 접지동봉의 직경 $[m]$, ϵ_r : 유전율, $L_{r,n}$: n 개 접지동봉의 합성 인덕턴스

$[H]$, $C_{r,n}$: n 개 접지동봉의 합성 커패시턴스 $[F]$, $Z_{r,n}$: n 개 접지동봉의 합성 과도접지 임피던스 $[\Omega]$

한편, 메쉬접지 방식의 과도접지 임피던스는 접지 형태를 하나의 정방형으로 상정하고, 동봉접지의 임피던스 산정식을 임피던스의 병렬 합성 및 브릿지 회로 산정 방안을 적용하여 산정한다[2]. 먼저, 메쉬접지의 저항은 식 (8)과 같으며, l_m 은 메쉬접지 한 변의 길이를 나타내고, r 은 메쉬접지에 사용하는 나동선의 반지름을 나타낸다. 또한, 메쉬접지의 유도성 임피던스와 용량성 임피던스는 각각 식 (12), 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서, 메쉬접지의 합성임피던스는 식 (14)와 같이 나타낸다.

$$R_{m,1} = \frac{\rho}{8\pi l_m} \times \left(\ln \frac{4l_m}{p_m}\right) [\Omega] \quad (8)$$

$$R_{m,n} = R_{m,1} + \eta \times \frac{3}{n} \left(\frac{\rho}{2\pi l_m} \times \left(\ln \frac{2l_m}{p_m}\right)\right) [\Omega] \quad (9)$$

$$L_{m,1} = 2l_m \times \left(\ln \frac{8l_m}{p_m}\right) \times 10^{-7} [H] \quad (10)$$

$$C_{m,1} = \frac{2 \times \epsilon_r \times l_m}{9 \times \ln\left(\frac{4l_m}{p_m}\right)} \times 10^{-9} [F] \quad (11)$$

$$L_{m,n} = L_{m,1} + \eta \times \frac{3}{n} \left(2l_m \times \left(\ln \frac{4l_m}{p_m}\right) \times 10^{-7}\right) [H] \quad (12)$$

$$C_{m,n} = C_{m,1} + \eta \times \frac{3}{n} \left(\frac{\epsilon_m \times l_m}{18 \times \ln\left(\frac{4l_m}{d}\right)} \times 10^{-9}\right) [F] \quad (13)$$

$$Z_{m,n} = R_{m,n} + j\left(\omega L_{m,n} - \frac{1}{\omega C_{m,n}}\right) [\Omega] \quad (14)$$

여기서, $R_{m,1}$: 단위 메쉬접지의 접지저항 $[\Omega]$, l_m : 메쉬접지 한 변의 길이 $[m]$, p_m : 메쉬접지에 사용되는 도체의 반경 $[m]$, $L_{m,1}$: 단위 메쉬접지의 인덕턴스 $[H]$, $C_{m,1}$: 단위 메쉬접지의 커패시턴스 $[F]$, $R_{m,n}$: n 개 메쉬접지의 합성 접지저항 $[\Omega]$, $L_{m,n}$: n 개 메쉬접지의 합성 인덕턴스 $[H]$, $C_{m,n}$: n 개 메쉬접지의 합성 커패시턴스 $[F]$, $Z_{m,n}$: n 개 메쉬접지의 합성 임피던스 $[\Omega]$

3.2 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 개선 알고리즘

상기에서 제시한 동봉접지 방식의 과도접지 임피던스 정식화를 바탕으로 배전계통에서 과도접지 임피던스를 감소시키기 위한 알고리즘에 대한 상세한 절차는 다음과 같다

[Step 1] 대상계통에 대한 접지동봉의 길이(l_r), 직경(d)과 접지동봉의 개수 1개의 정보를 입력한다.

[Step 2] [Step 1]의 정보를 바탕으로 식 (1)에 따라 접지동봉의 합성 저항($R_{r,n}$)을 산정한다.

[Step 3] [Step 2]의 접지동봉의 합성 저항($R_{r,n}$)이 한국 전기설비규정(KEC)의 접지기준을 만족하면 [Step 4]로 이동하고, 만족하지 않으면 접지동봉의 개수를 1개 증가시키고 [Step 2]로 돌아간다.

[Step 4] 식 (5), (6)에 따라 합성 인덕턴스($L_{r,n}$)와 합성 커패시턴스($C_{r,n}$)를 각각 산정하고, 이를 바탕으로 식 (7)에 따라 합성 과도접지 임피던스($Z_{r,n}$)를 구한다.

[Step 5] [Step 4]에서 산정한 합성 과도접지 임피던스($Z_{r,n}$)가 한국전기설비규정(KEC)의 접지기준을 만족하면 알고리즘을 종료하고, 만족하지 않으면 [Step 6]으로 이동한다.

[Step 6] 접지동봉의 길이, 직경, 개수를 재 조정 한 후, [Step 4]로 돌아간다.

또한, 상기에서 제시한 메쉬접지 방식의 과도접지 임피던스 정식화를 바탕으로 배전계통에서 과도접지 임피던스를 감소시키기 위한 알고리즘에 대한 상세한 절차는 다음과 같다.

[Step 1] 대상계통에 대한 단위 메쉬접지 한 변의 길이(l_m), 도체 반경(p_m) 등의 정보를 입력한다.

[Step 2] [Step 1]의 자료를 바탕으로, 식 (8), 식 (9)에 의하여 메쉬접지의 접지저항을 산정한다.

[Step 3] 메쉬접지의 합성 접지저항이 한국 전기설비규정(KEC)의 접지기준을 만족하면 [Step 4]로 이동하고, 만족하지 않으면 단위 메쉬접지의 개수를 증가시켜, [Step 2]로 돌아간다.

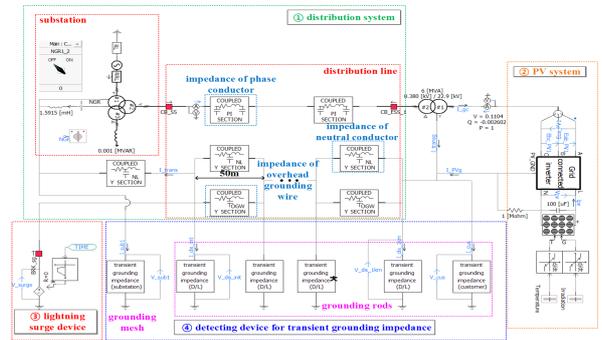
[Step 4] 식 (10) ~ 식(13)에 따라 합성 인덕턴스와 합성 커패시턴스를 각각 산정하고, 이를 바탕으로 식 (14)에 의하여 합성 과도접지 임피던스를 구한다.

[Step 5] [Step 4]에서 산정한 합성 과도접지 임피던스가 한국전기설비규정(KEC)의 접지기준을 만족하면 알고리즘을 종료하고, 만족하지 않으면 [Step 6]으로 이동한다.

[Step 6] 메쉬접지의 개수와 도체의 직경을 적절하게 조정 한 후, [Step 4]로 돌아간다.

4. PSCAD/EMTCD를 이용한 배전계통의 과도접지임피던스 모델링

접지방식에 따른 과도접지 임피던스를 측정하기 위한 배전계통의 모델링은 그림 5와 같이 배전계통부(①), 수용가부(②), 뇌서지 발생장치부(③), 과도접지임피던스 검출부(④)로 구성된다. 여기서, 뇌서지 발생장치부는 접지시스템에 시험전류를 인가하기 위한 전류원으로 주파수를 가변할 수 있도록 구성하고, 과도접지 임피던스 검출부는 과도접지 임피던스 검출부는 동봉접지 및 메쉬접지 방식으로 구성한다.



[그림 1] 전체 시스템 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 과도접지 임피던스 정식화 및 알고리즘의 유효성을 확인하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다. 여기서, 접지동봉의 초기 값은 길이 1[m], 직경 16[mm]를 기준으로 하고, 접지동봉의 접지저항, 인덕턴스, 커패시턴스는 각각 263.6[Ω], 0.12[mH], 10.06[uF]이고, 단위 메쉬접지의 접지저항, 인덕턴스, 커패시턴스는 각각 18.7[Ω], 0.85[mH], 172.59[uF]로 상정한다. 또한, 메쉬접지에 사용되는 도체는 150[mm]의 나동선, 매설깊이는 1[m], 한 변의 길이는 5[m]인 정방형을 초기조건으로 상정한다. 한편, 뇌서지 발생장치는 20[kV]의 전압, 25[kHz]의 주파수를 발생하는 것으로 상정하고, 접지 임피던스의 설치 기준값은 10[Ω] 이하의 조건에서 한국전기설비규정(KEC)을 만족하는 값으로 한다.

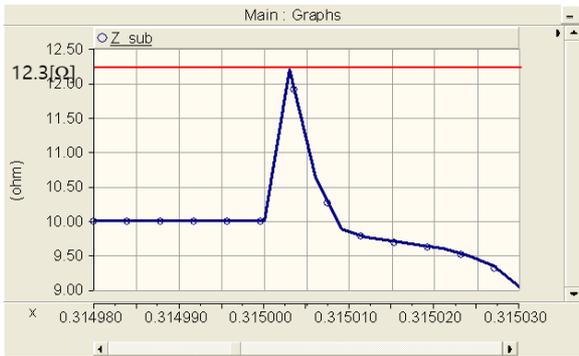
[표 2] 시뮬레이션 조건

항 목		내 역	
과도접지 임피던스	동봉접지	접지저항 ($R_{r,1}$)	263.6[Ω]
		인덕턴스 ($L_{r,1}$)	0.12[mH]
		커패시턴스 ($C_{r,1}$)	10.06[uF]
	메쉬접지	접지저항 ($R_{m,1}$)	18.7[Ω]
		인덕턴스 ($L_{m,1}$)	0.85[mH]
뇌서지 발생장치	커패시턴스 ($C_{m,1}$)	172.59[uF]	
	전압	20[kV]	
	주파수	25[kHz]	

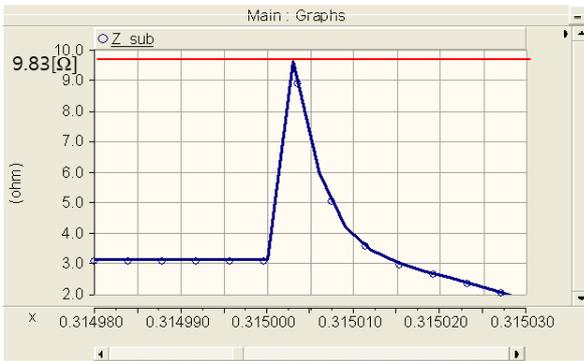
배전선로	상도체	선종	ACSR 160[mm ²]
		임피던스	R:0.182[Ω/km], L:1.04[mH/km]
	중성선	선종	ACSR 95[mm ²]
		임피던스	R:0.328[Ω/km], L:2.43[mH/km]
	가공지선	선종	ACSR 32[mm ²]
		임피던스	R:0.910[Ω/km], L:2.55[mH/km]
태양광전원 용량			1[MW]
KEC의 접지 저항 기준값			10[Ω]

5.2 250kHz급 뇌서지에 의한 과도접지 임피던스 특성

동봉접지 방식의 배전계통에서 250[kHz]의 뇌서지를 인가하는 경우의 과도접지 임피던스 특성은 그림 2와 같다. 여기서, 그림 2(a)와 (b)는 기존 동봉접지 방식과 제안한 알고리즘에 의한 동봉접지 방식의 과도접지 임피던스 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 기존의 동봉접지에서는 250[kHz]의 뇌서지가 인가됨에 따라 접지 임피던스가 10[Ω]에서 최대 12.3[Ω]까지 상승하지만, 제시한 알고리즘에 따라 동봉접지를 구성하면 접지 임피던스의 최대값이 9.83[Ω]으로 감소하는 것을 알 수 있다.



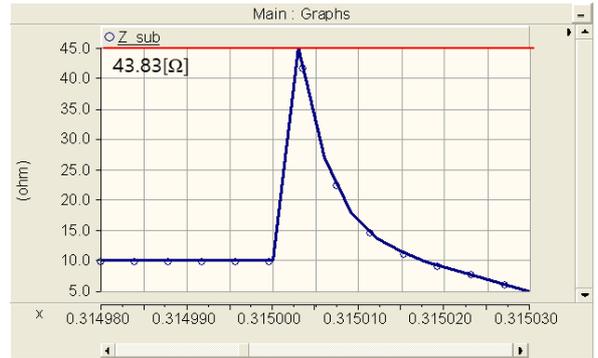
(a) 기존 방식



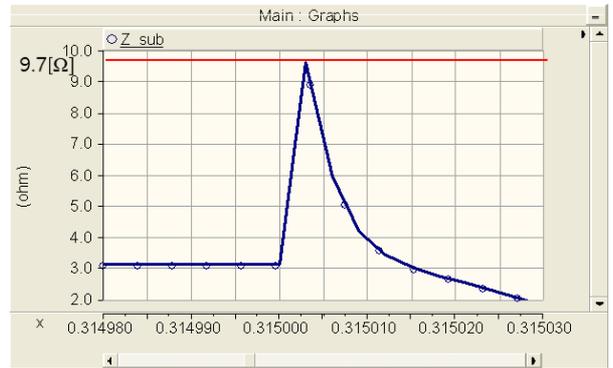
(b) 제안한 알고리즘에 의한 방식
[그림 2] 뇌서지에 의한 과도접지 임피던스 특성

메쉬접지 방식의 배전계통에서 250[kHz]의 뇌서지를 인가하는 경우의 과도접지 임피던스 특성은 그림 3과 같다. 여기서, 그림 3(a)와 (b)는 기존 메쉬접지 방식과 제안한 알고리즘에 의한 메쉬접지 방식의 과도접지 임피던스 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 기존의 메쉬접지에서는 250[kHz]의 뇌서지가 인가됨에 따라 접지 임피던스가 10[Ω]

에서 최대 43.83[Ω]까지 상승하지만, 제시한 알고리즘에 따라 동봉접지를 구성하면 접지 임피던스의 최대값이 9.7[Ω]으로 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) 기존 메쉬접지 방식



(b) 제안한 알고리즘에 의한 방식
[그림 3] 뇌서지에 의한 서지전류 특성

6. 결 론

본 논문에서는 주파수 대역에 따른 뇌서지의 분류기준을 제시하고, 이를 바탕으로 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 산정 방안 및 개선 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC S/W를 이용하여 배전계통부, 수용가부, 뇌서지 발생장치부, 메쉬접지 과도접지 임피던스부 등으로 구성된 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 개선 알고리즘 및 모델링을 바탕으로 250kHz급 뇌서지에 의한 과도접지 임피던스 특성을 분석한 결과, 제시한 알고리즘을 통해 고주파 대역에서 과도접지 임피던스를 개선할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 신동호, 김용, 정철희, 조대훈, 김필수(1999) “서지 전류에 의한 접지계의 과도응답 특성 및 접지저항 비교” 대한전기학회 pp. 222-225, 1999.11
- [2] 광충근 외4, “배전계통에서 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회, Vol. 23, 1-9, 2022.