



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 8월
석사학위 논문

풍력발전단지의 접지시스템 설계 및 분석에 관한 연구

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

文 海 烈

풍력발전단지의 접지시스템 설계 및 분석에 관한 연구

A Study on the Design and Analysis of the
Grounding System of a Wind Power Plant

2021年 8月 27日

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

文 海 烈

풍력발전단지의 접지시스템 설계 및 분석에 관한 연구

指導教授 崔 然 玉

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2021年 4月

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

文 海 烈

文海烈의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授  

委員 朝鮮大學校 教授  

委員 朝鮮大學校 教授  

2021年 5月

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서론	1
II. 이론적 고찰.....	3
A. 풍력발전시스템.....	3
B. 접지의 개요.....	6
C. 접지의 국내외 규정.....	8
D. 대지저항률의 정의 및 측정.....	10
E. 접지시스템의 구성방식.....	15
F. 접지전극의 종류.....	19
III. 접지시스템의 설계.....	22
A. 접지시스템 설계의 흐름도.....	23
B. 현장 DATA 및 접지도체 굵기 결정.....	24
C. 최대 허용 접촉전압 및 보폭전압의 계산.....	25
D. 접지저항 및 최대 지락 Grid 전류의 계산.....	29
E. 대지전위상승(GPR)의 검토.....	30
F. 최대 예상 접촉전압과 보폭전압의 계산.....	31
G. 접지시스템설계의 수정 및 완료.....	32

IV. 풍력발전단지의 접지설계 분석.....	33
A. 대지저항률 측정.....	33
B. 대지저항률 분석.....	38
C. 개별 접지시스템.....	43
D. 등전위 접지시스템.....	47
E. 개별 및 등전위 접지시스템 분석결과.....	55
V. 결 론.....	56

참고문헌

그림 목 차

그림 1. 풍력발전시스템의 에너지 변환과정.....	3
그림 2. 풍력발전기의 구조.....	4
그림 3. 풍력발전기의 단위출력변화.....	5
그림 4. 접지시스템의 개념도.....	6
그림 5. 계절변화에 의한 대지저항률의 변화.....	11
그림 6. Wenner 4전극법 구성도.....	12
그림 7. 수평 2지층 및 3지층 구조의 ρ-a 곡선 유형의 예.....	14
그림 8. 독립접지 방식의 구조.....	15
그림 9. 접지전극 사이의 전위간섭(ΔV).....	16
그림 10. 공통접지 방식의 구조.....	16
그림 11. 통합접지 방식의 구조.....	17
그림 12. 접지방식에 의한 등전위 본딩.....	18
그림 13. 망상(Mesh) 접지전극.....	19
그림 14. 전해질 직선봉 및 L형봉 접지전극.....	20
그림 15. 탄소 접지봉.....	21
그림 16. IEEE std. 80-2000 접지시스템 설계의 흐름도.....	23
그림 17. 감소계수 C_s 곡선.....	26
그림 18. 접촉전압의 개념도 및 등가회로.....	27
그림 19. 보폭전압의 개념도 및 등가회로.....	28
그림 20. 풍력발전단지 발전기의 배치도.....	33
그림 21. 대지저항률 측정 장비 및 회로구성도.....	34
그림 22. 풍력발전기 1호기의 대지저항 측정.....	34
그림 23. 풍력발전기 2호기의 대지저항 측정.....	35
그림 24. 풍력발전기 3호기의 대지저항 측정.....	35

그림 25. 풍력발전기 4호기의 대지저항 측정.....	36
그림 26. 풍력발전기 5호기의 대지저항 측정.....	36
그림 27. 지층 분석구조 및 설계 DATA 입력과정.....	38
그림 28. 풍력발전기 1호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께.....	39
그림 29. 풍력발전기 2호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께.....	39
그림 30. 풍력발전기 3호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께.....	40
그림 31. 풍력발전기 4호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께.....	40
그림 32. 풍력발전기 5호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께.....	41
그림 33. 개별 접지시스템의 풍력발전기 및 전기실 예비설계도.....	43
그림 34. 개별 접지시스템의 풍력발전기 및 전기실 프로그램 설계구조.....	45
그림 35. 등전위 접지시스템의 풍력발전기 및 전기실 예비설계도.....	47
그림 36. 등전위 접지시스템의 풍력발전기 및 전기실 프로그램 설계구조.....	49
그림 37. 등전위 접지시스템의 풍력발전단지 전위분포.....	51
그림 38. 등전위 접지시스템의 안전전압.....	52
그림 39. 등전위 접지시스템의 최대 예상 접촉전압(E_t) 분포도.....	53
그림 40. 등전위 접지시스템의 최대 예상 보폭전압(E_s) 분포도.....	54

표 목 차

표 1. 접지목적에 따른 적용 예시.....	7
표 2. 토양의 종류와 대지저항률의 변화.....	10
표 3. 전해질 및 온도에 따른 대지저항률의 변화.....	11
표 4. 접지도체의 물리적 상수.....	24
표 5. 대지저항 측정 및 대지저항률 계산결과.....	37
표 6. 풍력발전단지의 지층구조 및 대지저항률 분석결과.....	42
표 7. 개별 접지시스템의 설계입력 DATA.....	44
표 8. 개별 접지시스템의 접지저항 및 대지전위상승(GPR) 분석결과.....	46
표 9. 등전위 접지시스템의 설계입력 DATA.....	48
표 10. 등전위 접지시스템의 접지저항 및 대지전위상승(GPR) 분석결과.....	50
표 11. 풍력발전단지의 개별 및 등전위 접지시스템 접지설계 분석결과.....	55

ABSTRACT

A Study on the Design and Analysis of the Grounding System of a Wind Power Plant

Moon, Hae - Yeol

Advisor: Prof. Choi, Youn - Ok, Ph. D.

Department of Electrical Technology Convergence Engineering,
Graduate School of Industrial Technology and Entrepreneurship,
Chosun University

Wind power generation facilities are renewable energy resources with great potential for power generation, but they are installed in mountainous areas, coastal areas, and offshore areas, and their structures are very high, so they are easy to be exposed to lightning and surges. In addition, since a number of generators are integrated to supply power to the existing power system, if an accident occurs, it can act as a risk factor in life, power quality, economy, etc. due to earth fault current and fault current.

The grounding system of wind power generation facilities has been proposed as a minimum protection measure, such as protection of human life, rapid discharge of lightning and fault current, and rapid operation of cut-off devices. The grounding method of a wind turbine can be installed as an individual grounding system of the generator and an equipotential grounding system of the entire wind farm by the soil resistivity that varies depending on the type of grounding, humidity, and temperature change.

In this paper, we will discuss the individual grounding system of wind turbines installed in the mountainous area and the equipotential grounding system of the entire wind farm.

Measure the earth resistance at the installation site of the wind turbine, and use the CDEGS simulation program to determine the structure of the soil, soil resistivity, grounding resistance, maximum ground potential rise voltage(GPR), maximum allowable touch voltage(E_{touch}), maximum allowable step voltage(E_{step}), maximum expected touch voltage(E_t), maximum expected step voltage(E_s) were compared and analyzed.

The grounding resistance(R_g) of the individual grounding system of the wind turbine was higher than the reference value, and the maximum ground potential rise voltage(GPR) was also very large, which was confirmed as an inappropriate method. However, it was confirmed that the grounding resistance(R_g) and the maximum ground potential rise voltage(GPR) of the equipotential grounding system were lower than the reference values. It is judged that the grounding resistance is reduced and the potential hardness is eased as the grounding system's equipotential configuration increases the installation length of the grounding conductor, thereby securing safe touch voltage and step voltage.

The equipotential grounding system of a wind farm is considered to be an effective grounding method because it has several advantages such as reducing the effect of potential interference and potential difference by reducing the potential gradient when an fault current flows in, and reducing ground resistance.

Through this paper, since the grounding system of a wind farm is an important system to protect power facilities and people, it is necessary to accurately grasp the characteristics of the earthing, consider the environmental impact, grounding method, and the type of grounding electrode, and reflect it in the grounding design.

I. 서 론

국제적 산업발달과 경제성장은 인간생활에 많은 변화를 가져왔다. 이러한 변화를 가능하게 하는 전기에너지의 안정적인 공급과 생산은 시간이 지날수록 그 중요성이 커지고 있다. 그러나 화석연료의 고갈과 지구 환경오염, 미세먼지 증가로 인한 대기환경오염과 기상이변이 심각한 문제로 대두됨으로써 세계의 많은 국가들은 환경적, 경제적 측면에서 전기에너지원의 전환을 시도하고 있다. 따라서 신재생에너지원은 친환경 에너지로써 세계전력생산량에서 그 비중이 증가하고 있으며 미래의 핵심에너지원으로 각광받고 있다.

신재생에너지발전기술 중 하나인 풍력발전기술은 바람자원을 이용하여 풍력발전기의 터빈을 통해 운동에너지를 전기에너지로 전환하여 발전하는 방식이다. 대다수의 상용 풍력발전기는 수평축 형 발전기가 이용되고 있으며 날개격인 블레이드(BLADE), 발전기 및 변환기 등으로 구성된 나셀(NACELL), 블레이드와 나셀을 지탱하는 타워(TOWER), 타워를 지면이나 해상에 고정하는 파운데이션(FOUNDATION) 등으로 구성되어 있다. 통상적으로 4[m/s] 이상의 풍속에서 기동하며 타 신재생에너지 설비에 비하여 소요되는 부지가 비교적 작고 육상풍력발전기는 단위기당 5[MW]급이 상용화 되었고 해상풍력발전기의 경우 15[MW]급의 상용화가 예견되므로 단위기당 출력이 타 신재생에너지원에 비해 높아 발전가능성이 매우 높은 발전원이다. 또한 대형풍력발전기의 설치기술 발달로 인해 산악지대, 해안가, 해상을 중심으로 발전단지의 대용량 구성이 용이해 짐으로써 그 활용범위는 더욱 커질 전망이다.

그러나 풍력에너지의 특성상 풍력발전기는 산악지대, 해안지역, 해상 등에 설치되며 구조물도 매우 높아서 낙뢰 및 서지에 노출되기 쉽고 다수의 발전기가 통합되어 전력을 공급하게 된다. 그러므로 풍력발전설비 전력계통에 사고가 발생하게 되면 대용량의 지락전류, 고장전류, 서지전류 등이 연계되는 전력시스템에 위험요소로써 작용하여 인명피해, 전력품질악화, 경제적 손실 등을 끼치고 그 파급력은 대단히 커질 수 있으므로 전력설비의 안전과 보호는 매우 중요하다.[1]~[3]

전력계통의 사고로부터 전력설비를 보호하기 위해 접지시스템이 설치되고 있다. 접지시스템은 인축의 보호, 낙뢰 및 사고전류의 신속한 방전, 차단장치의 신속한 동작 등에 필요한 최소한의 보호조치로 제시되고 있다. 우리나라의 경우 전기설비기술기준, 한국전기설비규정(KEC), 한국전력의 변전설계기준 및 분산형전원 연계기술기준, 산업안전보건기준 등에 의해 전력설비의 접지시스템에 대해 규정되어 있다.[1]~[6]

풍력발전기의 접지시스템은 공통, 통합 접지를 설치하고 있으며 대지의 암질, 수분, 염분 등에 의해 변화하는 대지저항률에 의해 단위호기별 개별 접지와 풍력단지 전체의 등전위 접지로 시공 운영되고 있다.

본 논문에서는 산악지대에 설치된 풍력발전단지의 단위호기별 개별 접지시스템방식과 등전위 접지시스템방식에 대해 논하고자 한다. 강원도 태백시 소재의 21[MW]급 풍력발전단지에 설치되어 있는 4.2[MW]급 풍력발전기 5기에 대해 단위기당 개별 접지시스템과 5기를 연접한 등전위 접지시스템을 비교함으로써 효과적인 접지시스템의 설계를 도출하고자 한다. 각 풍력발전기 설치장소의 대지저항률을 측정하고 CDEGS Simulation 프로그램으로 대지의 구조, 접지저항, 대지전위상승(GPR), 최대 허용 접촉접압(E_{touch}), 최대 허용 보폭전압(E_{step}), 최대 예상 접촉전압(E_t), 최대 예상 보폭전압(E_s)을 분석하고자 한다. 이러한 분석을 통하여 접지방식을 비교하고 효과적인 접지설계를 통한 접지시스템의 안전성과 신뢰성을 향상시키고자 한다.

Ⅱ. 이론적 고찰

A. 풍력발전시스템

1. 풍력발전시스템의 동작원리

풍력발전은 바람의 운동에너지를 이용하여 전력을 생산하는 시스템으로써 청정에너지원인 바람을 이용하므로 온실가스의 배출이 없는 대표적 기후변화 대응 발전기술이다. 세계 풍력발전 시장은 지속적인 성장을 거듭하여 90여개국 이상에서 상업용 풍력발전단지가 운영되고 있으며, 이중 9개국은 총 풍력발전 설비용량이 10[GW] 이상이며, 우리나라를 포함하여 30개국은 설비용량이 1[GW] 이상이다. 최근 풍력발전설비가 대형화 되고 있으며 해상풍력단지를 중심으로 대용량의 발전단지 조성이 이루어지고 있어 그 활용범위는 더욱 커질 전망이다. 풍력발전기는 바람을 이용하여 블레이드(Blade)를 회전시키고 이 회전운동에 의해 동일 구동축인 주축, 증속기 및 발전기가 순차적으로 회전하여 전기를 생산하게 된다. 그림 1은 풍력발전기술의 에너지 변환과정을 나타내며 바람의 운동에너지를 이용하여 회전날개를 회전시켜 동일 구동계에 연결된 회전축에 의해 기계적인 회전력으로 변환하고 발전기를 통해 전력을 생산하게 된다. 즉 에너지 변환과정을 통해 전력을 생산하게 되는 것이다.[7]

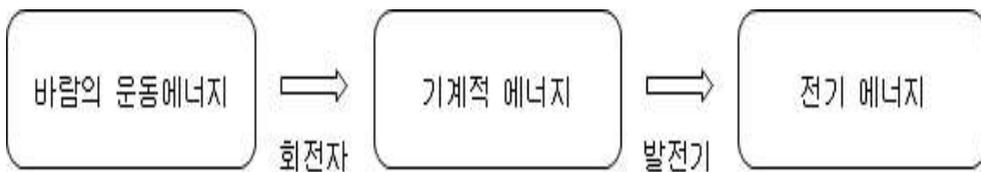


그림 1. 풍력발전시스템의 에너지 변환과정

2. 풍력발전기의 구조

그림 2는 풍력발전기의 구조를 나타내며 회전날개(Blade), 허브(Hub), 나셀(Nacelle), 타워(Tower), 기초(Foundation)으로 구성된다. 회전날개(Blade)는 바람의 운동에너지가 회전날개를 지나면서 양력(Lift Force)에 의해 회전하게 된다. 허브(Hub)는 회전날개와 회전축(Shaft)를 포함한 회전자(Rotor)이다. 나셀(Nacelle)은 제동기, 기어박스, 발전기, 변환기 등을 내장한 함체이다. 타워(Tower)는 회전날개(Blade)와 나셀(Nacelle)을 지탱하며 사다리 또는 엘리베이터, 각종 변환장치 등으로 구성된다. 기초(Foundation)은 타워를 지면 또는 해상에 고정하는 부위로써 육상풍력발전기는 콘크리트, 해상풍력발전기는 각종 구조물(Jacket Type, Suction Bucket Type 등) 형태로 이루어진다.[7]

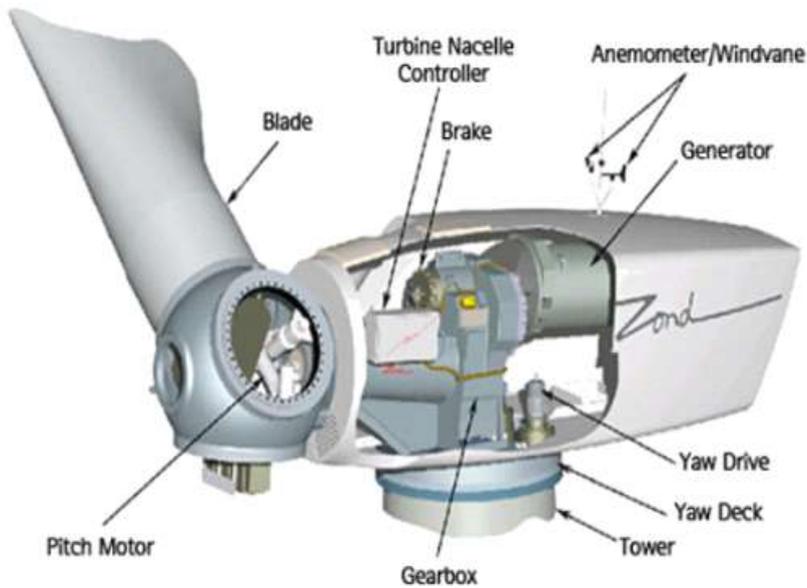


그림 2. 풍력발전기의 구조

3. 풍력발전시스템의 동향

최근 기상이변이 심각한 문제로 대두됨으로써 세계의 많은 국가들은 환경적, 경제적 측면에서 전기에너지원의 전환을 시도하고 있으며, 세계전력생산량에서 친환경 에너지원은 그 비중이 증가하고 미래의 핵심에너지원으로 각광받고 있다. 풍력발전기술은 무한한 청정에너지원인 바람을 이용하므로 바람자원의 영향을 크게 받고 소음 및 환경과피 문제 등을 야기하지만 연평균 25%의 높은 발전출력과 비교적 낮은 발전단가로 경제성이 우수한 편이다. 그림 3은 풍력발전기의 단위출력 변화를 나타내며 풍력발전기의 대형화로 발전단지 구성이 비교적 용이하고 기술의 발달로 발전단가가 낮아지고 있으므로 해상풍력발전단지를 중심으로 지속적으로 확대되고 있다.[7] 또한 풍력에너지의 특성상 산악지대, 해안지역, 해상 등에 설치되며 구조물도 매우 높아서 낙뢰 및 서지 등에 노출되기 쉽고 다수의 발전기가 통합되어 전력을 공급하게 된다. 그러므로 풍력발전설비의 고장, 사고 등으로 부터 연계되는 전력시스템에 위험요소로서 작용하여 인명피해, 전력품질, 경제적 손실 등을 끼치고 그 파급력은 대단히 커질 수 있으므로 풍력발전설비의 안전과 보호는 매우 중요하다.



그림 3. 풍력발전기의 단위출력 변화[7]

B. 접지의 개요

1. 접지의 정의

접지는 전기 관련설비(전기, 전자, 통신) 등의 도전성 부위를 대지와 전기적으로 접속하여 대지와 설비를 등전위화 시키고 전위차를 최소화시키는 것이다. 그림 4는 일반적인 접지시스템의 개념도를 나타낸 것으로 접지는 대지와 직접 접촉하게 되는 접지전극과 전기설비와 접지전극을 연결하는 접지선으로 구성되며, 전기기기나 계통을 독립 또는 공통으로 접지하기 위해 필요한 접속 및 장치로 구성된 설비를 접지시스템(Earthing System)이라고 한다. 접지전극과 대지와의 접속 상태를 정량적 지표로 접지저항으로 나타내며 접지전극을 통해 흐르는 전류를 접지전류라고하면 옴의 법칙에 의해 접지전극 주변에 전위상승을 발생시키며 여러 장애를 발생시키게 된다. 즉, 접지저항이 낮을수록 대지와 접속이 양호하게 실현되어 전위상승에 의한 인체의 감전사고, 설비의 장애 및 오동작, 이상전압, 건축물의 재해 등을 방지 할 수 있다.[8]~[10]

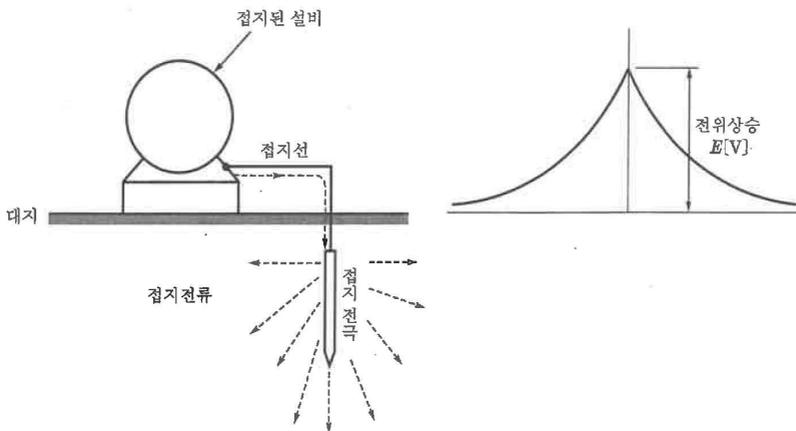


그림 4. 접지시스템의 개념도

2. 접지의 목적

접지의 목적은 전기설비의 누전, 전력계통 또는 낙뢰 등으로 인한 고장전류, 이상전압으로부터 인축의 감전사고 예방, 기기의 보호, 건축물의 재해방지 등이 있다. 표 1은 접지목적에 따른 적용을 나타낸 것으로 접지의 목적을 용도상 분류하면 보안용 접지와 기능용 접지로 분류될 수 있다. 보안용 접지는 계통접지, 기기접지, 뇌 보호용 접지 등을 통해 인축 또는 전기설비의 안전을 확보하는 것으로 정상상태에서는 접지계통에 전류가 흐르지 않는다. 기능용 접지는 노이즈대책용 접지, 전위기준용 접지 등 설비의 안정된 동작확보와 설비의 기능향상을 위한 접지로서 평상시에도 접지도선에 전류가 흐르게 된다.[8]~[10]

표 1. 접지목적에 따른 적용의 예시

구 분	접지의 목적	적용
보안용 접지	누전에 의한 감전 방지	기기 등의 금속체의 함
	혼축에 의한 감전 방지	고압·저압의 변압기 저압측 1점 접지
	유도 감전 방지	전차전과 병행하는 유도 금속체 접지
	낙뢰에 의한 재해방지	피뢰침, 피뢰기, 송·배전 선로의 가공지선
기능용 접지	보호계전기의 동작용	특고압, 고압, 저압전로의 변압기의 중성점접지, 콘덴서 접지
	대지귀로 이용	전기철도, 귀선접지, 통신선, 안테나 접지, 전기로 접지
	잡음, 유도장애 방지	각종 전기전자 계측기 몸체 접지, OA기기 몸체접지
	기기전로 보호, “0”전위 확보용	절연내력 시험회로의 1차측 접지, 전기집진기 지락회로의 1점 접지
	전식 방지용	금속 전극 접지

C. 접지의 국내외 규정

1. 국내의 접지 규정

우리나라의 접지방식은 미국방식과 일본방식을 혼용하여 적용하고 있으며 전기설비기술기준, 전기설비기술기준의 판단기준, 대한전기협회 내선규정, 한국전력공사 변전설계기준, 산업안전기준에 관한 규칙 등에 의해 규정되어 왔다. 현재 국제전기기술위원회(IEC: International Electro technical Commission)의 국제표준기준을 도입하여 국제적인 장애해소와 안전성 확보에 필요한 전기설비기술기준을 개정하였다. 또한 한국전기설비규정(KEC: Korea Electro-technical Code)을 제정함으로써 2022년부터는 판단기준과 내선규정의 소요접지저항 방식을 대체하고 접지시스템의 합리적인 설계, 시설물의 점검 및 검사, 대내외적인 시설환경 변화에 따른 안전성 확보 등을 규정하고 있다.[4]~[6]

2. 국외의 접지 규정

일본의 경우 전기설비 기술기준 및 내선규정에 의해 기존의 우리나라 규정과 유사하게 접지저항을 기반으로 제정되어 있다. 미국의 경우 미국표준협회(ANSI), 미국 전기·전자 통신 학회(IEEE) 등의 규정에 의해 대지전위상승(GPR), 접촉전압, 보폭전압 등을 규정하고 있다. IEEE(Std-80, Std-142, Std-367) 규정은 국내 특고압 변전설비의 접지설계 지침으로 이용되고 있으며 대용량 변전소, 발전소, 송전선, 발·변전소의 접지저항이 $1[\Omega]$ 이하로 요구 할 수 있으며, 산업용 변전소 또는 대용량 산업설비의 접지저항은 $1\sim 5[\Omega]$ 을 제시하고 있다. 대지전위상승(GPR)은 최악의 조건에서 $25[\text{kV}]$ 까지 높이질 수 있지만 보통 $10[\text{kV}]$ 보다 낮다고 기술하고 있다. 캐나다의 경우 캐나다 표준규격협회(CSA C22.1-1994)에 의해 대지전위상승(GPR)을 $5[\text{kV}]$ 로 제한하고, 허용 접촉전압, 허용 보폭전압 등을 규정하고 있다.[8]~[10]

3. 국제전기기술위원회(IEC)의 접지 규정

국제전기기술위원회(IEC)에서는 건축전기설비, 뇌 보호, 전력시스템 등에서 접지에 관해 규정하고 있다. 국제전기기술위원회(IEC)의 목적은 전기 및 전자 관련 기술 분야에서 표준화와 관련하여 국제간 협력을 촉진하고 국제간 이해를 증진시키는 것이다. 국제전기기술위원회(IEC)에서는 등전위본딩, EMC(전자파 적합성), 내·외부 뇌 보호 기술 등과 관련하여 올바른 접지시스템에 대하여 그 범위를 확대하고 있다.[8]~[10]

D. 대지저항률의 정의 및 측정

1. 대지저항률의 정의 및 변위요소

a. 대지저항률의 정의

대지저항률(ρ)은 체적 $1[m^3]$ 인 토양의 전기저항으로 대지고유저항이라고 정의하고 단위는 $[\Omega \cdot m]$ 이다.[8]

b. 대지저항률의 변위요소

대지저항률의 변화에 영향을 주는 요소로는 토양의 종류, 수분함유량, 전해질(염분) 성분, 온도, 계절 등이 있다.[8]

(1) 토양의 종류

표 2는 토양의 종류와 대지저항률의 변화를 나타낸 것으로 토양을 구성하는 입자, 성분, 분포, 균질성 등에 따라 그 성질이 변화 한다.

표 2. 토양의 종류와 대지저항률의 변화

토양의 종류	대지저항률 $[\Omega \cdot m]$
늪지 및 진흙	2 ~ 150
점토질, 모래	10 ~ 200
모래	100 ~ 1,000
사암 및 암반지대	200 ~ 2,000

(2) 수분의 함유량

대지저항률은 토양의 종류에 따라 다르긴 하지만 수분의 함유량이 5~20[%] 까지 급격히 감소하며 20[%] 이상 되면 완만하게 감소한다.

(3) 전해질 성분(염분)

대지저항률은 토양의 화학성분인 염분, 산, 알칼리 등에 영향을 받는다.

(4) 온도

표 3은 전해질과 온도에 따른 대지저항률의 변화를 나타내며 토양의 수분은 전해질 성분이므로 온도가 높아지면 대지저항률은 감소한다. 그러므로 토양의 수분이 증발되거나 동결되면 대지저항률은 현저히 증가한다.

표 3. 전해질 및 온도에 따른 대지저항률의 변화

전해질		온도	
함유율[%]	대지저항률[Ω · m]	온도[℃]	대지저항률[Ω · m]
0	110	20	72
0.1	20	10	99
1	10	0(Water)	138
5	7	0(Ice)	300
10	4	-5	790

(5) 계절(기후)

그림 5는 계절변화에 의한 대지저항률의 변화를 나타낸 것이다. 대지저항률은 계절의 영향을 받으며 일반적으로 겨울철에 높고 여름철에 낮게 되는데 2~5배 정도의 차이가 발생하게 된다. 지층의 깊이에 따른 계절적 대지저항률의 변화와 겨울철 동결심도 등을 반영해 접지전극의 매설깊이를 고려한다.

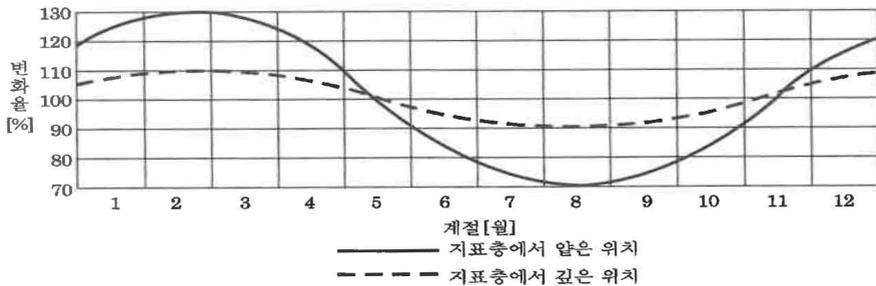


그림 5. 계절변화에 의한 대지저항률의 변화

2. 대지저항률의 측정(Wenner 4전극법)

대지저항률은 접지설계에서 가장 중요한 인자로서 대지의 구조, 토양의 성분, 측정 장소, 측정시 기상 및 기후 등에 따라 차이를 나타내므로 정확한 측정을 통해 접지시스템에 반영되어야 한다. 대지저항률 측정은 토양을 채취하여 분석하는 방법과 대지 표면에서 측정하는 전기 탐사법이 있다. 전기 탐사법은 임의의 접지전극에 전류가 유입되면 접지전극으로부터 방사모양으로 유출하면서 발생하는 전위차를 이용하여 옴의법칙에 의해 접지저항을 측정한다. 종류로는 간이형 접지저항계, 전기 검층법, Wenner 4전극법 등이 있으며 일반적으로 Wenner 4전극법이 많이 사용된다. 그림 6은 Frank Wenner에 의해 발표된 Wenner 4전극법의 구성도로 4개의 전극을 직선상의 등간격으로 배치하여 대지저항률을 측정하게 된다. 전극 C_1 과 C_2 사이에 전원을 공급하여 대지로 전류를 흘리게 되고 P_1 과 P_2 사이에 생기는 전위차를 측정하여 대지저항(R)을 얻을 수 있다.[8]~[10]

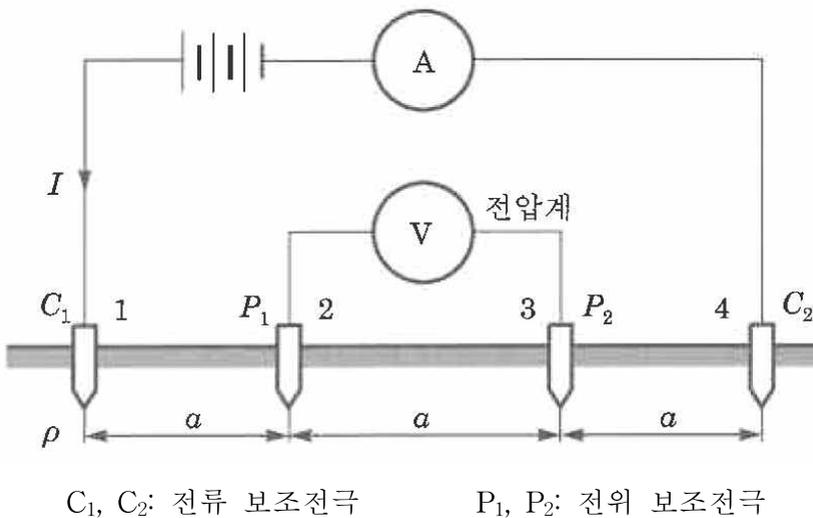


그림 6. Wenner 4전극법 구성도

Wenner 4전극법에 의해 측정된 후 대지저항률 ρ 는 다음 식(1)과 같다.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + a^2}}} \quad [\Omega \cdot \text{m}] \quad (1)$$

여기서, a: 전극 간격, d: 전극 깊이, R: 측정 저항치

만약 측정 전극의 깊이 d와 간격 a의 관계가 $a \gg d$ 라면 대지저항률의 계산은 식(2)와 같으며, 일반적으로 $a \geq 20d$ 의 조건에서 계산 된다.[8]~[10]

$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega \cdot \text{m}] \quad (2)$$

3. 지층의 구조와 대지저항률의 관계

대지표면에서부터 깊은 위치까지 균일한 토질로 구성된 대지는 많지 않으며, 다양한 토질로 이루어진 경우가 대다수이므로 지층에 따라 대지저항률도 모두 달라진다. 지표층의 대지저항률은 낮지만 깊은 곳은 대단히 높은 경우 또는 반대인 경우도 있기 때문에 접지설계에서 정확한 대지저항률의 측정과 대지구조의 해석은 매우 중요한 요소이다. 다층구조의 대지에 접지전극을 설치하는 경우 Wenner 4전극법으로 측정된 결과를 바탕으로 접지전극이 매설되는 위치의 대지저항률을 추정하고 접지저항의 산출에 적용하는 방법이 효과적이다. 대지저항률은 측정용 전극의 간격에 따라 다르게 되며, 측정 전류의 침투 깊이도 변하므로 대지의 지층 구조를 파악 할 수 있다. 즉, ρ -a 곡선을 구하면 지층 구조와 각 지층의 대지저항률을 산출할 수 있다. 하지만 지층의 구조에 따라 ρ -a 곡선은 변화하며 대단히 복잡하므로 Sundberg, Tagg의 표준곡선 등을 이용하거나 컴퓨터 프로그램을 통해 해석하고 등가 대지저항률, 평균 대지저항률을 적용하여 등가의 균일대지저항률로 나타내는 방법이 사용된다.

다음 그림 7은 수평 2지층 구조와 수평 3지층 구조의 ρ - a 곡선 유형의 예를 나타내고 ρ 는 대지저항률, a 는 전극간격, ρ_n 는 지층의 대지저항률, h_n 은 지층의 두께이다.[8]

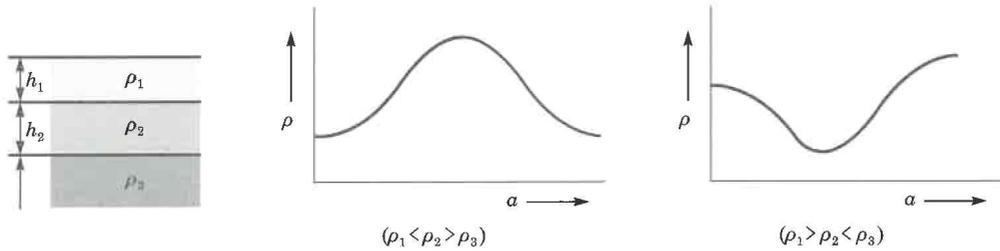
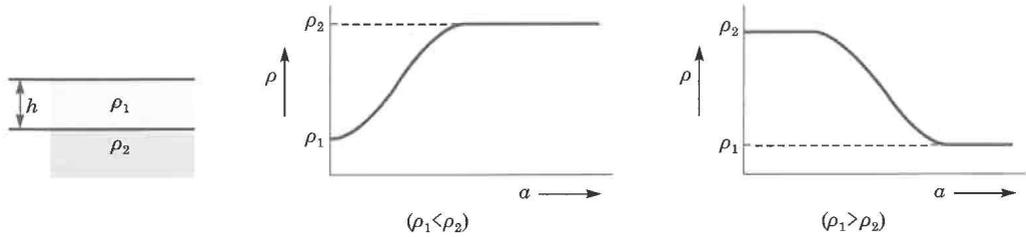


그림 7. 수평 2지층 및 3지층 구조의 ρ - a 곡선 유형의 예

E. 접지시스템의 구성방식

접지시스템의 구성방식은 독립접지, 공통접지, 통합접지 등이 있으며 전기·전력설비, 통신시스템 등 각각의 장비가 갖는 운용 및 사양, 공사 현장 여건, 대지의 성분 등이 다르기 때문에 각 특성을 고려하여 효과적이고 최적의 접지방식으로 구성되어야 한다.[8]~[10]

1. 독립접지 방식

독립접지 방식은 접지를 설치해야 하는 각각의 설비에 개별적으로 접지를 시공하는 방식이며 독립접지 또는 단독접지 방식이라고 하며 그림 8은 독립접지 방식의 구조를 나타내고 있다. 독립접지는 타 접지로부터 영향을 받지 않고 기기 또는 시설을 보호할 수 있다는 장점이 있으나 각 접지간에 충분한 이격거리와 분리가 확보되어야 한다. 단점으로는 강한 서지, 뇌전류 등이 유입 될 경우 인접 접지전극에 전위간섭(ΔV)이 발생하여 장비, 설비 등에 손상을 주거나 오동작을 유발할 수 있다. 그림 9는 접지전극 사이의 전위간섭(ΔV)을 나타낸 것으로 허용치는 설비, 시설, 인명 등의 안전에 손상이 없어야 하고 보폭전압과 접촉전압 등과 같은 위험전압의 크기가 충분히 검토되어야 한다.[8]~[10]

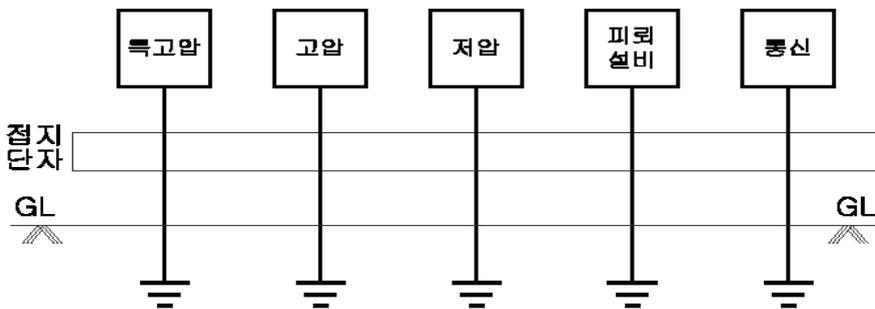


그림 8. 독립접지 방식의 구조

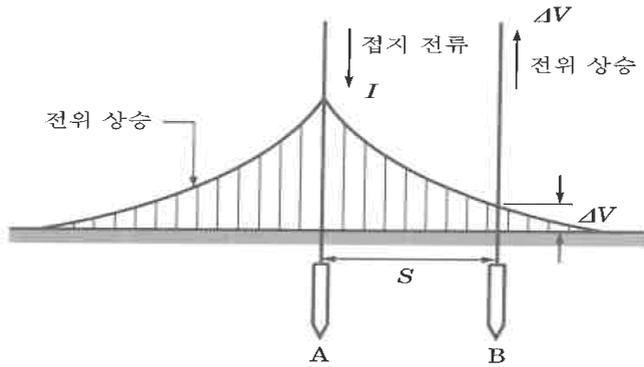


그림 9. 접지전극 사이의 전위간섭(ΔV)

2. 공통접지 방식

공통접지 방식은 전력설비의 특고압, 고압, 저압의 접지를 공통된 접지전극으로 구성하고 피뢰설비, 통신설비 접지는 별도로 분리하는 접지방식이다. 즉, 등전위가 형성되도록 특고압·고압 접지계통과 저압 접지계통을 공통으로 접지하는 방식으로 그림 10과 같은 구조이다. 공통접지 방식의 장점으로는 고-저압 장비간 전위차 발생을 방지 하고, 시공이 단순해지므로 경제적인 접지방식이나 피뢰 및 통신설비 접지전극과 이격거리를 확보하지 못하면 독립접지 방식과 동일하게 접지시스템전체에 전위차가 발생하여 전위간섭(ΔV)의 영향이 접지를 공통으로 하는 모든 설비에 파급된다.[10][12]

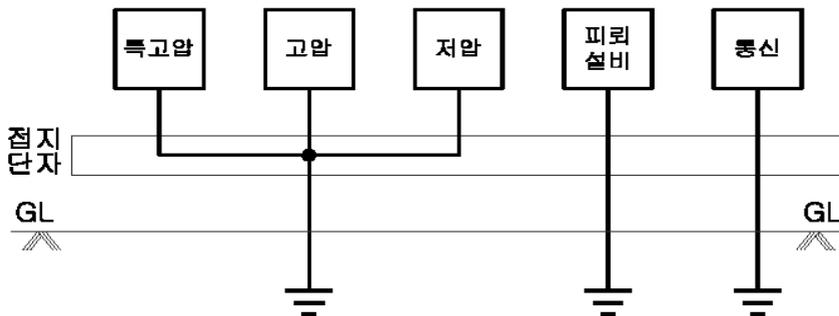


그림 10. 공통접지 방식의 구조

3. 통합접지 방식

통합접지 방식은 전기설비의 접지계통, 건축물의 피뢰설비, 전자통신설비 등 모든 접지시스템을 통합하여 구성하는 것을 말하며 건축물의 철골구조체도 접지전극으로 활용함으로써 설비 및 구조체간의 전위차를 해소하여 등전위를 형성하게 되는 방식으로 그림 11과 같은 구조이다. 즉, 각각의 목적이 다른 접지를 하나의 공용시스템으로 구축하여 신뢰성, 경제성, 편리성 등을 고려한 접지 방식이다. 통합접지 방식의 장점으로는 접지배선이 공통접지보다 단순해지고, 각각의 접지전극과 구조체가 병렬 연결되는 효과로 접지저항은 낮아지고 접지 성능이 향상된다. 그러나 접지시스템의 성능이 모든 설비와 장비에 영향을 끼치게 되므로 신뢰성 있는 접지전극의 형태와 시공, 등전위 본딩 등이 필요하다.[10][12]

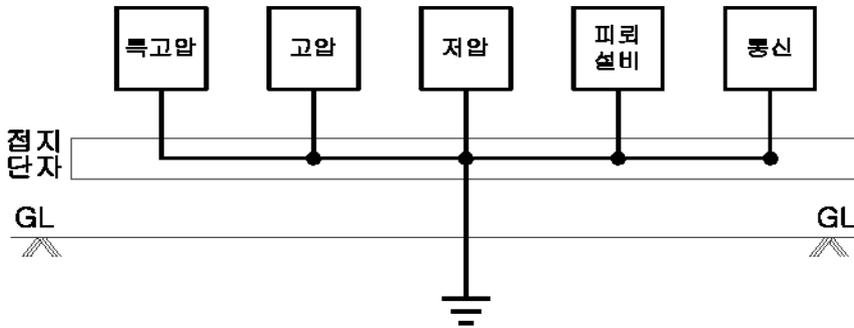
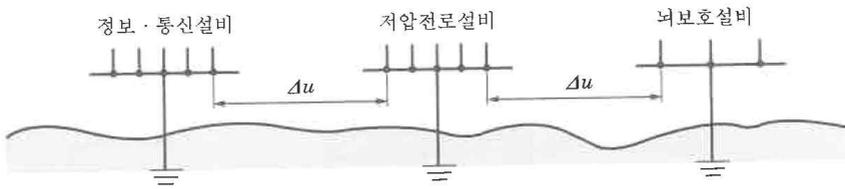


그림 11. 통합접지 방식의 구조

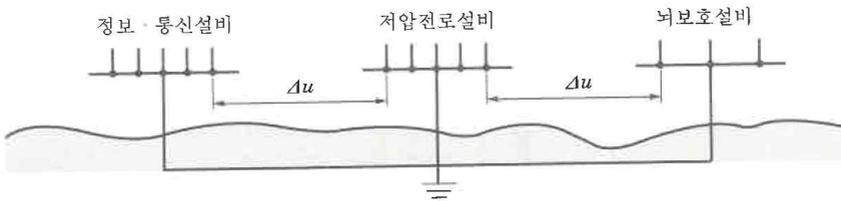
4. 등전위 본딩

IEEE에 의하면 등전위 본딩은 등전위를 위한 도전성 부분을 전기적으로 접속하는 것으로 전위를 같게 만들어주어 접촉전압을 줄여 안전한계치 이하로 억제함과 동시에 등전위 본딩을 함으로써 1점에 집중시킨 전위의 기준점을 제공하는 것으로 정의되어 있다. 전위차를 “0”으로 할 수 없는 경우도 있지만, 수

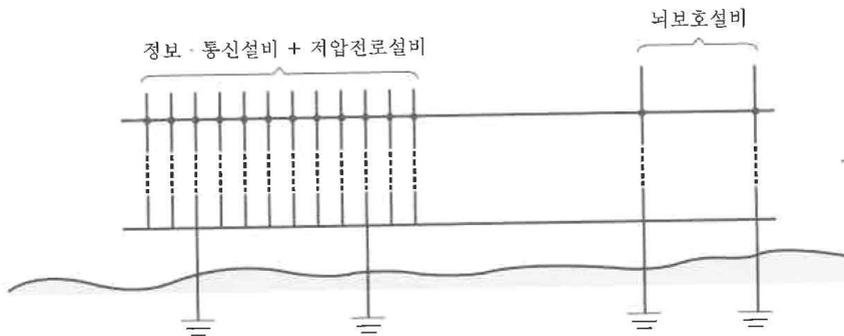
[mA]의 범위라면 등전위화가 구현되었다고 할 수 있다. 그림 12는 접지방식에 의한 등전위 본딩을 나타낸 것으로 구조물을 대상으로 보안용 접지와 기능용 접지, 뇌 보호 접지를 설치했다면 그림 12의 (a)와 같이 개별접지의 경우 대지의 전기적 저항과 접지전극의 저항성분으로 설비 상호간에 전위차(Δu)가 발생한다. 그림 12의 (b)는 1점 통합접지의 경우로써 그림 12의 (a)보단 작은 전위차(Δu)를 발생한다. 그림 12의 (c)는 각각의 접지전극을 등전위로 함으로써 전위차는 무시 할 수 있게 된다.[8]~[10]



(a) 독립접지(전위차 Δu 가 발생)



(b) 공통접지(전위차 Δu 가 발생)



(c) 공통접지+등전위 본딩

그림 12. 접지방식에 의한 등전위 본딩

F. 접지전극의 종류

1. 접지봉(Driven Rod)

접지봉은 일반적인 접지분야에서 가장 많이 사용되고 있는 접지전극으로 다양한 크기와 재료의 모델이 있으며 단순한 구조의 순동 구리봉, 구리를 도금한 동도금 강봉, 동피막을 입힌 동피복 강봉 등이 있다. 가격이 저렴하여 넓은 시공면적과 대지저항률이 낮은 지역에서 좋은 성능을 발휘하며 다른 접지시스템과 연계성이 좋다. 그러나 대지저항률이 높으면 소요수량이 많아지고 접지성능이 저하되며, 계절적 영향을 크게 받는 등 여러 단점이 있다.[8]~[10]

2. 망상(Mesh) 접지전극

망상(Mesh)접지는 넓은 면적에 연결 동선을 망상 형태로 접지망을 구성하는 것으로 일정간격의 가로와 세로로 나동선을 포설하여 접지전극으로 이용하는 방식으로 그림 13은 망상접지전극을 나타낸다. 대지저항률이 높은 지역이나 넓은 면적에 시공하여 낮은 접지저항, 낮은 접촉전압, 낮은 보폭전압을 얻기 쉬우므로 안전이 우선되는 장소에 설치한다. 그러나 넓은 시공면적과 시공비가 비싸고 유지보수가 어렵다는 단점이 있다. 발전소나 변전소 등에는 필수적으로 시공되며 플랜트 등과 같은 넓은 면적의 장소에서 많이 시공된다.[8]~[10]

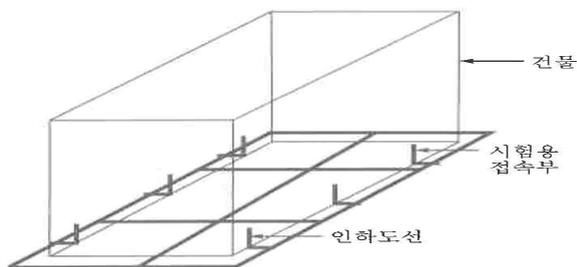


그림 13. 망상(Mesh) 접지전극

3. 전해질 접지전극

전해질 접지는 토양의 종류, 구조, 성분, 수분의 함유, 계절적 온도변화 등에 관계없이 가장 효율적이며 안정적으로 낮은 접지저항을 유지해주는 반영구적 접지시스템이다. 동 접지봉의 흡수공을 통해 공급된 습기가 전해질 접지봉 내부의 전해질 층과 작용하여 전도성 축진용액을 생성하고 배액공을 통해 접지봉 주위의 토양으로 확산하게 된다. 그러므로 시간이 경과할수록 토양사이의 전해질 수분이 지속적으로 공급되어 전기저항을 감소시키고 전도성 토양으로 변화시켜준다. 또한 빠른 끝점에서 순간적인 전위상승의 비율인 임펄스 임피던스 또는 서지 임피던스를 낮춰 급격한 전위상승으로 인한 장비파손 및 인축을 보호하고, 접지봉 자체의 수명도 연장 된다. 그러나 보링공법 등을 통해 시공되는 경우가 많으므로 시공비가 비싸다는 단점이 있다. 전해질 접지는 다양한 직경의 직선봉(Straight Rod)과 L형봉(L-shaped Rod)의 2가지 모델로 구분되며 그림 14와 같이 나타낸 것이다.[8]~[10]

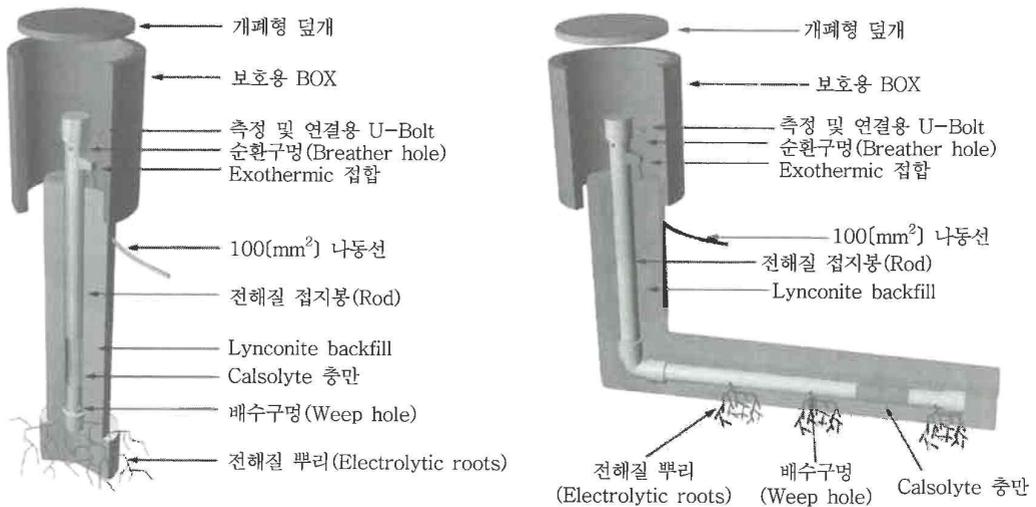


그림 14. 전해질 직선봉 및 L형봉 접지전극

4. 탄소 접지봉

그림 15는 탄소접지봉을 나타낸 것으로 양도체인 흑연을 사용하여 부식이 없고 영구적이며 접촉면적을 극대화한 것으로 접지본체와 대지사이의 접촉저항을 크게 줄일 수 있다. 또한 강력한 광물계 수분흡착제와 흡수성 재질로 구성되어 접지전극 주변에 일정한 수분을 유지한다. 접지전극주변의 저감체를 추가하면 접지시스템의 효과를 극대화 할 수 있으며 계절별 저항의 변화가 거의 없고 암반지역 등에서 탁월한 효과가 있다. 보링공법 등을 통해 시공되는 경우가 많으므로 시공비가 비싸다는 단점이 있다.[8]~[10]



그림 15. 탄소 접지봉

Ⅲ. 접지시스템의 설계

전력설비에서 접지의 목적은 인축의 감전보호와 기기의 안전성 확보 및 안정된 기능을 확보하는데 있으며 이를 수행하기 위해서는 세밀한 접지설계가 필요하다. 따라서 접지설계를 계획할 때에는 접지목적에 맞는 효과적인 접지를 실시하기 위해 접지전극과 접지시스템을 모두 고려한 설계시스템을 구축하여야 한다. 효율적인 접지설계를 위해서는 설계의 기본요소를 바탕으로 순서에 따라 계획적으로 시행 할 필요가 있으며 시공계획보다 선 시행되어야하고 전기안전을 책임질 수 있도록 구성되어야 한다. 접지시스템의 설계기술은 그 지표가 되는 기준접지저항을 결정할 필요가 있으며 이러한 기본요소를 바탕으로 소요접지저항을 만족하기 위한 안전한계전압 등을 결정 할 수 있다.

일반적으로 저압전기설비는 KS C IEC 60364, KS C IEC 61936-1, KS C IEC 62305 규정 등에 의해 감전에 대한 보호, 접지설비 및 보호도체, 피뢰설비 등의 접지시스템에 대해 규정되어 있다. 또한 교류 1[kV] 초과, 직류 1.5[kV]를 초과하는 발·변전소, 송·배전 및 수용가설비 등의 고압·특고압 접지시스템의 일반사항은 접촉전압 및 보폭전압의 허용값 이내의 요건을 만족해야 한다. 즉 소요접지저항을 기준으로 하지 않고 감전보호의 지표인 접촉전압 및 보폭전압의 한계전압 위주로 규정된 KS C IEC 61936-1 규정과 IEEE std. 80 규정 등에 의한 접지설계가 검토되어야 한다. 본 논문에서의 풍력발전시스템은 22.9[kV] 특별고압 계통에 연계되므로 변전소에서 접지시스템설계에 적용되는 IEEE std. 80 규정 중심으로 접지설계 흐름도를 고려하였다.[8][11]

A. 접지시스템 설계의 흐름도

그림 13은 IEEE-std.80-2000 접지시스템 설계의 흐름도를 나타낸 것으로 “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”에서는 변전소의 Mesh 접지에 의한 접지시스템 설계를 검토한다. 변전소 구내의 최대 메시 전압과 인체에 인가되는 최대 접촉전압 및 보폭전압을 접지설계의 지표로 한다.[6][8][11]

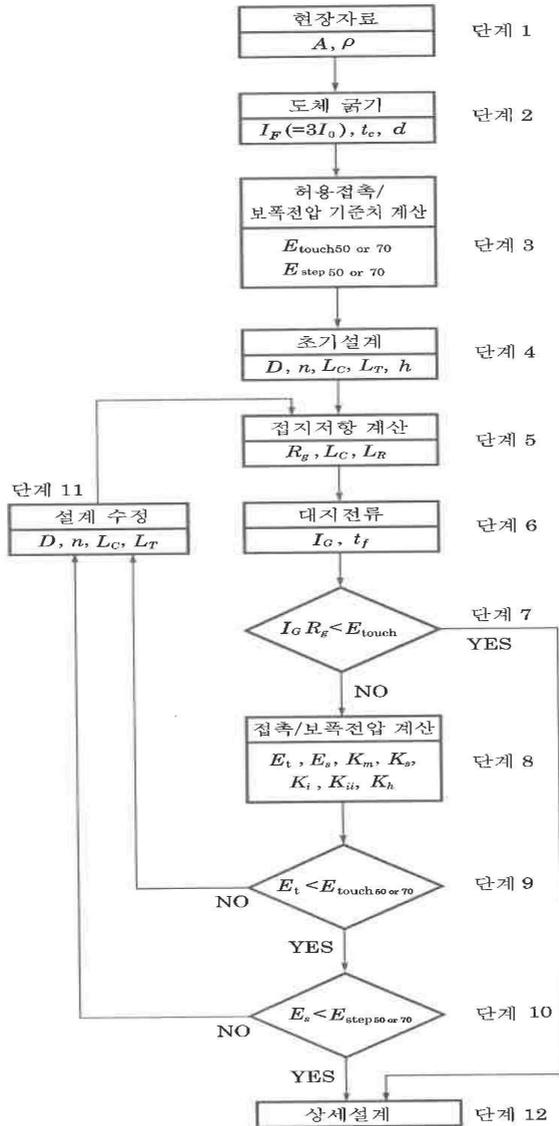


그림 16. IEEE std. 80-2000 접지시스템 설계의 흐름도

B. 현장 DATA 및 접지도체 굵기 결정

1. 현장 DATA 조사

현장의 설계조건으로부터 접지전극의 포설면적 $A[m^2]$, 시공구역의 지층구조, 토양의 종류를 근거로 대지저항률 $\rho[\Omega \cdot m]$ 을 추정 한다.[6][8][11]

2. 접지도체 굵기 결정

표 4는 접지도체의 물리적 상수를 나타낸 것으로 접지도체는 지락전류 또는 뇌 전류 등이 유입될 경우 용단, 기계적 강도, 부식 등을 고려하고 고장전류 크기, 고장지속 시간, 온도, 재료의 특성 등을 적용한 도체의 단면적 A_C 는 식(3)과 같이 계산한다.[6][8][11]

$$A_C = I_F \times \alpha \sqrt{\frac{t_c \times \alpha_r \times \rho_r \times 10^4}{TCAP} \frac{1}{\ln\left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} + 1\right)}} \quad [mm^2] \quad (3)$$

여기서, I_F : 예상 최대 지락 전류 [A]
 α : 도체전류의 분류율 t_c : 고장전류지속시간 [sec]
 α_r : 20°C에서의 저항온도계수 ρ_r : 20°C에서의 도체의 고유저항 [$\mu\Omega \cdot cm$]
 T_m : 도체의 최대허용온도 [°C] T_a : 주위온도 [°C]
 $TCAP$: 열용량계수 [$J/cm^3 \cdot ^\circ C$] K_0 : 0°C에서 저항온도계수 (α_0)의 역수

표 4. 접지도체의 물리적 상수

도체종류	도전율[%]	α_r	K_0	T_m	ρ_r	TCAP
연동선	100	0.00393	234	1.083	1.7241	3.422
경동선	97	0.00381	242	1.084	1.7774	3.422

C. 최대 허용 접촉전압 및 보폭전압의 계산

보폭전압(E_s)은 사람의 발과 발 사이(일반적으로 1[m] 기준) 대지표면과의 전위차이며, 접촉전압(E_c)은 사람이 접지된 기기와 손이 접촉된 경우 손과 양발의 대지표면과의 전위차이다. 전위차에 의해 흐르는 전류는 인체저항과 지표면 대지저항에 따라 달라지고 허용치 이내로 유지되어야 한다.[6][8][11]

1. 인체의 안전한계전류(I_B)

Dalziel의 실험에 의해 0.03~3.0[sec]동안 인체에 전류가 흐를 때 심실세동을 일으키지 않는 인체허용전류 I_B 는 식(4)와 같다.[6][8][11]

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_S}} \quad [A] \quad (4)$$

여기서, t_S : 인체감전시간 [sec]

K : 인체의 체중에 의한 계수 (50[kg]:0.116, 70[kg]:0.157)

2. 인체의 전기저항(R_B)

인체의 전기저항은 손과 손 사이, 손과 양발 사이, 발과 발 사이의 전류통과 경로에서 1000[Ω]으로 한다.[6][8][11]

3. 표면층 감소계수(C_S)

토양의 대지저항률과 표면층의 고유 저항률에 반사계수(K)는 식(5)와 표면층 감소계수(C_S)는 식(6)과 같고 그림 17에 표면층 감소계수 C_S 곡선을 나타내었다.[6][8][11]

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (5)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (6)$$

여기서, C_s : 표면층 감소계수(표면층 미시공 : 1.0)

ρ : 토양의 대지저항률 [$\Omega \cdot m$]

ρ_s : 표면층의 고유저항률 [$\Omega \cdot m$] (자갈의 고유저항률: 2000~3000)

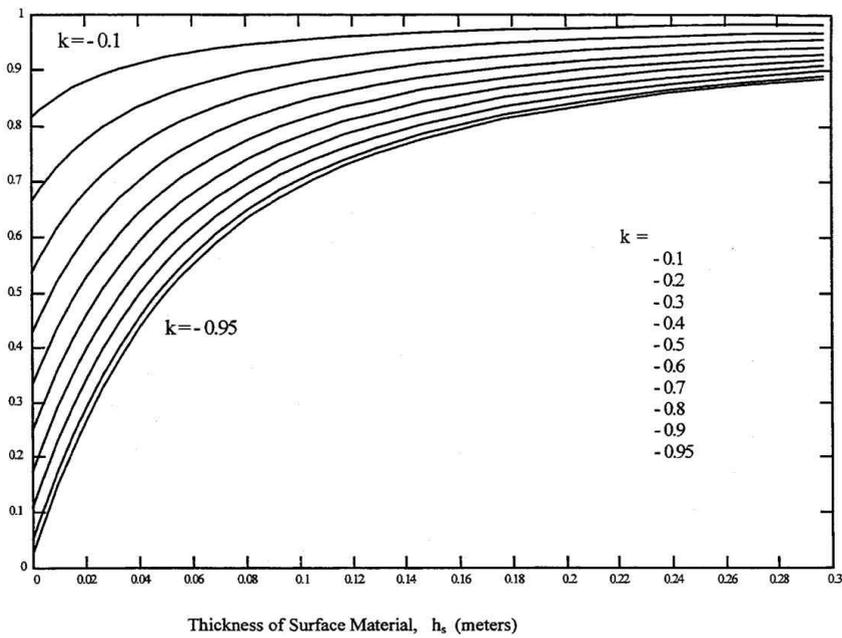


그림 17. 감소계수 C_s 곡선

4. 최대 허용 접촉전압(E_{touch})

사람이 고장전류가 유입될 때 접촉했을 경우 손과 양발 사이에 걸리는 최대 전위차로서 그림 18은 접촉전압의 개념도와 등가회로를 나타내고 최대 허용 접촉전압인 $E_{touch50}$ 은 식(7), $E_{touch70}$ 은 식(8)과 같다.[6][8][11]

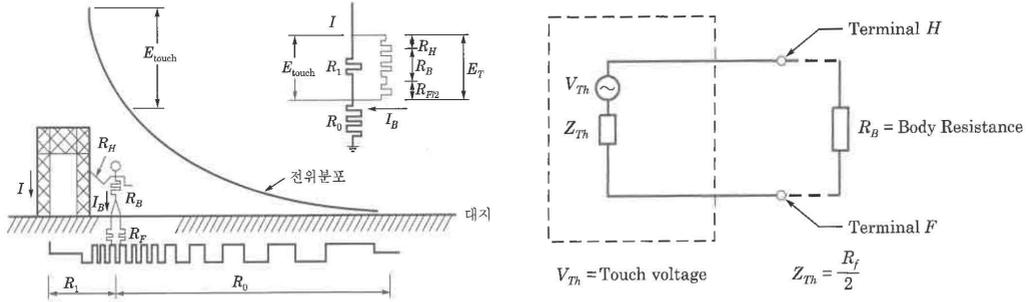


그림 18. 접촉전압의 개념도 및 등가회로

$$E_{touch50} = (R_B + \frac{1}{2}R_F)I_B = (1000 + 1.5C_S \times \rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \quad [V] \quad (7)$$

$$E_{touch70} = (R_B + \frac{1}{2}R_F)I_B = (1000 + 1.5C_S \times \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \quad [V] \quad (8)$$

여기서, $E_{touch50}$: 체중이 50[Kg]인 인체의 최대 허용 접촉전압 [V]

$E_{touch70}$: 체중이 70[Kg]인 인체의 최대 허용 접촉전압 [V]

R_B : 인체의 전기저항 [Ω]

R_F : 한 발과 대지사이의 저항 [Ω]

I_B : 인체허용전류 [A]

C_S : 표면층 감소계수

ρ_S : 표면층의 고유저항률 [$\Omega \cdot m$]

t_S : 고장전류지속시간 [sec]

5. 최대 허용 보폭전압(E_{step})

사람이 고장전류가 유입될 때 발생하는 전위에 의해 발과 발 사이에 걸리는 최대 전위차로써 그림 19는 보폭전압의 개념도와 등가회로를 나타내고 최대 허용 보폭전압인 E_{step50} 은 식(9), E_{step70} 은 식(10)과 같다.[6][8][11]

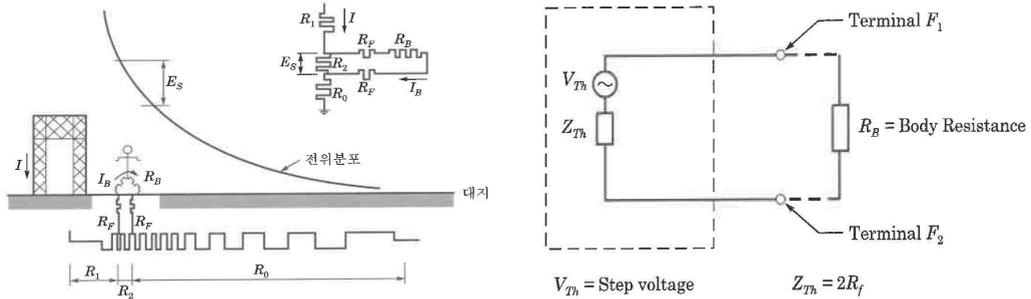


그림 19. 보폭전압의 개념도 및 등가회로

$$E_{step50} = (R_B + 2R_F) I_B = (1000 + 6C_S \times \rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \quad [V] \quad (9)$$

$$E_{step70} = (R_B + 2R_F) I_B = (1000 + 6C_S \times \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \quad [V] \quad (10)$$

여기서, E_{step50} : 체중이 50[Kg]인 인체의 최대 허용 보폭전압 [V]

E_{step70} : 체중이 70[Kg]인 인체의 최대 허용 보폭전압 [V]

R_B : 인체의 전기저항 [Ω]

R_F : 한 발과 대지사이의 저항 [Ω]

I_B : 인체허용전류 [A]

C_S : 표면층 감소계수

ρ_S : 표면층의 고유저항률 [$\Omega \cdot m$]

t_S : 고장전류지속시간 [sec]

D. 접지저항 및 최대 지락 Grid 전류의 계산

설치조건에 따른 접지전극의 매설깊이, 접지 Grid 간격, 접지전극 면적, 접지도체 길이 등을 감안하여 접지전극의 제원을 설정하고 접지저항, 최대 지락 Grid 전류의 계산은 다음과 같다.

1. 접지저항(R_g) 계산

일반적으로 대규모의 송·변전소의 접지저항은 1[Ω] 이하, 소규모인 곳에서는 1~5[Ω] 이하가 요구된다. 접지저항을 정확히 계산하기는 매우 어려우며 접지시스템을 모델링할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 통해 보다 정확한 계산이 가능하다. 변전소내의 0.25~2.5[m]의 깊이에 매설되는 Mesh 접지전극에 대해 Sverak의 접지저항 R_g 는 식(11)과 같다.[6][8][11]

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad [\Omega] \quad (11)$$

여기서, ρ : 대지저항률 [$\Omega \cdot m$] A : 접지전극의 포설면적 [m^2]
 L_T : 접지전극의 총 도체 길이 [m] h : 접지전극의 매설깊이 [m]

2. 최대 지락 Grid 전류(I_G)의 계산

최대 지락전류(I_F)를 퍼센트임피던스법(%Z), 컴퓨터 프로그램 등을 통해 계산하고 접지전극에 흐르는 최대 지락 Grid 전류 I_G 는 식(12)와 같다.[6][8][11]

$$I_G = C_p \times S_f \times I_F \quad [A] \quad (12)$$

여기서, I_F : 예상 최대 지락 전류 [A]
 C_p : 계통확장계수 (1.0~1.5)
 S_f : 지락전류의 분류계수 (0.2~0.4)

E. 대지전위상승(GPR)의 검토

접지전극이 매설된 대지면에 고장전류 또는 뇌 전류가 유입되면 접지시스템과 대지사이의 전위차에 의한 대지전위상승(GPR: Grounding Potential Rise)은 최대 지락 Grid 전류(I_G)와 접지저항(R_g)에 의해서 식(13)과 같다.

$$GPR = I_G \times R_g \quad [V] \quad (13)$$

지락전류가 유입 될 때 발생하는 접촉전압과 보폭전압은 인체에 대한 영향이 없도록 대지전위상승(GPR)을 10,000[V] 이하로 제한 한다. 또한 대지전위상승(GPR) > 최대 허용 접촉전압(E_{touch})의 관계가 만족하면 위험전압 검토는 불필요 하며 상세설계를 진행 한다.[6][8][11]

F. 최대 예상 접촉전압과 보폭전압의 계산

최대 예상 접촉전압 과 최대 예상 보폭전압의 계산을 통해 위험전압을 파악하고 최대 허용 접촉전압과 최대 허용 보폭전압과 비교하여 접지설계의 안전성을 판단 할 수 있다.[6][8][11]

1. 최대 예상 접촉전압(E_t) 및 보폭전압(E_s) 계산

Mesh 접지전극은 중심부와 4개 모서리 사이에 전위차가 발생하므로 접지 전위상승에 의한 최대 예상 접촉전압(E_t) 과 최대 예상 보폭전압(E_s)은 각각 다음 식(14), 식(15)와 같다.[6][8][11]

$$E_t = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_t} \quad [V] \quad (14)$$

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_s} \quad [V] \quad (15)$$

여기서, E_t : 최대 예상 접촉전압 [V] K_i : 전위경도 변화에 대한 보정계수
 E_s : 최대 예상 보폭전압 [V] K_m : 접촉전압의 접지망 간격계수
 ρ : 대지저항률 [$\Omega \cdot m$] L_t : 접촉전압의 접지도체 길이 [m]
 I_G : 최대 지락 Grid 전류 [A] K_s : 보폭전압의 접지망 간격계수
 L_s : 보폭전압의 접지도체 길이 [m]

2. 최대 예상 접촉전압(E_t)과 허용 접촉전압(E_{touch})의 비교

최대 예상 접촉전압(E_t)은 최대 허용 접촉전압(E_{touch}) 보다 작아야 한다. 즉, $E_t < E_{touch}$ 의 관계를 만족 하여야 한다.[6][8][11]

3. 최대 예상 보폭전압(E_s)과 허용 보폭전압(E_{step})의 비교

최대 예상 보폭전압(E_s)은 최대 허용 보폭전압(E_{step}) 보다 작아야 한다. 즉, $E_s < E_{step}$ 의 관계를 만족 하여야 한다.[6][8][11]

G. 접지시스템설계의 수정 및 완료

최대 예상 접촉전압(E_t)과 최대 예상 보폭전압(E_s)의 계산치가 최대 허용 접촉전압(E_{touch})과 최대 허용 보폭전압(E_{step}) 계산치보다 높게 되면 접지설계 수정이 필요 하다. 규정에서 요구하는 조건($E_t < E_{touch}$, $E_s < E_{step}$)에 만족하기 위해 접지망의 Grid 간격 및 도체개수 조절, 접지봉 등을 추가하여 접지전극의 길이를 증대시키거나 심매설 접지, 전해질 접지, 탄소 접지 등의 병행을 검토하여 접지 설계를 수정한다. 또한 자갈의 설치두께를 증가하여 허용 접촉전압(E_{touch}) 및 허용 보폭전압(E_{step}) 증대를 검토 한다.

규정에서 요구되는 접지시스템의 안전기준 조건에 만족하는 경우 접지구역의 전력설비, 전기기기, 통신기기, 구조체 본딩 등 추가적인 접지사항을 검토 하고 가공지선, 피뢰기, 변압기 중성점, 울타리 등에 접지전극을 추가설치 하는 등 접지전극을 보완하고 설계를 완료 한다.[6][8][11]

IV. 풍력발전단지의 접지시스템 분석

현장의 대지저항률을 측정하고 접지시스템의 설치조건 등을 검토하여 접지전극의 설치면적, 접지형태, 전극유형, 시공방법 등을 예비설계 하였으며 접지설계용 컴퓨터 프로그램 SES社의 CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic interference, Grounding & Soil structure analysis) RESAP 모듈을 이용해 대지저항률과 접지설계를 분석하였다.

A. 대지저항률 측정

1. 대지저항률의 측정 장소

강원도 태백시에 위치한 풍력발전단지로서 해발 약 1,000[m] 높이의 산악지대 등고선을 따라 4.2[MW]급 풍력발전기 5기, 전기실 1개동을 설치하며 총 21[MW]급 발전용량으로써 22.9[kV] 전용선로 1회선을 통해 한국전력공사 변전소와 계통연계하며 그림 20은 풍력발전단지 발전기의 배치도를 나타내고 있다.

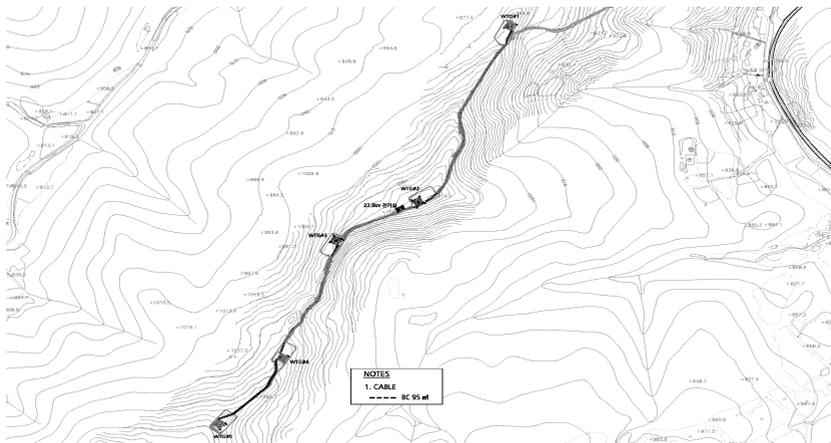


그림 20. 풍력발전단지 발전기의 배치도

2. 대지저항률의 측정방법

측정장비와 측정회로의 구성도는 그림 21과 같고 대지저항률은 식(1)을 적용하였고, 만약, $a \geq 20B$ 라고 하면, $\rho = 2\pi AR$, $\rho = 6.28AR [\Omega\text{m}]$ 로 간략화 하였다.

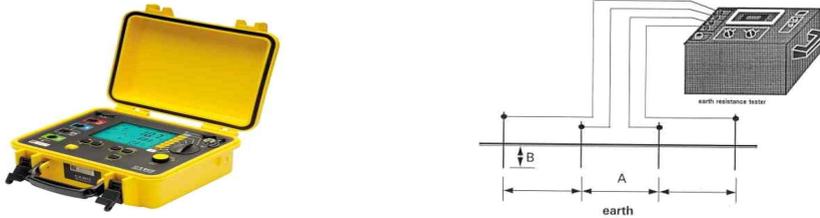


그림 21. 대지저항률 측정 장비 및 회로구성도

3. 대지저항률의 측정 및 계산

풍력발전기 1호기~5호기 각각의 장소에서 Wenner 4전극법을 통해 탐침간의 간격을 1[m], 2[m], 4[m], 8[m], 12[m], 16[m] 으로 변경하면서 측정하였다.

그림 22~그림 26은 각 호기별 간격변화에 따른 대지저항 측정을 나타낸 것이며 표 5는 대지저항률 계산결과를 나타내고 있다.



(a) 1m 간격: 331 [Ω]



(b) 2m 간격: 231 [Ω]



(c) 4m 간격: 114 [Ω]



(d) 8m 간격: 38.8 [Ω]



(e) 12m 간격: 17.3 [Ω]



(f) 16m 간격: 12.9 [Ω]

그림 22. 풍력발전기 1호기의 대지저항 측정



(a) 1m 간격: 490 [Ω]



(b) 2m 간격: 251 [Ω]



(c) 4m 간격: 70.6 [Ω]



(d) 8m 간격: 23.5 [Ω]



(e) 12m 간격: 12.8 [Ω]



(f) 16m 간격: 8.42 [Ω]

그림 23. 풍력발전기 2호기의 대지저항 측정



(a) 1m 간격: 509 [Ω]



(b) 2m 간격: 304 [Ω]



(c) 4m 간격: 160 [Ω]



(d) 8m 간격: 46.1 [Ω]



(e) 12m 간격: 29.9 [Ω]



(f) 16m 간격: 23 [Ω]

그림 24. 풍력발전기 3호기의 대지저항 측정



(a) 1m 간격: 1220 [Ω]



(b) 2m 간격: 548 [Ω]



(c) 4m 간격: 294 [Ω]



(d) 8m 간격: 76.9 [Ω]



(e) 12m 간격: 35 [Ω]



(f) 16m 간격: 21.5 [Ω]

그림 25. 풍력발전기 4호기의 대지저항 측정



(a) 1m 간격: 275 [Ω]



(b) 2m 간격: 161 [Ω]



(c) 4m 간격: 67 [Ω]



(d) 8m 간격: 29 [Ω]



(e) 12m 간격: 23.9 [Ω]



(f) 16m 간격: 22.7 [Ω]

그림 26. 풍력발전기 5호기의 대지저항 측정

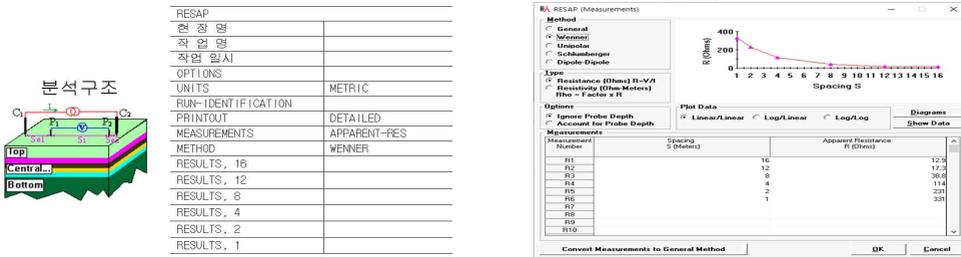
표 5. 대지저항 측정 및 대지저항률 계산결과

측정장소	태백시 풍력발전단지 부지내		
기상상태	맑음		
측정방법	Wenner 4전극법		
측정장비	CA 6470 / Chauvin Arnoux		
계산법	대지저항률($\Omega \cdot m$) = $2 \times \pi \times$ 측정간격(m) \times 저항값(Ω)		
명칭(위치)	탐침간 거리[m]	측정 저항값[Ω]	계산 대지저항률[$\Omega \cdot m$]
1호기	16	12.9	1,296.192
	12	17.3	1,303.728
	8	38.8	1,949.312
	4	114	2,863.68
	2	231	2,901.36
	1	331	2,078.68
2호기	16	8.42	846.0416
	12	12.8	964.608
	8	23.5	1,180.64
	4	70.6	1,773.472
	2	251	3,152.56
	1	490	3,077.2
3호기 및 전기실	16	23	2,311.04
	12	29.9	2,253.264
	8	46.1	2,316.064
	4	160	4,019.2
	2	304	3,818.24
	1	509	3,196.52
4호기	16	21.5	8,641.28
	12	35	2,637.6
	8	76.9	3,863.456
	4	294	7,385.28
	2	548	6,882.88
	1	1220	7,661.6
5호기	16	22.7	11,404.48
	12	23.9	1,801.104
	8	29	1,456.96
	4	67	1,683.04
	2	161	2,022.16
	1	275	1,727

B. 대지저항률 분석

1. CDEGS 프로그램을 활용한 대지저항률 분석

측정된 대지저항을 기초로 토양의 지층구조, 대지저항률, 접지저항, 위험전압 등을 분석하고 효율과 정확성, 신뢰성을 높이기 위해 분석프로그램은 SES社의 CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic interference, Grounding & Soil structure analysis) RESAP 모듈을 이용해 대지저항률과 접지시스템설계에 이용하였다. CDEGS는 각국의 규정, 국제규정 등의 설정이 가능한 대표 분석프로그램 중 하나로써 대지의 특성을 파악하고 효율적인 접지시스템을 설계 할 수 있으며 접지 성능을 예측 할 수 있다. 또한 대지구조의 분석을 수평다층, 수직다층, 지수함수형, 타원형 구조로 해석이 가능하므로 접지시스템 설계 및 분석에 이용된다. 본 연구는 수평다층 지질구조로 분석 하였으며 지질 구조가 수직적으로 쌓여 있는 것으로 간주하고 설계 DATA를 입력하였으며 그림 27은 지층 분석구조 및 설계 DATA 입력과정을 나타내고 있으며, 그림 28~그림 32는 풍력발전기 5기에 대한 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께를 나타내고 있다.



(a) 지층 분석구조

(b) DATA 입력과정

그림 27. 지층 분석구조 및 설계 DATA 입력과정

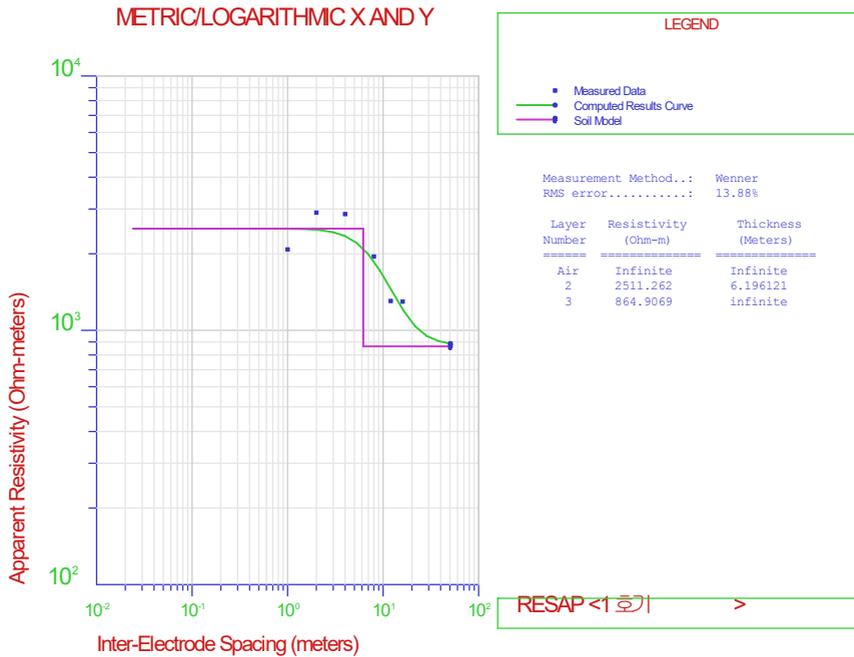


그림 28. 풍력발전기 1호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께

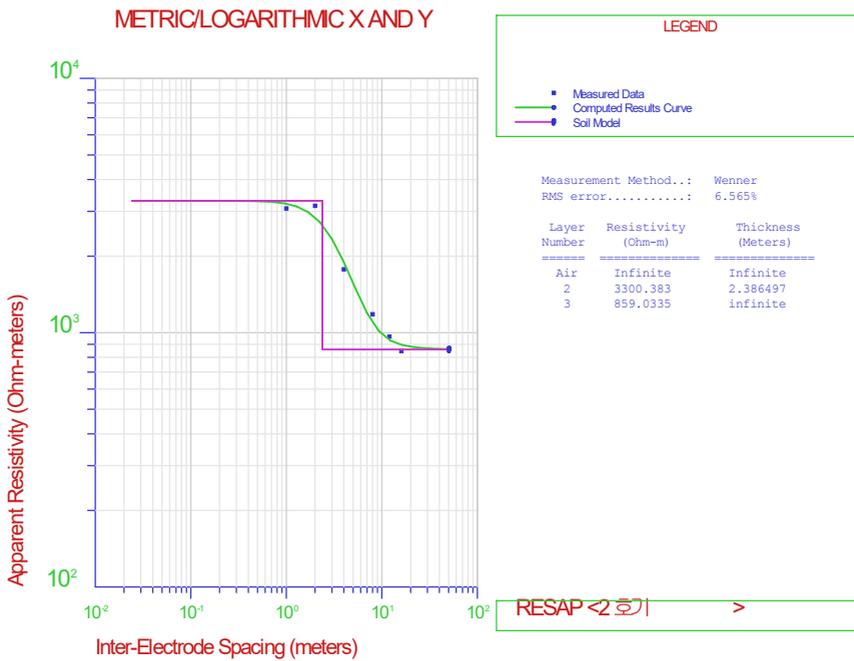


그림 29. 풍력발전기 2호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께

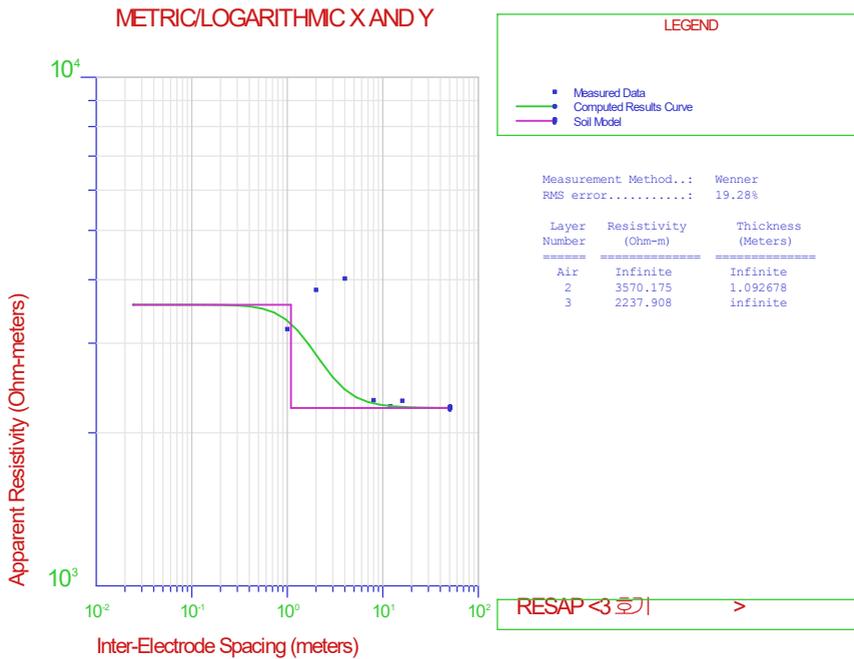


그림 30. 풍력발전기 3호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께

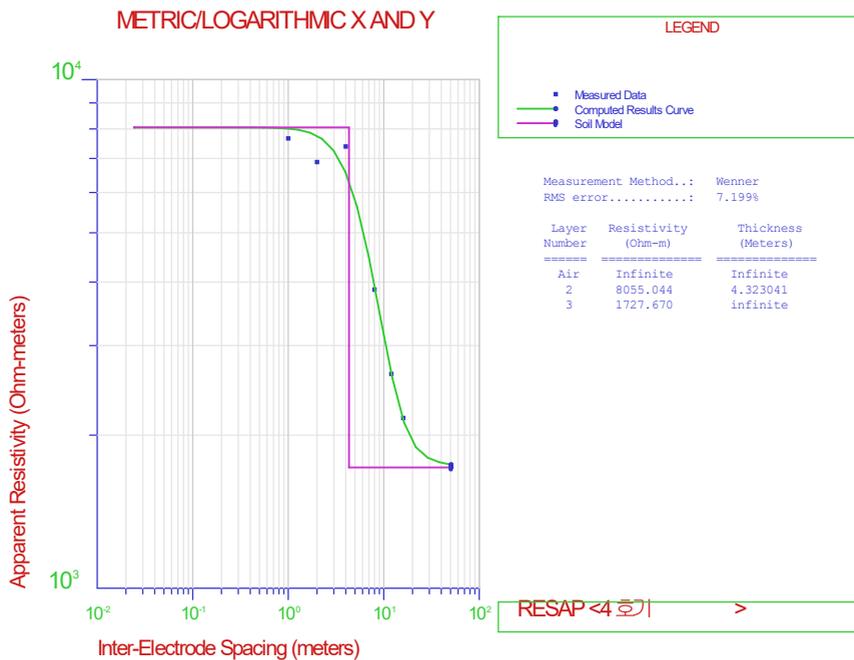


그림 31. 풍력발전기 4호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께

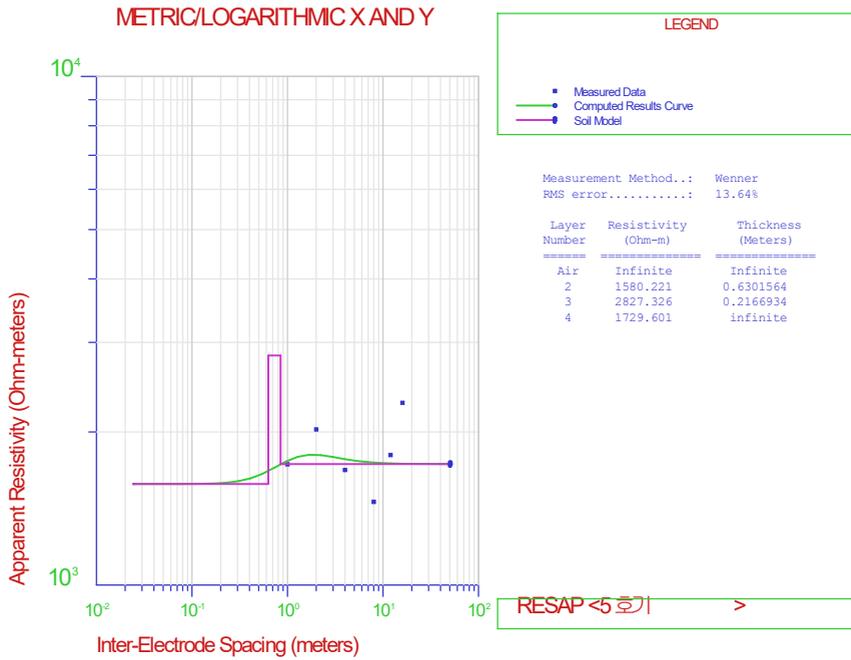


그림 32. 풍력발전기 5호기의 지층구조에 따른 대지저항률과 지층두께

2. 지층구조 및 대지저항률 분석결과

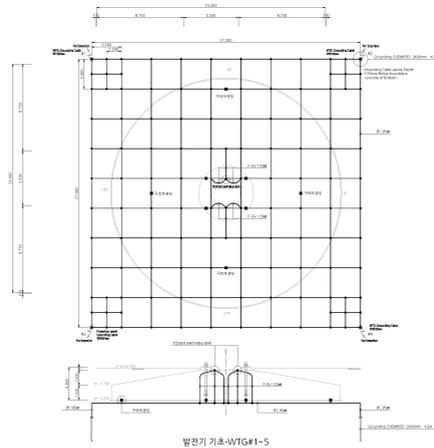
풍력발전단지 풍력발전기 5기의 지층구조 및 대지저항률 분석결과를 표 6에 나타내었다. 대지는 대체적으로 상지층과 하지층의 2개 지층구조로 분석되었으며 대지저항률은 하지층이 상지층보다 더 낮은 것으로 분석 되었다. 대지의 상지층에 마사토, 사암 등으로 구성된 지층구조로 인해 상지층의 대지저항률이 높게 나타난 것으로 추측된다.

표 6. 풍력발전단지의 지층구조 및 대지저항률 분석결과

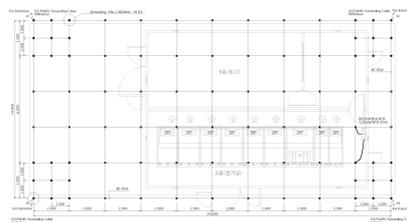
발전기 호기	지층	대지저항률($\Omega \cdot m$)	지층두께[m]
1호기	상 지 층	2511.262	6.196121
	하 지 층	864.9069	∞
2호기	상 지 층	3300.383	2.386497
	하 지 층	859.0335	∞
3호기 및 전기실	상 지 층	3570.175	1.092678
	하 지 층	2237.908	∞
4호기	상 지 층	8055.044	4.323041
	하 지 층	1727.670	∞
5호기	상 지 층	1580.221	0.6301564
	중 지 층	2827.326	0.2166934
	하 지 층	1729.601	∞

C. 개별 접지시스템

단위호기의 개별접지시스템은 그림 33과 같이 예비설계를 통해 CDEGS 입력 DATA를 산정하였다. 풍력발전기의 접지시스템은 공통, 통합접지시스템으로 구성 및 설치하고 발전기구조체와 등전위본딩을 실시하고 있다. 각 풍력발전기의 FOUNDATION 규격 및 터파기 조건을 반영한 MESH 접지망의 설치면적은 27[m] x 27[m], 깊이는 약 3.5[m]로 산정 하였으며 IEEE-std 80 규정에 의해 산정된 접지도체 굵기 이상인 95[mm²]로 적용하였다. 설치장소가 산악지역의 암반지대 특성으로 추측됨으로 전해질 접지봉 3.6[m] x 4[SET](천공 30[m])를 추가하여 경년변화에 의한 접지저항의 변화를 최소화 하였다. 22.9[kV] 전기실은 3호 발전기 대지에 위치하며 MESH 접지망 설치면적은 20[m] x 10[m], 깊이는 0.75[m], 2.4[M] 동 접지봉 36[EA]를 적용하였다.



(a) 풍력발전기



(b) 전기실

그림 33. 개별 접지시스템의 풍력발전기 및 전기실 예비설계도

1. 개별 접지시스템의 DATA

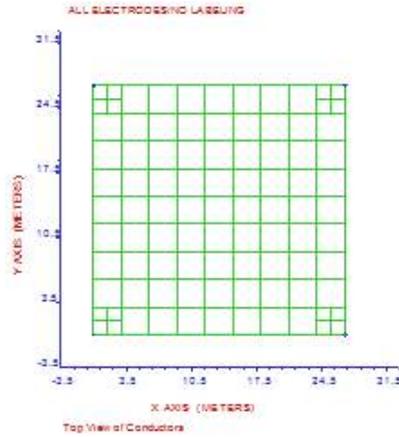
표 7은 개별 접지시스템의 설계입력 DATA를 나타내며 접지설계 Simulation에 필요한 현장 조건 및 각종 입력 Data를 정리하였다. 예비설계에 의한 접지설계 DATA와 전기안전공사의 업무지침에 의한 1선 지락전류, 지락전류 분류율을 반영 하였고 고장지속시간은 0.5[sec], 접지저항 허용값 5[Ω] 이하로 적용하였다.[6][11]~[13]

표 7. 개별 접지시스템의 설계입력 DATA

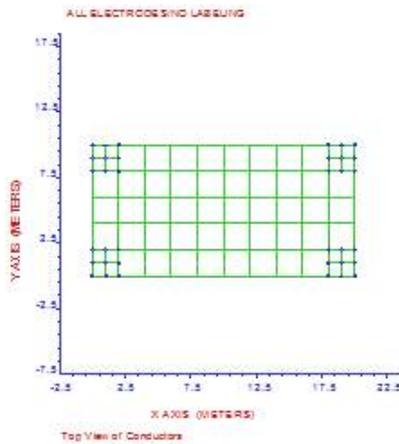
구 분	내 용
적용규격	IEEE Std. 80 - 2000
참조규격	한국전기안전공사 : 공통, 통합접지 검사업무처리방법 한국전력공사 : 변전 설계기준 DS-2601 접지설계
대지고유저항[Ω · m]	호기별 CDEGS Simulation 분석값[Ω · m]
고장지속시간[s]	0.5[sec]
1선지락 고장전류	7.329[kA]
지락전류 분류율	20[%]
접지방식	개별접지시스템
접지망 포설면적[m ²]	발전기: 729[m ²], 전기실: 200[m ²]
접지망 도체길이[m]	발전기: 684[m], 전기실: 332[m]
주 접지극	발전기: 전해질 접지봉 3.6[m](천공 30[m]), 접지망(MESH) 전기실: 2.4[m] 동 접지봉, 접지망(MESH)
접지봉 규격	발전기: Ø80 x 3.6[m], 전기실: Ø18 x 2.4[m]
접지봉 수량	발전기: 4[EA], 전기실: 36[EA]
요구 접지저항	5[Ω] 이하

2. 개별 접지시스템의 분석

그림 34는 개별 접지시스템의 프로그램 설계구조를 나타내며 예비설계에 의한 CDEGS 프로그램에서 적용한 설계구조를 보여주고 있으며 X축 및 Y축은 거리를 나타낸다. 프로그램에 의한 단위호기별로 지층의 구조, 지층의 대지저항률, 지층의 높이, 접지저항, 대지전위상승(GPR)의 결과를 보여준다.



(a) 풍력발전기



(b) 전기실

그림 34. 개별 접지시스템의 풍력발전기 및 전기실 프로그램 설계구조

3. 개별 접지시스템의 접지저항 및 최대 대지전위상승(GPR)

표 8은 개별 접지시스템의 접지저항 및 대지전위상승(GPR)분석 결과를 나타낸다. 단위호기별로 접지저항이 규정에서 요구한 5[Ω]이하를 만족하지 못 하였다. 또한 대지전위상승(GPR)은 규정에서 요구한 10000[V] 이하를 만족하지 못 하였다. 즉, 기준 접지저항 및 대지전위상승(GPR)이 요구조건에 부적합 하므로 안전전압의 산정과 위험전압의 검토가 불필요하며 예비설계에 의한 접지시스템은 수정이 필요하며 당 현장에 적용하기에는 부적절한 방식으로 확인 되었다.

표 8. 개별 접지시스템의 접지저항 및 대지전위상승(GPR) 분석결과

장소	지층	지층 대지저항률			접지저항 [Ω]	GPR [V]
		지층	대지저항률 [Ω·m]	두께(m)		
1호기	2지층 분석적용	상지층	2511.262	6.196121	10.025	14694
		하지층	864.9069	∞		
2호기	2지층 분석적용	상지층	3300.383	2.386497	9.4041	13784
		하지층	859.0335	∞		
3호기	2지층 분석적용	상지층	3570.175	1.092678	22.986	33693
		하지층	2237.908	∞		
전기실	3호기 값 적용	상지층	3570.175	1.092678	32.370	47448
		하지층	2237.908	∞		
4호기	2지층 분석적용	상지층	8055.044	4.323041	20.488	30031
		하지층	1727.670	∞		
5호기	3지층 분석적용	상지층	1580.221	0.6301564	17.068	25018
		중지층	2827.326	0.2166934		
		하지층	1729.601	∞		

D. 등전위 접지시스템

그림 35는 등전위 접지시스템의 예비설계도를 나타내며 단위호기의 개별접지 시스템에 접지도체를 추가하여 접지시스템 상호간 연결을 구성하였다. CDEGS 입력 DATA는 개별접지시스템에 등전위 접속한 접지도체를 반영하였다.

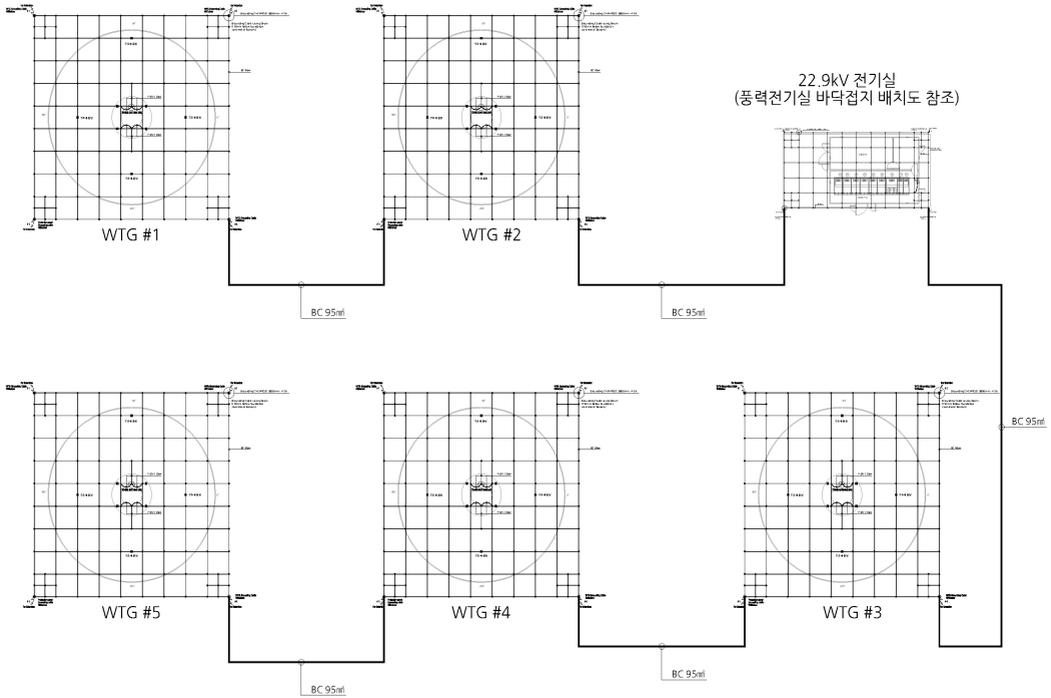


그림 35. 등전위 접지시스템의 풍력발전기 및 전기실 예비설계도

1. 등전위 접지시스템의 DATA

표 9는 등전위 접지시스템의 설계입력 DATA를 나타내고 있다. 접지설계 Simulation에 필요한 각종 입력 Data를 정리하였으며 연접용 접지도체에 대한 DATA를 추가 반영하였다. 예비설계에 의한 접지설계 DATA와 전기안전공사의 업무지침 규정은 개별접지시스템과 동일하게 적용하였다.[11]~[13]

표 9. 등전위 접지시스템의 설계입력 DATA

구 분	내 용
적용규격	IEEE Std. 80 - 2000
참조규격	한국전기안전공사 : 공통.통합접지 검사업무처리방법 한국전력공사 : 변전 설계기준 DS-2601 접지설계
대지고유저항[$\Omega \cdot m$]	CDEGS Simulation 분석값[$\Omega \cdot m$]
고장지속시간[s]	0.5[sec]
1선지락 고장전류	7.329[kA]
지락전류 분류율	20[%]
접지방식	등전위 접지시스템
접지망 포설면적[m ²]	4004.3[m ²]
접지망 도체길이[m]	4747.8[m]
주 접지극	발전기: 전해질 접지봉 3.6[m](천공 30[m]), 접지망(MESH) 전기실: 2.4[m] 동 접지봉, 접지망(MESH)
접지봉 규격	발전기: $\varnothing 80 \times 3.6$ [m], 전기실: $\varnothing 18 \times 2.4$ [m]
접지봉 수량	발전기: 4[EA], 전기실: 36[EA]
요구 접지저항	5[Ω] 이하

2. 등전위 접지시스템의 분석

그림 36은 예비설계에 의한 CDEGS 프로그램에서 적용한 설계구조를 보여주며 X축 및 Y축은 거리를 나타낸다. 프로그램에 의한 지층의 구조, 지층의 대지 저항률, 지층의 높이, 접지저항, 대지전위상승(GPR)의 결과를 보여준다.

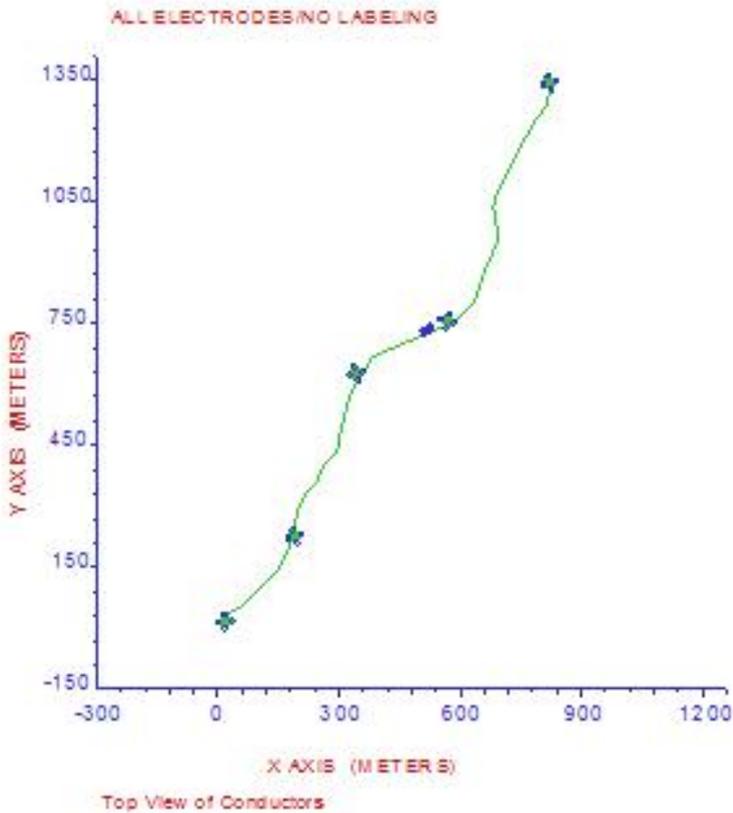


그림 36. 등전위 접지시스템의 풍력발전기 및 전기실 프로그램 설계구조

3. 등전위 접지시스템의 접지저항 및 대지전위상승(GPR)

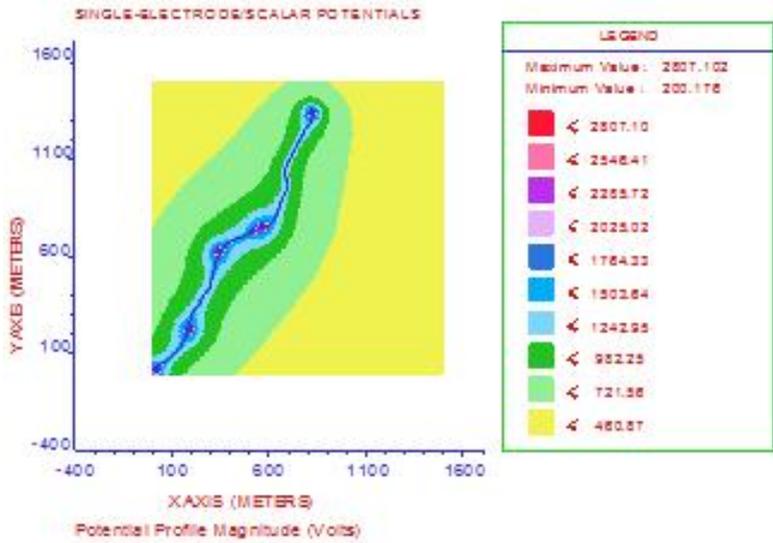
표 10은 등전위 접지시스템의 접지저항 및 대지전위상승(GPR)분석 결과를 나타낸다. 접지저항은 규정에서 요구한 5[Ω]이하를 만족하고 대지전위상승(GPR)도 규정에서 요구한 10,000[V] 이하를 만족 하였다. 즉, 기준 접지저항 및 대지전위상승(GPR)이 요구조건에 적합 하므로 위험전압과 허용안전전압을 비교 검토하여 접지시스템의 안전성을 판단하여야 한다.

표 10. 등전위 접지시스템의 접지저항 및 대지전위상승(GPR) 분석결과

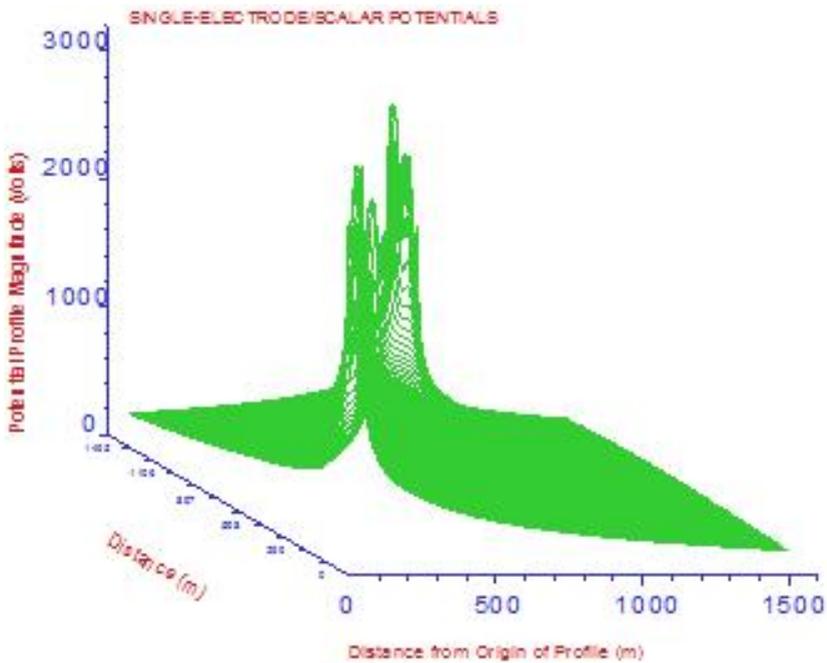
장소	지층	지층 대지저항률			접지저항 [Ω]	GPR [V]
		지층	대지저항률 [Ω·m]	두께(m)		
발전 단지	2지층 (평균값)	상지층	2540.469	3.886327	1.9311	2830.6
		하지층	1143.160	∞		

4. 등전위 접지시스템의 전위분포

그림 37은 등전위 접지시스템의 전위분포를 나타내며 등전위 접지시스템에 고장전류가 유입될 경우 전위경도를 색상으로 표현하여 전위분포를 나타낸 것으로 Z축은 전위의 상승, X축 및 Y축은 거리를 나타낸다. 전위경도는 최대 2807.102[V], 최소 200.176[V] 로 분석되었다.



(a) 전위분포의 색상으로 표현



(b) 전위분포의 전위상승으로 표현

그림 37. 등전위 접지시스템의 풍력발전단지 전위분포

5. 등전위 접지시스템의 안전전압

그림 38은 등전위 접지시스템의 안전전압을 나타내며 풍력발전단지 접지저항이 가장 높은 전기실 기준으로 지락전류가 유입될 경우 인체에 허용된 감전시간은 차단장치의 고장제거시간을 감안하여 고장지속시간 0.5[sec]로 안전전압을 분석하였다. 분석결과 최대 허용 접촉전압 E_{touch} 는 868.4[V] 이고 최대 허용 보폭전압 E_{step} 은 3005.7[V]로 나타났다. 등전위 접지시스템의 MESH 접지망은 지락전류가 MESH 접지전극에 유입될 경우 4개의 모서리에서 저항률이 작아지게 되므로 전류밀도가 커지게 되어 중심부와 모서리 사이에 전위차가 발생하게 된다. 이때의 전위차를 최대 허용 접촉전압(E_{touch})으로 나타내고 있다. 또한 MESH 접지전극 주변에서 1[m] 거리 이내의 전위경도를 최대 허용 보폭전압(E_{step})로 나타내고 있다. 안전전압은 접지전극 표면의 고유저항률에 의해 변화하며 풍력발전기 표면에 자갈을 시공하므로 $3000[\Omega \cdot m]$ 을 적용하였다.

Safety Calculation Table
Please select Touch and Step voltages from this table:

Surface Layer Resistivity	Fault Clearing Time					
	0.35 sec		0.5 sec		0.75 sec	
	Step (v)Voltage	Touch (v)Voltage	Step (v)Voltage	Touch (v)Voltage	Step (v)Voltage	Touch (v)Voltage
2000.0	2560.0	777.0	2185.4	663.3	1813.6	550.5
2500.0	3045.1	898.3	2599.5	766.9	2157.3	636.4
3000.0	3520.9	1017.3	3005.7	868.4	2494.4	720.7
3500.0	3990.4	1134.6	3406.5	968.6	2827.0	803.8
4000.0	4455.3	1250.9	3803.4	1067.8	3156.4	886.2

그림 38. 등전위 접지시스템의 안전전압

6. 등전위 접지시스템의 최대 예상 접촉전압

그림 39는 등전위 접지시스템의 최대 예상 접촉전압(E_t) 분포도를 나타내며 풍력발전단지 접지시스템의 접지저항이 가장 높은 전기실 기준으로 지락전류가 유입 될 경우 최대 예상 접촉전압(E_t)을 분석하였다. 최대 예상 접촉전압(E_t)의 범위는 최대 656.291[V]로 분석되었으며 최대 허용 접촉전압(E_{touch}) 868.4[V]를 초과하지 않는다.

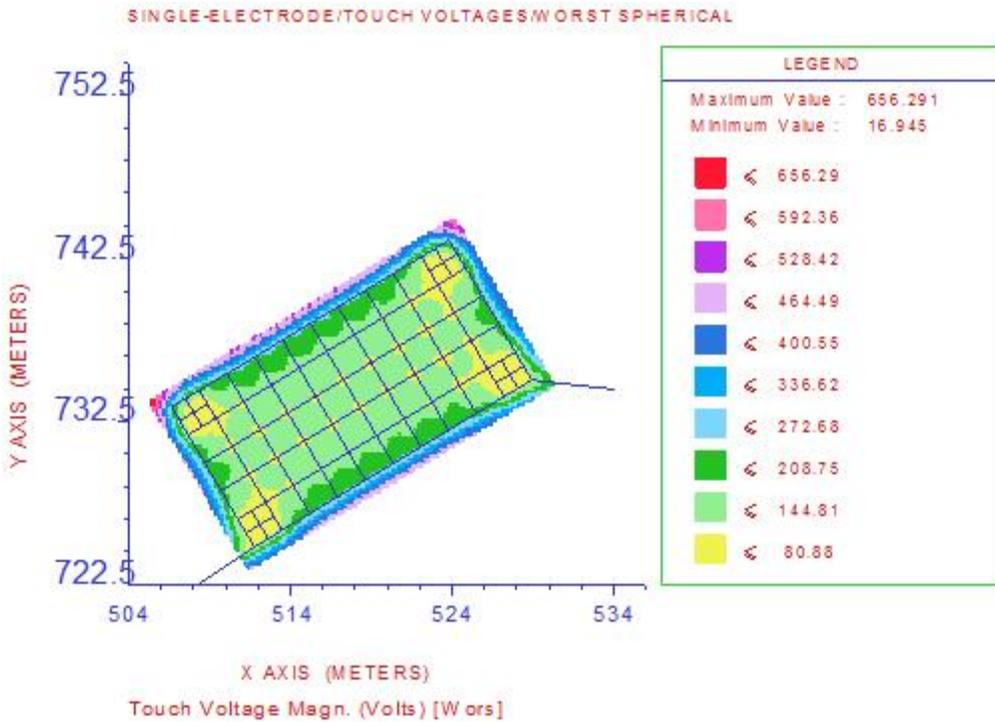


그림 39. 등전위 접지시스템의 최대 예상 접촉전압(E_t) 분포도

7. 등전위 접지시스템의 최대 예상 보폭전압

그림 40은 등전위 접지시스템의 최대 예상 보폭전압(E_s) 분포도를 나타내며 풍력발전단지 접지시스템의 접지저항이 가장 높은 전기실 기준으로 지락전류가 유입 될 경우 최대 예상 보폭전압(E_s)을 분석하였다. 접지전극 주변에서 1[m] 거리 내의 최대 예상 보폭전압(E_s)의 범위는 최대 328.946[V]로 분석되었으며 최대 허용 보폭전압(E_{step}) 3005.7[V]를 초과하지 않았다.

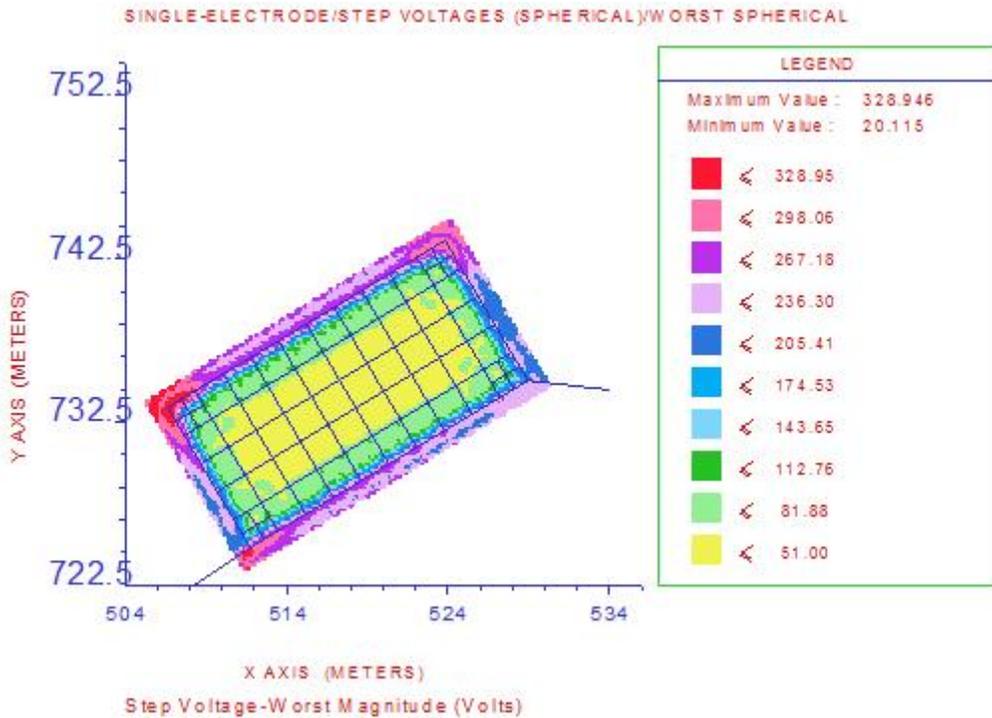


그림 40. 등전위 접지시스템의 최대 예상 보폭전압(E_s) 분포도

E. 개별 및 등전위 접지시스템 분석결과

표 11은 풍력발전단지의 개별 및 등전위 접지시스템의 접지설계 분석 결과를 나타내었다. 본 연구의 설치조건에서 개별 접지시스템의 접지저항은 9.4~32.37 [Ω] 범위이고 대지전위상승(GPR)은 13784~47448[V] 범위로서 기준치인 5[Ω] 이하와 10000[V] 이하를 크게 상회 하였다. 그러므로 개별접지시스템은 적절하지 않다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 등전위 접지시스템의 접지저항은 1.9311[Ω]으로 기준치인 5[Ω]이하였으며, 대지전위상승(GPR)은 2830.6[V]로서 10000[V] 이하를 만족하였다. 등전위 접지시스템의 안전전압 기준이 되는 최대 허용 접촉전압(E_{touch})은 868.4[V], 최대 허용 보폭전압(E_{step})은 3005.7[V]로 분석되었다. 또한 예상 위험전압인 최대 예상 접촉전압(E_t)은 656.29[V], 최대 예상 보폭전압(E_s)은 328.95[V]로 분석 되었다. 즉, 안전전압과 위험전압을 비교하여 안전성을 판단하는 $E_{touch} > E_t$, $E_{step} > E_s$ 결과를 만족하므로 등전위 접지시스템은 풍력발전단지에 적합한 접지방식임을 확인 할 수 있다.

표 11. 풍력발전단지의 개별 및 등전위 접지시스템 접지설계 분석결과

구 분		개별 접지시스템 (평균값)	등전위 접지시스템
대지저항률 [Ω·m]	상지층	3803.417	2540.469
	하지층	1483.8239	1143.160
접지저항 [Ω]		18.72352	1.9311
접지망 포설 면적[m ²]		발전기: 729 전기실: 200	4004.3
접지망 도체길이[m]		발전기: 684 전기실: 332	4747.8
대지전위상승(GPR) [V]		27444.67	2830.6
최대 허용 접촉전압 E_{touch} [V]		-	868.4
최대 예상 접촉전압 E_t [V]		-	656.29
최대 허용 보폭전압 E_{step} [V]		-	3005.7
최대 예상 보폭전압 E_s [V]		-	328.946

V. 결 론

본 논문에서는 산악지대에 설치되는 대규모 풍력발전단지의 접지시스템 구성을 개별 접지시스템과 발전단지전체의 등전위 접지시스템으로 구분하여 비교 검토함으로써 효과적인 접지시스템 방식에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 풍력발전기의 설치장소별로 대지저항을 실측하고 접지시스템 예비설계를 통해 CDEGS Simulation 프로그램을 이용하여 분석함으로써 풍력발전단지의 효율적인 접지시스템 설계기법을 제시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 접지에 관한 이론적 고찰을 통하여 국내외 접지시스템에 관한 규정을 검토하고 대지저항률 측정법과 지층구조에 따른 대지저항률의 관계를 바탕으로 접지시스템 설계에 적용되는 IEEE std. 80 규정 중심의 설계절차에 의한 허용 접촉전압(E_{touch})과 허용 보폭전압(E_{step})을 고려하여 접지시스템을 수정 보완하여 설계 하였다.
2. 풍력발전단지 풍력발전기 5기 설치장소의 지층구조 및 대지저항률 분석결과 대체적으로 상지층과 하지층의 2개 지층구조이며 대지저항률은 하지층이 상지층보다 더 낮은 것으로 분석되었다. 이는 대지의 상지층에 마사토, 사암 등으로 구성된 지층으로 인해 대지저항률이 높게 나타난 것으로 판단된다.
3. 개별 접지시스템의 접지저항은 $9.4 \sim 32.37[\Omega]$ 범위이고 대지전위상승(GPR)은 $13,784 \sim 47,448[V]$ 범위로 IEEE std. 80 규정의 기준인 $5[\Omega]$ 이하와 $10,000[V]$ 조건을 만족하지 못함으로써 개별 접지시스템은 적합하지 않은 방식으로 확인 되었다. 이는 높은 대지저항률, 풍력발전기 Foundation 설치면적 등으로 접지도체의 길이가 제한되어 필요한 접지저항을 확보하지 못한 영향이 큰 것으로 판단된다.
4. 등전위 접지시스템의 대지저항은 $1.9311[\Omega]$, 대지전위상승(GPR)은 $2,830.6[V]$ 로 IEEE std. 80 규정의 기준인 $5[\Omega]$ 이하와 $10,000[V]$ 조건을 만족함으로써 안전전

압을 확보하였음을 확인 하였다. 이는 접지시스템의 연접으로 접지전극 도체길이가 증대되어 접지저항이 감소하고 전위경도가 완화됨으로써 안전한 접촉전압과 보폭전압이 확보 된 것으로 판단된다.

풍력발전단지의 접지시스템은 전력설비와 인축을 보호하는 매우 중요한 시스템이다. 본 논문에서는 한 지역의 풍력발전단지에 대한 개별 접지시스템과 등전위 접지시스템에 대한 연구를 수행한 결과이나 향후 다수지역의 풍력발전단지에 대한 데이터 축적을 바탕으로 비교 분석하여 접지시스템의 안전성과 신뢰성 확보를 위한 추가적인 연구가 요구된다고 사료된다.

< 참 고 문 헌 >

- [1] 숭실대학교 대학원 박사학위 논문, “제한된 부지에서 전력설비 위험전압을 고려한 접지설계 개선방안에 관한 연구”, 손석금, 2012
- [2] 한국신·재생에너지학회, “풍력개발예정지에 대한 대지저항률 측정과 해석을 통한 최적 접지설계”, 장정호, 최형철, 이광호, 2008, pp.321~323
- [3] 대한전기학회, “풍력발전설비의 접지시스템 설계에 관한 연구”, 조대훈, 이기석, 정철희, 박대현, 2009, pp.2190~2092
- [4] 산업통상자원부, “전기기술기준”, 고시 제2021-18호
- [5] 산업통상자원부, “한국전기설비규정(KEC)”, 공고 제2021-36호
- [6] 대한전기협회, “접지시스템 설계방법에 관한 기술지침” 2019
- [7] 산업통상자원부, “신·재생 에너지 백서 2018”, 한국에너지공단
- [8] 성안당, “최신 접지설비 설계”, 최홍규, 소영주, 오정석, 최병숙, 2018
- [9] 기다리, “접지시스템 계획”, 이성우, 2012
- [10] 기다리, “접지공학”, 이복희, 2017
- [11] ANSI/IEEE Std.80-2000, “IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding”, 2000
- [12] 한국전기안전공사, “공통 통합접지 검사업무처리방법”, 2018
- [13] 한국전력공사, “변전설계기준 DS-2601, 접지설계”, 2013

감사의 글

대학 졸업 후 첫 취업이 었그제 같은데 벌써 13년이라는 시간이 지나갔습니다. 엔지니어로서 직장생활을 하면서 학업에서 배운 이론을 바탕으로 시작된 실무는 현장에서 발생하는 다양한 문제를 최소화하고 새로운 기술의 습득과 활용에 필요한 밑바탕이 된다는 것을 새삼스럽게 느끼게 되었습니다.

더욱 빠르게 변화하는 기술, 지식, 교육 등의 필요성을 느끼던 중 조선대학교 산업기술창업대학원 전기기술융합공학과에 입학하였고 벌써 2년이라는 시간이 흘러 졸업을 한다고 하니 감회가 새롭습니다.

본 논문을 위해 관심과 격려를 아끼지 않으시고 올바른 방향으로 지도해주신 조금배 교수님, 김남훈 교수님, 최연옥 교수님과 늦은 시간까지 열정적으로 강의하여 주신 최효상 교수님 외 전기공학과 모든 교수님께 깊이 감사드립니다.

대학원 진학을 격려하고 배려해주신 조 현 대표님과 항상 도움을 아끼지 않으신 정종성 실장님, 조 훈 이사님, 서민우 과장님께도 감사드립니다.

끝으로 사랑하는 어머니와 가족들에게 고마움을 전하며 도움주신 모든 분들의 기대에 어긋나지 않고 발전하는 모습 보여드릴 수 있도록 노력하겠습니다.

2021년 05월
문 해 열 올림