



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](#)

碩士學位論文

제주지역 낙뢰특성 및
풍력발전단지 접지사례 분석

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

左 吉 訓

2015년 6월

碩士學位論文

제주지역 낙뢰특성 및
풍력발전단지 접지사례 분석

指導教授 金世鎬

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

左吉訓

2015년 6월

제주지역 낙뢰특성 및 풍력발전단지 접지사례 분석

指導教授 金世鎬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 6 月 日




濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

左 吉 訓

左吉訓의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2015 年 6 月 日

委員長 金鎬民 
委員 金豪贊 
委員 金世鎬 

목 차

목 차	i
그림 목차	iii
표 목차	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 낙뢰의 발생 및 피뢰관련 국·내외 규정	3
2.1 낙뢰의 발생	3
2.2 제주지역의 지리적 특수성	7
2.3 피뢰대책 및 국·내외 규정	7
2.4 광역 피뢰침을 이용한 피뢰대책	13
III. 2010~2014년의 제주지역 낙뢰특성 분석	16
3.1 낙뢰자료 수집	16
3.2 낙뢰발생 빈도 분석	17
3.3 낙뢰발생 강도 분석	19
3.4 지역별 낙뢰분포 분석	22
IV. 풍력발전단지 접지사례 분석	26
4.1 제주지역 발전단지의 접지사례	26
4.2 등전위접지 시공	31

4.3 광역 피뢰침을 이용한 독립 피뢰철탕	34
V. 결 론	37
VI. 참고문헌	39
감사의 글	41

그림 목 차

그림 1	적란운 내에서의 전하 분포 모습	4
그림 2	뇌 방전의 매카니즘	5
그림 3	부극성과 정극성의 낙뢰발생	6
그림 4	풍력발전기 피뢰구역의 결정	8
그림 5	풍력발전기 구성요소별 피뢰대책	9
그림 6	낙뢰점의 결정	14
그림 7	ESE 피뢰침의 보호반경 R_p	15
그림 8	IMPACT ESP 외관 및 특성	16
그림 9	시간에 따른 낙뢰발생 횟수	18
그림 10	월별 낙뢰발생 횟수	19
그림 11	연별, 등급별 낙뢰발생 횟수	22
그림 12	5년간(2010~2014) 낙뢰강도	23
그림 13	5년간(2010~2014) 낙뢰일수	23
그림 14	5년간(2010~2014) 낙뢰횟수	24
그림 15	5년간(2010~2014) ± 8 등급 이상인 낙뢰분포	25
그림 16	A 풍력발전단지 풍력발전기 배치도	26
그림 17	B 풍력발전단지 풍력발전기 배치도	28
그림 18	C 풍력발전단지 풍력발전기 배치도	29
그림 19	D 풍력발전단지 풍력발전기 배치도	30
그림 20	E 풍력발전단지 풍력발전기 배치도	31
그림 21	풍력발전단지의 등전위 접지 방법	32
그림 22	접지 계산프로그램	33
그림 23	독립 피뢰철탐의 낙뢰	35
그림 24	독립 피뢰철탐	35

표 목차

표 1	IEC 피뢰관련 규정	10
표 2	월별, 극성별 낙뢰의 발생횟수 및 발생비율	17
표 3	낙뢰강도 등급	20
표 4	계절별 낙뢰강도 등급 분포	21

Analysis of Lightning Characteristics
and Wind Farm Grounding Systems
in Jeju Island

Gil-Hoon Jwa

Department of Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University

Supervised by professor Se-Ho Kim

Summary

This dissertation analyzes characteristics of seasonal and hourly lightning occurred over Jeju Island by using cloud-to-ground lightning polarity data measured by Korea Meteorological Administration for last 5 years (2010 ~ 2014). Because lightning protection considering accumulated lightning distribution around Jeju Island must be ensured, this thesis proposes plan of lightning protection. Frequency on lightning is a lot of different every year. And average frequency on lightning is 1200 times a year. On the contrary to average frequency, frequency on lightning in 2011 is more than 4500 times. Lightning

strength on straight and reverse polarity is similar. However, a lot of reverse polarity is in low lightning strength. A large number of lightning phenomenon occur on eastern region than western. Eastern region, especially side of coast, is also higher than western about all of characteristics including frequency, strength and so on. Because an amount of on-shore large scale wind farm is built in side of coast and mountain recently, One of the most important thing is lightning protection. According to KS C IEC 62305 (Korean standard on lightning protection system), only vertical lightning rod, horizontal lightning conductor, mesh grounding system and rolling sphere method are allowed. Consequently, this dissertation presents not only analyzing domestic and international standard on lightning protection but also proposing plan of lightning protection considering domestic standard about technique on electricity facilities. Because of feature of high earth resistance in Jeju Island, lightning protection on pylon is an alternative method by using equipotential grounding and early streamer emission lightning protection. In order to perfectly design inner and outer lightning protection system, lightning rod, surge protective device and equipotential common grounding is essential.

I. 서 론

산업의 고도 발전으로 인한 CO₂ 증가로 환경이 열악해 지고 이에 따른 엘리뇨 및 온난화 현상 등 기후변화 현상으로 기상이변이 발생하고 있으며 해마다 낙뢰의 피해 및 빈도수는 점차 늘어가고 있는 실정이다. 대형 건축물 및 구조물이 산업의 발달에 따라 많이 건설되고 있으며, 최근 신재생 에너지 발전에 따른 대용량의 높은 지상고를 갖는 풍력발전 시스템이 설치되고 있어 이에 따른 피뢰대책이 요구되고 있다. 지상의 높고 돌출된 구조물에는 낙뢰의 피격이 많은 경향이 있는 것이 사실이다.

풍력 에너지는 현재로서 가장 비용 효과적인 신재생 에너지원이지만 설치 위치가 해안가나 산등성이에 설치되고 있어 낙뢰에는 가장 취약한 것이 사실이다. 풍력, 태양광 등의 신재생 에너지가 전체 에너지에서 차지하는 비중이 점차 늘어남에 따라, 블레이드 등 풍력발전 시스템에 낙뢰의 피격에 의한 발전 중단은 장기간 풍력발전 시스템의 가동 중단으로 이어져 발전회사의 수익에 막대한 지장을 초래한다. 아직 제주도에서는 낙뢰에 대한 피해가 계전기의 순시동작 등에 국한하고 있으나 언제라도 닥칠 수 있는 낙뢰 재난에 대비하여 대책을 강구하여야 한다. 이에 대한 대책으로 풍력발전기 제조회사가 제시하는 피뢰대책으로만 설계, 시공되고 있어 지역 별 낙뢰강도에 따른 제주지역의 지역특성에 맞는 능동적이고 적극적인 피뢰대책은 미흡한 것이 현실이다.

과거 2004년부터 2006년까지 낙뢰로 인한 풍력발전기의 정지사례를 조사한 결과 낙뢰가 비교적 높은 빈도로 발생한 시간대는 오전 3시에서 6시 사이였고 낙뢰로 인하여 시스템 정지를 확인 할 수 있었으나, 그 횟수가 적고 시간은 길지 않았다[1]. 2008년부터 2012년 기상청 낙뢰 자료를 바탕으로 제주도의 낙뢰 특성을 분석한 결과 낙뢰는 7~9월에 많이 발생하며 부극성 낙뢰가 주로 발생하고 낙뢰 강도는 매년 비슷한 추세로 -7~-3등급 사이에 많이 분포하였다[2].

본 논문에서는 최근 2010년부터 2014년까지 5년간 제주도에서 발생한 낙뢰의 계절별, 월별, 시간별 낙뢰빈도, 극성율, 강도에 따른 제주도의 낙뢰 특성을 살펴본 후 제주도 내 풍력발전단지의 접지사례를 분석하였다.

풍력발전단지의 접지사례를 분석해본 결과 1990년대에 설치된 풍력단지들은 개별접지로 되어 있는 경우가 많고 최근에 제주도 조례에 의한 풍력발전의 전력선 지중화 조치 이후는 등전위 접지로 점차 이행되고 있는 실정이다. 풍력발전단지의 접지는 풍력발전기 타워기초를 이용한 통합접지 및 설비 사이의 등전위본딩과 별개로 풍력발전기 사이의 등전위 접지대책이 중요함을 강조하고자 한다.

Ⅱ. 낙뢰의 발생 및 피뢰관련 국·내외 규정

2.1 낙뢰의 발생

1) 뇌운 형성

뇌운이 발생하기 위한 기본적인 조건은 불안정대기, 상승작용 그리고 높은 습도이다. 그러나 이 3가지 조건에 의한 뇌운의 성장에는 하층의 가열이나 대류, 수렴, 기계적 상승, 상층냉각 등의 요인에 의한 도화선 작용이 선행되어야 한다. 이 가운데 한 가지 요인만이라도 충족되면 뇌운은 발생 가능해지며, 이 3가지 조건을 모두 만족할 때 그 일생(발달기, 성숙기, 소멸기)을 시작한다[3].

뇌운이 첫째 조건은 잠재 불안정한 공기가 주위보다 따뜻해지는 고도까지 상승하면, 그때부터 자유롭게 상승하게 된다. 이러한 고도까지 공기를 상승시켜 주기 위해서는 대기가 불안정한 상태, 즉 조건부 불안정이나 대류 불안정이어야 한다.

두 번째 조건은 상승작용이 일어나야 지표 부근의 따뜻한 공기가 자유대류 고도(LFC : Level of Free Convection)에 도달할 수 있다. 상승작용은 대류에 의한 일사, 지형에 의한 강제 상승, 전선 상에서의 온난공기의 상승, 저기압성 수렴, 상층냉각에 의한 대기 불안정으로 인한 상승, 이류 등의 여러 요인이 있다.

세 번째 조건은 대기 중의 수증기량이 많을수록 더 쉽게 자유대류 고도에 도달할 수 있다. 왜냐하면 공기덩이에 포함된 수증기량이 많을수록 열역학적인 불안정을 유발하기 쉽기 때문이다. 즉, 수증기가 물방울이 되어 구름이 형성되면 잠열이 방출되기 때문에 공기는 더욱 불안정해져서 상승작용이 촉진된다.

2) 낙뢰 메커니즘

번개가 전기현상에 의한 것이라는 것은 240여년 전 벤자민 프랭클린에 의하여 밝혀졌고, 일반적으로 적란운과 연결되어 나타나지만 난층운이나 눈보라, 먼지폭풍 그리고 분출하는 화산으로부터 나오는 먼지나 가스와 함께 나타나기도 한다. 뇌우가 있는 동안에 번갯불은 구름 안에서, 구름들 사이에서, 구름과 공기 사이에서, 또는 구름과 땅 사이에서 나타날 수 있다. 번개를 발생시키는 뇌운은 주로 적란운(積亂雲)이며, 이 적란운은 상층과 하층의 대기가 불안정할 때 발생하게 된다. 번개는 그림 1과 같이 적란운이 발달하면서 구름내부에 분리 축적된 음전하와 양전하 사이에서 발생하는 불꽃 방전이다. 관측에 따르면 구름의 상부에는 양의 전하가 그리고 하부에는 음의 전하가 축적되면서 지면에는 양의 전하가 유도된다[3].

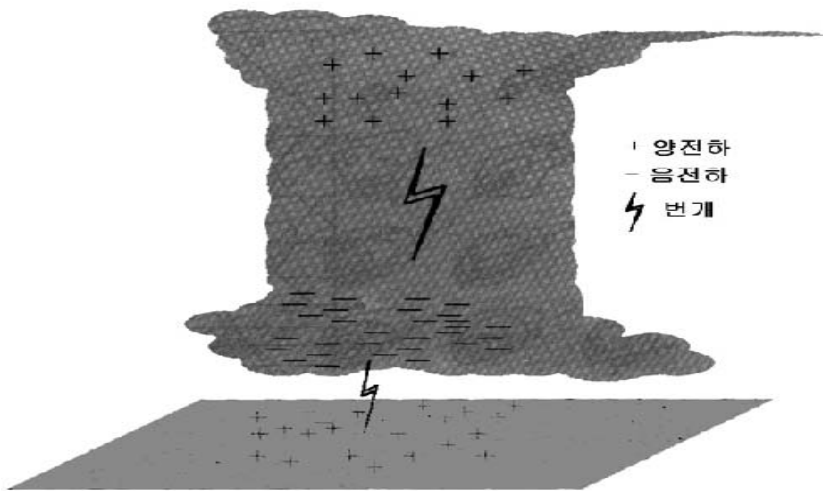
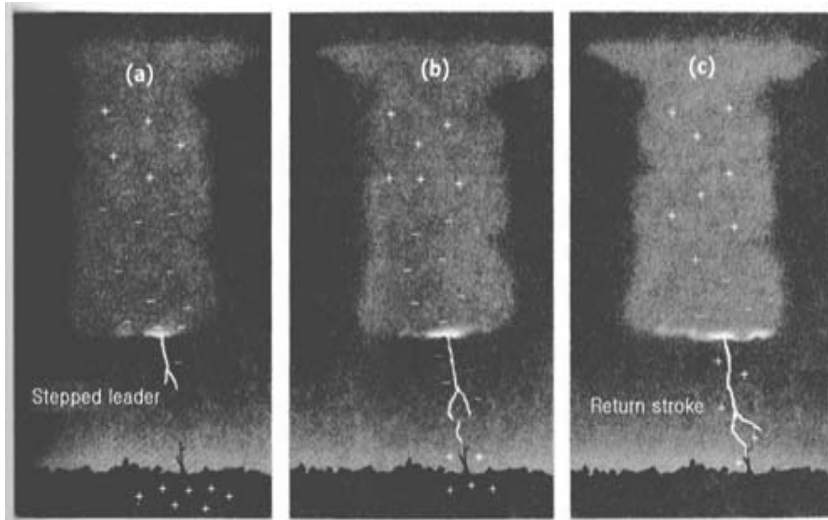


그림 1 적란운 내에서의 전하 분포 모습(Idealized Model)

뇌 방전의 메커니즘을 보면, 구름의 아랫부분에서 나타나는 번개는 뇌격이라고 불리는 성분방전으로 이루어져 있다. 그림 2에서 뇌격은 구름으로부터 지면

을 향하여 하강하는 비교적 약한 빛의 선도뇌격(stepped leader)과 이것이 지면에 도달하는 순간, 같은 길을 통하여 지면으로부터 구름을 향하여 상승하는 매우 밝고 빠른 속도의 방전, 즉 복귀뇌격(return stroke)으로 이루어져 있다.



(a) 선행방전

(b) 정상뇌격

(c)복귀뇌격

그림 2 뇌 방전의 메커니즘

뇌는 한줄기 빛으로 보이지만 실제로는 뇌(雷)가 실린 구름에서 공기 절연이 파괴되어, 선행방전(先行放電, stepped leader)이 구름을 출발하여 전진과 휴지를 반복하면서 지상으로 내려온다. 이 선도뇌격이 대지나 지상의 물체에 접근하면 대지나 물체에서 상향의 스트리머가 생기며, 이 양자가 결합할 때 뇌운에서 대지 또는 물체에 이르는 방전로가 형성된다. 그림 2는 선행방전과 상향 스트리머가 만나기 직전의 모습을 보여준다. 이러한 방전로에 대지 쪽에서 많은 전하가 유입되어 주 방전로가 생기고 이 방전로를 통해 지면에서 구름을 향해 매우 밝고 속도가 빠른 주 방전(Return Stroke)이 일어난다[3].

3) 낙뢰의 종류

정극성 낙뢰와 부극성 낙뢰의 특성 및 차이점을 살펴보면, 그림 3과 같이 부극성 낙뢰는 구름밑면이 음전하(-)를 띠고, 대지가 양전하(+)로 대전되었을 때 발생하며, 낙뢰의 90%이상이 부극성 낙뢰에 속한다. 평균 뇌격전류는 33 kA이다.

정극성 낙뢰는 구름밑면이 양전하(+)를 띠고 대지가 음전하(-)로 대전되었을 때 발생하며 낙뢰의 10%이하가 여기에 속한다. 그러나 정극성 낙뢰의 경우, 평균 뇌격전류가 75 kA 정도로 높아 상대적으로 낙뢰의 피해가능성은 적지만(10% 미만) 일단 피해를 입게 되면 부극성 낙뢰보다 배 이상의 피해를 입게 된다.

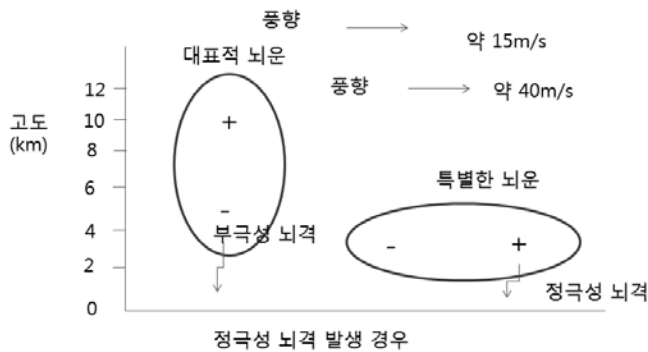


그림 3 부극성과 정극성의 낙뢰발생

뇌운이 형성되면 뇌운 바로 아래의 지표면에는 뇌운 하단부 전하와 반대 극성을 띠는 전하가 유도되고 양자 간의 전계 강도가 증가하게 된다. 대기의 절연 내력이 이 전계 강도를 이기지 못하면 절연이 파괴되고 구름과 대지 양자사이에 불꽃 방전이 있게 된다. 뇌운 속에서 또는 뇌운과 뇌운 사이에서도 이러한 현상은 빈번히 발생하지만 시설물 등에 손상을 입히는 낙뢰는 이러한 뇌운과 대지사이의 방전이다[4].

2.2 제주지역의 지리적 특수성

제주도는 한반도의 최남단(북위 33°06' ~ 34°00', 동경 126°08' ~ 126°58')에 위치하고 있으며, 총면적 1,847 km²로 동서 73 km, 남북 31 km로 동서방향은 남북방향보다 2.4배 길며, 장축이 위도에 대하여 북동방향에서 남서방향으로 약 15도 가량 기울어진 모습이다. 또한 한라산을 정점으로 동서사면은 완만(3~5°)하고 남북사면은 동서보다 급한 경사(5~10°)를 보이고 있다.

한라산 정상에서 남서쪽으로 해발 200 m~600 m 고도의 비교적 저변이 넓은 돈네코 계곡이 있으며 산 북쪽으로는 정상에서 700 m 고지에 이르는 "Y"계곡이 형성돼 있다. 또한 원추형으로 생긴 368개의 직경 1 km 미만, 표고 200~300 m인 봉우리로 "오름(악, 봉)"이라 불려지는 기생화산이 산 정상에서 해안까지 분포한다. 이와 같은 오름은 해발 600 m 이하 고도에 80% 정도가 산재되어 있어 하층바람에 영향을 주어 기류의 국소적인 수렴역을 만드는 등 지형성 일기변화를 창출하는 경우가 많다. 이와 같이 계절적 주풍계, 해륙풍의 순환 특성 등 여러 원인으로 인해 북부, 남부, 동부, 서부의 기상현상 출현이 각기 특성이 있고, 고도에 따른 날씨의 변화도 커서 한반도의 서해안, 동해안, 남해안 및 내륙과 산지기후 특성이 종합적으로 나타나고 있다[5].

2.3 피뢰대책 및 국·내외 규정

1) 피뢰구역 및 피뢰레벨의 결정

풍력발전기의 피뢰시스템은 설비의 중요도나 피뢰 위험성에 따라 4가지 등급으로 구분할 수 있으며, 특별히 위험성평가를 통한 언급이 없다면 일반적으로 풍력발전기의 피뢰레벨은 1등급을 적용하여야 한다.(풍력설비 판단기준 제

8조 제1항). 피뢰레벨은 풍력발전기의 특성 및 설치되는 지역의 낙뢰발생 특성, 직격뢰 예상빈도 등을 고려하여 결정하여야 한다.

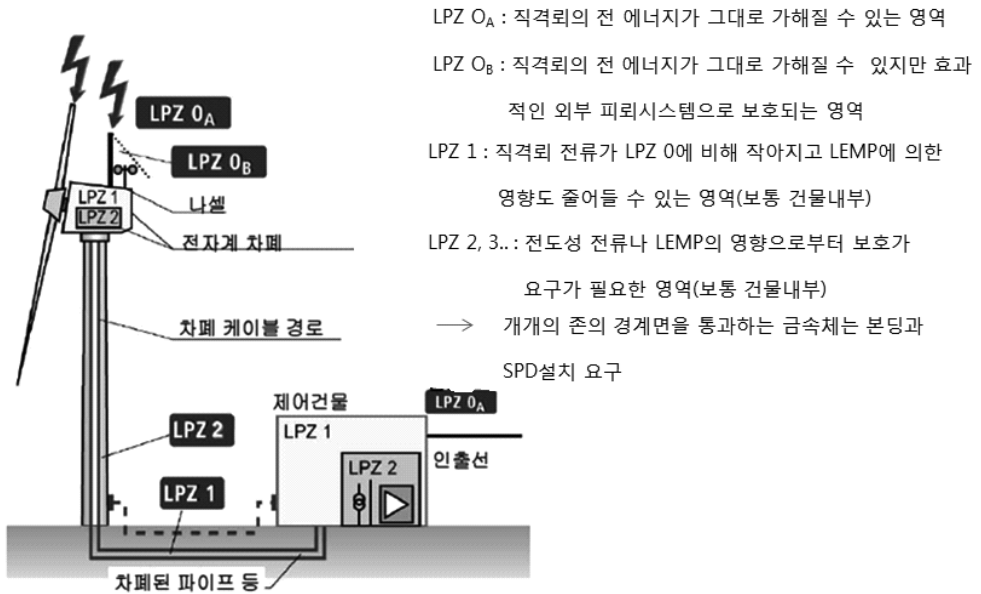


그림 4 풍력발전기 피뢰구역의 결정

또한 그림 4에 나타난 바와 같이 낙뢰로 인한 손상이나 고장을 방지하기 위하여 직격뢰, 절연내력 이상의 전위차 또는 전자계에 노출되는 부분이 존재하지 않도록 피뢰구역을 설정하여야 한다. 피뢰구역 내의 전기설비들은 해당구역의 위험도에 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다[8].

2) 구성요소 별 피뢰대책

풍력발전설비에 대한 낙뢰피해 부위를 제어할 수 없기 때문에 종합적인 피뢰대책으로서 그림 5에 나타난 바와 같이 각각의 부위에 대해 해당지역에서의 낙뢰의 특성에 견딜 수 있는 구조가 되도록 하여야 한다[8].

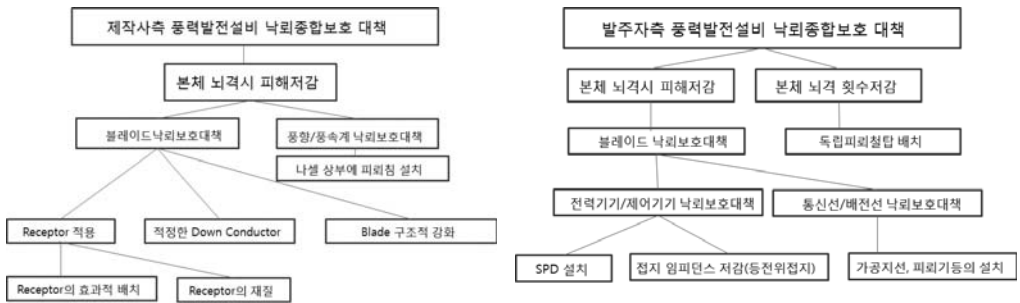


그림 5 풍력발전기 구성요소별 피뢰대책

3) 국·내외 규정

풍력발전기의 피뢰설비는 터빈이 설치되는 국가의 법령 및 국제 표준의 요구조건들을 만족하여야 한다.

가) IEC

풍력발전기에 대한 피뢰대책 표준제정 작업은 IEC 기술위원회(TC) 및 분과위원회(SC)에서 개발하고 있다. IEC/TC 88(풍력발전 시스템)기술위원회에서는 기계적 내부 전기시스템, 지지구조, 제어 및 보호시스템 등 풍력 터빈에 대한 전반적인 표준 작업을 진행하고 있다. IEC/TC 88기술위원회에서 2002년에 TR(Technical Report) 61400-24를 제정하였고, 2010년에 정식문서인 IS(International Standard) IEC 61400-24 표준을 발간하였다.

IEC 61400-24(Wind Turbine Generator Systems-24:Lightning Protection)

표준은 뇌해 대책의 특성 등에 대해서는 IEC/TC 81(건축물의 피뢰설비)의 문서를 기본적으로 따랐으며 풍력발전기 자체의 문제로서 블레이드 시험법과 기구 부품 등에 대해 추가하였다. 또한 IEC 피뢰관련 규정은 표 1과 같다[8].

표 1 IEC 피뢰관련 규정

표준번호	표준명	
IEC 61400-24	Wind turbine generator systems – Part 24 : Lightning protection	
IEC 62305-1	Protection against lightning	Part 1: General principles
IEC 62305-2		Part 2: Risk management
IEC 62305-3		Part 3: Physical damage to structures and life hazard
IEC 62305-4		Part 4: Electrical and electronic systems with in structures
IEC 62561-1	Lightning Protection System Components	Part 1: Requirements for connection components(CDV)
IEC 62561-2		Part 2: Requirements for conductors and earth electrodes (CDV)
IEC 62561-3		Part 3: Requirements for isolating spark gaps(CDV)
IEC 62561-4		Part 4: Requirements for fasteners
IEC 62561-5		Part 5: Requirements for earth electrode inspection housings and earth electrode seals
IEC 62561-6		Part 6: Requirements for lightning strike counters
IEC 62561-7		Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds (FDIS)
IEC 62561-8		Part 8: Requirements for components for isolated LPS(PWI)
IEC 61643-11	Low-voltage surge protective devices	Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems – Requirements and test methods
IEC 61643-12		Part 12: “ – Selection and application principles
IEC 61643-21		Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Performance requirements and testing methods
IEC 61643-22		Part 22: “ – Selection and application principles

나) 미국

미국은 풍력발전기 피뢰시스템 관련 표준으로 NFPA 780(Standard for the Installation of Lightning Protection Systems)에서 일반 건축물, 굴뚝, 폭발의 위험이 있는 시설물, 선박 및 풍력발전기 등에 대한 시설기준을 규정하고 있다.

특히 NFPA 780규정 제9장에서는 풍력발전기의 피뢰대책(Protection of Wind Turbine)를 규정하고 있으며 외부의 회전 블레이드, 나셀, 타워로 구성되는 풍력발전 구조물에 대한 피뢰대책을 규정하고 있다. 또한 미국 사용자설비의 상세 시설규정으로서 일상생활에서 사람이 접촉할 우려가 가장 많은 사용자설비의 저압전기설비에 대한 안전기준을 규정하고 있는 NFPA 70(NEC : National Electrical Code) 제694항(Small Wind Electric Systems)은 소형 풍력발전 시스템에 대한 성능요건을 규정하고 있다[8].

다) 일본

풍력발전기에 대한 피뢰대책에 대해서는 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO) 등을 중심으로 풍력발전설비의 뇌 피해 실태를 조사하고, 2008년 3월에 “일본 풍력발전기 가이드라인(낙뢰대책 편)”을 제정한 바 있다.

일본 풍력발전 낙뢰대책 가이드라인 구성을 보면 아래와 같다.

- ◎ 일본의 낙뢰 피해실태
- ◎ 낙뢰 맵
- ◎ 뇌보호시스템
 - 뇌피해 상황과 뇌보호 대책
 - 풍차 본체의 뇌보호 대책
 - 블레이드의 뇌보호 대책
 - 전력기기, 제어기기등의 뇌보호
 - 풍향, 풍속계의 낙뢰보호
 - 독립피뢰철탍에 의한 뇌보호 대책
- ◎ 뇌 대책 중점지역에 풍력발전 설비를 설치한 경우의 뇌보호 대책
- ◎ 뇌 리스크 계산 예
- ◎ 낙뢰 모의시험 결과

또한 낙뢰 예방시스템이 구축되어 있는 경우에도 낙뢰발생 이후에는 각각의 풍력발전기의 이상 유무를 확인하는 것을 권장하고 있다[8].

라) 한국

a) 전기설비기술기준 제6조의 2(전기설비의 피뢰)

뇌 방전으로 인한 과전압으로부터 전기설비의 손상, 감전, 또는 화재의 우려가 없도록 피뢰설비를 시설하고 그 밖에 적절한 조치를 하여야 한다.

b) 전기설비기술기준 제175조(풍력터빈의 피뢰설비)

풍력터빈은 손상, 감전 또는 화재의 우려가 없도록 피뢰설비를 시설하여야 한다.

c) 전기설비기술기준 제176조(전자기 적합성)

풍력터빈에 설치되는 전기설비는 전자기적합성을 고려하여 시설하여야 한다.

d) 전기설비기술기준의 판단기준 5. 발전용 풍력설비 제8조 (피뢰설비)

전기설비기술기준 제175조의 규정에 준하여 다음 각 호에 따라 피뢰설비를 시설하여야 한다.

(1) 피뢰설비는 IEC 61400-24에서 정하고 있는 피뢰구역(Lightning Protection Zones)에 적합하여야 하며, 다만 별도의 언급이 없다면 피뢰등급(Lightning Protection Level : LPL)은 1등급을 적용하여야 한다.

(2) 풍력터빈의 피뢰설비는 다음 각 목에 따라 시설하여야 한다.

㉠ 수뢰부를 풍력터빈 선단부분 및 가장자리 부분에 배치하되 뇌격전류에 의한 발열에 용손되지 않도록 재질, 크기, 두께 및 형상 등을 고려할 것.

㉡ 풍력터빈에 설치하는 인하도선은 쉽게 부식되지 않는 금속선으로서 뇌격전류를 안전하게 흘릴 수 있는 충분한 굵기여야 하며, 가능한 직선으로 시설할 것.

㉢ 풍력터빈 내부의 계측 센서용 케이블은 금속관 또는 차폐케이블 등을 사용하여 뇌유도 과전압으로부터 보호할 것.

㉣ 풍력터빈에 설치한 피뢰설비(리셉터, 인하도선 등)의 기능저하로 인해 다른 기능에 영향을 미치지 않을 것.

(3) 풍향·풍속계가 보호범위에 들도록 나셀 상부에 피뢰침을 시설하고 피뢰도선은 나셀프레임에 접속하여야 한다.

(4) 전력기기·제어기기 등의 피뢰설비는 다음 각 호에 따라 시설하여야 한다.

㉠ 전력기기는 금속시스 케이블, 내뢰변압기 및 서지 보호장치(SPD)를 적용할 것.

㉡ 제어기기는 광 케이블 및 포토커플러를 적용할 것.

㉢ 시설방법은 판단기준 “1. 전기설비”에서 규정하는 방법을 준용할 것.

(5) 풍력터빈의 접지는 타워기초를 이용한 통합접지공사를 하여야 하며, 설비 사이의 전위차로 인한 손상이 없도록 등전위 본당을 하여야 한다[18].

2.4 광역 피뢰침을 이용한 피뢰대책

1) 낙뢰점 결정의 메커니즘

여름철에 가장 많이 발생하는 음극성 뇌운과 대지사이의 뇌를 예로 들어 설명하면, 뇌운의 음전하 중심에서 직경 2~30 m의 뇌운 전하로 가득 채워진 원통형의 관과 직경이 약 1 cm의 강하게 이온화된 플라즈마 핵이 수십 미터의 계단형으로 지상을 향해 간헐적인 전진을 해올 때, 이 현상을 리더뢰라 하고 간헐 단계간의 휴지시간은 수 10 μ s에 달한다. 리더뢰의 선단이 지상에서 수 10 m의 거리에 가까워지면 그 선단 부근에 있는 수목의 첨단 끝이나 건물의 끝부분의 전계강도가 커져 약 30 kV/cm로 코로나 방전이 시작된다. 전계강도가 커지면 전자눈사태 현상에 의해 코로나 방전은 리더뢰와 유사한 포착방전이 되어 리더뢰를 향해 진전하고 최종적으로는 리더뢰와 만난다. 이로 인해 낙뢰점이 결정되고 리더뢰는 접지되어 전하 관에 축적된 전하가 지표면의 전하와 중화된다. 이 중화과정이 낙뢰 주방전이다. 최종 방전 거리 r (m)를 뇌격 거리라 하고 주 방전 전류 피크치 I (kA)와는 수식 (1)의 관계가 있다.

$$r = 10 \times I^{2/3}(\text{m}) \quad (1)$$

예를 들어 $I = 2.8, 9.5, 14.8$ kA에 대해 $r = 20, 45, 60$ m가 된다.

그림 6과 같이 리더뢰 선단 부근의 2곳에서 포착방전이 스타트했을 경우 리더뢰의 진전에 따라 최초로 뇌격거리에 달한 점이 낙뢰점이 된다[9].

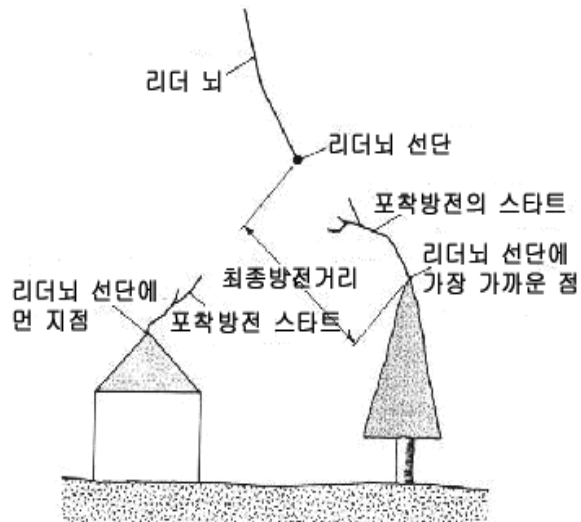


그림 6 낙뢰점의 결정

2) 동작원리

ESE란 Early Streamer Emission의 약어로 스트리머를 일찍 방사한다는 의미로 국제적으로 사용되는 용어이며 프랑스 피뢰보호규격인 NFC 17-102에 제정되어 있다. ESE는 대기 중에 발생하는 전계에너지를 수집 축적하고 있다가 낙뢰 직전에 대기중의 전계 변위(dE/dt)가 급격히 증가할 때 내부의 감지회로에서 이 정보를 검출하여 트리거 장치에 전달된다. 그리고 피뢰침 내부에 축적된 에너지가 피뢰침 상부에서 방출되면서 공기가 이온화 된다. 전자의 충돌 전리에 의해 상승 스트리머가 형성되어, 뇌운의 하강 스트리머를 향하여 발전되어 뇌를 조기에 포착한다[10].

3) 보호범위

경제성과 피뢰효과 등 리스크 분석결과를 고려하여 소유자 또는 설계자가 보호레벨을 결정한다. 또한 회전구체법에 의한 보호범위를 산정하기 위하여 보호레벨을 산정한다. 뇌운(雷雲)에서 지상으로 향하는 선행방전이 출발하면 약 50 m 진전할 때마다 약 30~90 μ s의 휴지(休止)를 반복하면서 지상으로 접근한다. 상향 스트리머의 발진은 주변의 돌기물 보다 약 60~70 μ s 빨리 일어난다. 스트리머의 진전속도는 약 1 m/ μ s로서 약 60~70 m정도 스트리머가 올라간다[10].

그림 7은 ESE 피뢰침의 보호 반경 R_p 를 나타냈다. R_p 는 회전구체법을 이용하여 수식 (2)를 통해 구하여 진다.

$$R_p = \sqrt{(D+\Delta L)^2 - (D-h)^2}$$

$$= \sqrt{h(2D-h) + \Delta L(2D+\Delta L)} \quad (2)$$

단, h : 기준면에서부터 피뢰침까지의 높이

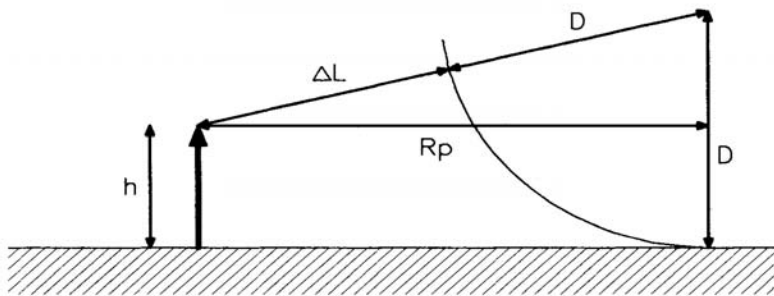


그림 7 ESE 피뢰침의 보호반경 R_p

Ⅲ. 2010~2014년의 제주지역 낙뢰특성 분석

3.1 낙뢰자료 수집

기상청에서 운영 중인 IMPACT ESP는 낙뢰탐지용 장비로서, 본 논문에서는 이로부터 탐지된 2010년부터 2014년까지의 낙뢰자료를 기상청 국가기후데이터센터의 도움을 받아 기상레이더 센터에서 ASC자료를 제공받고 활용하였다. 제주지역의 낙뢰발생 특성을 파악하고자 위, 경도는 북위 33°06' ~ 33°36', 동경 126°06' ~ 127°00'의 범위에 속하는 낙뢰 데이터를 분석하였다. 이 장비는 백령도, 인천, 동해, 추풍령, 광주, 진주, 서귀포 등 전국 7개소에 설치되어 있다. IMPACT ESP의 외관과 특성은 그림 8과 같다.

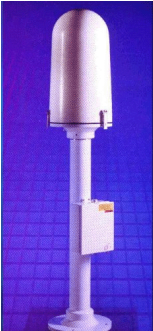
	제작회사	미국 GAI
	낙뢰 탐지 방식	MDF + TOA
	수신주파수 대역	LF/VLF
	감지효율	90%이상
	감지범위	250km 이내, 0.5km
	시간 동기화	GPS 부착
	탐측 종류	cloud - ground flash Return Stroke

그림 8 IMPACT ESP 외관 및 특성

그림 8에서 MDF와 TOA는 각각 방향탐지방식(Magnetic Direction Finding)과 도달 시간차 방식(Time Of Arrival)의 약자이다. 2개 이상의 감지기를 50~300 km 간격으로 배치하여 낙뢰의 주 방전에 의해 생성된 전자파를 감지하여 측정하고 각 수신기에서 서로 다른 시간에 수신하여 신호가 수신기에 도착하는 시간을 GPS 신호에 동기화시켜 감지하는 방식이다. Low

Frequency와 Very Low Frequency의 주파수를 수신하며 대지 방전의 복귀너격을 탐지하는 방식으로 낙뢰를 탐측한다. 여기서 복귀너격은 선도너격이 지면과 만나는 시점에 구름을 향해 상승하는 밝고 빠른 방전을 의미한다[6].

3.2 낙뢰발생 빈도 분석

제주도는 한반도의 남쪽에 위치한 사면이 바다로 둘러싸인 섬으로써 한라산이 원추형의 지형을 이루고 있어 고도에 따라 현저하게 다른 기후대가 형성되는 기상학적 특징을 가지고 있다. 표 2 는 2010년 ~ 2014년간 발생한 제주지역 낙뢰의 월별, 극성별 횟수 및 비율을 나타낸다. 5년간 총 43,174번 낙뢰가 발생하였고, 정극성 및 부극성 낙뢰가 각각 20% 와 80%였다. 전반적으로 낙뢰발생 빈도는 7월, 8월, 9월경에 집중적으로 나타났다. 주로 8월과 9월 경이 정극성보다는 부극성 비율이 높게 나타났다.

표 2 월별, 극성별 낙뢰의 발생횟수 및 발생비율

월	정극성		부극성		총횟수	비율(%)
	횟수	비율(%)	횟수	비율(%)		
1	1	0.0%	15	0.0%	16.0	0.0%
2	55	0.6%	87	0.3%	142.0	0.3%
3	342	4.0%	511	1.5%	853.0	2.0%
4	202	2.3%	76	0.2%	278.0	0.6%
5	238	2.7%	44	0.1%	282.0	0.7%
6	733	8.5%	1361	3.9%	2094.0	4.9%
7	2286	26.4%	7996	23.2%	10282.0	23.8%
8	1344	15.5%	6652	19.3%	7996.0	18.5%
9	3109	35.9%	17181	49.8%	20290.0	47.0%
10	114	1.3%	262	0.8%	376.0	0.9%
11	140	1.6%	253	0.7%	393.0	0.9%
12	92	1.1%	80	0.2%	172.0	0.4%

그림 9는 제주지역의 시간에 따른 낙뢰발생 횟수를 보여준다. 해에 따라 발생한 낙뢰횟수는 차이가 크지만, 그 경향은 비슷함을 알 수 있다. 특히 2011년 시간대별 낙뢰발생횟수가 나머지 년도와 다르게 19시 ~ 02시까지 많이 발생한 것을 볼 수 있다. 주로 새벽시간과 오전에 낙뢰 발생빈도가 높다는 것을 알 수 있다.

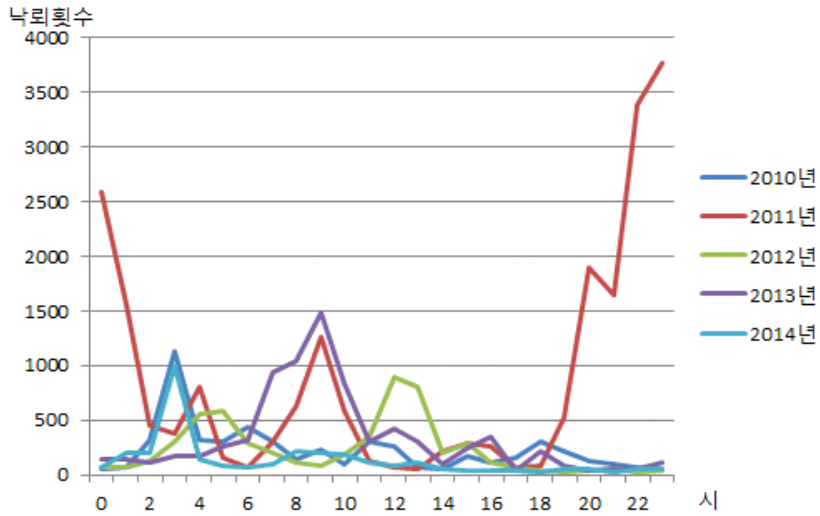


그림 9 시간에 따른 낙뢰발생 횟수

그림 10은 제주지역의 월별 낙뢰발생 횟수를 보여준다. 특히 7월부터 9월까지 낙뢰발생 빈도가 많이 발생하고 나머지 월은 낙뢰발생 빈도가 적음을 알 수 있다. 7월부터 9월까지 낙뢰빈도가 많은 이유는 6월 중순부터 장마전선이 활동하면서 전선낙뢰가 증가하고, 북태평양고기압이 확장하면서 기단낙뢰가 증가하기 때문으로 사료된다.

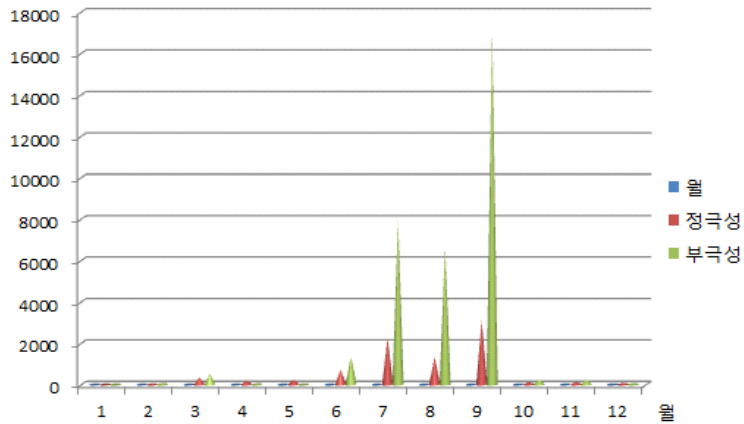


그림 10 월별 낙뢰발생 횟수

3.3 낙뢰발생 강도 분석

제주지역의 낙뢰강도 특성을 파악하기 위하여 표 3 과 같이 강도를 ± 15 등급으로 나누어 분석하였고 낙뢰강도의 단위는 kA이다. ‘+’는 정극성, ‘-’는 부극성이다. 여기서 정극성은 구름 밑면이 +이고 대지가 -일 때의 낙뢰이며 반대의 경우는 부극성이라 한다. 등급의 절대값 숫자가 0에 가까울수록 약한 낙뢰로 분류된다.

표 3 낙뢰강도 등급

등급	낙뢰강도(kA)	등급	낙뢰강도(kA)
0	-1.6~1.6	0	-1.6~1.6
1	1.6~2.5	-1	-2.5~-1.6
2	2.5~4.0	-2	-4.0~-2.5
3	4.0~6.3	-3	-6.3~-4.0
4	6.3~10.0	-4	-10.0~-6.3
5	10.0~15.8	-5	-15.8~-10.0
6	15.8~25.0	-6	-25.0~-15.8
7	25.0~39.8	-7	-39.8~-25.0
8	39.8~63.1	-8	-63.1~-39.8
9	63.1~100.0	-9	-100.0~-63.1
10	100.0~158.5	-10	-158.5~-100.0
11	158.5~251.2	-11	-251.2~-158.5
12	251.2~398.1	-12	-398.1~-251.2
13	398.1~630.9	-13	-630.9~-398.1
14	630.9~1000.0	-14	-1000.0~-630.9
15	1000.0이상	-15	-1000.0이하

표 4 는 5년간 계절별 낙뢰강도 등급 분포를 조사하였다. 5년간 -12등급이하, +12등급 이상, 0등급과 -1등급은 없었다. 부극성은 -4등급 ~ -7등급에 69%를 분포하였고 정극성은 2등급 ~ 6등급에 18.6%가 분포하였다.

표 4 계절별 낙뢰강도 등급 분포

등급	봄	여름	가을	겨울	계
-15	0	0	0	0	0
-14	0	0	0	0	0
-13	0	0	0	0	0
-12	0	0	0	0	0
-11	0	1	0	0	1
-10	1	35	9	0	45
-9	0	236	105	2	343
-8	13	890	624	8	1535
-7	49	2488	2265	22	4824
-6	146	4646	4055	32	8879
-5	214	4193	4636	52	9095
-4	147	2290	4437	41	6915
-3	61	1176	1553	23	2813
-2	0	54	12	2	68
-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	0	3
2	9	840	523	4	1376
3	10	835	1207	13	2065
4	87	474	656	13	1230
5	474	1346	597	29	2446
6	126	526	240	19	911
7	32	202	82	25	341
8	28	89	40	22	179
9	13	40	15	17	85
10	3	10	0	5	18
11	0	0	1	1	2
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0

그림 11은 5년간 년도별 낙뢰강도의 빈도를 조사하였다. 2011년에 낙뢰발생 횟수가 21,169회로 나머지 다른 년도 보다는 발생횟수가 많을 것을 알 수 있다. 2011년에는 다른 년도보다 여름철에 전선낙뢰 및 기단낙뢰가 많이 발생하였다. 그러나 해에 따라 발생한 등급별 낙뢰 빈도를 보면, 그 경향이 비교적 일정함을 알 수 있다.

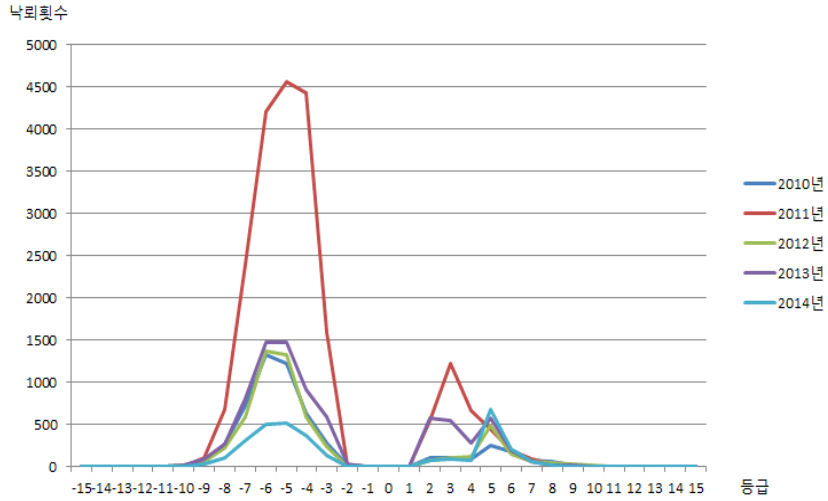


그림 11 연별, 등급별 낙뢰발생 횟수

3.4 지역별 낙뢰분포

그림 12는 최근 5년간 제주도의 지역별 낙뢰강도를 나타냈다. 그림 12를 보면 제주도 중산간 지역과 제주도 동부지역이 서부지역보다 낙뢰강도가 강하게 나타났고 제주도 해상에서는 제주도 남서쪽 해상(마라도 주변지역)에 낙뢰강도가 강하게 나타났다.

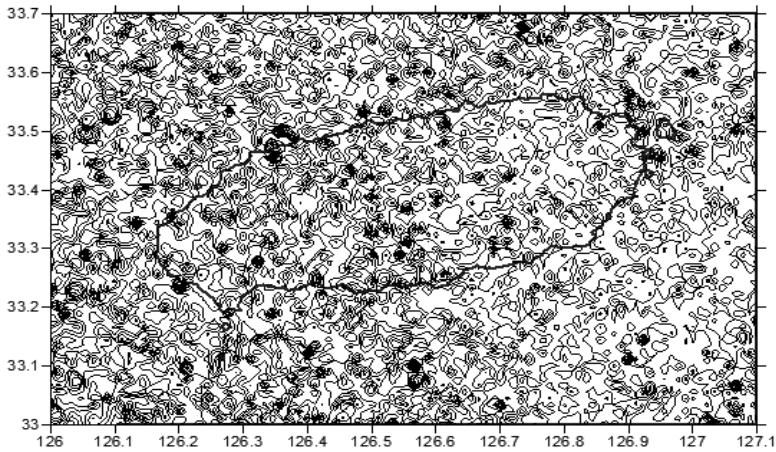


그림 12 5년간(2010~2014) 제주도 지역별 낙뢰강도

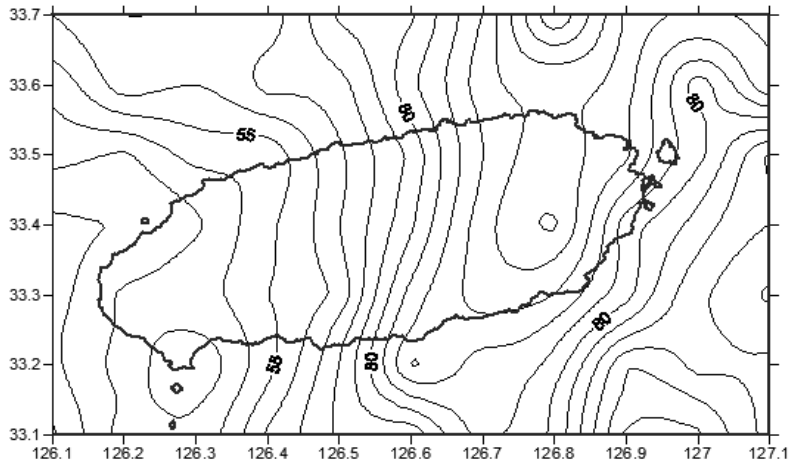


그림 13 5년간(2010~2014) 낙뢰일수

제주도의 지역별 낙뢰일수 분포를 그림 13에 나타냈다. 제주도 육상인 동부 지역과 중산간 지역에 많은 낙뢰 일수를 보여주고 있으나, 제주도 해상에서는 제주도 서쪽보다는 동쪽해상 중심으로 낙뢰 일수가 많음을 알 수 있다.

그림 14는 최근 5년 동안 제주도의 지역별 낙뢰횟수 분포를 나타냈다. 제주

도 육상에서는 동부지역이 서쪽지역보다 약 2배 정도의 낙뢰횟수가 많았으나 제주도 해상에서는 약 2배 ~ 4배 정도 더 많음을 알 수 있다. 그 이유는 제주도 동부지역에 넓게 분포한 크고 작은 110여개의 오름에 근거하고 있다. 동부지역은 많은 오름이 분포하는 복잡지형을 형성하고 있어 낮 동안에 부분적으로 강한 일사를 받아 지면부근의 습한 공기가 가열되어 오름을 따라 상승하면서 낙뢰발생 원인이 되는 적란운을 보다 쉽게 형성하기 때문으로 사료된다. 제주도 육·해상에서 낙뢰가 많은 지역은 동부지역으로 분포됨에 따라 앞으로 육·해상 풍력발전단지를 조성할 때, 낙뢰피해 대책을 강구하여야 할 것으로 사료된다.

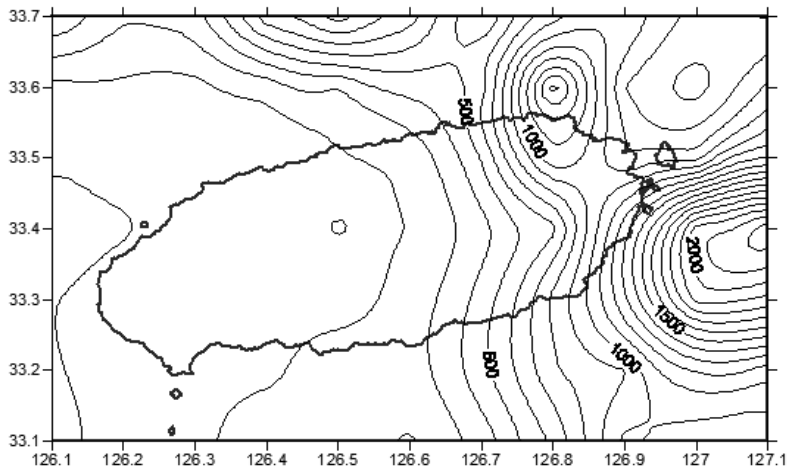


그림 14 5년간(2010~2014) 낙뢰횟수

그림 15는 제주도의 지역별 ± 8 등급 이상인 낙뢰의 분포를 나타냈다. 낙뢰등급의 절대값이 클수록 풍력발전기에 대한 피해가 크게 나타나는 등급으로 표시하였다. 이 그림에서 부극성 낙뢰 1,924개이고 정극성 낙뢰는 284개로 총 2,208개의 낙뢰 자료가 포함되어 있다. 제주도 동부지역으로 육상보다 해상을 중심으로 밀집하게 분포하고 있음을 나타냈다. 또한 중산간 지역보다는 동부 해안가를 중심으로 많이 분포됨에 따라 제주도 연근해 해상 풍력발전단지를 조성할 경우에도 강도가 센 낙뢰에 대한 대책이 강구된 기종을 선정하여야 할 것이다.

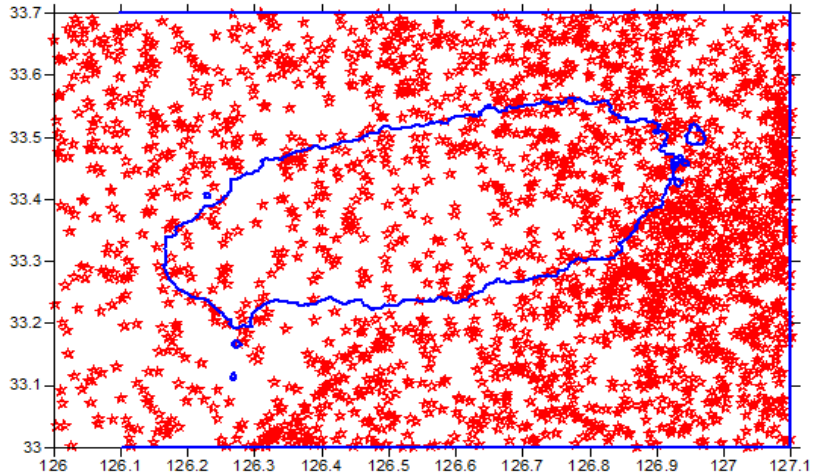


그림 15 5년간(2010~2014) ± 8 등급 이상인 낙뢰분포

최종적으로 제주지역의 낙뢰특성을 요약하면 다음과 같다.

- ① 낙뢰는 7~9월에 부극성 낙뢰가 많이 발생하고 낙뢰강도는 매년 비슷한 추세로 -4등급~-7등급사이에 많이 발생하였다.
- ② 중산간 지역과 동부지역이 서부지역보다 낙뢰강도가 강하게 나타났고, 해상에 서는 남서쪽 해상(마라도 주변지역)에 강한 낙뢰가 나타났다.
- ③ 육상과 해상을 구분하여 ± 8 등급 이상의 낙뢰분포를 살펴보면 해상이 육상보다 등급 값이 더 큰 낙뢰가 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 해안지방에 비교적 강도가 큰 낙뢰가 발생한 반면 중산간 지역은 ± 10 등급 이상의 낙뢰는 거의 발생하지 않았다. 제주도에 조성되는 풍력발전단지의 건설후보지는 주로 해안가에 위치하므로 강도가 센 낙뢰에 대한 대책이 강구된 기종을 선택하여야 한다.
- ④ 제주도의 동부지역이 서부지역보다 낙뢰횟수가 약 2~4배 정도 더 많다. 다시 서부지역을 남부와 북부로 나누어 빈도수를 비교해 보면 북부지역이 남부지역보다 약 2배 정도 더 많다. 즉 제주도에서 낙뢰빈도가 높은 지역은 동부지역 및 서부 북부지역으로 추후 이 지역에서 풍력발전 시스템을 계획하는 경우 낙뢰에 대한 대책을 추진하고 강도가 센 낙뢰에 대한 기종선택 및 등전위 시스템이 필요하다.

IV. 풍력발전단지 접지사례 분석

4.1 제주지역 발전단지의 접지 사례

1) 개별접지 사례

제주지역에 기존에 설치된 일부 대규모 풍력발전단지의 경우 개별 풍력발전기 마다 개별 등전위본당을 기본으로 한 독립접지로 구성되어 있다. 즉 이는 설치 시점이 각각 다르고 기종이 다양하다는 제약조건도 있지만 설계단계에서부터 풍력발전단지의 등전위 접지는 고려대상이 아니고 독립접지만을 하도록 설계되고 있다.

가) A 풍력발전단지

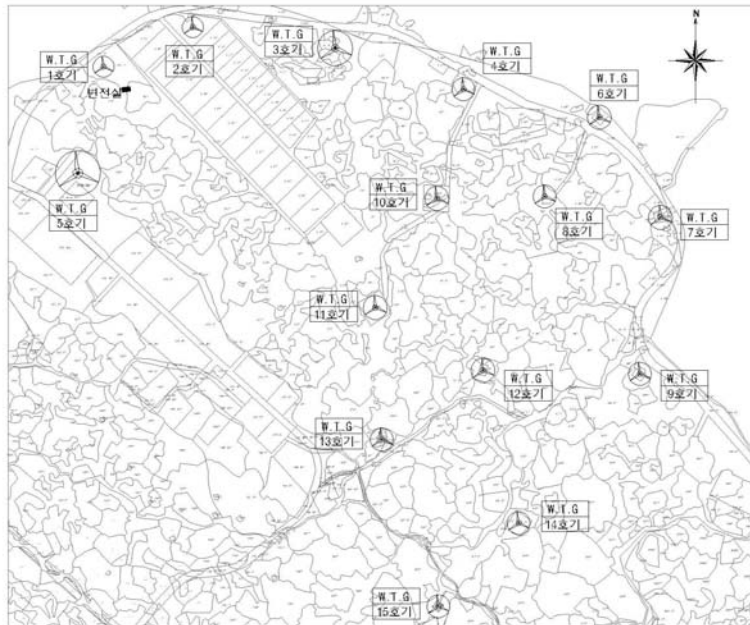


그림 16 A 풍력발전단지 풍력발전기 배치도

그림 16은 제주지역 동부에 위치한 A 풍력발전단지의 배치를 보여주고 있다. A 풍력발전단지는 2.0 MW × 1기, 1.65 MW × 1기, 1.5 MW × 1기, 0.75 MW × 4기, 0.66 MW × 5기 등으로 구성되고 설비용량은 총 11.45 MW이다. 한전 측 전력연계는 전주를 이용한 가공설비로 한전 S/S와 연계되어 있다. 여기에서 단지내의 전력 및 제어용 케이블은 CN/CV 특고압 케이블 및 광 케이블을 사용하고 있으며, 풍력발전기 사이의 접지선은 시설되어 있지 않았다. 접지는 개별 접지를 시행함으로써 주변의 풍력발전기와는 별개로 자체 접지 시스템을 유지하고 있으며 해당 발전기 내의 모든 접지 전극과 전기적으로 상호 연결되어 있는 금속 구조물과 접지도체를 등전위 부스바(EBB)에 연결하여 개별 통합접지 및 개별 등전위본딩을 유지하고 있다. 대부분 풍력발전기의 낙뢰보호시스템은 리셉터가 설치된 3개의 Rotor Blade, 나셀커버의 끝단 및 풍향계 덮개에 설치된 5개의 돌침 피뢰침에 의존하고 있다. 즉 풍력 발전기 마다 발전기 제작회사가 설치하는 피뢰침 이외에 별도의 대책은 없는 것으로 조사되었다.

나) B 풍력발전단지

그림 17은 제주지역 동부에 위치한 B 풍력발전단지의 배치를 보여주고 있다. B 풍력발전단지는 2.0 MW × 10기 등으로 구성되고 설비용량은 총 20 MW이다. 한전 측 전력연계는 지중케이블을 이용하여 지중 M/H로 한전 S/S와 연계되어 있다. 여기에서 전력 및 제어용 케이블은 CN/CV 특고압 케이블 및 광 케이블을 사용하고 있고, 풍력발전기 사이의 연접 접지선은 시설되어 있지 않았다. 이 지역은 낙뢰 다발지역 임에도 불구하고 접지는 개별 접지를 시행함으로써 주변의 풍력발전기와는 별개로 자체 접지 시스템을 유지하고 있다. 또한 해당 발전기 내 금속 구조물과 접지도체를 등전위 부스바(EBB)에 연결하여 개별 통합접지 및 등전위본딩을 유지하고 있다. 즉 풍력 발전기 마다 발

전기 제작회사가 설치하는 피뢰침 이외에 별도의 대책은 없는 것으로 조사되었다.

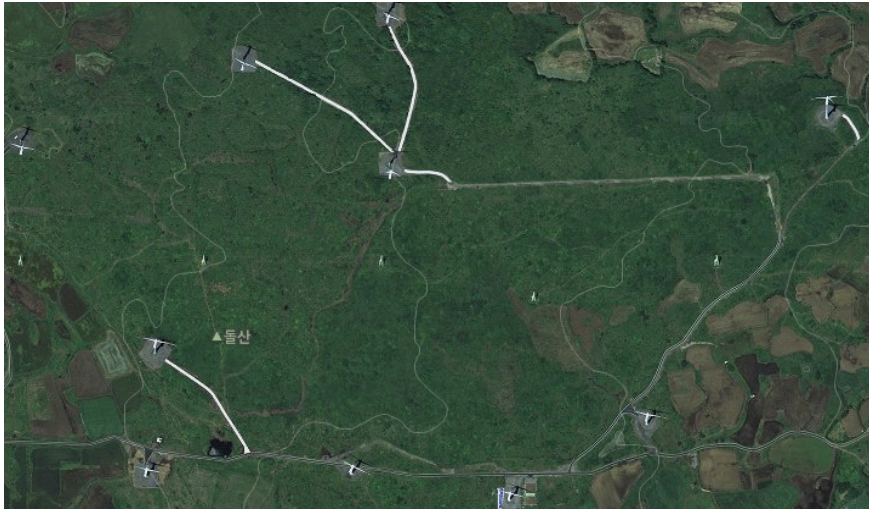


그림 17 B 풍력발전단지 풍력발전기 배치도

다) C 풍력발전단지

그림 18은 제주 서부지역에 위치한 C 풍력발전단지의 배치를 보여주고 있다. C 풍력발전단지는 3.0 MW × 5기, 1.5 MW × 4기 등으로 구성되고 설비용량은 총 21 MW이다. 한전 측 전력연계는 전주를 이용한 가공설비로 한전 S/S와 연계되어 있다. 여기에서도 전력 및 제어용 케이블은 CN/CV 특고압 케이블 및 광 케이블을 사용하고 있고, 풍력발전기 사이의 연접 접지선은 시설되어 있지 않았다. 이 지역은 제주도 전체적으로 볼 때 낙뢰에 대하여 나름대로 안전지대에 속하지만 접지는 개별 접지를 시행함으로써 주변의 풍력발전기와는 별개로 자체 접지 시스템을 유지하고 있으며 해당 발전기 내 금속 구조물과 접지도체를 등전위 부스바(EBB)에 연결하여 개별 통합접지 및 등전위본딩을 유지하고 있다. 즉 C 풍력발전단지의 풍력 발전기 마다 발전기 제작회사가 제공하는 피뢰침 이외에 별도의 대책은 없는 것으로 조사되었다.



그림 18 C 풍력발전단지 풍력발전기 배치도

2) 등전위접지 사례

등전위 접지를 시공하지 않은 풍력발전단지가 있는 반면 어떤 풍력발전단지는 등전위접지 시공을 시행한 발전단지도 있는 것으로 조사되었다.

가) D 풍력발전단지

그림 19와 같이 제주지역 동부에 위치한 어떤 풍력발전단지는 등전위접지 시공을 시행한 발전단지도 있었다. D 풍력발전단지는 1.5 MW × 7기, 0.75 MW × 6기 등으로 구성되고 총 설비용량은 15 MW 이다. 여기에서 전력 및 제어용 케이블은 CN/CV 특고압 케이블 및 광 케이블을 사용하고 있으며, 풍력발전기 사이의 접지선은 GV 및 BC 95 SQ를 사용하고 있다.



그림 19 D 풍력발전단지 풍력발전기 배치도

이는 시행사들이 풍력발전단지 시공 시 접지검토를 하면서 등전위 접지를 시행한 것으로 보인다. 기존 풍력발전기 마다 통합접지 및 등전위분당은 되어 있지만 개별접지로 되어 있기 때문에 이를 등전위접지로 확대한 것으로 판단된다. 따라서 등전위 접지를 시공하여 접지선의 전위가 상승하여도 상대적 전위차는 낮은 값을 유지하도록 하여야 한다.

나) E 풍력발전단지

최근 제주지역 동부지방에 건설되고 있는 E 풍력발전단지는 풍력발전기 개소마다 개별접지로 설계되었으나 발주자들이 접지 검토를 하면서 등전위 접지를 시행하고 있다. 그림 20과 같이 E 풍력발전단지는 2.0 MW × 15기 등으로 구성되고 총 설비용량은 30 MW 이다. 발전군 별로 접속되는 전력 및 제어용 케이블은 CN/CV 특고압 케이블 및 광 케이블을 사용하고 있으며, 풍력발전기 사이의 접지선은 GV 및 BC 95 SQ를 사용하고 있다.

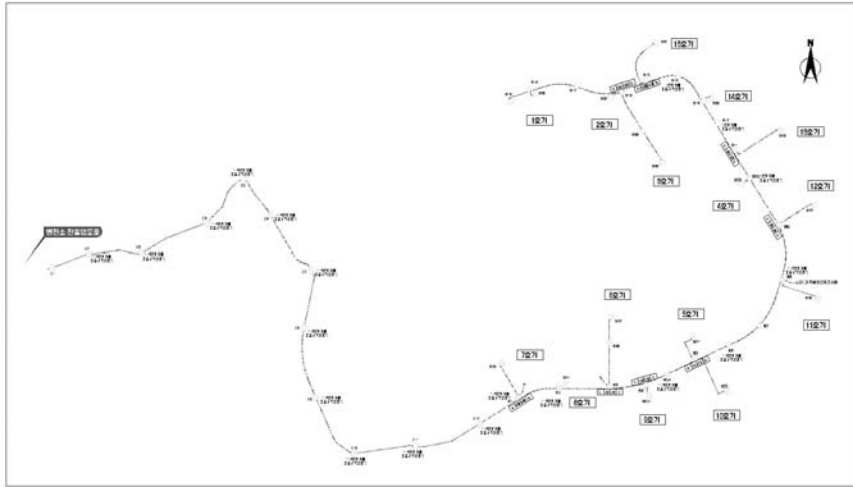


그림 20 E 풍력발전단지 풍력발전기 배치도

이는 발주자들이 풍력발전단지 시공 시 접지검토를 하면서 등전위 접지를 시행한 것으로 보인다. 기존 풍력발전기 마다 통합접지 및 등전위본당은 되어 있지만 개별접지로 되어 있기 때문에 이를 등전위접지로 확대한 것으로 판단된다. 따라서 등전위 접지를 시공하여 접지선의 전위가 상승하여도 상대적 전위차는 낮은 값을 유지하도록 하여야 한다.

4.2 등전위접지 시공

풍력발전단지의 등전위 접지화는 직격뢰 및 유도뢰에 대하여 넓은 범위의 풍력설비 등전위화를 이루어 전위차에 따른 여러 트러블을 많이 줄여줄 것이라고 판단된다. 풍력발전설비는 풍향이 좋은 산악지대 및 해안가에 설치하는 경우가 많으며, 이 경우 대지고유 저항치는 높아진다. 발전설비의 접지저항 값으로는 수 오름 정도를 요구하는 경우가 많다. 아울러 낮은 접지저항 값을 얻는 것은 어려우며 매설지선, 링 접지, 심타 전극 등의 각종 보조전극을 이용하여 정상 접지저항 값을 낮추어야 한다. 이에 따라 공사비는 증가하고 공

기는 늘어나게 된다. 또한 경년 경과 및 부식에 따른 접지값의 증가에도 대응하여야 한다. 풍력발전기 기초를 링 접지 극으로 보고 사용하는 것도 권장한다.

통합 접지에 의한 등전위화를 실행함으로써 전위차에 따른 뇌격전류를 감소시킬 수 있다. 풍력발전기의 접지시스템은 전원용 접지의 목적 뿐 아니라 피뢰용 접지의 목적을 달성할 수 있도록 하나의 시스템으로 구성하는 것이 바람직하다. 더욱이 대규모 기초구조물의 금속부분을 이용하는 것은 매우 낮은 접지 저항치를 얻을 수 있으므로 기초구조물의 금속부분을 접지 시스템으로 구성하는 것이 바람직하다[17].

IEC 61400-24에서는 복수의 풍력터빈을 동시에 운영하는 풍력발전단지에서는 그림 21과 같이 풍력발전기 사이의 등전위 접지를 권장하고 있다. 등전위 접지에 의해 큰 접지 극이 형성되기 때문에 풍력단지의 대지저항율이 높거나 개별 풍력발전기의 접지저항이 높은 경우에도 풍력발전단지로서는 낮은 접지 저항 값을 쉽게 얻을 수 있는 것이 이점이다.

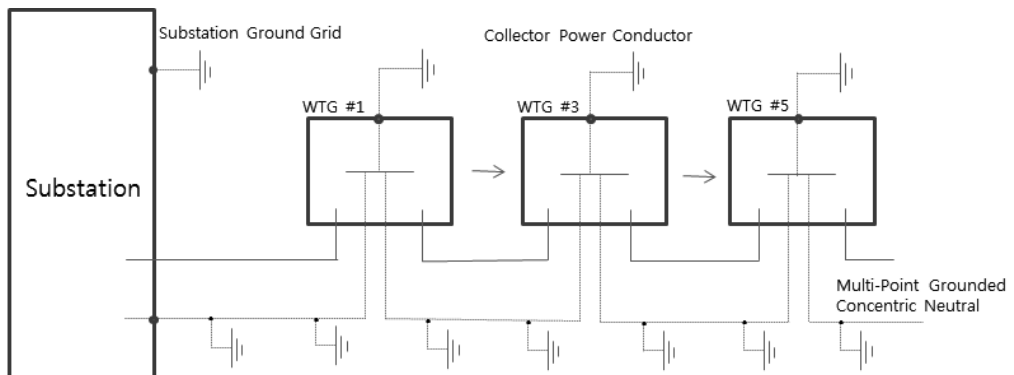


그림 21 풍력발전단지의 등전위 접지 방법

일반적으로 풍력발전설비에 사용하는 망상 접지설비를 예로 들어 접지 저항치를 계산을 해보면

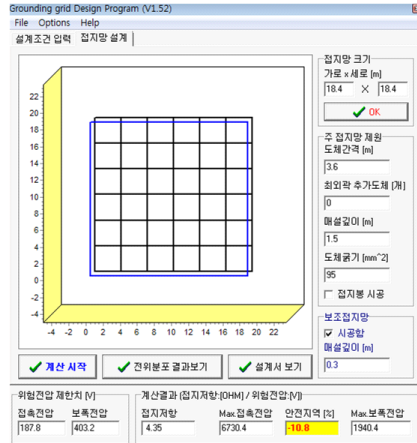


그림 22 접지 계산프로그램

조건: 대지고유저항 토양 200 [Ω -m] , 자갈층 500 [Ω -m] , 접지선 BC 95 SQ,

접지망 크기 18.4 m×18.4 m, 도체간격 3.6 m, 매설깊이 1.5 m

접지계산 프로그램(Grounding Grid Design Program)을 사용하여 계산하면 그림 22와 같이 접지저항은 4.35 Ω 이 도출된다.

이를 연결하는 5기의 풍력발전기를 예를 들어 병렬회로로 계산하면 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{\sum \frac{1}{Rn}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{4.35}\right) \times 5} = 0.87 \Omega$$

등전위 공통 접지를 실시하는 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 낙뢰 시 과도 임피던스 특성이 좋아 전위상승이 낮아진다.
- ② 유도뢰, 직격뢰 피습 시 전위상승이 낮아 서지와 노이즈의 근본을 제거할 수 있다.
- ③ 통신선과 강전선도 완벽히 등전위 접지시키면 접지로 인한 트러블이 발생하지 않는다.(예. 항공기, 서울-부산 간 KTX, NFPA780기준, IEC규정)

대피 대책에서 가장 중요한 점은 한정된 시설 내에서 전위차에 따른 기기 장애를 발생시키지 않도록 그림 21과 같이 등전위 접지를 시공하는 것이다. 접지설비에서 많이 볼 수 있는 방법은 접지 극에서 접지모선을 길게 부설하여 그 접지모선에서 각 기기의 접지를 연결하는 것이다. 이들은 교류적으로는 등전위이며, 등전위화를 구성하고 있다. 그러나 상당히 시간이 빠른 뇌현상의 경우는 교류적으로 등전위라 하더라도 통용되지 않는 측면이 있다. 교류적으로 등전위화 되더라도 뇌 서지가 침입하게 되면 전위차가 발생하여 기기내부의 전자회로간이나 도체 간의 절연을 파괴할 우려가 있다. 뇌 서지가 흐르는 루트에서는 접지선의 단면적보다도 길이를 짧게 접속하는 것이 중요하다[11].

또한 대단위 풍력단지에서 여러 개의 풍력설비를 제어하기 위해 풍력설비 간에 제어시스템이 설치된 경우 뇌격을 받은 풍력발전기와 인근의 풍력발전기 간 접지전위 상승에 의한 전위차가 발생하여 장치가 손상될 수 있기 때문에 각 풍력발전설비의 접지저항을 가능한 한 낮게 하고, 풍력발전설비 간 설치된 제어선의 인입개소에 제어회로용 서지보호 장치(SPD)를 설치할 필요가 있다.

제주지역의 개별접지 되어있는 풍력발전단지의 등전위접지 시공방법은 전원선이 가공선로로 되어있는 경우는 전주에 접지선을 부설하여 각 풍력발전기를 등전위화하고, 제주도 조례에 의한 전원선이 지중화 되어있는 풍력발전단지는 Repowering시 지중을 굴착하여 등전위화 시공을 하여야 할 것이다.

4.3 광역 피뢰침을 이용한 독립 피뢰철탑

일반적으로 동계뢰의 경우 뇌운이 바람을 타고 이동할 때 그림 23과 같이 높은 구조물로부터 상향방전이 발생하여 뇌운과의 사이에서 방전이 일어난다.

회전구체법에 의한 광역피뢰침의 보호범위를 산정하여야 할 것이다.

일본의 경우 1997년 가을 동해(일본해) 연안의 니이가타현 산 정상에 120 m 간격으로 설치한 나다치 풍력발전기 2기(최대 지상고 51.5 m)가 건설되었으나 다음해 봄부터 다수의 낙뢰를 맞아서 풍차날개가 손절, 컴퓨터 제어서립 소손 등 중대한 사고사 발생하였다. 1998년 풍차 중간에 피뢰철탄을 세우고 상부에 전자식(광역)피뢰침을 설치하여 그 후 풍차 본체의 사고는 전혀 없고 풍차의 가동율은 개선되었다고 한다[10].

제주의 기후상황도 일본과 비슷하기 때문에 피뢰철탄의 설치를 검토하여야 한다. 풍력단지 계획 시 1~2기 설치되는 기상탑을 풍력발전단지 완공 시 철거하지 말고 기상탑에 광역피뢰침을 설치하여 피뢰철탄으로 대응하는 대책마련이 필요하다.

V. 결 론

본 논문에서는 제주지역의 낙뢰특성과 풍력발전단지의 접지사례를 조사 분석하였다. 풍부한 자연의 혜택으로 풍황이 좋은 제주도가 풍력발전의 메카가 되고 있다. 이에 따라 여러 발전주체들이 대규모 풍력발전단지를 이미 건설하였거나, 현재 건설 중에 있고 행정적으로 처리중인 곳도 여러 군데가 있다. 풍력발전단지가 대단위화 및 용량 대형화에 따라 풍력발전기 블레이드의 지상고가 높아져 낙뢰로 인한 풍력발전기의 피해가 늘어나고 있는 실정이다. 제주도 조례에 의한 풍력발전단지의 단지 내 전력관로의 지중화에 따라 풍력발전단지의 접지방식도 통합접지 및 등전위 접지로 바뀌고 있는 중이다. 최근 5년간 제주지역의 낙뢰특성과 풍력발전단지의 접지사례를 분석한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 낙뢰는 7~9월에 부극성 낙뢰가 많이 발생하고 낙뢰강도는 매년 비슷한 추세로 -4등급~-7등급사이에 많이 발생하였다. 또한 중산간 지역과 동부지역이 서부지역보다 낙뢰강도가 강하게 나타났고, 해상에서는 남서쪽 해상(마라도 주변지역)에 강한 낙뢰가 나타났다.
2. 최근 설치되는 20 MW 이상의 대규모 풍력발전단지는 통합접지에 의한 단지의 등전위접지 시공을 하고 있는 추세이다. 이는 낙뢰에 의한 대책으로 개별접지에서 등전위접지로 변화 이행되고 있는 것으로 판단된다. 앞으로 제주도의 낙뢰특성 상 제도적으로 등전위 접지를 하도록 명확하게 할 필요가 있다고 판단된다.

3. 피뢰레벨에 상응하는 뇌격전류로부터 충분한 보호효과를 얻기 위한 풍력발전기의 접지시스템은 타워기초를 활용한 통합접지시스템으로 구현해야 하고 대규모 풍력발전단지의 경우 개별 발전기 사이의 전위차가 없도록 등전위시스템을 채택하여야 한다. 즉 개별 방어가 아닌 집단 방어의 개념으로 낙뢰에 대비하여야 한다.

4. 동계뢰와 같이 뇌운의 접근방향이 한정되어 있는 경우 또는 풍력발전기 본체만을 대상으로 하는 피뢰대책이 불충분할 경우에는 풍력발전기 근처에 광역피뢰침을 탑재한 독립피뢰철탑을 설치하는 것이 효과적이다.

VI. 참고문헌

- [1] Ko Kyung-Nam, Kim Kyoung-Bo, Huh Jong-Chul, “Characteristics of Lightning Occurred over Jeju Island for 2004-2006 and an Effect of Lightning on Wind Turbine Generator System”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 28. No. 1. pp. 83~90, 2008.
- [2] Han Ji-Hoon, Ko Kyung-Nam and Huh Jong-Chul, “Lightning Characteristics and Wind Farm Evaluation of Lightning of Jeju Island for 2008-2012”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33. No. 5. 2013.
- [3] Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr/>
- [4] 김광식, 기상학사전, 향문사, 1992.
- [5] Kim Kyoung-Bo, Yang Kyung-Boo, Ko Kyung-Nam, Huh Jong-Chul, “An Analysis of Lightning Characteristics for Construction of Wind Farm, Journal of the Korean Solar Energy Society”, pp. 211~217, 2007.
- [6] 기상청, 낙뢰연보, 2005.
- [7] Korean Meteorological Society, Introduction to Atmospheric Sciences, Sigmampress, pp. 324~330, 2009.
- [8] 강성만, 풍력발전시스템의 낙뢰피해와 피뢰대책 기술. 전기설비, 한국전기공사협회, 2012.
- [9] 중앙방뢰(주), 전자 제어 피뢰침에 의한 고층빌딩의 뇌 보호, 2002.
- [10] 가토 기이치로, 최근 피뢰침에 관한 사례와 유의점, 일본 중앙방뢰(주), 1999.
- [11] 야나가와 슌이치, 피뢰설비의 접지방식, 생산과 전기, 2004.
- [12] 김동진, 문병주, 박장태, 이현화, 광역피뢰침(ESE)의 기술개발과 배경의 고찰, No.11. pp 14~17, 대한전기학회, 2004.
- [13] 낙뢰보호사양서, 행원풍력발전단지 1기 증설공사, 현대중공업, 2013.
- [14] 접지 사양서, 행원풍력발전단지 1기 증설공사, 현대중공업, 2013.
- [15] 풍력발전기 기초 및 외형도(1650KW), 행원풍력발전단지 1기 증설공사, 현대중공업, 2013

- [16] KS C IEC 62305-1,2,3,4 지식경제부 기술표준원, 2007.
- [17] Robert Hoerauf, “Considerations in Wind Farm Grounding Designs” IEEE, Trans. on Industry Applications, Vol. 50. No. 2. pp. 1348~1355, 2013.
- [18] 국가법령정보센터, <http://www.law.go.kr/>
- [19] 풍력발전설비의 낙뢰대책 제품, 산코샤

감사의 글

2년 6개월 전 산업대학원 등록을 한다고 했을 때 그 나이에 무슨 공부를 하느냐고 기술사 자격만 있으면 됐지 하며 안쓰러운 듯 바라보던 와이프도 저의 논문 통과를 함께 기뻐하며 감개가 무량한 듯합니다. 대학교를 1970년에 졸업하고 나이 70이 다 되가는 나이에 대학원에서 공부하며 어떤 한계를 느끼기도 하고 멋진 전기공학과 학우들과 함께 배운다는 것에 기쁨을 느끼기도 했습니다. 뭔가를 해보려 고는 했지만 능력이 부족한 제가 졸업이라는 큰 결실을 맺기까지 많은 도움과 격려를 주신 모든 분들께 지면을 빌어 머리 숙여 감사를 드립니다.

우선 넓은신 아량으로 학문적 지도는 물론 세심한 배려와 정성으로 만학의 꿈을 이룰 수 있도록 이끌어 주신 김세호 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 일정에도 불구하고 논문심사를 맡아주시고 입학부터 지금까지 많은 학문적 지도와 가르침을 주신 김호민 학과장님, 김호찬 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 이개명 교수님, 오성보 교수님과 전기공학과 사무실 직원들께 감사드립니다. 대학원 입학 초기에는 지식을 배우는 일과 뭔가를 해 보고자 하는 열망과 설레임을 가지고 수업에 참여했지만 시간이 지날수록 업무 핑계로 대학원 생활을 조금 소홀히 한 것 같아 아쉬움이 남습니다.

그리고 업무와 학업에 아낌없는 지원을 해 주신 대경ENG의 김대환 회장, 허경자 대표이사 또한 JPM의 유병호 회장께도 감사의 말씀을 전 합니다. 또 본 논문의 작성에 교정과 큰 도움을 준 김 경숙 과장에게도 고마움을 전 합니다.

끝으로 격려와 사랑으로 저에게 믿음과 응원을 해준 사랑하는 우리가족에게 사랑과 감사의 말을 전합니다. 아내 김정화와 함께 특히 기상청 자료를 수집하고 노심초사하며 함께 걱정해주던 우리 딸 혜경이, 믿음직한 든든함으로 격려를 해주는 우리 아들 승협, 수자 부부 그리고 장래가 기대되는 멋진 나의 손주인 혁재, 연수에게도 사랑을 전합니다. 오늘의 이 결실을 발판삼아 늦었지만 더욱 더 성장 발전할 수 있도록 노력하겠습니다.

이 논문을 아버지, 어머니, 장인, 장모님 영전에 바칩니다.

2015년 6월

좌 길 훈 올림