

内灘風力発電所における 2011 年度冬季の雷電流観測

Observation of Lightning Current at Uchinada Wind Power Station in Winter of 2011

箕輪昌幸[†], 櫻野仁志^{††}, 渡辺崇^{†††}, 窪内祥之^{††††}, 依田正之[†]

Masayuki Minowa, Hitoshi Sakurano, Takashi Watanabe, Yoshiyuki Kubouchi, Masayuki Yoda

Abstract The Uchinada Wind Power Station is located in front of a sea coast of Japan Sea. In this area, many lightning occur in winter and a lot of severe troubles have been caused by the winter lightning. So, a lightning tower was set in the Uchinada site. And lightning observation has been carried out since 2003. This paper presents mainly the observation results in the winter season in 2011.

1. はじめに

近年は、地球環境問題より風力発電設備の建設が増えている。また、風車はスケールメリットを得るために大型化が進んでいる。当然のことながら、風車の大型化とともに風車への落雷の危険率は増加し、風力発電システムの雷対策が大きな課題になっている。特にわが国では、主に日本海沿岸において、冬季雷による被害が数多く報告されており^{1)~10)}、雷対策が重要課題となっている。

内灘風力発電所は、2003 年（平成 15 年）12 月に運転を開始した。建設地は冬季雷の多い地域であるため、当初より風車への落雷防止対策として避雷塔が建設されている。また、雷電流測定装置等も同時に設置し、風力発電所への落雷観測も開始した。そして風車および避雷塔への落雷データを蓄積するとともに、被雷塔の効果等に関する検討が行われている^{11), 12)}。

本報告では、2011 年度の観測結果を報告する。

2. 内灘風力発電所の概要

内灘風力発電所は、日本海を見渡せる見晴らしの良い高台（標高 41.3m）に建設されている。図 1 および図 2 に示すように、風車は 1 機で、その風車の北西側（日本海側）に避雷塔が設置されている。風車の最高地上高さは 100.25m、被雷塔の地上高さは 104.99m である。

風車と避雷塔との距離は 45.5m である。これらを含めての風車と避雷塔の緒元を表 1 に示す。

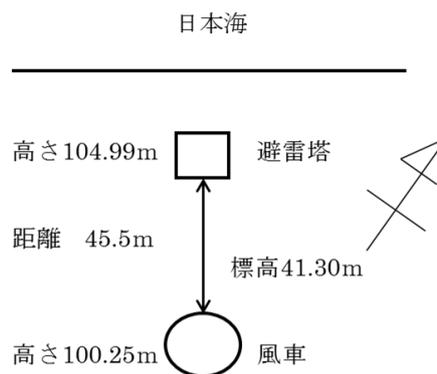


図 1 内灘風力発電所配置図



図 2 内灘風力発電所の全景

[†] 愛知工業大学 工学部 電気学科（豊田市）

^{††} カエラ研究所（高岡市）

^{†††} 内灘町 都市整備部（内灘町）

^{††††} (株)北計工業 開発センター（白山市）

表 1 風車と避雷塔の緒元

| 項目 | | 諸元 |
|--------------|-------|--------------|
| 発電所建設地点標高 | (m) | EL=41.3 |
| 年平均風速 | (m/s) | 5.2(地上高 30m) |
| 定格出力 | (kW) | 1500 |
| 定格風速 | (m/s) | 12 |
| ローター直径 | (m) | 70.5 |
| ハブ高さ | (m) | 65 |
| 風車最高地上高 | (m) | 100.25 |
| 避雷塔地上高さ | (m) | 104.99 |
| 風車から避雷塔までの距離 | (m) | 45.5 |

3. 内灘風力発電所における雷電流観測

避雷塔での電流測定では、避雷塔の各脚（合計 4 脚）にログスキーコイルを設置し、各コイルで検出されたデータをアナログ加算して避雷塔に流れる電流として記録している。風車での電流測定では、風車本体を囲むように、4 分割にした大口径ログスキーコイルを設置し、各分割部分で検出できたデータをアナログ加算して風車に流れる電流として記録している。記録できる最大電流値は、避雷塔用では±100kA、風車用では±50kA である。トリガレベルは各測定レンジの 3% である。また、最大サンプリング周波数は、避雷塔用では 4 MHz、風車用では 8MHz である。

4. 内灘風力発電所における雷電流観測の結果

4・1 落雷電流の観測結果の概要

表 2(次ページ)に 2011 年 11 月から 2012 年 3 月までに内灘風力発電所で観測された雷電流観測結果、気象データおよび落雷位置標定システム (LLS: Lightning Location System) データを示す。気温、風速、風向は内灘風力発電所からおよそ 4.1km 北西にある気象観測所「かほく」で観測されたデータである。No.1 と No.20 の落雷は波形を見ると、二つのピークがあるため、それぞれのピークに対して瞬度の数値を示してある。LLS データの距離は風車の位置から LLS が標定した落雷地点までの距離を、分別は LLS が雲放電か対地雷放電かを判定した結果を示している。LLS データが落雷を検出していない場合は No data と示した。

電流値が小さい場合ノイズ等で正確な値が求めにくいいため、今回はしきい値を±2kA としてデータ処理を実施した。そのため表 2 において、電流の大きさが 2kA 未満の場合、電気量および峻度は値を示していない。

表 2 より、電流値の大きさが 10kA を超えるものは 4 例あり、いずれも避雷塔で観測された。今回の観測において、風車で観測された、最も大きい電流値は 10kA であった。

4・2 雷撃電流波形

観測できた波形データの中から特徴ある 3 例を以下に示す。

(1) 2011 年 11 月 24 日 00 時 14 分 35 秒の電流波形

図 3 は 2011 年 11 月 24 日の 0 時 14 分 35 秒に内灘風力発電所の避雷塔で観測された雷電流波形である。表 2 の No.1 の落雷である。波形図より波形の山が 2 つ認められる。この落雷は多重雷であると考えられる。電流波形をみると、最大値は+19kA、継続時間が約 13ms であることがわかる。ゆえにこの雷は、IEC 規格が示す継続時間 2ms 以上 1s 未満の長時間雷撃に相当する。しきい値を±2kA として電気量を求めると約 39.3C である。また、この波形の第一雷撃の峻度は約 0.79kA/μs で、第二雷撃の峻度は約 0.21kA/μs となった。

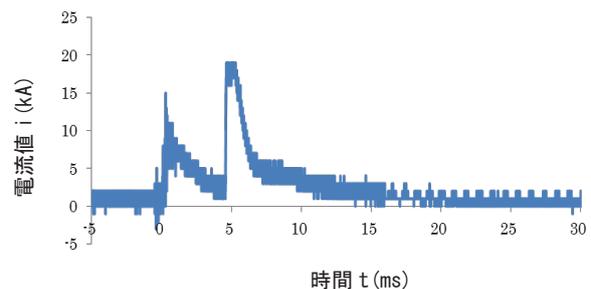


図 3 2011 年 11 月 24 日 0 時 14 分 35 秒に観測された雷電流波形（観測場所：避雷塔）

(2) 2011 年 12 月 24 日 14 時 51 分 50 秒の電流波形

図 4 は 2011 年 12 月 24 日の 14 時 51 分 50 秒に風車で観測された雷電流波形である。表 2 の No.8 の落雷である。この波形を見ると最大値は 1.5kA であった。尚、最大値がデータ処理のしきい値より小さいため、電気量と峻度は求めていない。

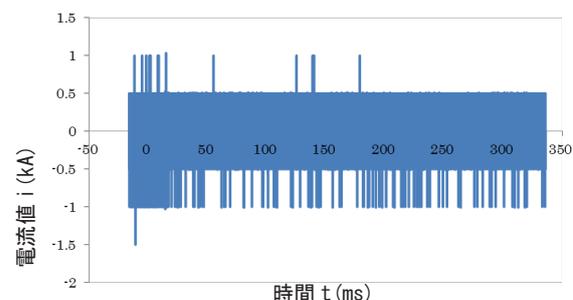


図 4 2011 年 11 月 24 日 14 時 51 分 50 秒に観測された雷電流波形（観測場所：風車）

内灘風力発電所における 2011 年度冬季の雷電流観測

表 2 2011 年度内灘風力発電所の雷観測結果と気象データ

| No. | 日時 | 測定場所 | 最大電流値[kA] | 気温 [°C] | 風速 [m/s] | 風向 | 電気量 [C] | 峻度 [kA/μs] | LLS データ | | |
|-----|----------------------|------|-------------|---------|----------|-----|-----------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|---------|
| | | | | | | | | | 電流 [kA] | 距離 [km] | 分別 |
| 1 | 11/11/24 00:14:35 | A | +19, 0 | 11.4 | 11.8 | 西 | 39.3 | 0.79 | +27 ^{注2} | 1.9 ^{注2} | CC |
| | | | | | | | | 0.21 ^{注1} | +15 ^{注2} | 7.4 ^{注2} | CC |
| 2 | 11/11/24 00:35:37 | A | +7, -10 | 11.8 | 11.4 | 西南西 | 12.0×10 ⁻³ | 16.0 | -9 | 0.3 | CC |
| 3 | 11/11/24 00:35:37 | B | +2.0, -10.0 | 11.8 | 11.4 | 西南西 | 0.38 | 1.28 | -9 | 0.3 | CC |
| 4 | 11/11/24 00:24:03 | A | +4, -4 | 11.8 | 11.4 | 西南西 | 6.75×10 ⁻³ | 0.13 | +26 | 7.8 | CG |
| 5 | 11/12/10 18:56:14 | A | +5, -3 | 5.0 | 4.8 | 南西 | 9.50×10 ⁻³ | 16.0 | +9 | 3.4 | CC |
| 6 | 11/12/22 01:08:24 | A | +7, -5 | 4.6 | 2.0 | 東 | 19.9×10 ⁻³ | 16.0 | +60 | 2.3 | CG |
| 7 | 11/12/24 14:51:50 | A | +14, -6 | 1.1 | 4.5 | 南南西 | 11.6×10 ⁻³ | 22.4 | -32 | 4.8 | CC |
| 8 | 11/12/24 14:51:50 | B | +1.0, -1.5 | 1.1 | 4.5 | 南南西 | — | — | -32 | 4.8 | CC |
| 9 | 11/12/24 15:54:16 | A | +4, -15 | 3.9 | 8.4 | 西北西 | 31.8×10 ⁻³ | 1.6 | No data | No data | No data |
| 10 | 12/01/04 01:19:53 | A | +4, -3 | 0.2 | 2.8 | 南 | 19.3×10 ⁻³ | 0.06 | No data | No data | No data |
| 11 | 12/01/04 01:20:40 | B | +1.0, -3.5 | 0.2 | 2.8 | 南 | 3.75×10 ⁻³ | 0.01 | +34 | 7.8 | CC |
| 12 | 12/01/04 01:23:46 | B | +1.0, -2.0 | 0.2 | 2.8 | 南 | — | — | -6 | 5.0 | CG |
| 13 | 12/01/25 20:51:06 | B | +1.0, -2.0 | 0.3 | 6.7 | 北 | — | — | No data | No data | No data |
| 14 | 12/01/25 23:33:45 | B | +8.0, -2.0 | -0.9 | 2.9 | 北 | 26.8 | 0.0014 | +12 | 0.5 | CG |
| 15 | 12/02/01 07:33:01 | B | +1.0, -2.5 | 0.4 | 8.7 | 南西 | 2.50×10 ⁻³ | 0.07 | No data | No data | No data |
| 16 | 12/02/01 07:36:58 | B | +1.0, -2.0 | 0.4 | 8.7 | 南西 | — | — | No data | No data | No data |
| 17 | 12/02/02 19:15:59 | B | +1.0, -3.0 | -1.7 | 6.8 | 北北西 | 23.1×10 ⁻³ | 0.16 | No data | No data | No data |
| 18 | 12/02/02 19:19:43 | A | +7, -2 | -1.7 | 6.8 | 北北西 | 88.9×10 ⁻³ | 0.62 | No data | No data | No data |
| 19 | 12/02/08 17:14:18 | B | +1.0, -1.5 | 0.4 | 9.0 | 西南西 | — | — | No data | No data | No data |
| 20 | 12/03/25 03:41:52 | A | +29, 0 | 2.9 | 10.3 | 南西 | 157 | 0.04 0.0014 ^{注1} | No data | No data | No data |

A : 避雷塔, B : 風車, CC : 雲放電, CG : 対地雷放電, 注 1 : 第二雷撃の瞬間, 注 2 : 同時刻の LLS で検知のデータ

(3) 2012 年 3 月 25 日の 3 時 41 分 52 秒の電流波形
 図 5 は 2012 年 3 月 25 日の 3 時 41 分 52 秒に避雷塔で観測された雷電流波形である。表 2 の No.20 の落雷である。この電流波形をみると、波形に 2 つのピークが認められるので、この落雷は多重雷であると考えられる。電流の最大値は +29kA、継続時間は約 40ms だとわかる。よってこの雷は IEC 規格に照らし合わせると、継続時間 2ms 以上 1s 未満の長時間雷撃でとなる。しきい値を ±2kA とし、電気を求めると 157C となる。IEC 規格に示される雷パラメータの電気の 50% 値は 80C である。したがってこの落雷は標準より電気が大きい落雷ということがわかる。峻度は第一雷撃で約 0.04kA/μs、第二雷撃で約 0.0014kA/μs と推定できた。電気量と同じように IEC 規格でしめされる雷電流瞬度パラメータ値の 50% 値は 2.4kA/μs であり、この落雷は峻度の小さい、つまり電流の立上り変化が緩やかな落雷であるといえる。

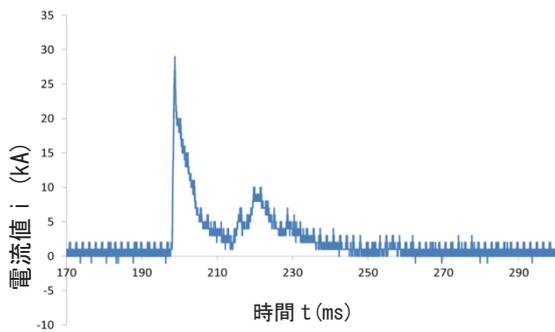


図 5 2012 年 03 月 25 日 03 時 41 分 52 秒に観測された雷電流波形 (観測場所: 避雷塔)

4・3 雷撃電流頻度分布

今回観測した結果を基に図 6 に雷撃電流頻度分布を示す。この雷撃電流頻度分布グラフより、避雷塔における累積頻度 50% の電流値は約 8kA であり、風車では約 3kA となった。風車に比べて避雷塔の電流値が高くなっており、避雷塔に電流値の大きい雷が高い頻度で落ちていることがわかる。

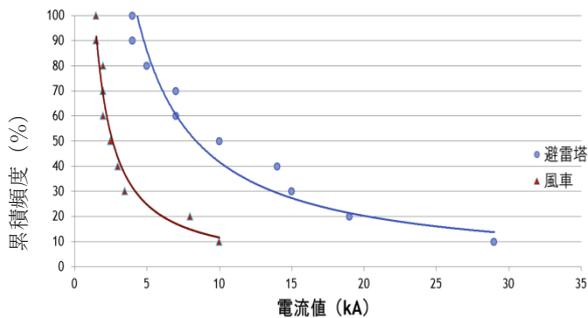


図 6 雷撃電流頻度分布

よって今回の観測では、避雷塔には電流値の大きい雷が落雷し、避雷塔による風車の保護効果が出ている、つまり避雷塔の保護効果が有効に作用しているといえる。

4・4 雷電気量頻度分布

図 7 に電気量の頻度分布を示す。このグラフでは低い累積頻度の場合では比較がしにくい。したがって、累積頻度 10% のところで比較すると、避雷塔は電気量約 157C なのに比べて風車は約 26C となっており、電気の大きい雷が避雷塔に高い頻度で落ちているといえる。よって今回の観測では、避雷塔には電気の大きい雷に対する避雷効果があるといえる。

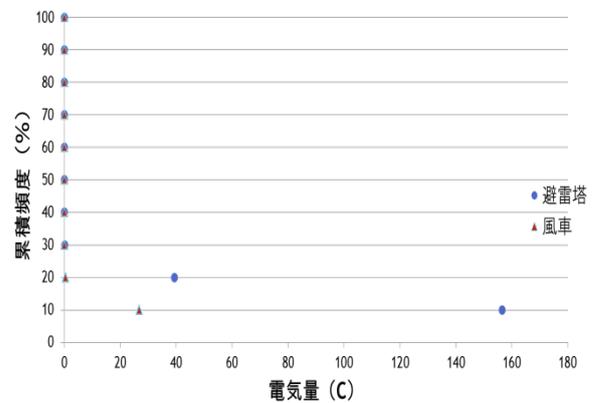


図 7 雷電気量の頻度分布

4・5 風向別落雷数

図 8 には風向別落雷数を示す。風車、避雷塔のいずれも風向が南西側のときには落雷が多い結果となった、また、風向が東側のときには落雷が少ないことがグラフからもわかる。今回、落雷記録時の風向は、大陸からの北西方向の季節風が強い時よりも西南西や南西の風向が多かった。したがって、今回は、日本海を低気圧が移動し、大気が擾乱状態にあったときの落雷が多かったと推測される。

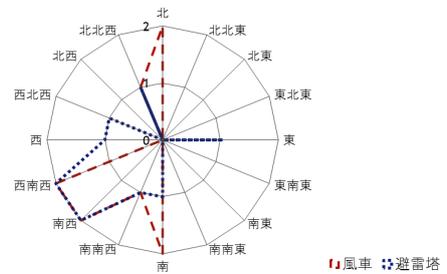


図 8 風向別落雷数 (2011 年冬季) (内灘風力への落雷)

4・6 LLSデータとの比較

風力発電所での雷電流の観測結果と雷電流を記録した時刻に対応する LLS データの状況は表 2 に示すとおりである。この LLS データは気象情報会社から入手したものである。今年度の観測では、全部で 20 例の電流測定データが得られた。そのうち 10 例は避雷塔で、残り 10 例は風車で記録された。これらの雷電流測定時刻と同時刻に LLS に記録のある電流測定データは表 2 に示すように 11 例であった。そして、この 11 例の内、LLS で落雷と認識されたのは 4 例で、その他は落雷ではなく雲放電等と認識されていた。また、表 2 に示すように電流値が +29kA の 2012 年 3 月 25 日のデータも含め、20 例の電流測定データの半分近い 9 例では、風力発電所を中心とした 10km 四方の領域に時刻対応する LLS データ記録されていない。このように、今回内灘風力発電所で観測された落雷が LLS で半分近く捕捉されていない原因としては以下のことが考えられる。

- ① 本風力発電所の風車と避雷塔の最高到達地上高さががいずれも 100m を超えている。そのため表 2 に示す雷電流観測結果の多くが、高構造物である避雷塔または風車から上向き放電で始まる落雷によるものと推測されること。
- ② 観測された電流波形の瞬度が小さく（波形変化が緩やか）、IEC 規格で示されている代表値である累積頻度 50% 値 (2.4kA/ μ s) より小さいものが多いこと。これらが波形判定に影響して、LLS での保続率が低かったのではないかと考える。

5. まとめ

最大電流値が 10kA を超えるものはすべて避雷塔で観測されており、大電流の雷撃に対して避雷塔は雷保護効果を果たしていると推察する。

2011 年度の観測で 20 例の電流データを得た。今後、引き続き観測を行い、落雷対策に資するデータを取集するとともに、蓄積されたデータをさまざまな観点から検討し、風力発電の雷害対策に役立てたいと考える。

参考文献

- 1) 風力発電設備の雷撃調査研究委員会 編:「風力発電設備の雷撃調査研究報告書」, 電気設備学会中部支部・北陸支部, 2003
- 2) 南正安, 原英喜, 箕輪昌幸, 山田琢寛:「風力発電設備の雷被害とその対策手法に関する調査」, 平成 17 年度電気設備学会全国大会 講演論文集, pp.359-360, 2005
- 3) A.Wada, S.Yokoyama, T.Numata, Y.Ishibashi, T.Hirose, “Lightning Damages of Wind Turbine Blades in Winter in Japan –Lightning Observation on the Nikaho-Kogen Wind Farm –”, Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection(ICLP), No.9a.7, pp.947-952, 2004
- 4) Masayuki Minowa, Masayasu Minami, Masayuki Yoda, “Research into Lightning Damages and Protection Systems for Wind Power Plants in Japan”, Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection(ICLP), No.XI-11, pp.1539-1544, 2006
- 5) NEDO:「平成 18 年度風力発電設備への落雷対策に関する調査」, 2007
- 6) 風力発電設備の雷害様相調査専門委員会:「風力発電設備の雷害様相ならびに対策の現状」, 電気学会技術報告第 1126 号, 電気学会, 2008
- 7) 夏野大輔, 白石浩之, 崎野博之, 延命正太郎, 古永充, 本崎晃弘, 出野勝:「次世代風力発電技術件キュ開発事業(落雷保護対策活動報告)」, 平成 22 年度第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 151-154, 2010
- 8) 延命正太郎, 夏野大輔, 古永充, 出野勝:「風力発電設備の雷害被害—特に電氣的被害について—」, 電気学会高電圧研究会, HV-10-082, 2010
- 9) 三木恵, 三木貫, 和田淳, 浅岡聡, 飛鳥幸仁, 本庄暢之:「日本海沿岸地域の冬季における風車への雷放電特性—仁賀保高原風力発電設備の 2005~2008 年度冬季雷観測結果—」, 電力中央研究所研究報告書, H09005, 2010
- 10) 本庄暢之:「風力発電設備の雷害実態と対策及び許認可対応」, 第 16 回 EMC 環境フォーラム, pp12-22, 2010
- 11) 箕輪昌幸, 櫻野仁志, 渡辺 崇, 窪内祥之, 依田正之:「内灘風力発電所における冬季雷放電の観測—2011 年度の観測結果—」, 2012 年(第 30 回)電気設備学会全国大会 B-20, 2012
- 12) M. Minowa, H. Sakurano T. Watanabe, Y. Kubouch, M. Yoda, “OBSERVATION OF LIGHTNING DISCHARGE AT UCHINADA WIND POWER STATION”, in Proc. 2012 International Conference on Grounding and Earthing, No. P3, 2012

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)