

2種類の落雷位置標定システムにより観測された雷特性の相異

新庄一雄*¹ 川村裕直*¹ 板本直樹*¹

1. まえがき

国内の電力会社では、架空送電設備の保守巡視の効率化や雷事故率予測などの耐雷設計に落雷位置標定システム(LLS: Lightning Location System)のデータを活用している¹⁾²⁾。北陸電力においては、1984年に最初のLLSが導入され、2002年10月には、既に3世代目のシステムへと更新された。この第3世代システムでは、従来システムよりも落雷の検出・標定方式が大きく改善されている。更に、捕捉性能の向上を目的とし、2004年11月からは、隣接している関西電力システムの4つのセンサーとの連携運用を行なっている。以後、便宜的に、連携後のシステムを第4世代システムと記す。

ところが、このようにシステムが次々と更新される状況であっても、LLSの標定データを真に耐雷設計に活かすには、長期間の観測・蓄積データを用いることが望ましい。それには、更新以前のシステムで観測された多くの貴重なデータをも活かすことが必須となる。しかし、新しいシステムは、古いシステムよりも性能が改善され、高機能化されており、落雷捕捉率や標定位置精度も向上していると予想される³⁾。

そこで、当社の新旧システムで観測された落雷データを基に観測データの整合性に関する評価を行なったので、以下に結果を報告する。

2. 評価システムについて

(1) システム配置と更新履歴

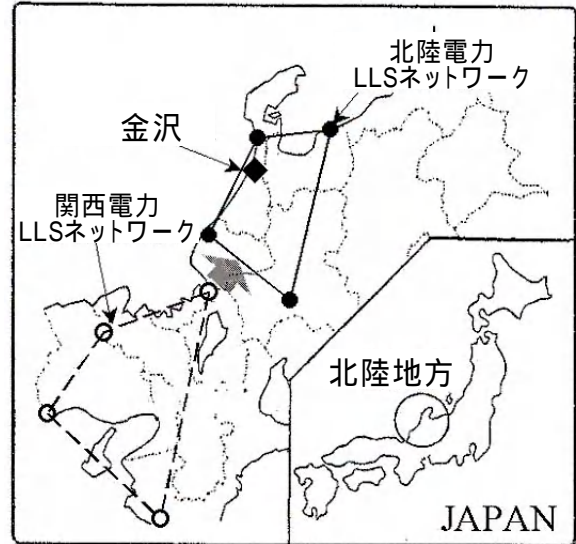
北陸電力におけるこれまでのLLS更新履歴と

第1表 北陸電力LLSの更新履歴

システム	稼働期間	センサー形式	位置標定方式
第2世代	1993年8月~2002年10月	ALDF×4局	MDF
第3世代	2002年10月~2004年11月	IMPACT×4局	MDFとTOAの コンバインド方式
第4世代	2004年11月~	IMPACT×8局 (関西電力が4局を連携)	

ALDF: Advanced Lightning Direction Finder
 IMPACT: Improved Accuracy from Combined Technique
 MDF: Magnetic Direction Finding 磁気方位探査
 TOA: Time of Arrival 到達時間差

*1 技術開発・環境保全センター 電力品質チーム



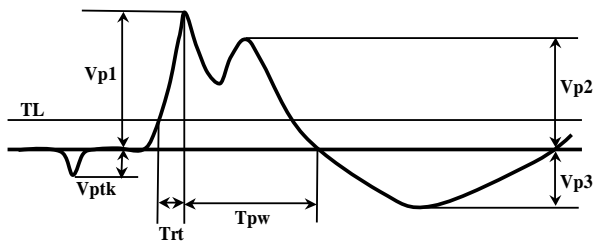
第1図 落雷位置標定システム配置

第2世代システム以降のセンサー配置を、第1表および第1図に示す。第2世代システムと第3世代システムは、ともに4つのセンサーを有し、設置位置も同じである。

(2) 雷波形識別基準

評価対象としたシステムの雷波形識別基準を、第2図、第2表に示す。雷波形識別基準とは、大地への落雷を雲内や雲間で発生する雲放電と識別し、地上設備へ影響を及ぼす落雷のみを検出する目的で設定された波形形状に関する判定基準のことである。

当社では、第3世代システムの雷波形識別基準値として、第2世代システムとほぼ同じ値を採用している。但し、第3世代システムでは、新たに大地落雷と雲放電の双方を区別した標定データを出力することが可能となった。当社の第3世代システムでは、パルス幅が4.9μs以上の場合は大地落雷、2.2~4.9μsの場合は雲放電と判定させており、大地落雷の判定に関しては、前述の通り、第2世代システムとほぼ同じ設定としている。なお、これらの設定値は、過去の雷観測結果を反映したものであるが、100%誤りの無い識別を期待できるものではない。



第2図 雷波形識別基準の略図

第2表 各システムの雷波形識別基準

パラメータ	第3世代システム	第2世代システム
	IMPACT-ESPセンサー	ALDFセンサー
受信感度	Medium	Medium
スレッシュホールドレベル (TL)	±100 mV	±100 mV
両極性判定 ($Vp3/Vp1$)	< 1.10	< 1.20
負極性プレトリガ ($Vptk/Vp1$)	< 0.25	< 0.25
正極性プレトリガ ($Vptk/Vp1$)	< 0.25	< 0.25
立ち上がり時間 (Trt)	< 30 μ s	< 30 μ s [near]
		< 40 μ s [far]
パルス幅 (Tpw)	> 2.2 μ s (4.9 μ s) *1	> 5.0 μ s
セカンドピーク ($Vp2/Vp1$)	< 1.15	< 1.25

*1 パルス幅が2.2 μ s ~ 4.9 μ s のストロークは、雲放電と見なす。

3. 新旧システムの精度評価

(1) 捕捉率

送電線事故を引き起こした落雷に対して、第2～4世代システムの捕捉率を評価した結果を、第3表に示す。

評価に用いたデータの観測期間は、第3世代システムが2002年10月～2004年8月、第4世代システムは2004年12月～2006年1月、第2世代システムは1993年11月～1996年10月である。これらの評価では、季節を夏季4月～10月、冬季11月～3月と区分し、第3世代システムに対しては、落雷と判定されたデータのみを用いた場合と雲放

電と判定されたデータも含めた全ての標定データを用いた場合に分けて評価を行なった。また、標定データの評価指標として、当該送電線が地絡事故に至ると想定される最小雷電流波高値を電圧階級毎に設定し、この条件を考慮する・しないによる差異も確認した。なお、これらの最小雷電流波高値は、国内の電力設備の耐雷評価に使用されている想定雷撃電流波高値の80%とした。

第3, 4世代システムでは、最小雷電流波高値の条件を考慮しなければ夏季、冬季ともに捕捉率が向上していると評価されるが、最小雷電流波高値を考慮すると、第2世代システムよりも捕捉率が低下したと評価されてしまう。第2世代システムの精度評価は、約9年前に行なわれたものであるが¹⁾、当時の時刻管理精度が低いことを除くと、評価条件は今回と全く同じである。捕捉率が、新しいシステムであるにもかかわらず低く評価された原因としては、第2世代システムの評価において、当時の時刻管理精度の限界により、事故が発生した時刻とLLSが標定した時刻の同一性の判定を、今回ほど厳密には行えていなかった可能性がある。仮に、捕捉率が低下した原因を時刻管理精度以外に求めるとすると、第3世代システムの雷検出性能が向上したが故に、主放電の直前に生じる微弱な電磁界パルスを標定し、主放電の標定には至らなかった可能性も考えられる。但し、この仮説の確証は、得られていない。

第4世代システムでは、広域連係前よりも全体的に捕捉率が向上しており、特に夏季雷に対する捕捉率の向上は顕著である。また、相対的に件数

第3表 送電線事故時の落雷捕捉率

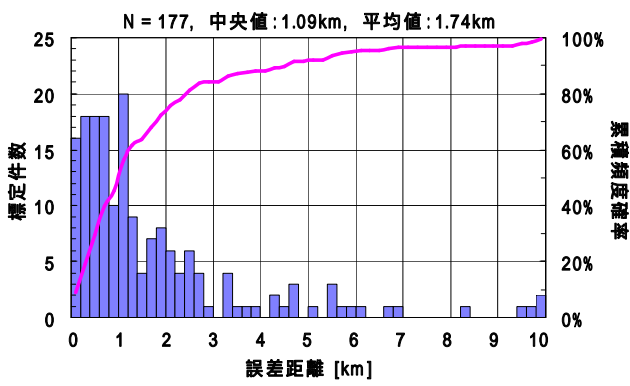
システム	第3世代				第4世代		第2世代
	大地落雷 (ストローク)		大地落雷+雲放電 (ストローク)		大地落雷+雲放電 (ストローク)		大地落雷 (フロッグ)
評価雷放電	考慮	考慮しない	考慮	考慮しない	考慮	考慮しない	考慮
最小雷電流波高値条件	考慮	考慮しない	考慮	考慮しない	考慮	考慮しない	考慮
ケース No.	I	II	III	IV	V	VI	VII
夏季	32.3%	78.1%	33.3%	83.8%	60.6%	97.1%	79.5%
	(34 / 105)	(82 / 105)	(35 / 105)	(88 / 105)	(63 / 104)	(101 / 104)	(163 / 205)
冬季	39.7%	60.3%	41.3%	73.6%	43.8%	76.7%	62.6%
	(48 / 121)	(73 / 121)	(50 / 121)	(89 / 121)	(32 / 73)	(56 / 73)	(87 / 139)
合計	36.3%	68.6%	37.6%	78.3%	53.7%	88.7%	72.7%
	(82 / 226)	(155 / 226)	(85 / 226)	(177 / 226)	(95 / 177)	(157 / 177)	(250 / 344)

カッコ内に(捕捉件数/送電線事故件数)を示す。

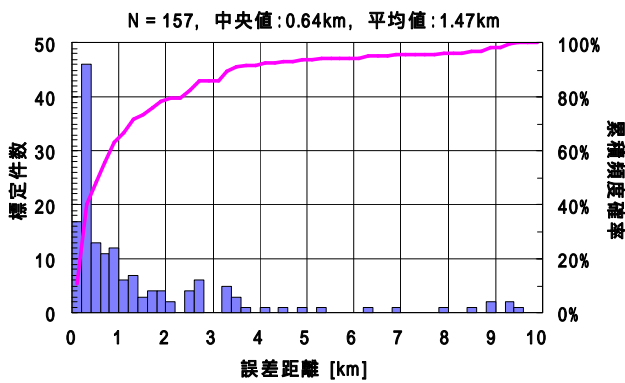
が少なく、第3表から読み取ることにはできないが、超高压送電線の事故を引き起こした落雷に対する捕捉率は、広域連係前に比べると大きく改善されていることが確認されている⁴⁾⁵⁾。このことから、LLSの標定データを送電線の雷事故巡視に活用する場合、仮に事故様相と最小雷電流波高値が合致しないデータを用いたとしても、運用に大きな問題が生じることはなく、業務の効率化が期待できる。

(2) 標定位置精度

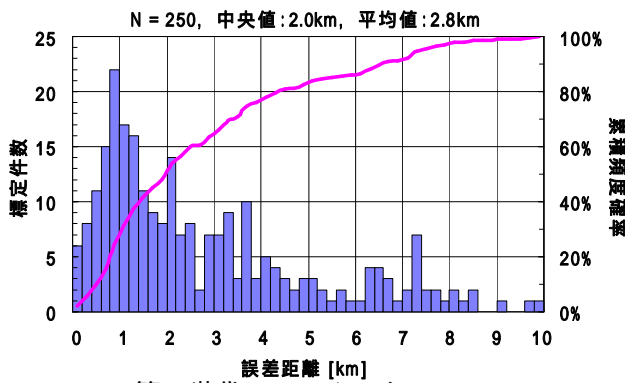
送電線事故を引き起こした落雷に対する、各システム毎の標定位置誤差の分布を、第3図に示す。



(a) 第3世代システム，ケース No.IV



(b) 第4世代システム，ケース No.VI



(c) 第2世代システム，ケース No.VII

第3図 標定位置誤差の分布

第3世代システムの評価は、第3表で示したケースNo. IVを、第4世代システムに関してはケースNo. VIを、第2世代システムに関してはケースNo. VIIのデータをそれぞれ用いた。

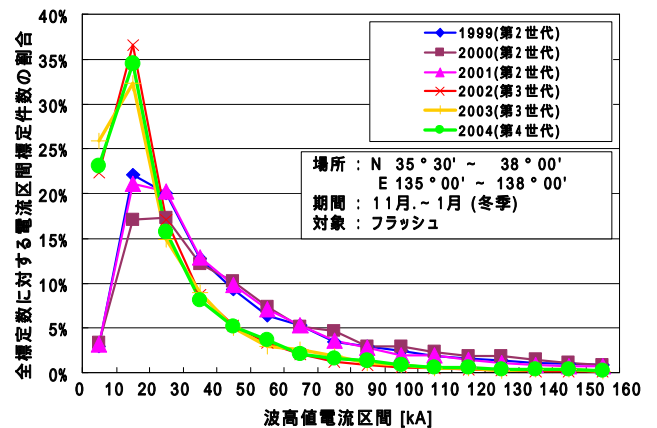
第3世代システムの誤差距離は、発生確率50%の中央値で約1.09 kmと評価された。第4世代システムでは、広域連係運用することにより、誤差距離の中央値が0.64 kmと大きく改善された。この値は、第2世代システムの誤差距離の約30%に相当する。

第3世代以降のシステムでは、磁気方位探査(MDF)と到達時間差(TOA)のコンバインド方式の採用により、標定位置精度が向上すると期待されていたが、センサー数の増加とセンサー設置域の広域化による効果も非常に大きいことが確認された。

(3) 推定電流波高値と分布

第4図に、1999年11月～2005年1月の各年度毎の冬季(11月～1月)別に、各期の全標定件数に対する各波高値電流区間に標定された件数が占める割合(以下、「占有率」と記す。)の分布を示す。第2世代システムではフラッシュデータ(多重放電を1データと扱う)しか出力できないため、評価の整合性を考慮して、第3, 4世代システムに対しては、多重雷の最初に標定された落雷のストローク(単一放電)のみの件数を用いた。

第3, 4世代システムにおいては、第2世代システムに比べて0～20kAの小電流落雷の標定件数とその占有率が大きく増加している。第4世代の広域連係システムにおいては、比較的大きな電流を伴う落雷の標定件数は増加しているが、小電流



第4図 電流区間による標定件数の割合

落雷に対する標定件数の増加に比べるとわずかである。したがって、連係前後における電流区間毎の標定件数占有率の分布には、大きな差異は見られない。

ところで、新旧システムでは、電流の算出式が、(1)式、(2)式のように異なることもあり、原理的に推定電流波高値に差異が生じていることが予想される。

第3, 4世代システム電流波高値算出式

$$I = 0.185 \times MS \times (RTF / 100)^{1.13} \quad \text{---- (1)}$$

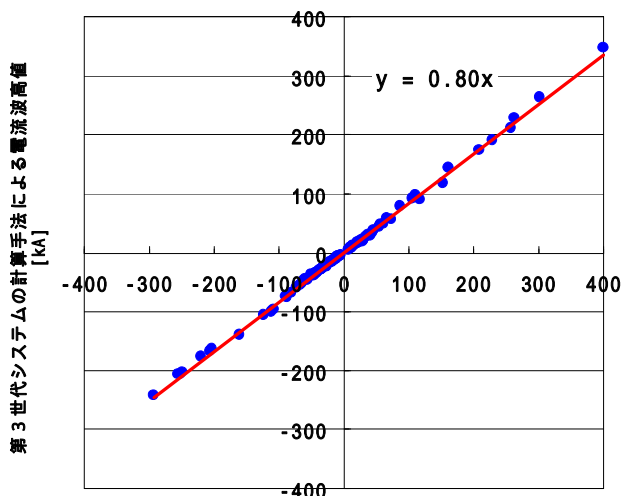
第2世代システム電流波高値算出式

$$I = RTF \times MS / 218 \quad \text{----- (2)}$$

$\left(\begin{array}{l} I : \text{推定電流波高値 [kA]} \\ MS : \text{信号強度} \\ RTF : \text{落雷からの距離 [km]} \end{array} \right)$

そこで確認のため、第3世代システムで標定された落雷の推定電流波高値と、第3世代システムのセンサーで計測された信号強度を第2世代システムの電流算出式に代入して求めた推定電流波高値の比較を行なった。結果を第5図に示す。評価に用いた落雷は、推定電流波高値、標定位置ともに広く分布する103件を選定した。評価の結果、第3世代システムの推定電流波高値は、第2世代システムの算出式を用いて求めた推定電流波高値の0.8倍となった。

更に、第2, 3世代システムと同時期に観測を実施していた他社LLSのデータおよび当社の電

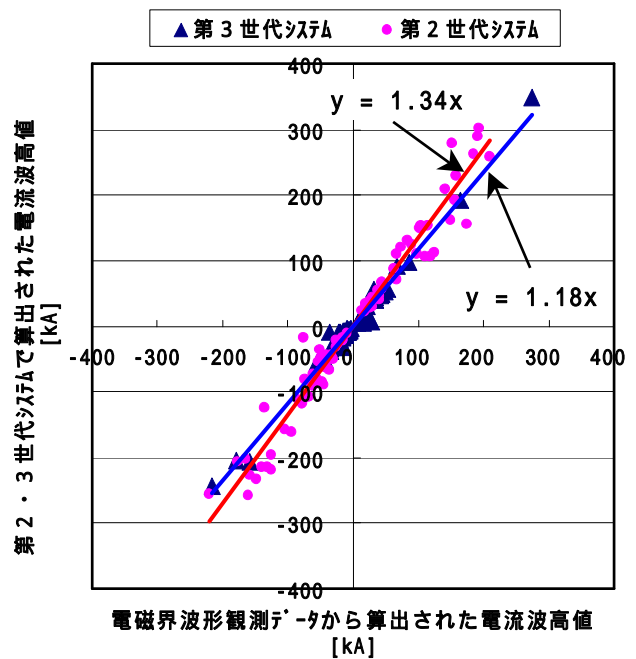


第2世代システムの計算手法による電流波高値 [kA]

第3世代システム = 0.80 × 第2世代システム

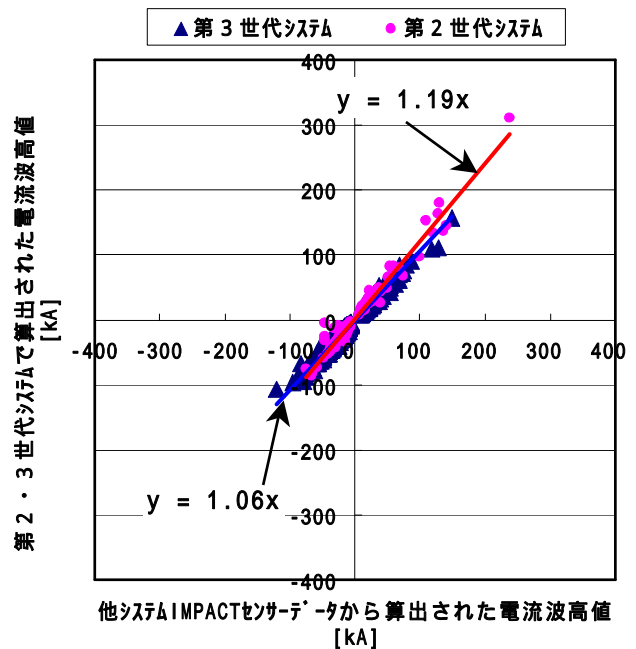
第5図 算出式による推定電流波高値の差異

磁界波形観測データを用いて、第2, 第3システム間の相対評価を行なった。他社LLSデータを用いた評価は、北陸地域に近い1つのセンサー(当社と同じIMPACTタイプ)で検出された信号強度を基準とし、同一雷に対する第2, 3世代システ



第3世代システム = 0.88 × 第2世代システム

(a) 他社LLSセンサー信号強度を用いた比較



第3世代システム = 0.89 × 第2世代システム

(b) 電磁界波形信号強度を用いた比較

第6図 他の観測データを仲介した第3, 2世代システム電流波高値の比較

ムの算出方式による推定電流波高値の比較を行なった。更に、別の方法として、磁界波形観測による落雷の信号強度と第2, 3世代システムで標定された推定電流波高値の比較も行なった。以上の比較結果を、第6図の(a), (b)に示す。その結果、2通りの比較方法ともに、第3世代システムの推定電流波高値は、第2世代システムの約0.9倍であると評価された。

以上、算出式の差異およびシステム出力データの差異の2通りの比較評価から、第3世代システムの推定電流波高値は、第2世代システムに対して、各々0.8倍、約0.9倍と異なった値が得られた。これより、第3世代システムから得られる信号強度は、第2世代システムより、およそ1.12 (0.9/0.8)倍程度大きいと評価される。この違いは、新旧両システムのハードウェアの差異、すなわち、システムとしての総合的な感度の差異を示すものと考えられる。

以上の比較結果から、第4図に示した新旧システム間に見られる電流波高値分布の大きな違いは、単に新旧システムが採用している電流波高値推定手法やシステム感度の違いによるものだけではないと判断される。また、文献6では、標定データの中に雲放電が含まれている可能性を示している。これは、0~10kAの小電流雷に対する標定件数の増加を示唆するものであり、電流波高値分布に見られる差異の原因の1つとして理解できる。しかし、問題は、そのように大きく異なってしまう真の原因が何であるのかである。第3世代以降のシステムの波形識別基準は、第2世代システムから大きく変更はされていない。更に、送電線事故を引き起こした落雷としては推定電流波高値が小さいと評価されたデータが多くあることを考慮すると、原因は、雲放電の混入だけではないと考えられる。先述したように、第3世代以降のシステムが、主放電に先行して生じる放電パルスを落雷として評価し、実際の主放電のパルス波形を評価できていない場合があると考えなければ、差異の原因を説明することはできない。これは、大電流を伴う落雷が、波形識別基準による判定で除外されてしまうこととも深く関連していると思われる。

4. まとめ

最新LLSを広域連係させたシステムの送電線事故に対する捕捉率は、推定電流波高値の妥当性を除けば、非常に高い。また、第3世代システムの標定誤差距離は、1 km以内に約50%が入り、広域連係した第4世代では、0.64 kmと実用レベルに達している。また、第3世代以降のシステムから得られる推定電流波高値は、簡単な数値換算で、第2世代システムのデータと整合を取ることにも可能である。しかし、標定される雷放電の特性に差異が生じているため、電流波高値の分布、特に0~20kAの領域においては、第2世代システムデータとの整合は見られない。これは、電力設備の耐雷設計において、LLSから得られる電流波高値分布を活用するには、慎重でなければならないことを示している。

参考文献

- 1) T. Suda, T. Shindo, S. Yokoyama, et al, "Lightning Occurrence Data Observed with Lightning Location System Operated by Power Utilities in Japan", 26th ICLP, No.2b.3, 2002
- 2) H. Kawamura, K. Shinjo, T. Araya, "Evaluation of Lightning Outage Rate Considering Line Surge Arrester Failure", IEEJ Trans., Vol.125-B, No.7, 2005
- 3) K. L. Cummins, M. J. Murphy, E. A. Bardo, W. L. Hiscox, R. B. Pyle, A. E. Piper, "A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network", J. Geophys. Res., Vol.103, No.D8, pp9035-9044, 1998-4
- 4) K. L. Cummins, "Continental-Scale Detection of Cloud-to-Ground Lightning", IEEJ Trans., Vol.120-B, No.1, 2000
- 5) 川村, 新庄, 熊田:「新旧落雷位置標定システムの精度比較について」,平成16年度電気学会,電力・エネルギー部門大会論文集(分冊B), No.241 (2004-8)
- 6) W. Schulz, G. Diendorfer, "Performance Improvement of the German Lightning Location System during the 11 Years of Operation", 27th ICLP, No.2a6, 2004-9