

風力発電設備用雷電流計測装置における 洋上風車向け大口径ロゴウスキーコイルの開発

■ 安岡 一晟
Issei Yasuoka

■ 藤岡 博文
Hirofumi Fujioka

■ 藤野 守也
Moriya Fujino

近年、洋上風力発電の普及に伴い、発電容量の増加を背景に風力発電設備の大型化が進んでいる。その一方で、大型化により落雷によるブレード損傷や飛散などの被害が発生している。この対策として、風力発電設備に対して JIS C 1400-24:2023 に適合した落雷検出装置の設置を経済産業省が義務付けた。東光高岳の雷電流計測装置では、風車のタワー脚部にロゴウスキーコイルを設置することで落雷を検出する。風力発電設備の大型化に伴い、大口径ロゴウスキーコイルの需要が高まっている。しかし、大口径化を進めると高周波域特性の劣化が懸念される。本稿では、ロゴウスキーコイルの大口径化（25 m）を実現したので報告する。

1 はじめに

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた再生可能エネルギーの導入拡大が求められている。その中で風力発電が注目を集めている。風力発電は年々導入が進んでおり、さらに近年では、陸上風力発電より発電容量の大きい洋上風力発電の導入が加速している⁽¹⁾。洋上風力発電の普及に伴い、発電容量の増加を背景に風力発電設備の大型化が進んでおり、落雷による風車ブレードの損傷や飛散、運用への支障などの被害が増加している。落雷による被害の対策として、経済産業省は風力発電設備へ JIS C 1400-24:2023⁽²⁾ に適合した落雷検出装置の設置を義務付けた⁽³⁾。

東光高岳の雷電流計測装置は、ロゴウスキーコイルを風車のタワー脚部に一周巻き付けて雷電流を測定することにより落雷を検出する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。風力発電設備の大型化によりタワーの径も大きくなっているため、それに合わせたロゴウスキーコイルの大口径化が求められている。しかし、ロゴウスキーコイルの大口径化により、高周波域特性の劣化が懸念される。

本稿では、この課題に対応した風車のタワー脚部に設置する洋上向け大口径ロゴウスキーコイル（コイル長：25 m）の開発および JIS C 1400-24:2023 への適合を証明するために規定された JEM 1515⁽⁶⁾ 型式試験の結果を報告する。

2 雷電流計測装置の仕様

2.1 JIS 規格と落雷検出装置

雷電流計測装置は、JIS C 1400-24:2023 の附属書 JA に規定されている落雷検出装置の要求性能を満足している。雷電流計測装置の電流計測性能仕様を表 1 に示す。

表 1 雷電流計測装置の計測仕様

項目	仕様
周波数帯域	0.1 Hz～300 kHz（－3 dB）
最大計測電流	100 kA, 200 kA （計測可能電流値＝最大計測電流×1.2）
トリガレベル	最大計測電流×1%
電荷量演算範囲	0～9,999 C（分解能 1 C）
電流波高値計測精度	10 kA 以上：±10%以内 10 kA 未満：±1 kA 以内 （精度周波数範囲：1 Hz～100 kHz）
電荷量演算精度	10 C 以上：±15%以内 10 C 未満：±2 C 以内 （精度周波数範囲：1 Hz～10 kHz, 10 C 以上）
長時間雷撃電流波形	継続時間 1 s 未満 電流波高値 5 kA 程度 継続時間 1 s 以上 9,999 C 以下：－28%±15%以内
計測時間	1 s

2.2 計測原理⁽⁴⁾と周波数特性

ロゴウスキーコイルの計測原理と回路構成を図 1 に示す。ロゴウスキーコイルは、コイル内周を貫通する電流を検出し、その電流 $I(t)$ を電圧に変換して計測する。ロゴウスキーコイルで誘起される電圧 $e(t)$ は、式 (1) に示すように一次電流 $I(t)$ を微分した波形となる。これを積分し、式 (2) に示す一次電流に比例した電圧 $v(t)$ を出力する。また、低域補償回路と組み合わせることにより、低域周波数の電流も計測可能となる。

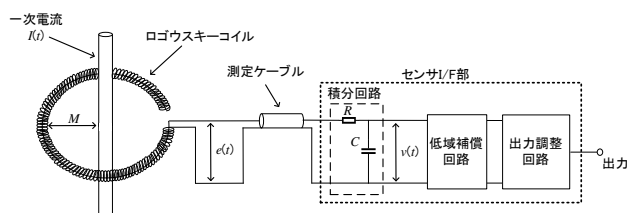


図 1 ロゴウスキーコイルの計測原理

$$e(t) = M \times \frac{dI(t)}{dt} \quad [\text{V}] \quad (1)$$

$$v(t) = \frac{M}{RC} \times I(t) \quad [\text{V}] \quad (2)$$

M : 相互インダクタンス [H]

センサ I/F 部の特性は、図 2 に示すようにロゴウスキーコイルの微分特性と相対する積分特性になるように、低域補償回路と積分回路を加算し、フラットな周波数特性を実現している。

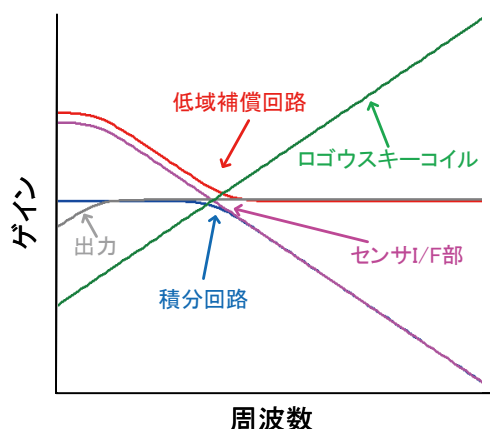


図 2 周波数特性の模式図

3 ログウスキーコイルの大口径化

3.1 大口径化の課題⁽⁷⁾

ロゴウスキーコイルを従来と同様の製作方法で大口径化した場合、式 (3) に示すようにコイル長 l に比べて、巻き数 N の 2 乗の増加による影響が大きく、自己インダクタンス L が増大する。図 3 に示す自己インダクタンス L (コイル: $L1$, コイルケーブル: $L2, L3$) と静電容量 C (コイル: $C1$, コイルケーブル: $C2$) によって共振が発生する。なお、コイルケーブル (同軸ケーブル) は 15 m 固定としている。共振周波数 f は式 (4) で決定されるため、 L の増大に伴い f は低下し、これに伴い、カットオフ周波数も低周波側に移動 (低下) するため、帯域が制限される。例えば、コイル長 25 m では、カットオフ周波数が約 290 kHz となり、仕様値の 300 kHz (−3 dB) を満足することができない。

$$L = \frac{\mu S N^2}{l} \quad [\text{H}] \quad (3)$$

μ : 透磁率 [H/m] S : 断面積 [m^2]

N : 巻き数 l : コイルの長さ [m]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

f : 共振周波数 [Hz] L : 自己インダクタンス [H]

C : 静電容量 [F]

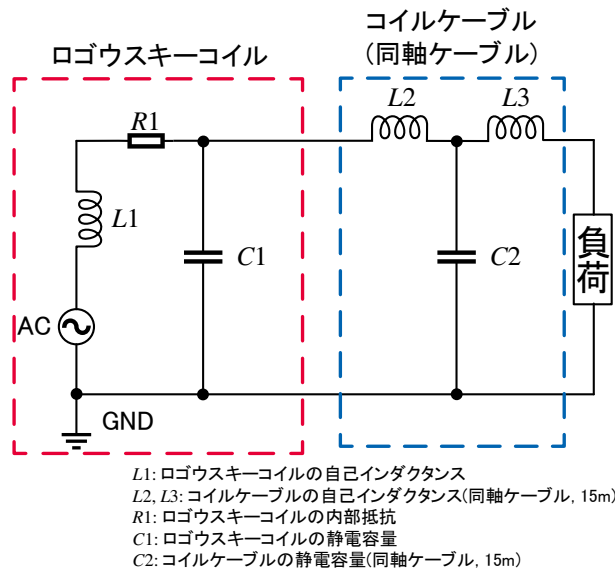


図 3 ログウスキーコイルとコイルケーブル (同軸ケーブル) の等価回路

3.2 大口径化の設計検討⁽⁷⁾

大口径のロゴウスキーコイルを従来の方法で製造した場合、共振周波数が低下する影響から仕様値を満足できない。そこで、仕様値を満足するための設計方法を検討した。まず、自己インダクタンス L の増加の影響が大きいため、巻き数を削減して自己インダクタンス L を低減させた。しかし、巻き数を減らすと式 (5) に示す相互インダクタンス M も低減してしまう。そのため、断面積を大きくすることで、相互インダクタンス M の低下を補填した。また、これらの設計変更に伴う出力電圧の変動に対しては、センサ I/F 部でのゲイン調整により装置仕様への適合を図った。設計変更したロゴウスキーコイルのシミュレーションを実施し、共振周波数が高周波側へ移り (図 4), カットオフ周波数 420 kHz と仕様値 300 kHz (−3 dB) を満足すること (図 5) を確認した。

$$M = \frac{\mu S N}{l} \quad [\text{H}] \quad (5)$$

μ : 透磁率 [H/m] S : 断面積 [m^2]

N : 巻き数 l : コイルの長さ [m]

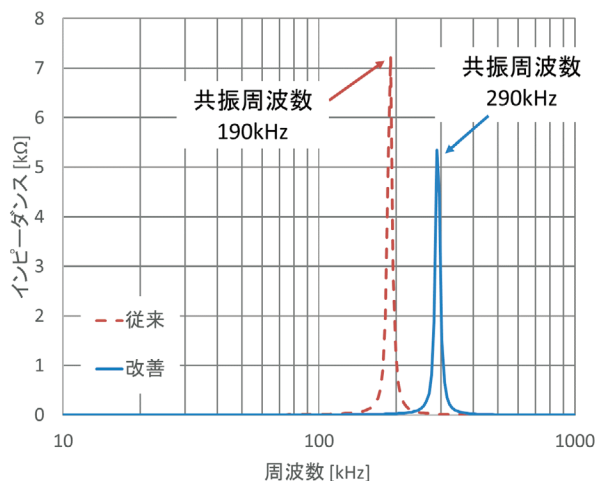


図4 ログウスキーコイルの共振周波数の比較
(シミュレーション結果)

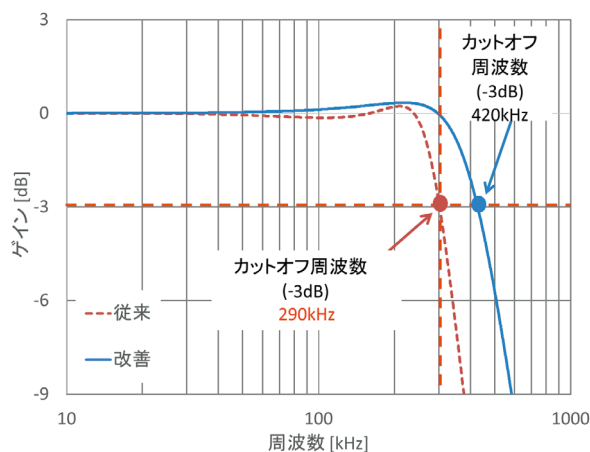


図5 ログウスキーコイルの高周波域特性
(シミュレーション結果)

4 電流計測性能試験方法

JIS C 1400-24:2023 の附属書 JA への適合を証明するためには、JEM 1515 に規定されている型式試験に合格しなければならない。以下に、型式試験の方法を述べる。

4.1 電流検出周波数帯域試験⁽⁷⁾

JEM 1515 の電流検出周波数帯域試験では、印加電流を電流センサに鎖交させたときの、センサ I/F 部の出力信号を測定し、周波数帯域を確認する。印加波形は正弦波または減衰振動波と規定されている⁽⁶⁾。

電流検出周波数帯域試験の回路構成を図6と図7に示す。本試験は、測定する周波数によって回路構成が異なる。発生電流は4 A 一定とし、印加線とログウスキーコイルを相互に複数回（印加線：10 ターン，ログウスキーコイル：5 ターン）巻き付ける。正弦波電流を印加し、印加電流波形とセンサ I/F 部の出力電圧波形を

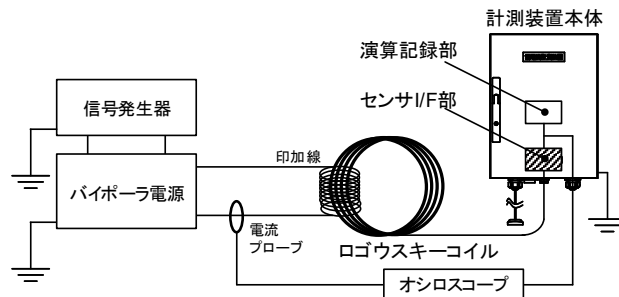


図6 電流検出周波数帯域試験回路構成
(測定周波数 20 kHz 以下)

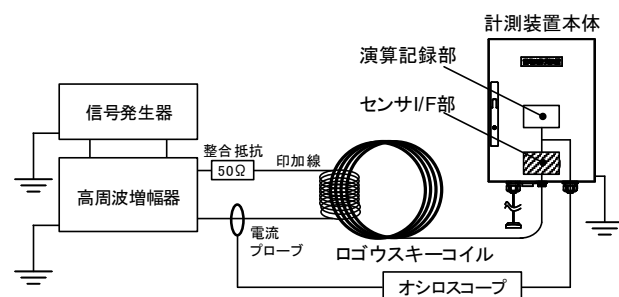


図7 電流検出周波数帯域試験回路構成
(測定周波数 20 kHz 以上)

周波数ごとに数値を読み取り、換算した電流波高値を比較した。

4.2 電流値検出試験

JEM 1515 の電流値検出試験は、10/350 μ s 電流インパルス波形を印加し、装置本体が検出した電流波高値の検出精度を確認する⁽⁶⁾。電流値検出試験の回路構成を図8に示す。印加線とログウスキーコイルを相互に複数回巻き付けることにより、等価的に電流波高値 200 kA 相当までを印加した。

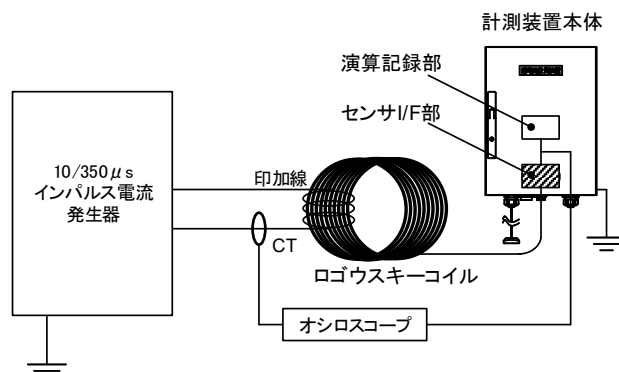


図8 電流値検出試験回路構成

4.3 電荷量値検出試験

JEM 1515 の電荷量^{注1)}値検出試験は、長時間雷撃電流波形または短時間雷撃電流波形で実施し、装置本体が検出した電荷量の検出精度を確認する⁽⁶⁾。本試験では、

矩形波電流発生装置を用いて、長時間雷撃電流波形を印加した⁽⁸⁾。電荷量値検出試験回路構成を図9に示す。印加線とロゴウスキーコイルを相互に複数回巻き付けることにより、発生電流約500 Aの継続時間を調整して、等価的な電荷量をロゴウスキーコイルに印加している。最大測定電荷量値検出試験では、計測時間1 sを超える継続時間1.1 sの矩形波を印加した。

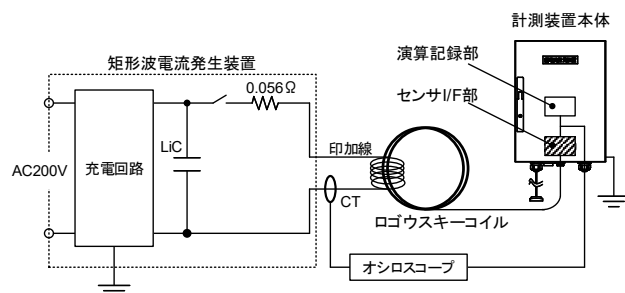


図9 電荷量値検出試験回路構成

5 電流計測性能試験結果

5.1 電流検出周波数帯域試験

電流検出周波数帯域試験は、最大計測電流100 kAおよび200 kAの装置で実施した。印加した電流波形とセンサI/F部の出力波形の例（300 kHz）を図10に示す。測定する周波数範囲で印加電流が200 Aになるように調整している。利得特性を図11および図12に示す。結果として0.1 Hz（−3 dB）および300 kHz（−3 dB）を満足していることを確認した。また、高周波域カットオフ周波数は430～440 kHz程度であることを確認した。

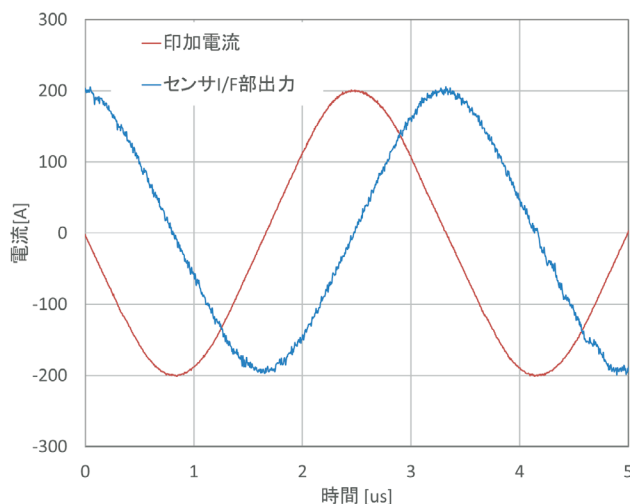


図10 印加電流波形とセンサI/F部出力波形の例

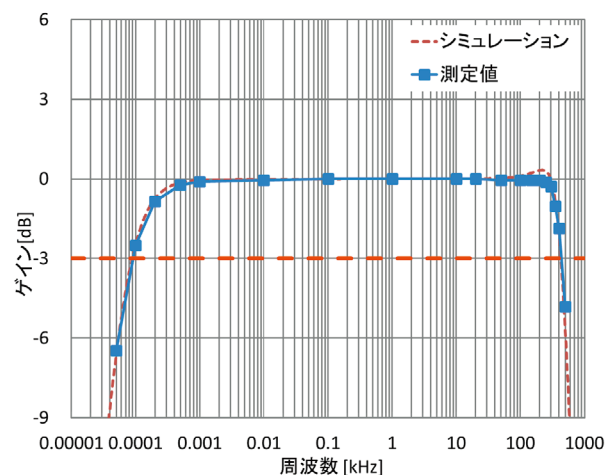


図11 電流検出周波数帯域試験の利得特性
(最大計測電流100 kA)

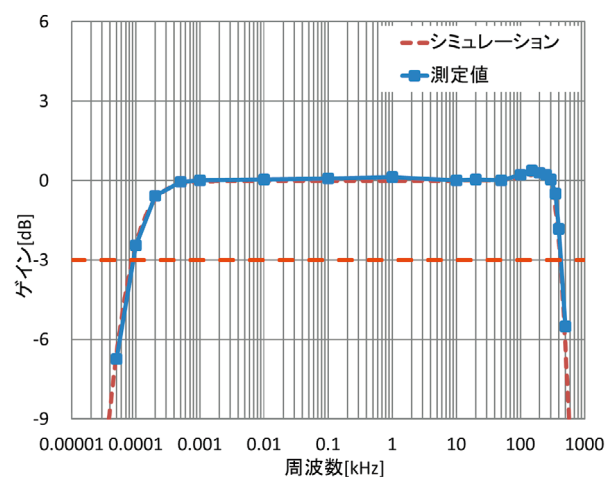


図12 電流検出周波数帯域試験の利得特性
(最大計測電流200 kA)

5.2 電流値検出試験

印加した電流波形とセンサI/F部の出力波形の例を図13に示す。電流値検出試験の結果を表2に示す。表1の計測精度（10 kA以上：±10%以内、10 kA未満：±1 kA以内）を満足していることを確認した。

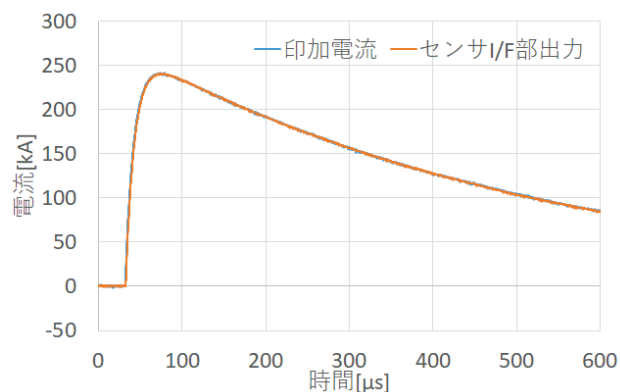


図13 印加電流波形とセンサI/F部出力波形の例

表 2 電流値検出試験結果

最大計測電流	印加電流	正極性		負極性	
		比誤差	電流差	比誤差	電流差
100 kA	1 kA	11.9%	0.13 kA	2.2%	0.02 kA
	60 kA	-2.4%	—	-1.1%	—
	100 kA	-2.4%	—	-1.4%	—
	120 kA	-2.8%	—	-1.4%	—
200 kA	2 kA	2.3%	0.05 kA	2.5%	0.05 kA
	120 kA	-0.6%	—	-0.3%	—
	200 kA	-0.1%	—	0.2%	—
	240 kA	-0.9%	—	-0.2%	—

5.3 電荷量値検出試験

継続時間 1 s 未満（電流波高値約 5 kA）の矩形波を印加した 100 C から 2,000 C までの電荷量誤差の測定結果を図 14 と図 15 に示す。表 1 の演算精度（800 C 以下：-20%～+10%，1,000 C 以下：-20%～+40%）を満足していることを確認した。

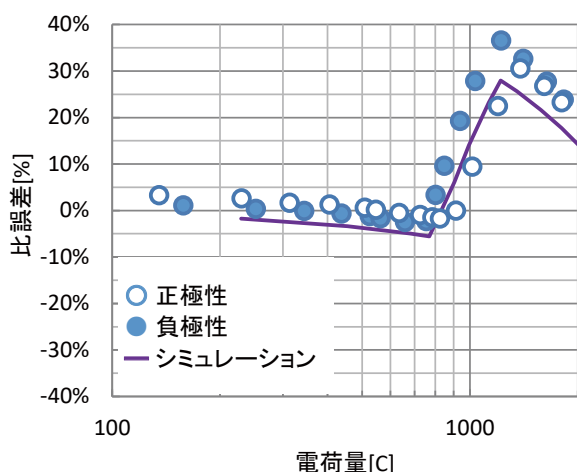


図 14 電荷量測定誤差（最大計測電流 100 kA）

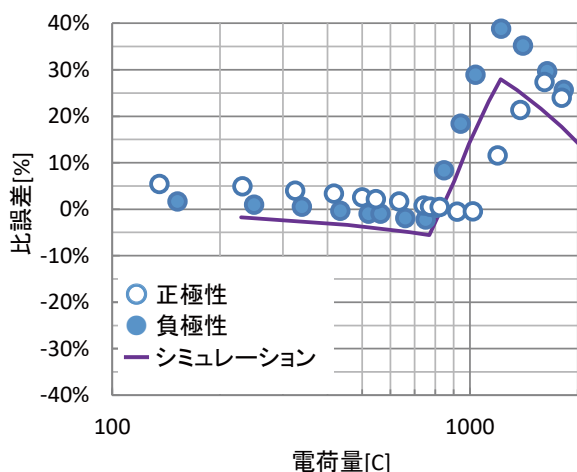


図 15 電荷量測定誤差（最大計測電流 200 kA）

印加した継続時間約 1.1 s（電流波高値約 10 kA）の矩形波（約 9,700 C，正極性）の電流波形とセンサ I/F 部の出力波形の例を図 16 に示す。この波形の電荷量誤差の測定結果は、-26.3%（負極性-27.8%）であり、表 1 の演算精度（9,999 C 以下：-28%±15%以内）を満足していることを確認した。

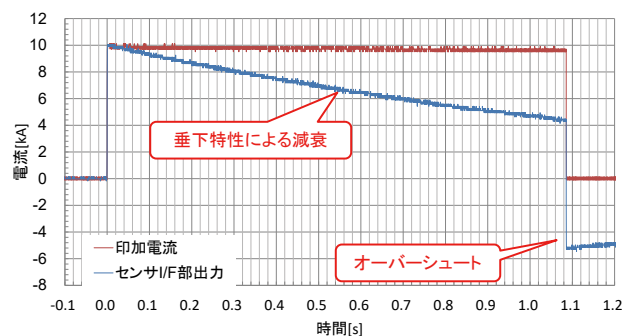


図 16 印加電流波形とセンサ I/F 部出力波形の例

周波数帯域下限（低周波域カットオフ周波数：-3 dB）に伴い直流成分を測定できないロゴウスキーコイル方式の雷電流計測装置では、図 16 に示すように、矩形波電流印加中（継続時間内）には「下垂特性による減衰^{注2)}」が発生し、印加終了後には「オーバーシュート」が発生するため、両者の影響（単独，相殺）により、電荷量の測定誤差が異なっている⁽⁶⁾⁽⁸⁾。

6 おわりに

本稿では、課題となっていた高周波域特性の劣化への対策を施した、大口径ロゴウスキーコイル（コイル長：25 m）の開発，および JIS C 1400-24:2023 に適合するための JEM 1515 に基づく型式試験の電流計測性能結果について報告した。

今後は、建設予定の 10 MW 以上の洋上風車向けに 25 m ロゴウスキーコイルの製品化を進め、洋上風力発電設備の安定運用に貢献していく予定である。

参考文献

- (1) 経済産業省：「洋上風力の産業競争強化に向けた官民協議会」
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/index.html
- (2) 日本産業標準調査会審議：「風力発電システム—第 24 部：雷保護 JIS C 1400-24:2023」，2023 年 1 月 20 日改正
- (3) 経済産業省：発電用風力設備の技術基準の解釈（令和 6 年 10 月 1 日施行），第 7 条
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/denjikokuji.html
- (4) 藤岡：「風力発電設備用雷電流計測装置の電流計測性能」，東光高岳技報 No.4 2017，p.39（2017）

https://www.tktk.co.jp/report/pdf/2017/giho2017_17.pdf

- (5) 酒井：「風力発電設備用雷電流計測装置」，東光高岳技報 No.6 2019，p.24（2019）
https://www.tktk.co.jp/report/pdf/2019/giho2019_10.pdf
- (6) 日本電機工業会規格：「JEM 1515 風車用雷電流検知形落雷検出装置の試験方法」，2024 年 12 月 20 日改正
- (7) 安岡一晟，藤野守也，藤岡博文：「風力発電設備用雷電流計測装置における大口径ロゴウスキーコイルの周波数帯域試験の最適化」，電気学会高電圧研究会，HV-25-099（2025）
- (8) 藤岡博文，安岡一晟，藤野守也，小槌淳：「矩形波電流発生装置による風力発電設備用雷電流計測装置の電荷量値検出試験結果」，電気学会高電圧研究会，HV-25-049（2025）

■ 語句説明

- 注 1) 電荷量：雷放電の継続時間全域における雷電流の時間積分値。
- 注 2) 垂下特性による減衰：直流電流成分を計測する際，電流センサの低周波特性の影響で出力波形が時間の経過とともに徐々に低下する現象。

安岡 一晟

戦略技術研究所 技術開発センター
ICT 技術グループ 所属

藤岡 博文

戦略技術研究所 技術開発センター
ICT 技術グループ 所属

藤野 守也

戦略技術研究所 技術開発センター
ICT 技術グループ 所属