(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第6309200号
(P6309200)
(45)発行日　平成30年4月11日(2018.4.11)　(24)登録日　平成30年3月23日(2018.3.23)

(51)Int.Cl.　F I
G01R 15/24 (2006.01)　G01R 15/24 E

請求項の数 5　(全 16 頁)

(21)出願番号　特願2013-64369(P2013-64369)
(22)出願日　平成25年3月26日(2013.3.26)
(65)公開番号　特開2014-190741(P2014-190741A)
(43)公開日　平成26年10月6日(2014.10.6)
審査請求日　平成27年10月28日(2015.10.28)

前置審査

(73)特許権者　000006208
三菱重工業株式会社
東京都港区港南二丁目１６番５号
(73)特許権者　591235614
昭和電子工業株式会社
神奈川県相模原市南区北里２丁目９番９号
(74)代理人　100112737
弁理士　藤田　考晴
(74)代理人　100140914
弁理士　三苫　貴織
(74)代理人　100136168
弁理士　川上　美紀
(74)代理人　100172524
弁理士　長田　大輔

最終頁に続く

(54)【発明の名称】雷電流計測装置及び雷電流計測方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
センサファイバを備え、該センサファイバに直線偏光を入力し、該センサファイバの周囲に設置された導体を流れる被計測電流により生じる磁界によって前記直線偏光に付与されるファラデー回転の大きさを検出することで、前記被計測電流を計測する雷電流計測装置であって、
前記センサファイバからの出力光を偏波面が互いに直交する水平成分と垂直成分に分離する偏光分離手段と、
前記偏光分離手段によって分離された後に光電気変換により信号に変換された前記水平成分と前記垂直成分の差分であってデジタル化された信号を、逆正弦処理することでファラデー回転角を算出する第１算出手段と、
前記偏光分離手段によって分離された後に光電気変換により信号に変換された前記水平成分と前記垂直成分とを増幅する増幅手段と、
前記増幅手段によって増幅された前記水平成分と前記垂直成分の差分であってデジタル化された信号に基づいてファラデー回転角を算出する第２算出手段と、
前記第１算出手段によって算出されたファラデー回転角から電流値を換算する第１換算手段と、
前記第２算出手段によって算出されたファラデー回転角から電流値を換算する第２換算手段と、
前記第１換算手段によって換算された電流の波形と前記第２換算手段によって換算され

た電流の波形を予め定められた閾値に基づいて結合する結合手段と
を備えた雷電流計測装置。
【請求項２】
前記被計測電流を計測しない状態におけるファラデー回転角のオフセット量に基づいて、前記偏光分離手段によって分離された前記水平成分と前記垂直成分のオフセットを調整するオフセット調整手段を備え、
前記第２算出手段は、前記オフセット調整手段によってオフセットが調整されると共に前記増幅手段によって増幅された前記水平成分と前記垂直成分の差分に基づいてファラデー回転角を算出する請求項１記載の雷電流計測装置。
【請求項３】
前記信号をアナログ信号からデジタル信号に変換する過程で、前記オフセット調整手段によってオフセットが調整されると共に前記増幅手段によって増幅された前記水平成分と前記垂直成分の信号を、前記増幅手段による増幅率で割り戻す割戻手段を備え、
前記第２算出手段は、前記割戻手段によって割り戻された前記水平成分と前記垂直成分の差分に基づいてファラデー回転角を算出する請求項２記載の雷電流計測装置。
【請求項４】
前記第１算出手段に入力される前記水平成分を示す信号及び前記垂直成分を示す信号は、第１サンプリング周波数でアナログ信号からデジタル信号に変換され、
前記第２算出手段に入力される前記水平成分を示す信号及び前記垂直成分を示す信号は、第２サンプリング周波数でアナログ信号からデジタル信号に変換され、
前記第１サンプリング周波数は、前記第２サンプリング周波数よりも速い請求項１から請求項３の何れか１項記載の雷電流計測装置。
【請求項５】
センサファイバに直線偏光を入力し、該センサファイバの周囲に設置された導体を流れる被計測電流により生じる磁界によって前記直線偏光に付与されるファラデー回転の大きさを検出することで、前記被計測電流を計測する雷電流計測方法であって、
前記センサファイバからの出力光を偏波面が互いに直交する水平成分と垂直成分に分離する第１工程と、
前記第１工程によって分離された後に光電気変換により信号に変換された前記水平成分と前記垂直成分の差分であってデジタル化された信号を、逆正弦処理することでファラデー回転角を算出すると共に、前記第１工程によって分離された後に光電気変換により信号に変換され、増幅された前記水平成分と前記垂直成分の差分であってデジタル化された信号に基づいてファラデー回転角を算出する第２工程と、
前記第２工程によって算出したファラデー回転角から電流値を換算する第３工程と、
前記第３工程によって換算された電流の波形を予め定められた閾値に基づいて結合する結合工程とを含む雷電流計測方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、雷電流計測装置及び雷電流計測方法に関するものである。
【背景技術】
【０００２】
各種機器（例えば航空機、風車、自動車等）や建築物等は、落雷を受ける場合がある。落雷を受けた場合に生じる電流（以下、「雷電流」という。）や電流分布の計測は、対雷設計上非常に重要である。
雷電流は、例えばＳＡＥ規格ＡＲＰ５４１２．ｒｅｖＡで規定されているように（図７参照）、最大ピークが１００ｋＡ以上（航空機の主翼先端では２００ｋＡ程度、主翼中央では１００ｋＡ程度）であって立ち上りから５００μｓｅｃまでのパルス波形の大電流（図７の領域Ａ）と、平均が２ｋＡであって５ｍｓｅｃ程度まで徐々に減少する電流（図７の領域Ｂ）と、平均が４００Ａであって１ｓｅｃ程度で持続する小電流（図７の領域Ｃ）

とを含む。このように、雷電流は、継続時間は短いものの高ダイナミックレンジであり時間帯域も広い電流波形であり、対雷設計のためにもその電流値を正確に計測することが求められる。

【０００３】

雷電流を計測するための一般的な手段として、変流器（Current Transformer）やロゴスキーコイルのように磁束の時間変化によるループ端での起電力を計測する手段がある。

【０００４】

しかし、上記手段では、磁束の時間変化によるループ端での起電力を計測しているため低周波成分及び直流成分を計測できない。また、ロゴスキーコイルで計測する場合、被落雷物への施工状況によっては容量結合するため、落雷による本来の信号に対して誤差が重畳することとなる。また、雷電流のような高電圧かつ高電流場での計測は、計測手段に対する絶縁処置やノイズ対策が重要となるが、容易ではない。さらに、上記計測手段では、電流を計測するためのセンサの寸法が十数ｍｍ～数十ｍｍ以上と大きく、センサの形状を大きくかえることができず、数ｍｍ程度の狭窄部の計測が困難であるため、詳細な雷電流の経路の評価が困難であった。

【０００５】

そこで、狭窄部の計測が可能な光ファイバ電流センサを用いて電流を計測する手段がある。光ファイバ電流センサは、光磁気効果を利用して電流が発生させる磁場を計測し、電流値を求めるものであり、ファイバ光の光磁気効果によるファラデー回転角の変化を評価することによって電流値を求める。

【０００６】

光ファイバ電流センサの一例として、サニャック効果と呼ばれる円形光路における光位相差の変化を求めることによって、電流の直流成分を計測するシステムが開発されている。

【０００７】

また、特許文献１には、被落雷物に設置した光磁界センサに計測光を供給し、その計測光の偏波面の回転角を光磁界センサにおいて、被落雷物に流れる雷電流の回りに発生する磁界変化に伴って変化させ、その光磁界センサから出力される計測光の回転角を光強度に置き換え、その光強度を計測することにより雷電流を計測する雷電流計測方法が開示されている。

【０００８】

さらに、特許文献２には、センサファイバからの出力光を偏波面が互いに直交する２つの偏光成分に分離する偏光分離素子と、分離された２つの偏光成分を光電気変換によりそれぞれ第１信号Ｐｘ及び第２信号Ｐｙに変換し、信号処理部によって第１信号Ｐｘの直流成分と交流成分の比Ｓｘ及び第２信号Ｐｙの直流成分と交流成分の比Ｓｙに異なる係数を乗じてその差分値を算出するファイバ電流センサが開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００９】

【特許文献１】特開平７－４３３９２号公報

【特許文献２】特開２００９－１２２０９５号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【００１０】

しかしながら、サニャック効果を用いたシステムでは、電流の直流成分しか検出できない。また、特許文献１に開示されている雷電流計測方法では、具体的な計測方法について言及されていない。さらに、特許文献２に開示されているファイバ電流センサでは、送電線等の導体に流れる電流を被計測電流としており、雷電流を計測対象とはしておらず商用電源を対象としているので、図７の領域Ｃのような雷電流に含まれる小電流である低周波成分を計測できず、かつ被計測電流は交流電流とされ、信号処理部において光源のリップ

ル等を削減するために直流成分と交流成分の比をとっているので直流成分を評価できない。

【００１１】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであって、大電流と小電流とを含む高いダイナミックレンジの直流成分の雷電流を計測できる、雷電流計測装置及び雷電流計測方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【００１２】

上記課題を解決するために、本発明の雷電流計測装置及び雷電流計測方法は以下の手段を採用する。

【００１３】

すなわち、本発明に係る雷電流計測装置は、センサファイバを備え、該センサファイバに直線偏光を入力し、該センサファイバの周囲に設置された導体を流れる被計測電流により生じる磁界によって前記直線偏光に付与されるファラデー回転の大きさを検出することで、前記被計測電流を計測する雷電流計測装置であって、前記センサファイバからの出力光を偏波面が互いに直交する水平成分と垂直成分に分離する偏光分離手段と、前記変更分離手段によって分離された後に光電気変換により信号に変換された前記水平成分と前記垂直成分の差分であってデジタル化された信号を、逆正弦処理することでファラデー回転角を算出する第１算出手段と、前記変更分離手段によって分離された後に光電気変換により信号に変換された前記水平成分と前記垂直成分とを増幅する増幅手段と、前記増幅手段によって増幅された前記水平成分と前記垂直成分の差分であってデジタル化された信号に基づいてファラデー回転角を算出する第２算出手段と、前記第１算出手段によって算出されたファラデー回転角から電流値を換算する第１換算手段と、前記第２算出手段によって算出されたファラデー回転角から電流値を換算する第２換算手段と、前記第１換算手段によって換算された電流の波形と前記第２換算手段によって換算された電流の波形を予め定められた閾値に基づいて結合する結合手段とを備える。

【００１４】

本発明によれば、雷電流計測装置は、センサファイバを備え、該センサファイバに直線偏光を入力し、該センサファイバの周囲に設置された導体を流れる被計測電流により生じる磁界によって直線偏光に付与されるファラデー回転の大きさを検出することで、被計測電流を計測する。雷電流計測装置は、センサファイバを用いることによって、被計測電流が流れる導体が太い導体、複雑な形状、狭い場所に設置されている等しても、電流を計測することができる。

【００１５】

そして、被計測電流により生じる磁界によってファラデー回転角が変化した出力光は、偏光分離手段によって、偏波面が互いに直交する水平成分と垂直成分に分離される。

水平成分と垂直成分に分離された出力光は、光電気変換により信号に変換される。

被計測電流である雷電流は、例えば１００ｋＡから１００Ａで変化し、雷電流が小さい場合はファラデー回転角が小さく、雷電流が大きい場合はファラデー回転角が大きくなる。このように、雷電流は、その変動量が大きいため、雷電流の計測装置には高ダイナミックレンジが要求される。

【００１６】

ここで、ファラデー回転角が小さい場合は、光強度の水平成分と垂直成分の差分とファラデー回転角の関係は略比例する一方、ファラデー回転角が大きい場合は、光強度の水平成分と垂直成分の差分とファラデー回転角の関係は正弦関数で表わされる。

そのため、雷電流計測装置は、第１算出手段によって光強度の水平成分と垂直成分の差分であってデジタル化された信号を逆正弦処理することでファラデー回転角を算出し、第１換算手段によってファラデー回転角から電流値を換算するので、雷電流に含まれる大電流を精度よく計測できることとなる。

【００１７】

また、雷電流計測装置は、増幅手段によって光強度の水平成分と垂直成分の信号を増幅し、第２算出手段によって増幅した光強度の水平成分と垂直成分の差分であってデジタル化された信号に基づいてファラデー回転角を算出し、第２換算手段によってファラデー回転角から電流値を換算するので、雷電流に含まれる小電流を精度よく計測できることとなる。なお、第２算出手段では、光強度の水平成分と垂直成分の差分とファラデー回転角が比例関係であるとしてファラデー回転角を算出してもよいし、正弦関数で表わされる関係であるとしてファラデー回転角を算出してもよい。

【００１８】

以上のように、雷電流計測装置は、大電流に対応した処理と小電流に対応した処理とを同時に行うため、大電流と小電流とを含む高いダイナミックレンジの直流成分の雷電流を計測できる。

また本発明によれば、第１換算手段によって換算された電流の波形と第２換算手段によって換算された電流の波形が、予め定められた閾値に基づいて結合されるので、雷電流の高周波数領域から低周波数領域に至るまでの波形が簡易に生成できる。

【００１９】

また、本発明の雷電流計測装置は、前記被計測電流を計測しない状態におけるファラデー回転角のオフセット量に基づいて、前記偏光分離手段によって分離された前記水平成分と前記垂直成分のオフセットを調整するオフセット調整手段を備え、前記第２算出手段は、前記オフセット調整手段によってオフセットが調整されると共に前記増幅手段によって増幅された前記水平成分と前記垂直成分の差分に基づいてファラデー回転角を算出してもよい。

【００２０】

本発明によれば、小電流に応じたファラデー回転角を算出する第２算出手段に入力される信号のオフセットを調整するので、ファラデー回転の温度依存や光源のリップル成分等の影響を除去でき、雷電流に含まれる小電流をより精度高く計測することができる。

【００２１】

また、本発明の雷電流計測装置は、前記信号をアナログ信号からデジタル信号に変換する過程で、前記オフセット調整手段によってオフセットが調整されると共に前記増幅手段によって増幅された前記水平成分と前記垂直成分の信号を、前記増幅手段による増幅率で割り戻す割戻手段を備え、前記第２算出手段は、前記割戻手段によって割り戻された前記水平成分と前記垂直成分の差分に基づいてファラデー回転角を算出してもよい。

【００２２】

本発明によれば、小電流に応じたアナログ信号をデジタル信号に変換する過程で、増幅した信号を増幅に用いた増幅率で割り戻すので、量子化誤差を小さくすることができる。

【００２３】

また、本発明の雷電流計測装置は、前記第１算出手段に入力される前記水平成分を示す信号及び前記垂直成分を示す信号は、第１サンプリング周波数でアナログ信号からデジタル信号に変換され、前記第２算出手段に入力される前記水平成分を示す信号及び前記垂直成分を示す信号は、第２サンプリング周波数でアナログ信号からデジタル信号に変換され、前記第１サンプリング周波数は、前記第２サンプリング周波数よりも速くてもよい。

【００２４】

雷電流は、パルス状の大電流と該大電流に比べ長い時間持続する小電流とが含まれる。すなわち、大電流は高周波数であり、小電流は大電流に比べ低周波数である。

そこで、本発明によれば、大電流に応じたファラデー回転角を算出する第１算出手段に入力される信号をデジタル信号に変換するための第１サンプリング周波数を、小電流に応じたファラデー回転角を算出する第２算出手段に入力される信号をデジタル信号に変換するための第２サンプリング周波数よりも速くする。これにより、本発明は、雷電流に含まれる大電流及び小電流に応じた、より精度の高い計測が可能となる。

【００２７】

一方、本発明に係る雷電流計測方法は、センサファイバに直線偏光を入力し、該センサ

ファイバの周囲に設置された導体を流れる被計測電流により生じる磁界によって前記直線偏光に付与されるファラデー回転の大きさを検出することで、前記被計測電流を計測する雷電流計測方法であって、前記センサファイバからの出力光を偏波面が互いに直交する水平成分と垂直成分に分離する第１工程と、前記第１工程によって分離された後に光電気変換により信号に変換された前記水平成分と前記垂直成分の差分であってデジタル化された信号を、逆正弦処理することでファラデー回転角を算出すると共に、前記第１工程によって分離された後に光電気変換により信号に変換され、増幅された前記水平成分と前記垂直成分の差分であってデジタル化された信号に基づいてファラデー回転角を算出する第２工程と、前記第２工程によって算出したファラデー回転角から電流値を換算する第３工程と、前記第３工程によって換算された電流の波形を予め定められた閾値に基づいて結合する結合工程とを含む。

【発明の効果】

【００２８】

本発明によれば、大電流と小電流とを含む高いダイナミックレンジの直流成分の雷電流を計測できる、という優れた効果を有する。

【図面の簡単な説明】

【００２９】

【図１】本発明の実施形態に係る雷電流計測装置の構成図である。

【図２】光強度の水平成分Ｐｘ及び垂直成分Ｐｙを示した図である。

【図３】光強度の水平成分Ｐｘと垂直成分Ｐｙの差分とファラーデー回転角との関係を示した図である。

【図４】本実施形態に係る小電流処理の流れを示したフローチャートである。

【図５】本実施形態に係る小電流処理による信号Ｐｘ，Ｐｙの変化を示した図である。

【図６】変形例に係る雷電流計測装置の構成図である。

【図７】雷電流の大きさを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【００３０】

以下に、本発明に係る雷電流計測装置及び雷電流計測方法の一実施形態について、図面を参照して説明する。

【００３１】

図１は、本実施形態に係る雷電流計測装置１０の構成図である。

図１に示されるように、雷電流計測装置１０は、光源１２、センサファイバ１４、光サーキュレータ１６、偏光分離素子１８、ファラデー回転子２０、信号処理部２２、及び信号解析部２４を備えている。

【００３２】

センサファイバ１４は、計測しようとしている被計測電流が流れる導体２６の周囲を周回するようにして配置される。このセンサファイバ１４として、好適にはファラデー効果の大きさを決めるベルデ定数が大きい特性を持った光ファイバである、鉛ドープされた鉛ガラスファイバを用いることができる。なお、導体２６としては、例えば航空機の主翼が用いられる。また、柔軟性のあるセンサファイバ１４を用いることによって、被計測電流が流れる導体が、太い導体、複雑な形状、狭い場所（例えば数ｍｍ以下の狭歪部）に設置されている等しても、電流を計測することができる。

センサファイバ１４の一端にはファラデー回転子２０が取り付けられ、他端には金属薄膜の蒸着等によって反射部（ミラー）２８が形成されている。ファラデー回転子２０と偏光分離素子１８、偏光分離素子１８と光サーキュレータ１６はそれぞれ光ファイバで接続され、光サーキュレータ１６は、光源１２から送光ファイバ３０を通じて供給される光がセンサファイバ１４側へ透過する向きに接続される。

【００３３】

信号処理部２２は入力部として２つの受光素子３２ｘ，３２ｙを有し、その１つの受光素子３２ｘは受光ファイバ３４ｘにより光サーキュレータ１６のセンサファイバ１４側か

らの透過光が出力される端子に接続され、もう１つの受光素子３２ｙは受光ファイバ３４ｙにより偏光分離素子１８に接続される。

【００３４】

そして、光源１２から発せられた光は、送光ファイバ３０および光サーキュレータ１６を介して偏光分離素子１８へ入射される。この光は、偏光分離素子１８によって電界の振動方向が一方向（偏光分離素子１８の主軸方向）にそろった直線偏光に変換されて、ファラデー回転子２０へ入力される。ファラデー回転子２０は、永久磁石と該永久磁石によって磁気飽和させられた強磁性体結晶である強磁性ガーネットとからなり、強磁性ガーネットを通過する光に片道２２．５度のファラデー回転を付与する。ファラデー回転子２０を出た直線偏光は、センサファイバ１４へ入力され、センサファイバ１４の周回部分において、導体２６を流れる被計測電流の周囲に生じた磁界によってファラデー回転を受け、その偏波面が磁界の大きさに比例したファラデー回転角だけ回転する。

【００３５】

センサファイバ１４を伝搬する光は、さらに反射部２８で反射されて再び周回部分を通りファラデー回転を受け、ファラデー回転子２０へ入力される。ファラデー回転子２０を再び通過することでさらに２２．５度のファラデー回転が与えられるので、このファラデー回転子２０により、往復で合計４５度のファラデー回転が与えられることになる。即ち、この雷電流計測装置１０では、光学バイアスが４５度に設定されている。ファラデー回転子２０を通過した光は、再び偏光分離素子１８へと導かれ、偏光方向の互いに直交（偏光分離素子１８の主軸方向とそれに垂直な方向）する２つの偏光成分である水平成分と垂直成分に分離される（図２参照）。

分離された水平成分の光は光サーキュレータ１６と受光ファイバ３４ｘを介して受光素子３２ｘによって受光され、光電気変換によって水平成分の光強度に比例した信号Ｐｘ（アナログ信号）に変換される。また、垂直成分の光は受光ファイバ３４ｙを介して受光素子３２ｙによって受光され、光電気変換によって垂直成分の光強度に比例した信号Ｐｙ（アナログ信号）に変換される。

【００３６】

信号処理部２２は、アナログ信号をデジタル信号に変換するＡ／Ｄ変換器３６ｘ１，３６ｙ１、及び小電流処理部３８ｘ，３８ｙを備える。

【００３７】

受光素子３２ｘから出力された信号Ｐｘは、Ａ／Ｄ変換器３６ｘ１及び小電流処理部３８ｘへ入力される。小電流処理部３８ｘは、オフセット部４０ｘ、増幅器４２ｘ、Ａ／Ｄ変換器３６ｘ２、及び割戻部４４ｘを備える。

【００３８】

Ａ／Ｄ変換器３６ｘ１は、第１サンプリング周波数で信号Ｐｘをアナログ信号からデジタル信号へ変換する。Ａ／Ｄ変換器３６ｘ１によってデジタル信号に変換された信号Ｐｘは、信号解析部２４が備えるファラデー回転角算出部４６Ａへ入力される。

小電流処理部３８ｘへ入力された信号Ｐｘは詳細を後述する小電流処理が行われると共に、Ａ／Ｄ変換器３６ｘ２によって第２サンプリング周波数でアナログ信号からデジタル信号へ変換された後、信号解析部２４が備えるファラデー回転角算出部４６Ｂへ入力される。

【００３９】

受光素子３２ｙから出力された信号Ｐｙは、Ａ／Ｄ変換器３６ｙ１及び小電流処理部３８ｙへ入力される。小電流処理部３８ｙは、オフセット部４０ｙ、増幅器４２ｙ、Ａ／Ｄ変換器３６ｙ２、及び割戻部４４ｙを備える。

【００４０】

Ａ／Ｄ変換器３６ｙ１は、第１サンプリング周波数で信号Ｐｙをアナログ信号からデジタル信号へ変換する。Ａ／Ｄ変換器３６ｙ１によってデジタル信号に変換された信号Ｐｙは、信号解析部２４が備えるファラデー回転角算出部４６Ａへ入力される。

小電流処理部３８ｙへ入力された信号Ｐｙは後述する小電流処理が行われると共に、Ａ

／Ｄ変換器３６ｙ２によって第２サンプリング周波数でアナログ信号からデジタル信号へ変換された後、信号解析部２４が備えるファラデー回転角算出部４６Ｂへ入力される。

【００４１】

ファラデー回転角算出部４６Ａは、信号Ｐｘにより示される光強度の水平成分と信号Ｐｙにより示される光強度の垂直成分の差分を、逆正弦処理することでファラデー回転角を算出する。そして、電流値換算部４８Ａは、ファラデー回転角算出部４６Ａによって算出されたファラデー回転角から電流値を換算する。

【００４２】

ファラデー回転角算出部４６Ｂは、小電流処理が行われた信号Ｐｘにより示される光強度の水平成分と小電流処理が行われた信号Ｐｙにより示される光強度の垂直成分の差分に基づいて、ファラデー回転角を算出する。そして、電流値換算部４８Ｂは、ファラデー回転角算出部４６Ｂによって算出されたファラデー回転角から電流値を換算する。

【００４３】

さらに、信号解析部２４が備える波形結合部５０は、電流値換算部４８Ａによって換算された電流の波形と電流値換算部４８Ｂによって換算された電流の波形を、予め定められた閾値に基づいて結合する。

【００４４】

次に、雷電流計測装置１０の作用について説明する。

なお、雷電流計測装置１０による計測は、例えば、実際の雷が発生すると共に生じる外部磁場を検出した場合をトリガとし、実験により雷を発生させる場合は、雷を模擬して放電させるタイミングをトリガとする。

【００４５】

ここで、被計測電流である雷電流は、例えば１００ｋＡから１００Ａで変化し、雷電流が小さい場合はファラデー回転角が小さく、雷電流が大きい場合はファラデー回転角が大きくなる。

図３に示されるように、ファラデー回転角が小さい場合は、光強度の水平成分と垂直成分の差分とファラデー回転角の関係は略比例（破線）する一方、ファラデー回転角が大きい場合は、光強度の水平成分と垂直成分の差分とファラデー回転角の関係は正弦関数（実線）で表わされる。

すなわち、雷電流に含まれる大電流を計測するには、光強度の水平成分と垂直成分の差分が逆正弦処理することによって電流値を求めることが好ましい。

【００４６】

具体的には、電界をＥとし、ファラデー回転角をθ_Fとすると、信号Ｐｘで示される水平成分の光強度は、下記（１）式で表わされ、信号Ｐｙで示される垂直成分の光強度は、下記（２）式で表わされる。光強度の水平成分と垂直成分の差分Ｓは、下記（３）式で表わされる。

【数１】

$$S_x = E^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - 2\theta_F\right) \quad \cdots \ (1)$$

【数２】

$$S_x = E^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - 2\theta_F\right) \quad \cdots \ (2)$$

【数３】

$$S = S_x - S_y = E^2 \sin^2 4\theta_F \quad \cdots (3)$$

【００４７】

ファラデー回転角θ$_F$は、（３）式に基づいて下記（４）式で表わされる。

【数４】

$$\theta_F = \frac{1}{4} Arc\sin^2\left(\frac{S}{E^2}\right) \quad \cdots (4)$$

【００４８】

そして、雷電流Ｉは、ファラデー回転角θＦを用いて（５）式で表わされる。

【数５】

$$I = \frac{I_o}{\pi/2} \cdot \theta_F \quad \cdots (5)$$

（５）式におけるI_Oは、所定のファラデー回転角における基準となる電流であり、光ファイバの性質によって特定され、例えば鉛ドープ光ファイバではファラデー回転角が４５°の場合に電流値が１００ｋＡとなる。

【００４９】

このように、雷電流計測装置１０は、（１）式から（４）式を用いてファラデー回転角算出部４６Ａによって光強度の水平成分と垂直成分の差分が逆正弦処理されることでファラデー回転角を算出し、電流値換算部４８Ａによって算出したファラデー回転角から電流値を換算するので、雷電流に含まれる大電流を精度よく計測できることとなる。

【００５０】

次に、雷電流に含まれる小電流を精度よく計測するために行われる小電流処理について図４，５を参照して説明する。

図４は、本実施形態に係る小電流処理の流れを示したフローチャートであり、小電流処理部３８ｘ，３８ｙで行われる小電流処理は各々同様である。図５は、小電流処理による信号Ｐｘ，Ｐｙの変化を示した図である。

【００５１】

小電流処理部３８ｘに信号Ｐｘが入力されると、まずステップ１００では、オフセット部４０ｘによって信号ＰｘからオフセットとなるＰｘベースライン（Ｐｘｂ）を減算することによって、信号Ｐｘのオフセットを除去する（図５（ｂ））。Ｐｘベースラインとは、図５（ａ）に示されるように、雷電流が発生する前の基準レベルである。これにより、ファラデー回転子２０の温度依存性や光源１２のリップル成分等を除去できる。

【００５２】

次のステップ１０２では、増幅器４２ｘによって、下記（６）式に示されるようにオフセット除去された信号Ｐｘを所定の増幅率Ｇａｉｎで増幅し、信号Ｆｘとする（図５（ｃ））。なお、増幅器４２ｘ，４２ｙとしては、増幅可能な帯域が広帯域（０．１Ｈｚ～数１０ＭＨｚ）の増幅器が用いられている。

【数６】

$$Fx = (Px - Pxb) \cdot Gain \quad \cdots (6)$$

【００５３】

次のステップ１０４では、Ａ／Ｄ変換器３６ｘ２によって信号Ｆｘをアナログ信号からデジタル信号へ変換する。

【００５４】

次のステップ１０６では、割戻部４４ｘによって、下記（７）式に示されるようにデジタル信号とされた信号Ｆｘを増幅率Ｇａｉｎで除算し、ＰｘベースラインＰｘｂを加算する割り戻しによって、微小変化量Ｐｘ’を算出する（図５（ｄ））。

【数７】

$$Px' = Pxb + \frac{Fx}{Gain} \qquad \cdots (7)$$

このように、小電流処理は、小電流に応じたアナログ信号をデジタル信号に変換する過程で、小電流に応じたアナログ信号を増幅し、デジタル信号に変換した後に、増幅に用いた増幅率で割り戻すので、量子化誤差を小さくすることができる。

【００５５】

次のステップ１０８では、割戻部４４ｘによって、下記（８）式に示されるように算出した微小変化量Ｐｘ’をＰｘベースラインＰｘｂで除算することによって規格化（図５（ｅ））し、規格化した後の信号Ｐｘをファラデー回転角算出部４６Ｂへ出力し、小電流処理を終了する。

【数８】

$$Px = \frac{Px'}{Pxb} \qquad \cdots (8)$$

【００５６】

（８）式に示されるような規格化を行うことによって、雷電流が生じていない初期状態を“１”として、ファラデー回転角がどの程度変化しているのかを明確にすることができる。

【００５７】

なお、信号Ｐｙに対する小電流処理は、信号Ｐｘに対する小電流処理と同様であり、オフセット部４０ｙによって信号Ｐｙからオフセット量となるＰｙベースライン（Ｐｙｂ）を減算した後に、増幅部４２ｙによって所定の増幅率で増幅させる。そして、信号Ｐｙに対する小電流処理は、Ａ／Ｄ変換器３６ｙ２によってＡ／Ｄ変換を行った後に、割戻部４４ｙによって微小変化量Ｐｙ’を算出すると共に微小変化量Ｐｙ’をＰｘベースラインＰｘｂで除算することによって規格化した信号Ｐｙをファラデー回転角算出部４６Ｂへ出力する。

【００５８】

以上のような小電流処理が信号Ｐｘ，Ｐｙに行われることによって、ファラデー回転角の変位量が小さい小電流のファラデー回転角も精度よく計測できるようになる。

【００５９】

そして、雷電流計測装置１０は、ファラデー回転角算出部４６Ｂによって、小電流処理が行われた光強度の水平成分と垂直成分の差分に基づいてファラデー回転角を算出し、電流値換算部４８Ｂによってファラデー回転角から電流値を換算するので、雷電流に含まれる小電流を精度よく計測できることとなる。

【００６０】

なお、ファラデー回転角算出部４６Ｂでは、光強度の水平成分と垂直成分の差分とファラデー回転角が比例関係であるとしてファラデー回転角を算出してもよいし、正弦関数で表わされる関係であるとしてファラデー回転角を算出してもよい。

比例関係であるとしてファラデー回転角を算出する場合は、光強度の水平成分と垂直成

分の差分に所定の係数を乗算することによってファラデー回転角を算出する。一方、正弦関数で表わされる関係であるとしてファラデー回転角を算出する場合は、（１）式から（４）式を用いてファラデー回転角を算出する。

【００６１】

また、雷電流は、上述したように、パルス状の大電流と該大電流に比べ長い時間持続する小電流とが含まれる。すなわち、大電流は高周波数であり、小電流は低周波数である。

【００６２】

そこで、雷電流計測装置１０は、大電流に対応することとなるファラデー回転角算出部４６Ａに入力される信号をデジタル化するための第１サンプリング周波数を、小電流に対応することとなるファラデー回転角算出部４６Ｂに入力される信号をデジタル化するための第２サンプリング周波数よりも速くする。すなわち、Ａ／Ｄ変換器３６ｘ１，ｙ１の第１サンプリング周波数が、Ａ／Ｄ変換器３６ｘ２，ｙ２の第２サンプリング周波数よりも速く、高周波数の大電流を計測するための要求時間分解能を満たすものとされる。

これにより、雷電流計測装置１０は、雷電流に含まれる大電流及び小電流に応じた、より精度の高い計測が可能となる。

【００６３】

また、波形結合部５０によって、電流値換算部４８Ａで換算された電流の波形と電流値換算部４８Ｂで換算された電流の波形が、予め定められた閾値に基づいて結合される。

電流値換算部４８Ａで換算された電流の波形は、雷電流に含まれる大電流に応じた処理によって得られた波形であるため、電流値換算部４８Ａで換算された電流の波形のうち、小電流に対応する波形の精度は大電流に対応する波形の精度に比べて高くない。一方、電流値換算部４８Ｂで換算された電流の波形は、雷電流に含まれる小電流に応じた処理によって得られた波形であるため、電流値換算部４８Ｂで換算された電流の波形のうち、大電流に対応する波形の精度は小電流に対応する波形の精度に比べて高くない。

【００６４】

そのため、電流値換算部４８Ａによって換算された電流の波形と電流値換算部４８Ｂによって換算された電流の波形が、予め定められた閾値に基づいて結合されることによって、雷電流の高周波数領域から低周波数領域に至るまでの波形が簡易に生成できる。

なお、予め定められた閾値は、例えば電流値や時間によって定められ、大電流と小電流との間の電流値（例えば１ｋＡ）や、大電流と小電流との間の時間（例えば５ｍｓｅｃ）等である。

【００６５】

以上説明したように、本実施形態に係る雷電流計測装置１０は、センサファイバ１４からの出力光を偏波面が互いに直交する水平成分と垂直成分に分離する偏光分離素子１８と、偏光分離素子１８によって分離された後に光電気変換により信号に変換された水平成分と垂直成分の差分であってデジタル化された信号を、逆正弦処理することでファラデー回転角を算出するファラデー回転角算出部４６Ａと、偏光分離素子１８によって分離された後に光電気変換により信号に変換された水平成分と垂直成分とを増幅する増幅器４２ｘ，４２ｙと、増幅器４２ｘ，４２ｙによって増幅された水平成分と垂直成分の差分であってデジタル化された信号に基づいてファラデー回転角を算出するファラデー回転角算出部４６Ｂと、ファラデー回転角算出部４６Ａによって算出されたファラデー回転角から電流値を換算する電流値換算部４８Ａと、ファラデー回転角算出部４６Ｂによって算出されたファラデー回転角から電流値を換算する電流値換算部４８Ｂと、を備える。

【００６６】

従って、雷電流計測装置１０は、大電流に対応した処理と小電流に対応した処理とを同時に行うため、大電流と小電流とを含む高いダイナミックレンジの直流成分の雷電流を計測できる。

【００６７】

下記表１に、既存の電流計測装置と本実施形態に係る雷電流計測装置１０との比較を示す。

【表１】

電流計測装置	雷電流計測				
	高速 立ち上り (1μsec) 大電流 (100kA)	直流継続 (1sec) 小電流 (400A)	狭い場所 ・ 太い導体 の計測	電磁雑音	電気絶縁
ロゴスキーコイル	○	×	×	×	×
変流器	○	×	×	×	×
既存光ファイバ 電流センサ(1) (鉛ガラスファイバ センサ、光強度検出、 交流用、アナログ処理)	△	△	○	○	○
既存光ファイバ 電流センサ(2) (石英ガラスファイバ センサ、サニャック 干渉計、直流＋交流用、 デジタル処理)	×	○	×	○	○
本実施形態に係る 雷電流計測装置	○	○	○	○	○

【００６８】
表１に示されるように、既存の各電流計測装置では、雷電流の計測を目的とした場合、各々不適な項目があるが、本実施形態に係る雷電流計測装置１０では、各項目を満たし、雷電流の計測に適している。
【００６９】
〔変形例〕
図６に雷電流計測装置１０の変形例を示す。
図６に示されるように雷電流計測装置１０は、受光素子３２ｘ，３２ｙの下流側にＡ／Ｄ変換器３６ｘ，３６ｙを備える。これによって、雷電流計測装置１０の構成がより簡素化される。
【００７０】
また、雷電流計測装置１０は、ファラデー回転角算出部４６Ａへ入力される信号Ｐｘ，Ｐｙ、すなわち大電流に対応した信号に対しても、小電流処理部３８ｘ，３８ｙで行うオフセット除去と同様の処理が行われてもよい。
【００７１】
以上、本発明を、上記実施形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施形態に記載の範囲には限定されない。発明の要旨を逸脱しない範囲で上記実施形態に多様な変更または改良を加えることができ、該変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれる。
【００７２】
例えば、上記実施形態では、導体２６を航空機とする形態について説明したが、本発明

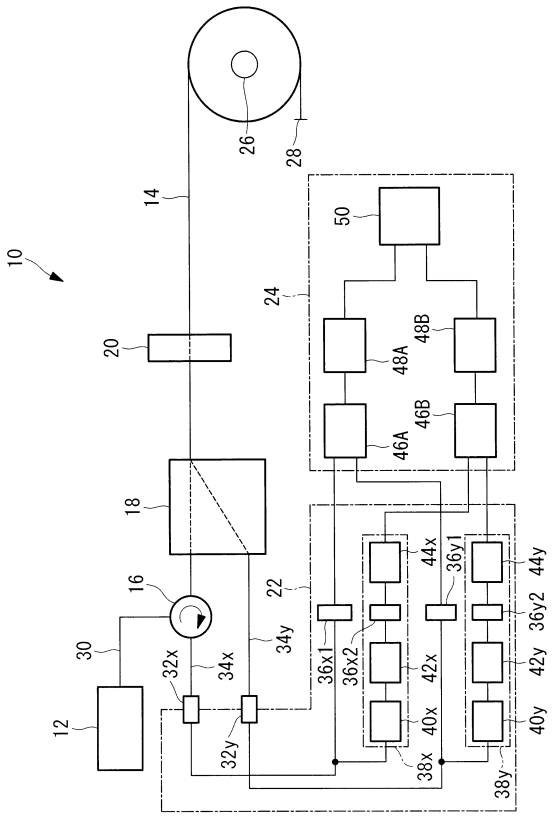
は、これに限定されるものではなく、導体２６として自動車、風力発電装置、電線、及びビル等とする形態としてもよい。

【符号の説明】

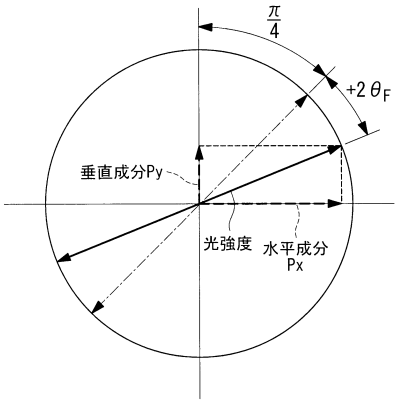
【００７３】

１０　雷電流計測装置
１４　センサファイバ
１８　偏光分離素子
２６　導体
３６ｘ１　Ａ／Ｄ変換器
３６ｘ２　Ａ／Ｄ変換器
３６ｙ１　Ａ／Ｄ変換器
３６ｙ２　Ａ／Ｄ変換器
４０ｘ　オフセット部
４０ｙ　オフセット部
４２ｘ　増幅器
４２ｙ　増幅器
４６Ａ　ファラデー回転角算出部
４６Ｂ　ファラデー回転角算出部
４８Ａ　電流値換算部
４８Ｂ　電流値換算部

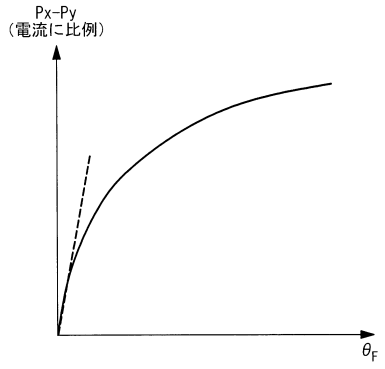
【図１】



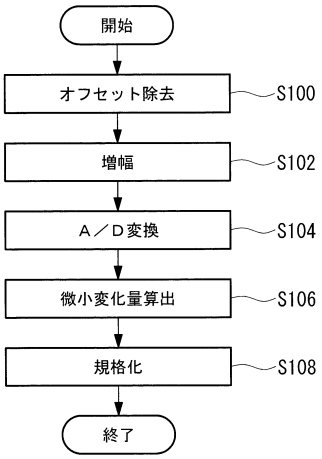
【図２】



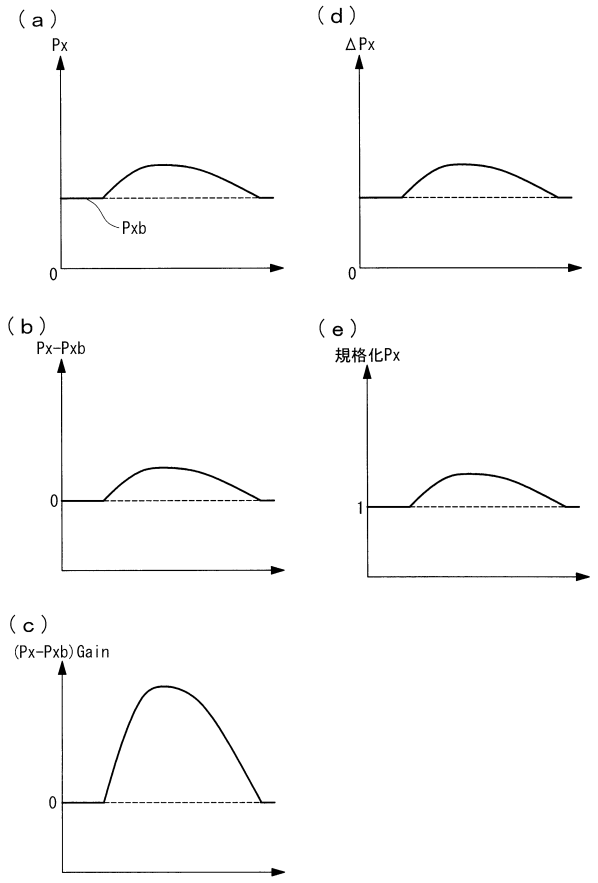
【図３】


Px-Py
（電流に比例）
θ_F

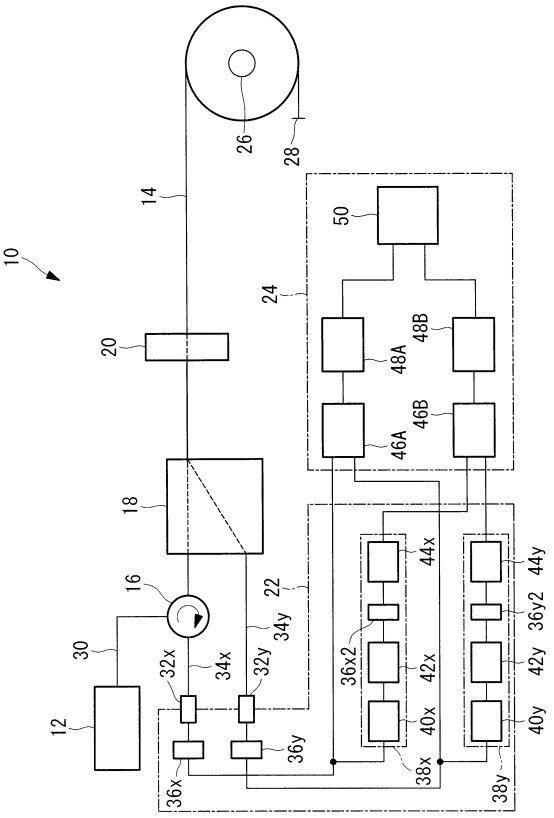
【図４】


開始
オフセット除去
S100
増幅
S102
Ａ／Ｄ変換
S104
微小変化量算出
S106
規格化
S108
終了

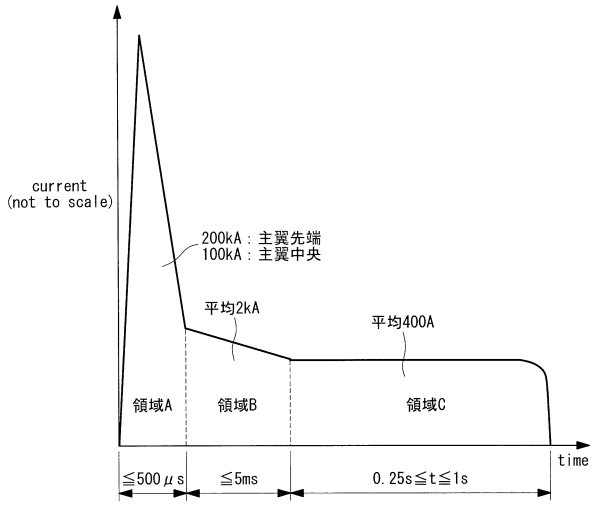
【図５】


（ａ）
Px
Pxb
0
（ｂ）
Px-Pxb
0
（ｃ）
(Px-Pxb)Gain
0
（ｄ）
ΔPx
0
（ｅ）
規格化Px
1

【図６】


10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32x
32y
34x
34y
36x
36y
36x2
38x
38y
40x
40y
42x
42y
44x
44y
46A
46B
48A
48B
50

【図７】


current
(not to scale)
200kA：主翼先端
100kA：主翼中央
平均2kA
平均400A
領域A
領域B
領域C
time
≦500μs
≦5ms
0.25s≦t≦1s

フロントページの続き

(72)発明者　青井　辰史
東京都港区港南二丁目１６番５号　三菱重工業株式会社内
(72)発明者　津村　陽一郎
東京都港区港南二丁目１６番５号　三菱重工業株式会社内
(72)発明者　黒澤　潔
東京都千代田区内幸町１丁目１番３号　東京電力株式会社内
(72)発明者　菊地原　豊
神奈川県相模原市南区北里２丁目９番９号　昭和電子工業株式会社内

審査官　續山　浩二

(56)参考文献　特開２０１１－２１４９５９（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－１９８７５６（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－２７０５０５（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－２６２０６５（ＪＰ，Ａ）
特開２０１１－１４１２４６（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－２２７８１４（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－０７８３４４（ＪＰ，Ａ）
特開昭６２－１６１０５９（ＪＰ，Ａ）
特開２０１１－２１４９５８（ＪＰ，Ａ）
特開２０１１－０１７６７６（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－１１６０５２（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－１４５８９９（ＪＰ，Ａ）
特開２００４－０６９７１０（ＪＰ，Ａ）
特開２００３－０１４７９０（ＪＰ，Ａ）
特表２００４－５０３７５１（ＪＰ，Ａ）
特表平０８－５０４９５１（ＪＰ，Ａ）
米国特許第０６３９２５８３（ＵＳ，Ｂ１）
米国特許第０４７０７１４７（ＵＳ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ０１Ｒ　１５／２４